

О. Г. Попова, В. В. Остапчук, І. М. Тараненко

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ КОМПОЗИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»

О. Г. Попова, В. В. Остапчук, І. М. Тараненко

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ КОМПОЗИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2026

УДК 629.7.02:620.22-419(075.8)
П58

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. В. В. Драгобецький,
д-р техн. наук, доц. С. Ю. Плєснецов

Попова, О. Г.

П58 Контроль якості композитних конструкцій [Електронний ресурс] :
навч. посіб. / О. Г. Попова, В. В. Остапчук, І. М. Тараненко. – Харків :
Нац. аерокосм. ун-т «Харків. авіац. ін-т», 2026. – 125 с.

ISBN 978-966-996-106-8

Розглянуто методи контролю якості композитних конструкцій, фізичні принципи їх роботи, переваги й недоліки. Описано обладнання для оцінювання якості конструкцій з композитів, що допоможе здобувачам освіти під час курсового й дипломного проектування, а також у подальшій роботі з композитними конструкціями обґрунтувати вибір того чи іншого методу контролю для оцінювання якості композитної конструкції та обладнання для його реалізації.

Для здобувачів освіти технічних спеціальностей.

Іл. 78. Табл. 8. Бібліогр.: 3 назви

УДК 629.7.02:620.22-419(075.8)

© Попова О. Г., Остапчук В. В., Тараненко І. М., 2026
© Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», 2026

ISBN 978-966-996-106-8

1. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ Й ВИМОГИ ДО НИХ

Забезпечення високої якості й надійності виробів із полімерних композиційних матеріалів є неможливим без застосування ефективних сучасних методів контролю на всіх стадіях виробничого циклу: від виготовлення до експлуатації. При цьому кожній стадії відповідають певні методи контролю.

Методи контролю якості можуть бути *руйнівними, неруйнівними, аналітичними та метрологічними (перевірними)*.

Перевага *руйнівних* методів контролю полягає в можливості визначення кількісних характеристик контрольованого параметра матеріалів і виробів шляхом прямих вимірювань. Наприклад, такий важливий параметр виробу, як міцність, найбільш об'єктивно визначається шляхом його руйнування з дотриманням режимів навантаження. Крім того, руйнівні методи дають змогу визначити ресурс виробу до руйнування при заданих навантаженнях, безпосередньо визначити надійність виробу, вузла, деталі, а також імітувати умови, близькі до експлуатаційних. До руйнівних методів контролю належать випробування на розтяг, стиск, удар, жароміцність; випробування при термічних та електричних навантаженнях; визначення твердості; метрологічні методи контролю.

Руйнівні методи контролю мають такі недоліки: призводять до руйнування виробу або значного погіршення його показників якості; не забезпечують безперервності вимірювань при технологічному процесі виготовлення виробів і при експлуатації, не гарантують експлуатаційної надійності відповідальних деталей, як і в екстремальних умовах, оскільки контроль є вибіркоким. Багато методів руйнівного контролю є трудомісткими й потребують великих витрат часу висококваліфікованого персоналу.

Метрологічний контроль призначено в основному для перевірки методів контролю й визначення точності й чутливості застосовуваних методів та апаратури.

Аналітичні методи належать до категорії неруйнівних методів контролю й потребують застосування складних аналітичних моделей, числових методів і програмних продуктів, що їх реалізують. Точність методів аналітичного контролю залежить від правильності побудови математичної моделі, що описує реальну конструкцію під час експлуатації або виготовлення.

Неруйнівні методи контролю дедалі ширше застосовуються як на стадії виготовлення, так і на стадії експлуатації виробів композиційних матеріалів. Ці методи не мають недоліків, властивих руйнівним методам контролю. Контроль виробів проводиться без порушення їх режиму функціонування. Можна проводити багаторазовий контроль одного й того самого виробу практично через будь-який проміжок часу; автоматизувати процес контролю з наявністю засобів, що мають зворотний зв'язок із технологічним процесом; стежити за роботоздатністю відповідальних виробів, запобігаючи їх руйнуванню; мати можливість виявляти внутрішні дефекти, визначати їх координати та оцінювати розміри. Крім того, застосування методів неруйнівного

контролю дає змогу поліпшувати технології виготовлення виробів шляхом своєчасного виявлення неполадок у технологічному обладнанні або помилок під час розроблення технології виготовлення. Ці методи мають високу точність, достовірність отриманих результатів, чутливість і роздільну здатність.

У дрібносерійному й середньосерійному виробництві неруйнівні методи контролю застосовуються для суцільного контролю якості виробів. У великосерійному виробництві ефективнішими є статистичні методи вибіркового контролю. Методи контролю якості поділяються за *кількісними, якісними або альтернативними* ознаками. *Кількісні* методи дають змогу реєструвати точні числові значення параметрів, що визначають якість виробу. *Якісні* методи дають змогу зазначити лише категорії, класи (сортність тощо), до яких належить контрольований виріб. У тому випадку, коли вироби поділяються на придатні та дефектні, контроль називають *контролем за альтернативною ознакою*. Цей вид контролю є окремим випадком контролю за якісною ознакою.

Проте неруйнівні методи контролю є непрямими, тобто неможливо безпосередньо визначити такі параметри, як міцність, живучість та ін. Для визначення цих параметрів необхідним є тарування за допомогою руйнівних та аналітичних методів, яке проводиться за спеціальними еталонами. Методи неруйнівного контролю не встановлюють впливу різних дефектів на надійність і довговічність виробів, тобто деякі методи є контактними, а це створює труднощі під час автоматизованого контролю; результати контролю, що здійснюється деякими методами, є складними у розшифруванні, а обладнання, наприклад, прилади акустико-емісійного методу, має високу вартість. Порівняльний аналіз методів руйнівного та неруйнівного контролю дає змогу зробити висновок: універсальних методів немає, і кожен конкретний виріб контролюють тим методом, який у цьому випадку забезпечує виявлення у виробі неприпустимих дефектів.

2. ВИБІР ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ

Вибір того чи іншого методу контролю якості та прогнозування надійності визначається такими факторами:

- 1) фізичним станом контрольованого середовища (діелектрик, напівпровідник, провідник, магнітний чи немагнітний матеріал);
- 2) видом структури контрольованого середовища (аморфна, монокристалічна, полікристалічна, анізотропна);
- 3) здатністю взаємодіяти з випромінюванням, що проходить (слабке або сильне поглинання, розсіювання тощо);
- 4) параметрами середовища контролю (у вакуумі, рідині, при високій температурі, під великим тиском та ін.);
- 5) розмірами, конфігурацією та конструктивними особливостями

об'єкта контролю;

б) видом розв'язуваної задачі (дефектоскопія, товщинометрія, структурометрія, вологометрія, контроль густини та в'язкості, контроль кінетики затвердіння, контроль напружено-деформованого стану, контроль умісту компонентів).

3. ОСОБЛИВОСТІ БУДОВИ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Композитні матеріали характеризуються такими чотирма ознаками:

- об'ємне сполучення двох або більше матеріалів;
- наявність чіткої межі фаз;
- надійне (гарантоване) сполучення фаз по всій поверхні контакту;
- одержання нових властивостей композитного матеріалу порівняно із властивостями матеріалів, з яких він складається.

Основними компонентами КМ є *матричні* й *армувальні матеріали*. Матричні матеріали виконують функції сполучної речовини: з'єднують між собою окремі армувальні матеріали, перерозподіляють зусилля між ними й фіксують форму виробу. Армувальні матеріали надають КМ необхідних механічних властивостей.

Армувальні матеріали повинні мати високі міцність і жорсткість, малу густину, стабільність властивостей у широкому температурному інтервалі, бути, якщо можливо, хімічно стійкими й сумісними з матричними матеріалами.

Армувальні матеріали можуть використовуватися у вигляді:

- безперервних волокон (кручені й некручені нитки, джгути, ровінги, ровниця та ін.);
- коротких волокон, штапельних ниток тощо;
- тканин різного переплетення (полотняного, ситцевого, сатинового, саржевого, трикотажного та ін.), стрічок тощо;
- нетканих матеріалів типу матів.

Компоненти КМ мають відповідати таким умовам сумісності:

- хороша взаємна адгезія;
- взаємна нерозчинність у всьому інтервалі температур (під час виробництва й експлуатації);
- відсутність хімічної взаємодії у всьому інтервалі температур;
- однаковість коефіцієнтів термічного розширення;
- жорсткість матричного матеріалу має бути нижчою за жорсткість армувальних матеріалів.

Переваги композиційних матеріалів:

1. Високі показники щодо конструктивної міцності (питома міцність і жорсткість, зносостійкість, корозійна стійкість, в'язкість руйнування, енергія поглинання при поширенні тріщини, питома ударна в'язкість, надійність і живучість при знакозмінних навантаженнях).

2. Радіопрозорість деяких КМ.

3. Стійкість до агресивних середовищ.

4. Немагнітність і високі діелектричні властивості деяких КМ.

5. Раціональний розподіл матеріалу в конструкції деталей, вузлів та агрегатів, можливість створення рівномірних в усіх перерізах деталей, оскільки остаточно властивості матеріалу формуються в процесі виробництва елементів конструкції.

6. Можливість виробництва великогабаритних елементів конструкцій, унаслідок чого зменшується кількість механічних з'єднань, а отже, і маси вузлів та агрегатів.

Недоліки композиційних матеріалів:

1. Низькі фізико-механічні властивості в неголовних напрямках, особливо міжшарова міцність.

2. Низькі твердість і контактна міцність.

3. Схильність до старіння (змінення властивостей у процесі експлуатації, зазвичай у бік погіршення).

4. При тривалому впливі значних навантажень спостерігається повзучість і плинність матеріалу.

5. Труднощі перероблення й утилізації відходів деталей, що вийшли з ладу, вузлів та агрегатів із КМ.

Композиційні матеріали можна класифікувати за такими ознаками: за матеріалом компонентів, за типом арматури та її орієнтацією, за способом одержання композицій і виробів з них, за призначенням (рис. 3.1).

Залежно від матеріалу матриці (матеріалознавчий принцип) КМ поділяють на такі групи:

1) композиції з металевою матрицею – металеві композиційні матеріали (МКМ);

2) композиції з полімерною матрицею – полімерні композиційні матеріали (ПКМ);

3) композиції з керамічною матрицею – керамічні композиційні матеріали (ККМ);

4) композиції з вуглецевою матрицею – вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (ВВКМ).

Полімерні КМ зазвичай розрізняють за видом армувальних волокон. Наприклад, ПКМ, армовані скляними волокнами, називають склопластиками, металевими – металопластиками, органічними – органопластиками, борними – боропластиками, вуглецевими – вуглепластиками, азбестовими – азбопластиками і т. д.

Що стосується МКМ, то поки ще немає чітко визначених правил щодо їх найменування. Найчастіше на початку назви пишуть матричний матеріал, потім армувальний матеріал, наприклад: мідь-вольфрам.

За орієнтацією і типом арматури (конструкційний принцип) усі КМ можна поділити на три групи: ізотропні, ортотропні й анізотропні.

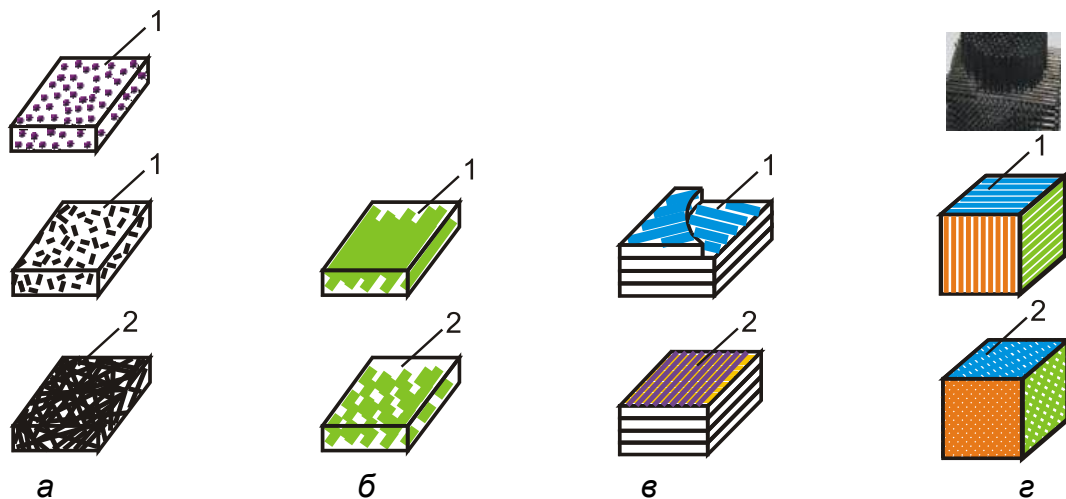


Рис. 3.1. Класифікація композитів:

а – хаотично армовані (1 – короткі волокна або дрібні частинки, 2 – безперервні волокна); б – односпрямовані або одновимірно армовані (1D) (1 – безперервні волокна, 2 – короткі волокна); в – двовимірно армовані, або шаруваті (2D) (1 – безперервні нитки, 2 – тканини); г – просторово армовані (1 – три сім'ї ниток (3D), 2 – n сімей ниток (nD))

Ізотропними називають матеріали, що мають однакові властивості в усіх напрямках (дисперсно-зміцнені й хаотично армовані матеріали). Зміцнення здійснюється відрізками волокон або ниткоподібними кристалами (вуглець). При цьому КМ виходять квазіізотропними, тобто анізотропними в мікрооб'ємах, але ізотропними в об'ємі всього виробу. Такі КМ із геометричної точки зору відносять до КМ із нуль-вимірним армувальним компонентом (усі розміри армувального компонента набагато менші від розмірів елементарного об'єму КМ).

Ортотропними називають матеріали, що мають три площини симетрії, відносно яких властивості КМ є практично однаковими.

Анізотропними називають матеріали, властивості яких залежать від напрямку.

Армувальні матеріали можуть бути односпрямованими, сітчастими, шаруватими, тривимірними або сітчастими з поперечним прошиванням, тому з геометричної точки зору КМ можна поділити на дві групи:

– *КМ із одновимірним армувальним компонентом*, один розмір якого є порівнянним з розмірами елементарного об'єму КМ (КМ, армовані волокнами);

– *КМ із двовимірним армувальним компонентом*, два розміри якого є порівнянними з розмірами елементарного об'єму КМ (шаруваті КМ, КМ, армовані тканинами і фольгою).

Якщо КМ містить декілька армувальних компонентів, різних за розмірами або природою, то їх називають поліармованими.

За способом одержання (технологічний принцип) полімерні КМ можна поділити на ливарні, пресовані й намотувальні. Металеві КМ за цим

способом поділяють на ливарні й деформівні (спікання, гаряче пресування, дифузійне зварювання, плазмове напилювання на волокна або дроти матричного матеріалу з подальшим пресуванням або спіканням тощо).

За призначенням (експлуатаційний принцип) КМ можна класифікувати так:

- загальноконструкційного призначення (несні конструкції літаків, ракет, авіадвигунів, суден тощо);
- жароміцні (для лопаток турбін, камер згоряння та інших виробів);
- термостійкі (для виробів, що експлуатуються в умовах різких теплозмін);
- фрикційні й антифрикційні;
- удароміцні (броне літаків, танків);
- теплозахисні;
- зі спеціальними властивостями (електричними, магнітними, оптичними тощо).

3.1. Хаотично армовані композити

Експлуатаційні, механічні й технологічні властивості хаотично армованих матеріалів (див. рис. 3.1, а) повністю визначаються й керуються такими структурними параметрами:

- а) матеріал матриці (сполучного) і наповнювача (арматури);
- б) розміри армувальних елементів, у тому числі поділ за розмірами, фракціями;
- в) об'ємний або масовий уміст компонентів (для розрахунків зручно використовувати об'ємний уміст, а для технологічної реалізації – масовий; знаючи густину матеріалів, ці два показники можна просто перерахувати один через одного – або об'ємний уміст через масовий, або навпаки);
- г) дефекти й нерегулярності:
 - ступінь чистоти матеріалів компонентів композиту (або їх забруднення, наявність домішок);
 - нерівномірність розподілу наповнювача (арматури) по об'єму композиту;
 - відмінність фракційного складу (за розмірами) від передбаченого в паспорті на матеріал;
 - відхилення об'ємного вмісту армувального матеріалу від передбаченого в нормативному документі, наприклад у стандарті, технічних умовах, паспорті тощо;
 - пористість, властива всім типам матриць на цей час, що пов'язано з технологією формування композитів і деталей з них;
 - внутрішні дефекти й нерегулярності матеріалів матриці й арматури, які зазвичай на етапі вивчення властивостей композитів ураховуються через відповідні характеристики матеріалу, наприклад: дефекти кристалічної структури вуглецевого волокна вже позначилися на границі міцності волокна, що використовується для прогнозування міцності вуглепластику.

3.2. Односпрямовані композити (1D)

Переважає більшість конструкційних композитів армується волокнами, тому односпрямовані композитні матеріали можуть розглядатися і як матеріали, що мають самостійне значення й застосування, і як типові елементи (елементарні цеглинки) усіх волокнистих матеріалів. Завжди з будь-якого об'єму (див. рис. 3.1) можна виокремити елементарний об'єм у вигляді односпрямованого композиту, щось на зразок елементарної комірки для металів. У цей час практично всі розрахунки конструкцій з композитів базуються на моделі односпрямованого матеріалу.

Фундаментальними структурними параметрами односпрямованих композитів є:

- а) матеріал волокна та сполучного (матриці);
- б) об'ємний уміст волокон (рис. 3.2):

$$\theta = \frac{f_v}{ab}, \quad (3.1)$$

де f_v – сумарна площа поперечних перерізів усіх волокон, розташованих у перерізі матеріалу розміром $a \times b$, причому волокна є перпендикулярними до перерізу;

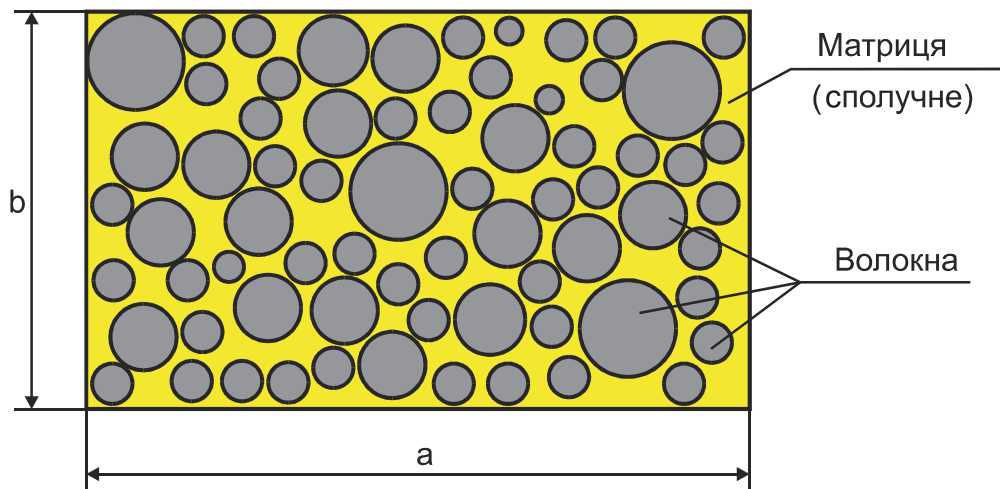


Рис. 3.2. До визначення об'ємного вмісту компонентів композиту

в) дефекти й нерегулярності будови композиту, серед яких найважливішими є:

- розорієнтація (непаралельність) волокон;
- ступінь чистоти компонентів;
- нерівномірність розподілу волокон по перерізу;
- пористість;
- місцеве непоклеювання волокон і сполучного (місцева відсутність адгезії);
- внутрішні дефекти й нерегулярності будови матеріалів арматури й

матриці.

В описі структурних параметрів односпрямованого композиту застосовувався термін «волокно», але все сказане є правильним при армуванні нитками й джгутами, тому що важко уявити формування структури деталі з волокон діаметром 3...5 мкм. З ниток і джгутів виготовляють тканини, трикотажне полотно, плетені рукави тощо. У цих випадках досить поширеним дефектом є непроникнення сполучного всередину нитки через його недостатню в'язкість (рідкоплинність).

3.3. Шаруваті композитні матеріали (2D)

Для одержання деталі необхідної товщини слід послідовно укласти кілька шарів армувального напівфабрикату (стрічки, тканини, ниток тощо). Якщо ці шари укладаються під різними кутами, то вийде класичний шаруватий композит (рис. 3.3).

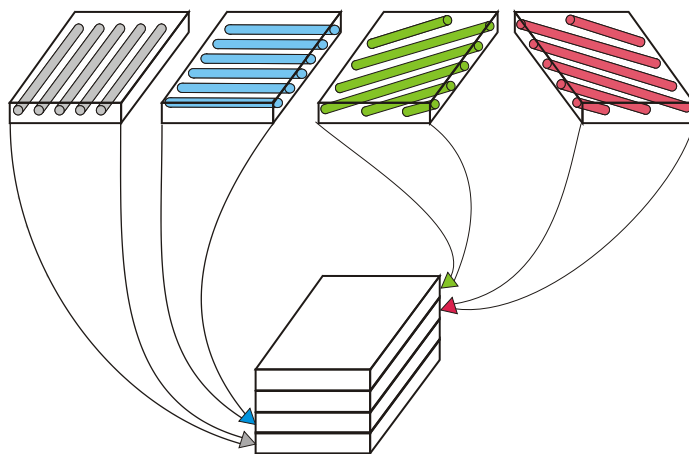


Рис. 3.3. Шаруватий композитний матеріал

Фізико-механічні характеристики шаруватого композитного матеріалу визначаються такими структурними параметрами:

а) матеріал арматур кожного шару (матеріал матриці має бути таким самим для забезпечення надійного склеювання (з'єднання) шарів, тільки в такому випадку можна казати про монолітний матеріал, а не про набір шарів);

б) об'ємний уміст армувального матеріалу в композиті кожного шару;

в) товщина, кут орієнтації і послідовність укладання шарів;

г) дефекти й нерегулярності будови шаруватого композиту:

- усі перелічені вище для односпрямованих матеріалів, що є по суті складовою частиною шаруватого композиту;

- розорієнтація укладання шарів у пакеті;

- непроклеювання між шарами;

- місцева різновтовщинність шарів, що виникає через нахлести або

зазори при розкроюванні й укладанні армувального напівфабрикату (стрічки, тканини тощо).

Експлуатаційні, механічні й технологічні властивості шаруватих композитів визначають у два етапи. Спочатку розраховують характеристики кожного шару, а потім – пакета в цілому. Відповідні методики є предметом окремого розділу механіки – механіки композитних матеріалів.

3.4. Просторово армовані композити (3D, 4D і більше)

У шаруватих композитних матеріалах армувальні елементи (нитки, волокна тощо) укладено паралельно один до одного в кожному шарі, а шари – паралельно один до одного в пакеті. Якщо ж узяти односпрямовані елементи – стрижenci (наприклад, отверділий просочений сполучним джгут), то їх можна укласти один відносно одного нескінченною кількістю варіантів (рис. 3.4) і в такий спосіб формувати необхідну структуру матеріалу, а отже, і його властивості. Використання композитів – це один з напрямів, що бурхливо розвиваються, який трохи утруднює однозначне формування переліку структурних параметрів просторово армованих композитів.

Основними, найважливішими структурними параметрами є:

- а) просторова геометрія схеми армування (напрямок і послідовність укладання арматури);
- б) матеріал арматур кожного напрямку (як і в попередньому випадку, сполучне є таким самим для всього масиву матеріалу);
- в) об'ємний уміст арматур по кожному напрямку;
- г) дефекти й нерегулярності просторової будови композитів, що залежать від технології формування структури армування й використовуваних напівфабрикатів (див. рис. 3.4).

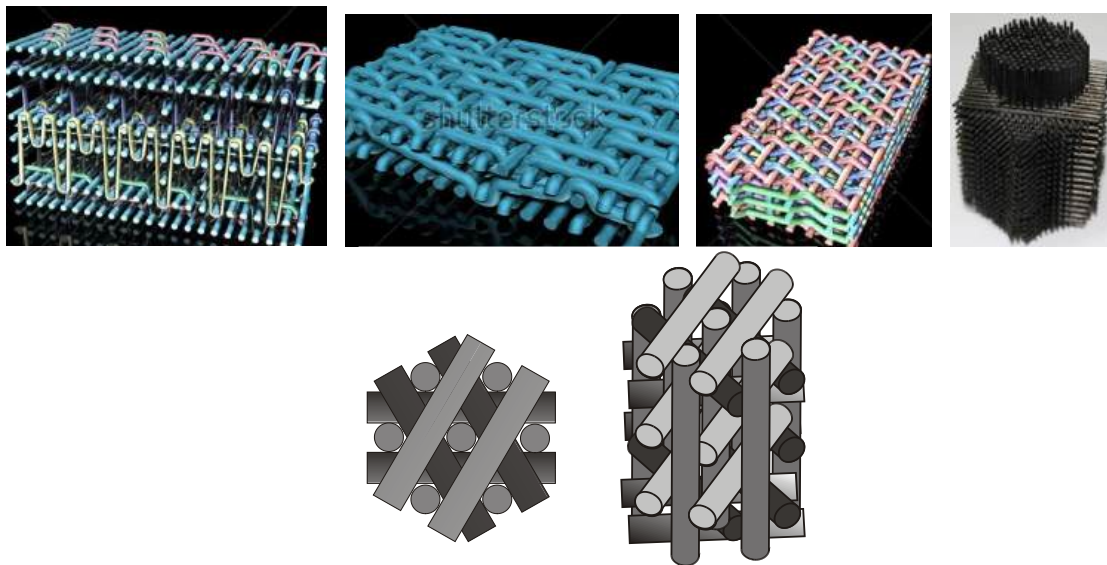


Рис. 3.4. Схеми просторово армованих композитів

Якщо для кожного типу матеріалу є відомою залежність його експлуатаційних, механічних і технологічних властивостей від внутрішньої будови й відповідних параметрів структури, то інженер зможе обґрунтовано запропонувати способи модифікації (поліпшення) тих або інших характеристик шуканого матеріалу.

Типові композити являють собою матричний матеріал (матрицю), армований різного роду порошками (від сажі до наночастинок алмазу), короткими (до 50 см) і довгими волокнами й нитками, а також ткацькими або трикотажними напівфабрикатами з них. Зараз як матриця використовуються термореактивні й термопластичні *полімери* (полімерні композити), *метали* (металеві композити), *кераміка* (керамічні композити) і *вуглець* (вуглець-вуглецеві композити).

3.5. Волокнисті армувальні елементи

Вимоги до волокон, що застосовуються як армувальні матеріали в КМ

Властивості волокон, які використовуються як арматура: висока температура плавлення, низька густина, висока міцність і жорсткість у всьому інтервалі робочих температур, технологічність, мінімальна розчинність у матриці, висока хімічна стійкість, відсутність фазових перетворень у зоні робочих температур, нетоксичність під час виготовлення й експлуатації, сумісність волокон з матеріалом матриці.

Для армування зазвичай застосовуються такі види волокон: металеві волокна й дроти, неорганічні полікристалічні, скляні, органічні, короткі волокна у вигляді монокристалів або мінеральних волокон.

Волокнисті армувальні елементи – це зазвичай безперервні кручені і некручені нитки, джгути (ровинги), стрічки, тканини різного переплетення, металеві волокна й дроти, а також порошки (монокристали), штапельні тканини, мати та ін. Форма армувальних елементів залежить від природи волокон, способів їх вироблення й подальшого текстильного перероблення, а також від технологічних процесів виробництва деталей з композиційних матеріалів.

Скляні волокна. При достатньо низькій густині $((2,4...2,6) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3)$ скляні волокна мають високу міцність, низьку теплопровідність, стійкість до хімічного й біологічного впливу. Цим пояснюється широке застосування скловолокон, ровингів, тканин та інших матеріалів на основі скловолокон для створення деталей та елементів конструкцій зі склопластиків.

Найбільш широко застосовується безлужне алюмоборосилікатне Е-скло (до його складу входять оксиди SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O та деякі інші компоненти).

Безперервні волокна одержують витягуванням розплавленої скломаси через фільтри діаметром 0,8...3,0 мм з подальшим швидким витягуванням

їх до діаметра 3...19 мкм.

Штапельне волокно одержують шляхом витягування безперервного скловолокна з подальшим розриванням його на відрізки певної довжини.

Кварцове волокно зазвичай одержують витягуванням стрижнів, оскільки кварц навіть при температурі 2400 К має дуже високу в'язкість, що утруднює його формування з розплаву.

Поверхню скляних волокон покривають замаслювачем, що запобігає пошкодженню волокон під час різного роду ткацького перероблення й перешкоджає адсорбуванню на волокнах вологи з навколишнього середовища. Існує два види замаслювачів: пасивні й активні (гідрофобно-адгезійні). Пасивні замаслювачі (наприклад, парафінова емульсія або замаслювачі на основі крохмалю) застосовуються тільки на стадії ткацького перероблення волокна. Перед нанесенням сполучного на армувальний матеріал ці замаслювачі видаляють шляхом термічного або хімічного оброблення.

Після видалення замаслювачів на поверхню волокон часто наносять апрети (апретування) – речовини, що сприяють створенню міцного зв'язку на межі «волокно – матриця». Як апрети застосовуються зазвичай кремнійорганічні й металоорганічні сполуки. Найперспективнішими є активні замаслювачі, що запобігають руйнуванню поверхні волокна, підвищують адгезію між скловолокном і полімерною матрицею й поліпшують перероблення волокон.

Скловолокна мають високу термостійкість і жароміцність. При підвищенні температури модуль пружності кварцового волокна збільшується від 74 ГПа при 300 К (27 °С) до 83 ГПа при 1200 К (927 °С). Міцність безлужного алюмосилікатного скла починає знижуватися при 600 К (327 °С), натрій-кальційсилікатних, борних, свинцевих й фосфатних – при 400...500 К (127...227 °С), а модуль пружності зменшується незначно аж до температури розм'якшення.

Скловолокна застосовуються в композитах у вигляді джгутів і ниток з елементарних волокон, стрічок, тканин різноманітного переплетення, матів, полотен та інших нетканих матеріалів.

Ткані армувальні матеріали одержують шляхом текстильного перероблення крученої комплексної нитки, джгута, пряжі або ровингів. Для текстильного перероблення використовують скловолокна діаметром 3...4 мкм. Ткані армувальні матеріали є технологічними, зручними при виготовленні великогабаритних виробів і дають змогу досягати високого вмісту арматури у склопластиках.

Органічні волокна. Найчастіше для виробництва виробів АКТ використовують волокна на основі ароматичних поліамідів (арамідні волокна). Застосовують також поліамідні (наприклад, капрон, найлон та ін.) та поліімідні волокна.

Арамідні волокна мають унікальний комплекс властивостей: високу міцність при розтягуванні й модуль пружності, термостабільність, широкий температурний діапазон робочих температур, високу втомну міцність й високі

діелектричні властивості, низьку повзучість.

Завдяки низькій густині арамідні волокна за питомою міцністю перевершують усі відомі нині армувальні волокна й металеві сплави, поступаються лише вуглецевим і борним волокнам за питомим модулем пружності.

Арамідні волокна добре піддаються текстильному переробленню. Міцність після текстильного перероблення становить 90 % початкової міцності ниток, що дає можливість застосовувати арамідні волокна у вигляді різних тканин.

Вуглецеві волокна. Вуглецеві волокна є найперспективнішими армувальними матеріалами, оскільки мають такі унікальні властивості: низька густина ($1,43 \dots 1,83 \text{ г/см}^3$), високі міцність (до 3500 МПа) і питома міцність, високі жорсткість (модуль пружності $E = 250 \dots 600 \text{ ГПа}$) і питома жорсткість. Крім того, вуглецеві волокна мають високу теплостійкість (у вакуумі або інертному середовищі), низькі коефіцієнти тертя й термічного розширення й можуть бути провідниками й напівпровідниками.

Вуглецеві волокна підрозділяються на карбонізовані (максимальна температура термообробки – $900 \dots 2000 \text{ }^\circ\text{C}$, уміст вуглецю – $80 \dots 90 \%$) і графітізовані (температура термообробки – до $3000 \text{ }^\circ\text{C}$, уміст вуглецю – понад 99%).

Вуглецеві волокна одержують методом термохімічного перероблення органічних вуглевмісних волокон:

- поліакрилонітрильних волокон (ПАН-волокон);
- гідратцелюлозних волокон (ГЦВ) – віскозних волокон;
- волокон, які одержують з вуглецевих (нафтових і кам'яновугільних) пеків.

Найбільш дешевими й доступними початковими матеріалами є нафтові й кам'яновугільні пеки, що являють собою суміш олігомерних продуктів. З них формують волокна, пропускаючи розплав при температурі $100 \dots 350 \text{ }^\circ\text{C}$ через фільтри діаметром 0,3 мм. Потім сформоване волокно витягують до ступеня витягання $100000 \dots 500000 \%$. При цьому досягається висока орієнтація макромолекул волокна.

Процес одержання вуглецевого волокна складається з таких етапів:

1. Формування вихідного волокна.
2. Термохімічне перероблення волокна на ранній стадії карбонізації з нагріванням до температури $450 \dots 700 \text{ }^\circ\text{C}$. При цьому внаслідок хімічних реакцій видаляються радикали зі структури ланцюгових молекул полімеру, унаслідок чого залишається основний ланцюг молекул полімеру, що складається з атомів вуглецю.
3. Високотемпературна карбонізація або графітізація волокна з нагріванням до 2000 або $3000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Термохімічне оброблення проводять у вакуумі або інертному середовищі – азоті, гелії, аргоні. Для поліпшення якості волокон і запобігання усадці термохімічне оброблення проводять одночасно з деяким витягуванням волокон (волокна мають бути в натягнутому стані).

Вуглецеві волокна мають фібрилярну будову. Характерний елемент структури – закриті пори, які можуть займати до 33 % об'єму волокна. Пори мають голкоподібну форму, орієнтовані вздовж основного волокна, їх середня довжина становить $(2...3) \cdot 10^{-2}$ мкм, а діаметр – $(1...2) \cdot 10^{-3}$ мкм. Збільшення кількості пор знижує міцність волокна при розтяганні. Вуглецеві волокна, які застосовуються для армування конструкційних матеріалів, умовно поділяються на дві групи: високомодульні ($E = 300...700$ ГПа, $\sigma^f = 2,0...2,5$ ГПа) і високоміцні ($E = 200...250$ ГПа, $\sigma^f = 2,5...3,2$ ГПа). Отримано також волокна високої міцності з високим модулем пружності.

Вуглецеві волокна добре піддаються текстильному переробленню, тому їх досить широко використовують у вигляді тканин, а також у вигляді ровингів, ровниці, джгутів та інших видів матеріалів.

До недоліків вуглецевого волокна можна віднести таке:

- схильність до окиснювання на повітрі (особливо при температурі 300...400 °C);
- висока хімічна активність при взаємодії з металевими матрицями;
- виникнення електричного потенціалу на межі «волокно – металева матриця»;
- відносно слабка адгезія до полімерних матриць.

З метою усунення цих недоліків проводяться дослідження щодо нанесення на вуглецеві волокна металевих і керамічних покриттів.

Борні волокна. Волокна бору є одними з перспективних армувальних матеріалів для композитів з полімерною й металевою матрицями. Волокна бору мають низьку густину ($2,55...2,65$ г/см³), високу міцність при розтяганні (до 3500 МПа) і стисканні, високий модуль пружності ($E = 380...420$ ГПа), високі твердість і зносостійкість (мікротвердість – до 4000 кгс/мм²; твердість за Моосом – 9,3 ум. од., ця твердість алмазу дорівнює 10 ум. од.), високу температуру плавлення (2050 °C). Борні волокна мають високу зсувну жорсткість ($G = 180$ ГПа), низьку тепло- й електропровідність.

Основний метод одержання борних волокон – осадження бору з газової суміші трихлористого бору BCl_3 і водню H_2 на вольфрамову нитку діаметром близько 12 мкм при температурі 1000...1100 °C під тиском, близьким до атмосферного. Унаслідок осадження утворюється серцевина з боридів вольфраму (WB , W_2B_5 і WB_4) діаметром 15...17 мкм, навколо якої розташовується шар полікристалічного бору. Нагрівання вольфрамової нитки здійснюється через ртутні електричні контакти, які одночасно утворюють гідравлічні затвори для герметизації камери реактора. Швидкість руху волокна через реактор безперервної дії становить 0,8...1 м/хв. Осадженням одержують бороволокно діаметром зазвичай 100 мкм (іноді 150 і 200 мкм).

Таким чином, борні волокна – неоднорідні за складом і структурою, анізотропні. Границя міцності серцевини волокна менша від границі міцності волокна в цілому. Серцевина волокна навантажена великими стискальними напруженнями, а бор в зоні, що прилягає до вольфрамової нитки, – розтяжними. Це призводить до утворення радіальних тріщин у борних волокнах

унаслідок великих залишкових напружень, які збільшуються зі збільшенням діаметра волокна. Для підвищення жаростійкості борних волокон, захисту їх від впливу деяких металевих матриць і підвищення адгезії волокон до деяких матричних матеріалів волокна покривають карбідом кремнію шляхом осадження з парогазової фази в середовищі аргону й водню. Волокна бору, покриті тонким шаром карбіду кремнію, називають *борси́ком*.

Волокна бору широко застосовуються у виробництві композитів на основі полімерної й алюмінієвої матриць. Композити на основі борних волокон та алюмінієвої матриці мають кілька переваг порівняно з аналогічними матеріалами з полімерною матрицею. Вони, наприклад, можуть працювати при температурі до 370 °C (640 K), і їх можна переробляти на звичайному технологічному обладнанні, яке застосовується в металургійному виробництві.

Недоліки борних волокон:

1. Міцність борних волокон має значний статистичний розкид. Коефіцієнт варіації міцності залежно від дефектності структури поверхні волокон становить 17...36 %.

2. Через високу жорсткість і великий діаметр борні волокна досить обмежено піддаються ткацькому переробленню. Їх використовують тільки вздовж основи частіше стрічок, іноді тканин. Уздовж утку використовуються органоволокна (бороорганострічки й тканини), скловолокна (боросклянки й стрічки), вуглеволокна (боровуглетканини, стрічки), комбіновані ткані матеріали, наприклад боросклянки, стрічки тощо.

Властивості деяких видів армувальних матеріалів наведено в табл. 3.1.

Металеві волокна й дроти. Металеві волокна й дроти є дуже ефективними армувальними матеріалами. Для композиційних матеріалів, що працюють при низьких і помірних температурах, використовуються сталеві й берилієві волокна; для композитів, які експлуатуються при помірних і високих температурах, – вольфрамові, молібденові волокна й волокна зі сплавів тугоплавких металів.

Волокна й дроти зі сталей. Найчастіше для виготовлення тонкого високоміцного дроту використовуються корозійностійкі (нержавіючі) сталі аустенітного, аустенітно-мартенситного класів і мартенситно-старіючі сталі. Завдяки застосуванню оптимальних технологій виготовлення дротів одержують дроти зі значним ступенем наклепу, іноді з мартенситною структурою, а іноді дроти, додатково зміцнені в процесі штучного старіння.

При температурах 350...400 °C відбувається зниження міцності наклепаних сталевих дротів, винятком є дроти зі сталей Н13М10К16, Н8М18К14, що зберігають свої міцнісні властивості при температурі 450...500 °C.

Вольфрамові й молібденові волокна й дроти. Вольфрамові волокна є досить технологічними для виготовлення композитів, що експлуатуються при високих температурах. Вольфрамовими волокнами зміцнюють жароміцні нікелеві та інші сплави. Уведення у вольфрам і сплави на його основі

дисперсних частинок (окису торію ThO_2 , карбідів) або легувальних елементів (Re, Ti, V тощо) дає можливість істотно підвищити жароміцність і знизити повзучість.

Таблиця 3.1

Властивості армувальних волокон

Марка волокна	Густина $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Модуль пружності E	Середня міц- ність на базі 10 мм σ^f	Гранична деформація ε , %
		ГПа		
Скловолокно: ВМ-1	2,58	95	4,20	4,8
Органічні волокна:				
Кевлар-29	1,45	60...70	2,8...3,3	4,5
Кевлар-49	1,45	130...140	3,6...3,8	2,7...3,5
СВМ	1,43	125...135	3,8...4,2	3...4
Вуглецеві волокна:				
ЛУ-4	1,70	250	3,0...3,5	1,3
Урал-15	1,5...1,6	70...80	1,5...1,7	2,1
Урал-24	1,7...1,8	150...200	1,7...2,0	1,1
Кулон	1,90	400...600	2,0	0,4
Борні волокна:				
Avco (B/W)	2,58	400	2,52	0,6
	2,50	390...400	3,47	0,9
	2,50	390...400	3,39	0,85

Для підвищення тривалої міцності вольфрамових волокон при високих температурах на їх поверхню розпиленням наносять тонкі бар'єрні покриття (4...12 мкм) з карбідів титану й гафнію, окисів алюмінію й гафнію тощо. Найефективнішим є покриття карбідом гафнію HfC , що дає змогу уникнути рекристалізації вольфрамових волокон при температурі 1100...1200 °С протягом 1000 год. Порівняльну характеристику деяких видів металевих волокон наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Порівняльна характеристика металевих волокон

Дріт	$t_{пл}$, °С	ρ , г/см ³	σ_b , кгс/мм ²	E , кгс/мм ²
Берилієвий	1284	1,84	100...130	29 000
Вольфрамовий	3400	19,3	420	40 000
Сталевий	1500	7,8	360...400	20 000
Титановий	1668	4,5	150...200	12 000

Коротковолокниста арматура. Як коротковолокнисту арматуру

можна використовувати подрібнені мінеральні волокна, наприклад волокна азбесту. Але найперспективнішими є ниткоподібні монокристали або вуса.

Монокристалічні волокна мають такі самі переваги, що й скляні та борні волокна. Їх граничне відносне подовження – як у скляних волокон (3...4 %), а модуль пружності – як у борних волокон і вище (40000...68000 кгс/мм²).

Властивості деяких ниткоподібних кристалів наведено в табл. 3.3.

До армувальних напівфабрикатів відносять:

- кручені й некручені нитки, що містять близько 1000 елементарних волокон (філаментів);
- джгути, ровинги, що являють собою пучок ниток;
- односпрямовані ткані й неткані стрічки завширшки 20...30 мм;
- тканини різноманітного плетіння, найчастіше полотняного, сатинового й саржевого (рис. 3.5), одношарові й багатшарові, пласкі (2D) та об'ємні (3D) тощо;
- неткані напівфабрикати у вигляді листів, плит тощо;
- трикотажне полотно;
- плетені рукави (рис. 3.6);
- цільноткані або цільноплетені каркаси арматур деталі або агрегата, наприклад крила літака.

Таблиця 3.3

Властивості ниткоподібних кристалів

Кристали	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{г/см}^3$	$\sigma_{в}, \text{кгс/мм}^2$	$E, \text{кгс/мм}^2$
Оксид алюмінію	3,96	2050	2800	50 000
Карбід кремнію	3,21	2650	3700	58 000
Нітрид кремнію	3,18	1900	1500	49 500
Оксид магнію	3,6	3072	2400	31 000
Оксид берилію	1,8	822	1400...1900	68 900

Ткацько-трикотажне перероблення армувальних волокон призводить до зниження міцнісних та інших характеристик, а також до неминучого ламання крихких волокон, непроникнення всередину нитки матеріалу матриці, скривлень та інших явищ.

Як уже було сказано, найважливішим компонентом композиту є матриця, без якої композит не може існувати, але яка без армувального матеріалу не може використовуватися в інженерній діяльності, тобто обидва компоненти є і важливими, і потрібними. Як матеріал матриці використовуються *полімерні сполучні, метали і сплави, кераміка й вуглець*. Найбільшого поширення набули *полімерні матриці*, історія створення яких почалася 1936 року в США, коли було синтезовано промислову поліефірну смолу, що була придатним сполучним матеріалом для скляних волокон, які тоді щойно з'явилися. *Термореактивна полімерна матриця* складається зі смол (фенолформальдегідних, епоксидних, поліефірних, поліімідних,

кремнійорганічних) та отверджувача (ініціатора, каталізатора, модифікатора), що запускає процес полімеризації й твердіння. З метою поліпшення будь-яких експлуатаційних або механічних властивостей до складу матеріалу матриці додають й інші компоненти – *пластифікатори, розріджувачі, барвники* тощо. Хімічна основа полімеризації й твердіння термореактивних матричних матеріалів не відрізняється від хімічної основи полімерів.

Хороші перспективи мають *термопластичні матеріали* для матриці композиту, які можуть багаторазово переходити із твердого стану в рідкий (або розм'якшений), і тому їх можна використовувати для процесу формоутворення на наявному устаткуванні. Для композитів використовуються такі термопластичні матеріали: нейлон-6,5, поліфеніленсульфід, ролівсан, полісульфон, поліефір термопластичний та ін. Якщо вдасться підвищити робочу температуру термопластів до рівня реактопластів, то застосування термопластичних матриць різко підвищиться.

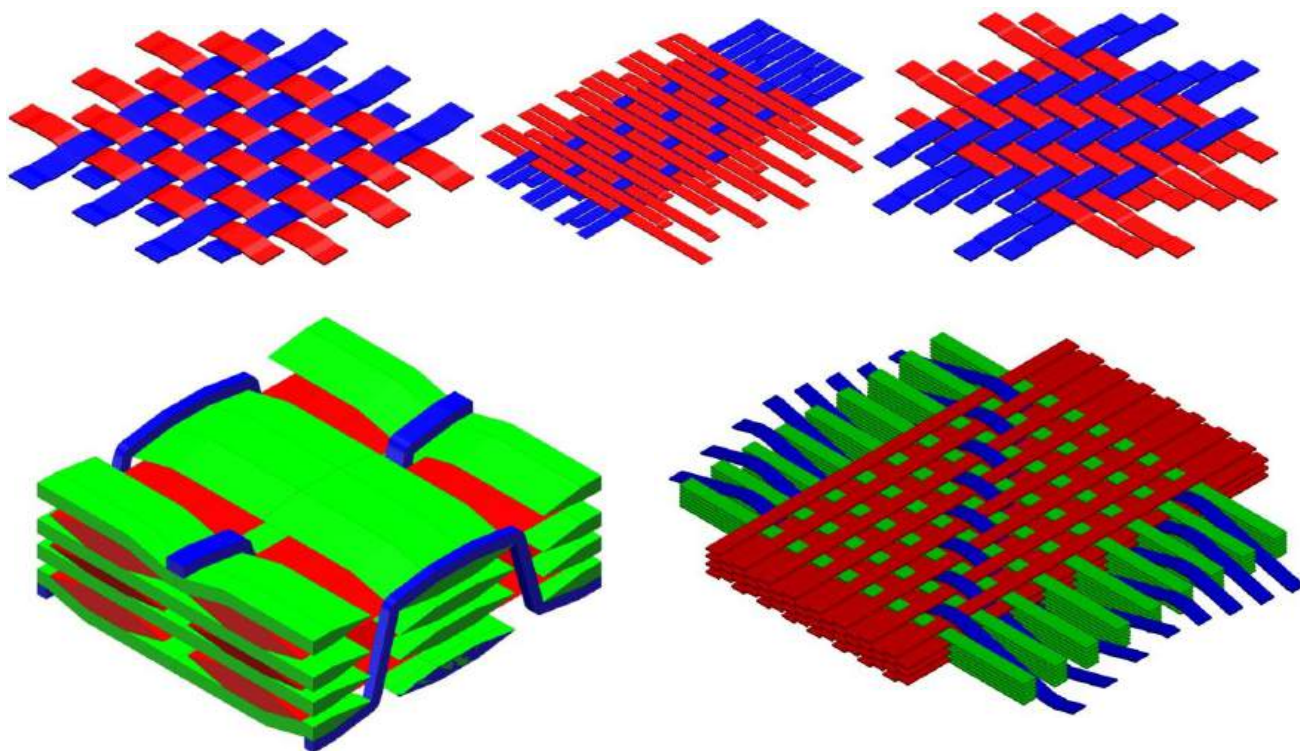


Рис. 3.5. Схеми утворення тканин з армувальних ниток або джгутів



Рис. 3.6. Плетені рукави з ниток (джгутів)

Щоб *металокомпозит* можна було використовувати при високих робочих температурах, як матриці застосовуються матеріали на основі алюмінію, магнію, титану й деяких інших металів та їх сплавів. Основними проблемами при одержанні металокомпозитів є труднощі виключення хімічної взаємодії матеріалів волокон і матриці, забезпечення монолітності матриці (мінімізація пористості), високої адгезії волокон і матриці та ін.

Керамічні матеріали мають високі жароміцність і жаростійкість, але є крихкими, і для забезпечення необхідної пластичності доцільно армувати їх волокнами інших відповідних матеріалів – тугоплавких металів, керамічних, ниткоподібних «вусів», вуглецю, карбідів та ін. Труднощі одержання *керамічних композитів* в основному пов'язані з керамічною технологією, тобто з формуванням матеріалу шляхом високотемпературного випалювання, у зв'язку із чим армувальні волокна мають витримувати таку температуру й при цьому утворювати хороший зв'язок з матеріалом матриці. У цьому напрямі можливості для інженерної творчості є необмеженими.

З метою забезпечення термостійкості й термоміцності при мінімальній масі використовують *вуглецеву матрицю*, армовану вуглецевими волокнами, – так званий *вуглець-вуглецевий композитний матеріал*. Цим матеріалом забезпечується теплозахист найбільш гарячих зон космічних апаратів багаторазового використання типу радянського «Бурану» або американського Space-Shuttle, європейських майбутніх кораблів та ін. Технологія одержання вуглець-вуглецевого композиту є дорогою й енергоємною, але для космічної техніки це виправдовується тим, що виведення 1 кг корисного навантаження на навколоземну орбіту коштує від 10 до 100 тис. дол., тобто при зменшенні маси конструкції збільшується маса корисного навантаження.

Усі армувальні матеріали мають свої переваги й недоліки, і для посилення одних і нейтралізації інших має сенс комбінувати арматури композиту, тобто робити *гібридні композитні матеріали*. Залежно від способу комбінування розрізняють *внутрішньосхарову* (комбінування різних елементарних волокон у нитці, чергування ниток основи й утку тощо) і *міжшарову* (чергування шарів нитки або тканини з різними наповнювачами) *гібридизацію*. Гібридизація ще більше розширює межі й можливості застосування композитів.

Композити складаються із двох і більше різних матеріалів, кожний з яких має дефекти внутрішньої будови. Ці дефекти виникають при виготовленні композитних матеріалів і залежно від виду можуть впливати як позитивно, так і негативно. Дефекти завжди приводять до зміни характеристик матеріалу, і не завжди в гіршу сторону.

Крім дефектів матеріалів матриці й арматури в композитах можуть бути дефекти, обумовлені будовою (об'ємним сполученням) і технологією одержання (властивості матеріалу формуються одночасно з виробом). До основних дефектів належать:

– недостатня адгезія волокон і матриці, унаслідок чого не забезпечується їх спільна робота (адгезія – це зчеплення (прилипання) поверхонь

різнорідних матеріалів, обумовлене міжмолекулярною взаємодією (вандер-ваальсовою, полярною), а інколи і взаємною дифузією). Бажано, щоб міцність адгезійного зв'язку була не меншою за міцність когезійного зв'язку (зв'язку між молекулами полімерної матриці або між кристалами в металевій матриці);

- неякісне просочення арматури сполучним, тобто наявність зон повітряних включень усередині ниток і джгутів;

- нерівномірний і невпорядкований розподіл армувальних волокон або їх частинок по об'єму матриці;

- порушення передбаченої проектом орієнтації армувальних волокон, тобто розорієнтація волокон;

- нерівномірна полімеризація матеріалу матриці по об'єму деталі;

- наявність забруднень різної природи на армувальному матеріалі;

- наявність залишків активних або пасивних замаслювачів на поверхні волокон, які наносяться для полегшення перероблення на ткані напівфабрикати;

- пористість, пов'язана з невидаленням летких та інших речовин, що супроводжують полімеризацію;

- обриви й розриви ниток і джгутів;

- відхилення об'ємного вмісту волокон від значення, передбаченого в нормативних документах; об'ємний уміст характеризує частку об'єму волокон від загального об'єму матеріалу, вимірюється найчастіше у відсотках і є найважливішою характеристикою композитних матеріалів, від якої залежить більшість експлуатаційних і механічних властивостей.

На завершення можна сказати, що всі експлуатаційні, механічні й технологічні властивості композитів визначаються властивостями матеріалів арматури й матриці та їх структурним співвідношенням (об'ємним умістом, напрямком укладання волокон відносно діючих сил, видом напівфабрикату й послідовністю укладання його шарів тощо).

Контрольні запитання

1. Якими ознаками характеризується композитний матеріал?
2. Із чого складається композитний матеріал?
3. Які види композитних матеріалів ви знаєте?
4. Чим армують композитні матеріали?
5. Які напівфабрикати арматур використовуються в композитних матеріалах?
6. Які матеріали використовуються як матриця композиту? Назвіть їх переваги й недоліки.
7. Що таке гібридний композитний матеріал? Як його одержують і навіщо він потрібний?
8. Які дефекти будови існують у композитних матеріалах?

4. ОСОБЛИВОСТІ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВИРОБІВ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Методи неруйнівного контролю (МНК) залежно від фізичних явищ, покладених в їх основу, поділяються на такі види: оптичний, капілярний (проникними речовинами), магнітний, вихрострумний, акустичний (ультразвуковий), тепловий, радіаційний.

Полімерні композиційні матеріали (ПКМ) є складним об'єктом контролю, оскільки характеризуються істотною неоднорідністю структури, анізотропією властивостей, великою різноманітністю типів структур (односпрямована, поздовжньо-поперечна, комбінована тощо), специфічними фізичними властивостями: високими електро-, тепло-, звукоізоляційними.

Більшість видів полімерних композиційних матеріалів залежно від виду наповнювача, що використовується, належать до діелектриків. Майже всі ПКМ є немагнітними матеріалами. Тому такі методи контролю, як магнітні та вихрострумові, здебільшого є непридатними для дефектоскопії ПКМ. Неefективними для контролю ПКМ є також високочастотні ультразвукові методи, тому що ультразвукові хвилі з частотою більше 1 МГц сильно поглинаються середовищем або вони значно обмежують діапазон контрольованих товщин. Радіаційні методи для ПКМ є більш ефективними для контролю густини або товщини, ніж дефектоскопія.

Основні критерії вибору методу контролю:

- 1) чутливість контролю;
- 2) точність і відтворюваність результатів контролю;
- 3) можливість механізації або автоматизації контролю;
- 4) забезпечення високої продуктивності контролю;
- 5) простота методики контролю;
- 6) інформаційна здатність та універсальність контролю;
- 7) наявність і можливість використання серійної апаратури;
- 8) порівняно невисока вартість контролю;
- 9) можливість використання праці персоналу невисокої кваліфікації;
- 10) безпека для обслуговуваного персоналу.

Комплексність контролю якості полягає в такому:

1) визначення оптимального комплексу фізичних параметрів, за якими оцінюються міцнісні та інші фізико-механічні характеристики ПКМ і виробів на їх основі;

2) розроблення та здійснення оптимального комплексу методів і засобів контролю дефектів структури;

3) інтегральне оцінювання роботоздатності виробу за комплексом параметрів, визначених неруйнівними методами.

Походження та види дефектів композитних конструкцій

Створення сучасних конструкцій і виробів аерокосмічної техніки високої якості та надійності пов'язане із застосуванням конструкційних матеріалів з підвищеними фізико-механічними, технологічними та експлуатаційними властивостями. До таких матеріалів належать композити.

Композиційні матеріали є гетерофазними системами, утвореними об'ємним поєднанням хімічно різнорідних компонентів з чіткою межею поділу між фазами, що характеризуються властивостями, яких не має жоден з компонентів окремо.

Композиційні матеріали складаються з двох або більше компонентів, серед яких можна виділити армувальні елементи, що забезпечують необхідні механічні характеристики матеріалу, і матрицю (або сполучне), що забезпечує спільну роботу армувальних елементів. Фізико-механічні властивості композиційних матеріалів визначаються властивостями армувальних елементів і матриці, а також міцністю зв'язку між ними.

Сучасні полімерні композиційні матеріали (склопластики, боропластики, вуглепластики, пінопласти тощо) характеризуються високою питомою міцністю, високими звуко-, тепло- та електроізоляційними властивостями, а також суттєвою неоднорідністю структури, анізотропією властивостей.

Застосування композиційних матеріалів у різних відповідальних виробках потребує забезпечення їх високої якості та надійності. Однак у процесі виробництва виробів із композиційних матеріалів виникають різні дефекти (раковини, пори, тріщини, розшарування, порушення орієнтації та кількісного вмісту армувального наповнювача тощо), що є характерними лише для цих матеріалів. Це призводить до змінення фізико-механічних властивостей, погіршення якості та надійності виробів.

Дефектами називають такі порушення структури композиційних матеріалів, які знижують фізико-механічні характеристики, установлені відповідними нормативними документами (ГОСТами, ТУ та ін.).

Дефекти структури композиційних матеріалів – це:

- дефекти вихідної сировини;
- дефекти, що утворюються в процесі перероблення матеріалу виробу;
- дефекти, що виникають під час експлуатації виробу.

Дефекти вихідної сировини (табл. 4.1) можуть бути джерелом утворення дефектів готового виробу. Наприклад, в армувальному матеріалі можуть мати місце дефекти текстильного перероблення, обриви ниток, надмірна вологість тощо.

Дефекти вихідної сировини

Фактори утворення дефектів	Дефекти	Методи контролю
Порушення температурного режиму навколишнього середовища	Підвищена або знижена в'язкість сполучного, желатинізація сполучного	Ультразвуковий (УЗ), мікrorадіохвильовий (МРВ)
Порушення вологості навколишнього середовища	Підвищена вологість наповнювача	МРВ, електричний (Е)
Порушення дозування компонентів сполучного	Надлишковий уміст ініціювальних і летких компонентів сполучного, зміна в'язкості сполучного	МРВ, Е, УЗ
Порушення хімічного складу сполучного	Зниження адгезійних і фізико-механічних властивостей сполучного	УЗ, МРВ
Недоліки гідрофобно-адгезійного оброблення наповнювача	Зменшення адгезії наповнювача та сполучного	Інфрачервоний (ІЧ)
Порушення режимів витягування волокна й утворення дефектів під час ткацького оброблення	Дефекти армувальних волокон (поверхневі тріщини, внутрішні порожнини, зміна діаметра тощо)	Оптичний (О), ІЧ, УЗ

Армувальний матеріал просочують сполучним у ваннах просочувальних машин. Основною вимогою до цієї операції є підтримання заданої концентрації та в'язкості сполучного, оптимального вмісту летких речовин. Підтримання заданої постійної в'язкості сполучного регулюється кількістю розчинника або зміненням температури просочувальної ванни. Відхилення значень в'язкості від нормованих параметрів призводить до нерівномірного просочення армувального матеріалу, що спричиняє істотний розкид фізико-механічних властивостей, невиправдану витрату сполучного й утворення напливів смоли на поверхні та між шарами готового виробу. Підвищення вмісту летких речовин призводить до утворення раковин, пористості, розтріскування та інших дефектів. При зниженому вмісті летких речовин можуть статися розшарування, поява місць з недостатнім склеюванням окремих шарів тканини, унаслідок чого знижуються фізико-механічні властивості матеріалу та виробу. Уміст летких речовин визначається типом сполучного, концентрацією розчинника і навіть режимом сушіння. Тривале сушіння, підвищена температура, вологість можуть призвести до погіршення якості сполучного внаслідок передчасної полімеризації.

На якість виробу найбільше впливають дефекти, пов'язані з недосконалістю технології виготовлення виробів. Кожному способу виготовлення

виробів властиві характерні види дефектів.

Причинами утворення дефектів під формування виробів (табл. 4.2, 4.3) є недотримання режимів підготовки вихідної сировини, стан технологічного устаткування і навіть порушення технологічних режимів і режимів термооброблення деталей. Попередня підготовка вихідної сировини має забезпечити відповідну в'язкість сполучного, уміст затверджувачів і пластифікаторів у ньому, певну вологість армувального наповнювача та його гідрофобно-адгезійне оброблення.

На якість композитних виробів, що виготовляються, значно впливають недосконалість конструкції та технічний стан технологічного обладнання (автоклавів, печей, пресів, оснастки тощо), а також контрольно-вимірювальних приладів (манометрів, термометрів, реле часу тощо). Під час проектування необхідно передбачити можливість рівномірного обігрівання та охолодження форми-оснастки, оскільки нерівномірність обігрівання або охолодження призводить до утворення у виробі поверхневого здуття, розшарування, тріщин, короблення, надмірної пористості матеріалу. Це особливо важливо враховувати під час виготовлення великогабаритних деталей, виробів складної конфігурації та значної товщини. Обігрівання оснастки здійснюється з використанням пари, електричних та індукційних нагрівачів. Охолоджують оснастку зазвичай водою або шляхом обдування холодним повітрям.

Необхідно також передбачити газовідвідні канали для швидкого й повного відведення всіх газоподібних продуктів та пари, що утворюються в процесі формування виробу. Недотримання цієї умови також призводить до утворення різних дефектів (раковин, тріщин і підвищеної пористості).

Конструкція оснастки під час пресування має забезпечувати високий тиск, достатній для оформлення всіх елементів деталі з урахуванням ступеня плинності прес-маси. У всіх випадках оснастка має відповідати високим вимогам точності геометричних розмірів форми й положення. Недотримання цих вимог призводить до порушення геометричних розмірів виробів, значної неоднорідності структури та нерівномірності розподілу фізико-механічних властивостей на різних ділянках виробу.

Порушення режимів зусилля під час формування призводить до утворення надлишкової пористості, зниження адгезії сполучного й армувального матеріалу та зменшення значень фізико-механічних властивостей, тому вибір оптимальної величини зусилля формування для виробів на основі орієнтованого наповнювача є особливо важливим.

Якість затвердіння і ступінь полімеризації полімерних матеріалів залежать від температурно-часового режиму при охолодженні і спричиняють нерівномірну усадку, викривлення й утворення тріщин і розшаровувань, а також внутрішніх напружень.

Усадкові явища, що відбуваються в полімерних матеріалах унаслідок хімічних, термічних і механічних процесів, істотно впливають на якість виробів, оскільки змінюють як форму виробу, так і його фізико-механічні

характеристики. Утворення дефектів структури внаслідок усадкових явищ зумовлено хімічними процесами, що відбуваються у сполучному, і має бути враховано в технологічних процесах формування виробів.

Для повного затвердіння сполучного, видалення летких компонентів і кінцевої усадки матеріалу зазвичай застосовують додаткове термооброблення пресованих деталей. Від режимів термооброблення залежить стабілізація значень фізико-механічних характеристик, усадки та структури матеріалу. Недотримання цих режимів може призвести до утворення нових дефектів, зниження фізико-механічних властивостей (в основному через часткову термодеструкцію сполучного й порушення адгезійного зв'язку його з армувальним наповнювачем).

Таблиця 4.2

Дефекти формування

Фактори утворення дефектів	Дефекти	Методи контролю
Похибки дозування наповнювача та сполучного	Незатвердіння сполучного, нерівномірний розподіл сполучного та наповнювача, зниження фізико-механічних властивостей, напливи сполучного	УЗ, МРВ
Порушення теплового режиму формування та термооброблення виробу	Розшарування, внутрішні та поверхневі тріщини, пористість	ІЧ, УЗ, МРВ
Помилки укладання орієнтованого армувального матеріалу	Порушення орієнтації та співвідношення волокон у поздовжньому й поперечному напрямках, зміна анізотропії фізико-механічних властивостей	Поляризаційний УЗ, МРВ
Несправності в технологічному й контрольно-вимірному устаткуванні (манометри та ін.), порушення технологічних режимів перероблення	Непроклеювання, розшарування, пористість, підвищена шорсткість поверхні, оголення армувальних матеріалів, складки шарів армувального матеріалу, внутрішні залишкові напруження, усадкові явища	ІЧ, УЗ, МРВ
Потрапляння сторонніх включень у вихідну сировину	Сторонні включення (металеві, ганчір'я, плівка тощо)	ІЧ, МРВ
Порушення геометричних розмірів форм та оснащення, помилки укладання склопакетів, усадкові явища	Порушення геометричних розмірів і форми виробу	УЗ, магнітний, МРВ, оптико-механічний, інтерферометричний
Помилки, допущені під час проектування та розрахунку конструкції	Конструктивні дефекти виробу (невідповідність конфігурації, розмірів і зон механічного оброблення, неправильний вибір армувального матеріалу)	Візуальний

У процесі підготовки армувального матеріалу й укладання його іноді порушуються взаємна орієнтація наповнювача, співвідношення поздовжніх і поперечних волокон, відбувається утворення складок у шарах. Це суттєво знижує фізико-механічні властивості й порушує структуру матеріалу у виробі. Подібні дефекти можуть виникати під час формування виробу через нерівномірний розподіл зусилля в шарах композитного виробу. Нерівномірність зусиль формування призводить до зміщення, повороту та жолоблення окремих шарів і волокон у матеріалі, утворення тріщин, розшаровувань, пористості.

Таблиця 4.3

Види дефектів при різних методах формування

Найменування методу	Тип виробу	Характерні дефекти
Метод відкритого формування		
Контактне формування: - без прикочування - з прикочуванням - з ущільненням шарів	Великогабаритні вироби складної конфігурації, оболонки, листи великих розмірів	Пористість, розшарування, ділянки неповного затвердіння, різнотовщинність, низькі значення фізико-механічних властивостей, нерівномірний розподіл сполучного, зморшки
Формування еластичною діафрагмою	Велико- та середньогабаритні вироби складної конфігурації, оболонки	Різнотовщинність, нерівномірний розподіл сполучного, порушення орієнтації наповнювача, ділянки неповного затвердіння, розшарування, зморшки
Формування методом сухого та мокрого намотування: - пряме намотування - поздовжньо-поперечне намотування - спіраль-но-гвинтове або комбіноване намотування - геодезичне намотування	Велико- та середньогабаритні вироби типу тіл обертання: циліндричні, сферичні, тороїдальні та інші оболонки	Розшарування, нестача сполучного в зоні напусків полотна, пористість
Метод закритого формування		
Формування напиленням	Середньогабаритні вироби складної конфігурації	Пористість, різнотовщинність, нерівномірність розподілу наповнювача та сполучного, низькі значення фізико-механічних характеристик
Пресування просочених тканин і полотен	Середньо- та малогабаритні вироби простої форми	Тріщини, розшарування, локальна пористість, нерівномірний розподіл сполучного

Закінчення табл. 4.3

Найменування методу	Тип виробу	Характерні дефекти
Пресування прес-матеріалу	Малогабаритні вироби складної форми з прес-матеріалу марок АГ-4В, ДСВ-2Р-2М, премікс, препрег	Ділянки локальної орієнтації наповнювача, тріщини, пористість, нерівномірний розподіл сполучного
Автоклавний метод	Велико- та середньогабаритні вироби простої та складної конфігурації	Розшарування, пористість, складки, порушення орієнтації армувального матеріалу
Лиття під тиском	Середньо- та малогабаритні вироби зі склонаповнених термо- та реактопластів	Ділянки локальної розорієнтації наповнювача, нерівномірність сполучного, пористість, внутрішні залишкові напруження
Відцентрове формування	Середньогабаритні вироби типу тіл обертання	Нерівномірний розподіл сполучного по товщині, пористість, локальна орієнтація наповнювача
Пултрузія	Профільні та довгомірні вироби	Тріщини, нерівномірне просочення сполучного, обриви ниток і волокон
Вакуумне формування	Середньогабаритні вироби простої та складної форми	Складки армувальних шарів, нерівномірний розподіл сполучного

Одним з найважливіших факторів, що впливають на утворення різних дефектів полімерних композиційних матеріалів, є процес експлуатації виробів. Основні причини утворення дефектів: недотримання режимів експлуатації виробу, вплив умов навколишнього середовища, моральний і фізичний знос виробу (табл. 4.4).

Навіть при незначних рівнях зовнішніх навантажень у виробках із композиційних матеріалів виникають мікротріщини, які разом із різними видами впливів (вологість, температура) суттєво знижують фізико-механічні властивості композиційних матеріалів. Тріщина є джерелом концентрації напружень, це призводить до зниження несної здатності виробу, що експлуатується, особливо при змінних напруженнях. Унаслідок відмінності показників деформативності та коефіцієнтів лінійного теплового розширення відбувається порушення адгезійного зв'язку полімеру й наповнювача, утворення мікротріщин у сполучному, поява розривів волокон, забарвлення сполучного тощо. Крім того, надмірне зволоження призводить до гігроскопічного капілярного поглинання води, що спричиняє додаткове зростання тріщин і неможливість їх «заліковування».

Особливо сильно на передчасний вихід з ладу різних деталей, виробів і конструкцій з композиційних матеріалів впливають помилки, допущені під час проєктування. Ці помилки виявляються переважно під час експлуатації виробів.

Вибір правильної форми виробу, забезпечення стабільного волого-температурного режиму робочих ділянок виробу й чітка регламентація експлуатації виробу сприяють підвищенню його довговічності.

Таблиця 4.4

Дефекти, що виникають у процесі експлуатації виробу

Фактори утворення дефектів	Дефекти	Методи контролю
Недотримання режимів експлуатації виробу	Поверхневі тріщини, фарбування сполучного, розшарування	УЗ, ІЧ
Зміна умов навколишнього середовища	Потрапляння внутрішньої (гігроскопічної) вологи, температурна деструкція	МРВ, Е
Фізичний знос виробу	Деструкція матеріалу, розшарування, зниження несної здатності	УЗ, ІЧ, МРВ

Полімероармовані КМ характеризуються пористістю. Крім пор у композиційних матеріалах виникають мікротріщини, які зазвичай мають вигляд звивистої ламаної лінії з відгалуженнями або без них.

Поява тріщин пов'язана з напруженнями під час усадки сполучного в процесі полімеризації. Так, хімічна реакція затвердіння поліефірного сполучного є екзотермічною, тобто супроводжується виділенням великої кількості тепла, унаслідок чого температура всередині матеріалу може становити 80 °С.

У процесі охолодження виробів через різні коефіцієнти температурного розширення волокон і смоли виникає концентрація напружень, що призводить до появи тріщин у сполучному. Щоб запобігти тріщиноутворенню, необхідно суворо дотримуватися товщини шару смоли на тканині і не допускати надмірного прискорення реакції затвердіння.

Тріщини полімерного сполучного можуть виникати внаслідок концентрації напружень через щільне упакування арматури їх паралельних волокон (при двовісному розтягуванні). Деформація КМ перпендикулярно до волокон спричиняє значну деформацію смоли між сусідніми волокнами й утворення тріщин.

Контрольні запитання

1. Перелічіть переваги й недоліки руйнівних і неруйнівних методів контролю якості.
2. Які неруйнівні методи застосовуються для контролю якості композиційних матеріалів?
3. Перелічіть основні критерії вибору методу контролю якості.
4. Які особливості структури КМ необхідно враховувати під час вибору методу контролю якості?

5. ВІЗУАЛЬНО-ОПТИЧНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

Візуально-оптичний метод неруйнівного контролю ґрунтується на візуальному огляді об'єктів контролю неозброєним оком або за допомогою оптичних засобів (лупи, мікроскопа, ендоскопа, бороскопа тощо). Цей метод застосовується для виявлення різних поверхневих дефектів, структурних змін і деформацій деталей та вузлів авіаційної техніки, відхилень від заданої геометричної форми, для огляду закритих конструкцій, важкодоступних місць літаків і гелікоптерів. Контроль проводиться шляхом спостереження деталей у світлі. Оптичні засоби контролю використовуються на різних стадіях ремонту й експлуатації авіаційної техніки.

Основні типи дефектів, що виявляються:

- поверхневі тріщини;
- корозійні й ерозійні пошкодження;
- розшарування;
- відкриті раковини;
- зони змінення структури матеріалу, що спричиняють змінення оптичних властивостей поверхні;
- місця течі з масляних і паливних трубопроводів, резервуарів, заглушок, нарізних з'єднань.

Основними перевагами цього методу є простота контролю, нескладне устаткування, порівняно мала трудомісткість. Тому візуально-оптичний метод є найбільш поширеним при контролі якості авіаційних конструкцій і широко використовується в умовах експлуатації під час планових робіт, оглядів до та після польотів і непланових оглядів у разі аварій. Контролюють елементи крила у навантажених зонах, вузли кріплення елеронів, закрилків, вузли шасі, елементи кріплення двигунів тощо.

Однак візуально-оптичний контроль має недостатньо високу достовірність і чутливість.

За способом реєстрації дефекту розрізняють три групи оптичних приладів: детекторні, візуальні й комбіновані. При використанні візуальних приладів (лупи, мікроскопів, ендоскопів, приладів вимірювання лінійних і куткових розмірів тощо) приймачем є око. У детекторних приладах приймачами є фотоемульсії, люмінесцентні речовини, електронні прилади тощо. Комбіновані прилади використовуються для візуального огляду й огляду за допомогою детектора.

При візуально-оптичному контролі використовують лупи, лупи з підсвічуванням (мікролампа розташована в зоні фокусу лупи), телескопічні лупи (для віддалених деталей). Для огляду внутрішніх порожнин об'єктів при утрудненому прямому доступі використовують гнучкі ендоскопи, жорсткі ендоскопи (бороскопи) і відеоскопи. Такі прилади мають різний діаметр і довжину робочої частини та можливість запису фото- або відеозображення контрольованої поверхні.

Технічна ендоскопія – це сучасна методика неруйнівного контролю матеріалів та обладнання шляхом візуального огляду поверхонь і вузлів технічних засобів у випадку, коли доступ до цих поверхонь утруднений, якщо огляд здійснюється за допомогою звичайних засобів вимірювання. Залежно від ступеня доступності для проведення оглядів застосовуються різні види ендоскопів. Ендоскопи використовуються для контролю стояків шасі літаків, силових елементів крила, паливних резервуарів, шестерень пневматичних редукторів систем.

Ендоскопи

Універсальні волоконно-оптичні ендоскопи призначені для контролю важкодоступних зон і закритих порожнин шляхом візуального огляду.

Ендоскопи мають гнучкий робочий модуль різних діаметрів і довжин з керованим (дистальним) кінцем. Робоча частина ендоскопа є гнучкою оболонкою, усередині якої укладено два волоконно-оптичні джгути. Один призначений для передавання зображення, інший – для передавання світлового потоку, що створює необхідний рівень освітленості досліджуваного об'єкта.

На рис. 5.1 зображено ендоскоп серії ЕТГ (гнучкий технічний ендоскоп), який має такі технічні характеристики:

- діаметр робочої частини – 4...10 мм;
- довжина робочої частини – 500...2700 мм;
- кут поля зору – 60°;
- кут відхилення дистального кінця – 180°;
- діапазон робочих температур – (-5...+45) °С.

Для всіх ендоскопів реалізовано кут відхилення керованого дистального кінця на $\pm 180^\circ$ (рис. 5.2).



Рис. 5.1. Ендоскоп серії ЕТГ



Рис. 5.2. Можливе відхилення керованого дистального кінця ендоскопів на $\pm 180^\circ$

Ендоскоп серії ЕТГА (гнучкий технічний ендоскоп з автономним живленням) має такі технічні характеристики:

- діаметр робочої частини – 6...8 мм;
- довжина робочої частини – 500...1500 мм;
- кут поля зору – 60°;
- кут відхилення дистального кінця – 180°;
- діапазон робочих температур – (-5...+45) °С.

Відеоендоскопи

Відеоендоскопи (*відеоскопи*) мають на робочому кінці мініатюрну відеокамеру, що дає змогу отримувати на екрані монітора чітке зображення. За допомогою відеоендоскопа можна документувати результати контролю.

Універсальний гнучкий відеоскоп IPLEX II SX (рис. 5.3) – компактний та універсальний прилад з можливістю заміни робочих частин. Змінні робочі частини (зонди) мають різний діаметр і довжину. «Гладкий» зонд має зовнішній діаметр 6 мм і довжину 9,6 м, «наддовгий» зонд – зовнішній діаметр 6 мм і довжину 19 м. До відеоскопа IPLEX II SX випускають також змінні робочі частини діаметром 4,4 мм завдовжки 4 м і діаметром 6,2 мм завдовжки 3,5 м з внутрішнім інструментальним каналом. Усі змінні робочі частини виконують вимірювальні функції. Відеоскоп Olympus IPLEX дає змогу задокументувати до 4800 цифрових повнокольорових знімків на кожній флеш-карті. Завдяки цьому можна проводити повторні вимірювання дефектів за допомогою спеціальної програми.



Рис. 5.3. Універсальний гнучкий відеоскоп IPLEX II SX (Olympus)

Бороскопи

Жорсткі ендоскопи серії ЕТЖ (бороскопи) (рис. 5.4) призначені для візуального контролю порожнин, глибоких отворів тощо зі збільшенням у 1,5–2,5 рази.

Високу якість зображення забезпечує оптична система із твердотільних лінз інформаційного каналу бороскопа. Підсвічування робочої зони забезпечується від зовнішнього джерела світла через волоконно-оптичний світловод.

Технічні характеристики жорстких ендоскопів серії ЕТЖ (бороскопів):

- діаметр робочої частини – 1,7...4 мм;
- довжина робочої частини – 200...300 мм;
- кут поля зору – 0°, 30°, 70°, 90°;
- діапазон робочих температур – (-5...+45) °С .

Модельний ряд бороскопів 5-ї серії дуже різноманітний і являє собою широкий спектр приладів різних діаметрів і довжин, напрямків огляду і кутів поля зору.



Рис. 5.4. Жорсткі ендоскопи серії ЕТЖ

Контрольні запитання

1. Які дефекти можна виявити візуально-оптичним методом?
2. Яке обладнання застосовується під час контролю візуально-оптичним методом?
3. Перелічіть переваги й недоліки візуально-оптичного методу.

6. ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ У ВИРОБАХ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ КАПІЛЯРНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

Капілярний контроль – метод неруйнівного контролю, що базується на капілярному проникненні індикаторних рідин (пенетрантів) у порожнини поверхневих і наскрізних несучільностей матеріалу об'єкта контролю. Капілярний метод контролю є найбільш простим і доступним методом

неруйнівного контролю, широко застосовується для виявлення наскрізних або поверхневих несучільностей. Метод дає змогу визначити протяжність, напрямок і характер поширення дефекту у виробах контролю (рис. 6.1). Вироби, виготовлені з металів, пластмас та інших твердих конструкційних матеріалів, можуть мати будь-які розміри та форми.

Основні капілярні методи й пенетранти класифікуються так: люмінесцентний; кольоровий; люмінесцентно-кольоровий; яскравий (ахроматичний).

Технологічні стадії контролю для всіх методів є однаковими, але остаточна стадія огляду та розбракування має деякі відмінності: при кольоровому методі контрольована поверхня для огляду висвітлюється природним світлом, а при люмінесцентному – ультрафіолетовим світлом залежно від комплекту дефектоскопічних матеріалів.

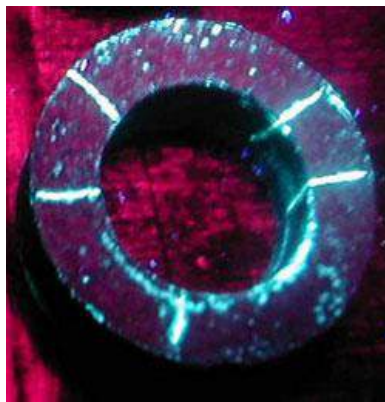


Рис. 6.1. Дефекти поверхні, що виявлені люмінісцентним методом неруйнівного контролю

Люмінесцентно-кольоровий метод потребує освітлення видимим світлом та ультрафіолетового опромінення. При цьому кольоровим методом дефекти виявляються у вигляді червоних точок і ліній на білому фоні, а люмінесцентним – у вигляді жовто-зелених люмінесцентних ліній і точок на чорному фоні.

6.1. Основні принципи методу

Підготовка об'єктів до контролю полягає в очищенні контрольованої поверхні й порожнин дефектів від усіляких забруднень, лакофарбових покриттів тощо.

Процес капілярного контролю складається з трьох основних етапів (рис. 6.2): нанесення на контрольовану поверхню проникної індикаторної рідини (пенетранту); видалення надлишків пенетранту з поверхні; виявлення індикацій. При проведенні капілярного контролю використовують комплект дефектоскопічних матеріалів – пенетрант, очисник, проявник. На контрольовану поверхню виробу наносять рідину з великою змочувальною здатністю.

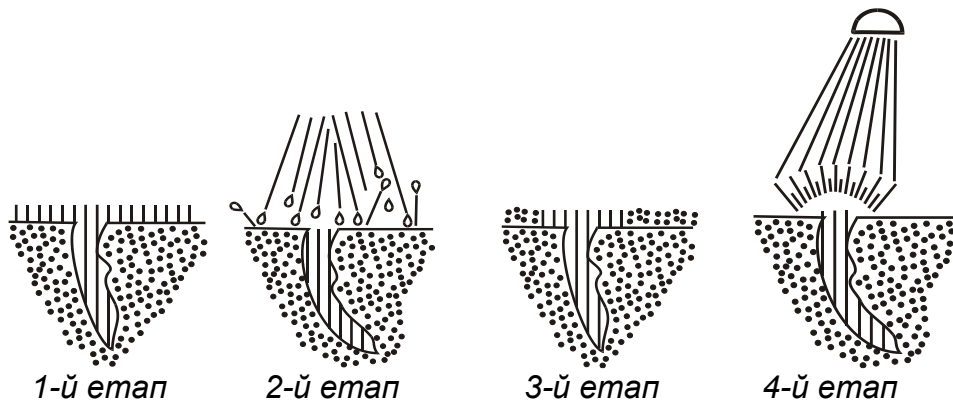


Рис. 6.2. Етапи проведення капілярного контролю

У цю рідину додають як індикатор додають або барвник, або люмінесцентну домішку (люмінофор). Індикаторний пенетрант проникає у відкриті поверхневі дефекти, після чого його надлишок видаляється з поверхні об'єкта контролю за допомогою різних очисників. Потім поверхню виробу покривають проявником, як такий можна використовувати білу фарбу або порошок, що характеризується високою адсорбувальною здатністю. Адсорбувальна речовина витягує з дефекту рідину, що залишилася там, набуває яскравого кольору барвника в місці розташування дефекту або змочується рідиною з люмінесцентною домішкою, яка при опроміненні ультрафіолетовими променями починає флюоресціювати. Отриманий індикаторний малюнок помітний набагато краще, ніж дефект. Індикації, що виявилися, мають бути правильно оцінені, а контрольовані деталі після завершення контролю повністю очищені від залишків дефектоскопічних матеріалів.

6.2. Дефектоскопічні матеріали та способи їх нанесення

Залежно від конфігурації виробу (ступеня складності геометрії поверхні) існує кілька способів нанесення дефектоскопічних матеріалів, наприклад зануренням виробу у ванну або аерозольним розпиленням. Найчастіше для нанесення пенетранту застосовуються герметичні аерозольні балончики (рис. 6.3). Балончики зручні для зберігання й застосування. Завдяки їх використанню немає потреби користуватися пензлем, отже, економиться матеріал. Пенетрант може бути нанесений лише на окремі ділянки, де потребується контроль (рис. 6.4).

До складу пенетранту можуть входити спеціальні флуоресцентні речовини, тобто речовини, що дають яскраве світіння при опроміненні ультрафіолетовим світлом. У цьому випадку індикації зазвичай виявляються у вигляді жовто-зелених слідів, що світяться. Крім того, багато виробників випускають пенетранти, що поєднують у собі властивості кольорових і флуоресцентних матеріалів, – флуоресцентно-кольорові пенетранти. У цьому випадку дослідження результатів контролю можна проводити як при звичайному освітленні, так і в ультрафіолетовому світлі. Однак при контролі в

ультрафіолетовому світлі виявлення дефектів буде кращим, ніж при звичайному освітленні.



Рис. 6.3. Аерозольні балончики для нанесення пенетранту

Пенетрант можна видалити сухою або змоченою водою серветкою або очисником. При використанні аерозолів проявник завжди наноситься розпиленням відразу після сушіння. Проявник необхідно наносити тонким рівномірним шаром. Щоб проявник міг витягнути пенетрант, що знаходиться в порожнині дефектів, на поверхню, він має бути вологим. Товщина шару проявника має бути достатньою для того, щоб забезпечити адсорбцію барвника пенетранту і контрастний білий фон для виявлення дефектів червоним пенетрантом.

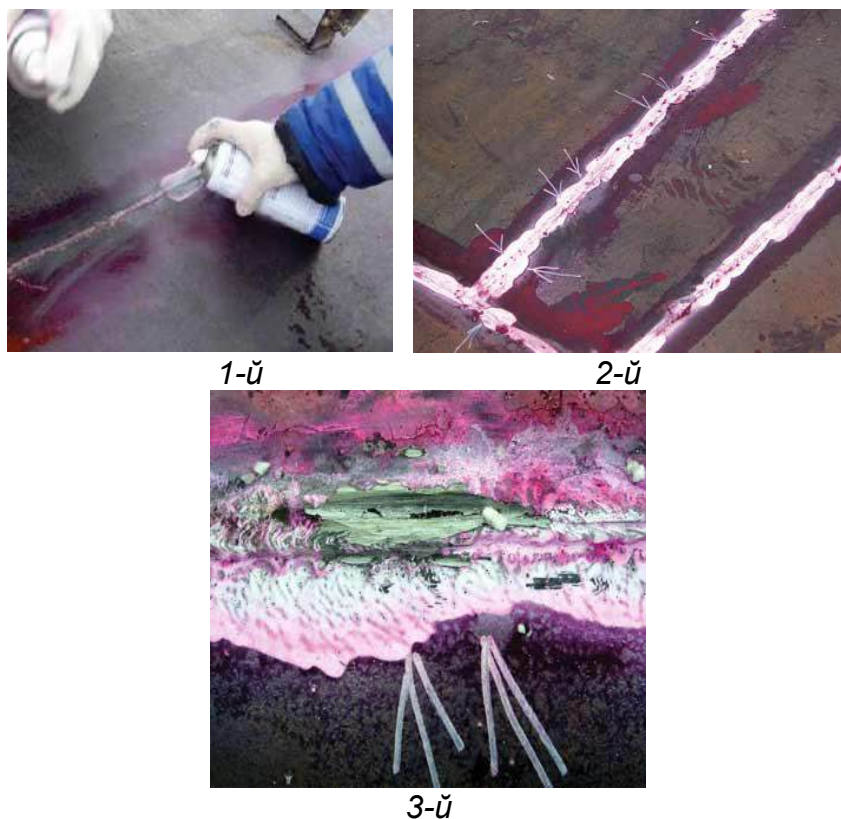


Рис. 6.4. Етапи нанесення пенетранту

Але шар не має бути занадто товстим, інакше він приховуватиме або затемнюватиме червоні індикаторні сліди дефектів. Тому краще нанести два або три тонкі шари проявника, ніж один товстий.

Індикаторні сліди дефектів починають виявлятися, як тільки проявник висохне, але остаточний контроль проводиться через 15...20 хв, коли дефекти виявляються повністю.

Швидкість прояву, глибина кольору і навіть малюнок індикаторного сліду вказують на тип дефекту. Червоні свідчать про наявність тріщини. Тонкі тріщини виявляються у вигляді точок, що утворюють лінію, пористість – у вигляді розсіяних червоних точок.

Критерії відбракування деталі зазвичай визначаються нормативними документами залежно від умов експлуатації деталі, розміру дефекту, його положення та типу індикаторного сліду. У разі капілярного методу застосовується таке маркування дефектів:

а) за кількістю дефектів:

- А – поодинокі,
- Б – множинні,
- В – суцільні;

б) за напрямом дефектів:

- || – дефекти, паралельні до напрямку виробу,
- $\perp$ – дефекти, перпендикулярні до напрямку виробу,
- Z – дефекти, розташовані під кутом до напрямку виробу.

Проявник, що залишився на поверхні, видаляють серветкою, змоченою водою, а потім сухою. Якщо матеріал має схильність до кородування, то після цього має бути проведене його оброблення, що запобігає корозії.

Залежно від вимог, що ставляться до об'єкта контролю, матеріалу виробу, його стану та умов контролю, а також вимог до роздільної здатності необхідно вибирати дефектоскопічні матеріали потрібного типу та класу чутливості. Їх укомплектовують у цільові набори, до складу яких входять сумісні дефектоскопічні матеріали: індикаторний пенетрант, очисники об'єкта контролю від пенетранту та проявник пенетранту.

Сумісність дефектоскопічних матеріалів у наборах є обов'язковою.

При виявленні наскрізних дефектів процедура відрізняється від стандартної тим, що на одну поверхню об'єкта контролю наноситься пенетрант, а на протилежну поверхню – проявник. Ця технологія, яку називають контролем течошуканням, застосовується для контролю тонкостінних резервуарів, трубопроводів і баків. Одну сторону, наприклад, внутрішню поверхню резервуара, обробляють пенетрантом, іншу – покривають проявником. Пенетрант, що забарвлює, проходить через дефект, і, коли він досягає протилежної сторони, дефект виявляється у вигляді червоного індикаторного сліду на білому фоні.

Застосування методу обмежується (в основному при контролі течошуканням при виявленні наскрізних несуцільностей) межею капілярного ефекту витратних матеріалів, що наносяться, і формою капілярного проходу.

6.3. Чутливість капілярного методу контролю

Капілярний контроль має високу чутливість до поверхневих дефектів. Чутливість капілярного методу характеризується здатністю надійно (із заданою ймовірністю) виявляти мінімальний за розмірами поверхневий дефект за його індикаторним слідом.

Чутливість капілярних методів залежить від чистоти оброблення поверхні, якості підготовки поверхні деталей перед контролем, характеру дефекту, вибору методики й набору дефектоскопічних матеріалів, дотримання технології контролю, температури контрольованої деталі та навколишнього середовища тощо.

Залежно від мінімального розміру дефектів, що виявляються (ширини розкриття), встановлено чотири класи чутливості капілярних методів неруйнівного контролю: 1-й – менше 1 мкм; 2-й – 1...10 мкм; 3-й – 10...100 мкм; 4-й – 100...500 мкм. Клас чутливості встановлює розробник виробу.

Діапазон чутливості капілярної дефектоскопії обмежується верхньою і нижньою межами розмірів дефектів, що виявляються.

Верхня межа чутливості визначається максимальною величиною розкриття протяжного дефекту, що обмежує його виявленість певними дефектоскопічними матеріалами та відповідною технологією внаслідок інтенсивного вимивання індикаторної рідини з гирла порожнини дефекту.

Нижня межа чутливості визначається мінімальною величиною розкриття протяжного дефекту, що обмежує його виявленість певними дефектоскопічними матеріалами і відповідною технологією через втрату забарвлювальної здатності малої кількості індикаторної рідини.

Рівні чутливості пенетрантних систем визначаються таким чином:

- рівень 1/2 – ультранизька чутливість;
- рівень 1 – низька;
- рівень 2 – середня;
- рівень 3 – висока;
- рівень 4 – надвисока.

Нумерація рівнів чутливості за MIL-I-25135E і AMS-2644 та за ДСТУ не збігається, за американським стандартом рівень 1 – низький, за ДСТУ клас чутливості 1 – найвищий. Рівень чутливості дефектоскопічних матеріалів оцінюють шляхом порівняння результатів кваліфікаційних випробувань з показниками відповідних еталонних матеріалів за кількістю та яскравістю індикаторних слідів виявлених дефектів на випробувальних панелях.

Вартість матеріалів безпосередньо пов'язана з чутливістю системи, і використання чутливості, вищої, ніж потрібно, призводить до збільшення витрат.

Перевіряючи функціонування всієї технологічної системи капілярного контролю, часто використовують універсальний тест-зразок Z-5 (PSM-5), відомий також як панель ТАМ. Ці тест-зразки не є засобом визначення чутливості, їх не можна використовувати для порівняння чутливості різних пенетрантів. Вони є засобом перевірки технології капілярного контролю за

відповідним класом чутливості й можуть бути використані лише до однієї пенетрантної системи.

Тест-панель PSM-5 використовується для контролю за капілярним процесом в цілому. Тест-панель виготовляється з нержавіючої сталі (товщина – 2,3 мм, розмір – 10 x 15 см). З робочого боку тест-панель хромована і має п'ять зіркоподібних дефектів. Розміри дефектів розташовуються в міру їх збільшення. При капілярному контролі дефекти виявляються у вигляді зіркоподібних індикацій. Найбільший дефект стає видимим після оброблення низькочутливим пенетрантом. Найменший дефект важко побачити навіть під час використання високочутливих пенетрантів. Рисунок дефектів варіюється від панелі до панелі.

Контрольний зразок (EN ISO 3452-3) використовується для визначення чутливості пенетрантних систем і складається з чотирьох тест-панелей, що являють собою бронзові пластини розміром 100 x 35 x 2, покриті NiCr-шаром з такою товщиною покриття: 10, 20, 30, 50 мкм. У NiCr-покритті нанесено поперечні тріщини, глибина яких відповідає товщині NiCr-покриття. Відношення ширини тріщин до їх глибини становить 1:20. Тест-панелі з глибиною тріщин 10, 20, 30 мкм використовуються для контролю чутливості флуоресцентних пенетрантних систем. Чутливість контрастних пенетрантних систем визначається за допомогою панелей із тріщинами з глибиною 30 і 50 мкм.

Для контролю ступеня змивання флуоресцентного пенетранту використовується тест-панель, розділена на чотири сегменти (25 x 3 мм) з різним ступенем шорсткості (2,5; 5; 10 і 15 мкм), над якими розташовані п'ять зіркоподібних еталонів тріщин.

Залежно від необхідної продуктивності й маси виробу може бути запропонований різний ступінь автоматизації ділянки контролю: від монолітних постів контролю до автоматизованих ліній замкнутого циклу транспортування виробів, наприклад, по рольгангах у спеціальних транспортувальних кошиках або за допомогою кронштейнів, які переміщуються по монорейках вручну або приводяться в рух ланцюговим приводом; пристроями підняття й опускання виробу у ванну з реактивами або системою розпилювачів, установлених по периметру герметичної kabіни (рис. 6.5).

Переваги капілярного контролю:

- висока чутливість виявлення дефектів;
- широкий спектр контрольованих матеріалів;
- перевірка деталей складної геометричної форми;
- можливість застосування різних методик з різною чутливістю;
- висока достовірність і відтворюваність результатів;
- простота й невисока вартість;
- висока продуктивність при потоковому контролі.

Недоліки капілярного контролю:

- виявлення лише поверхневих дефектів;
- незастосовність до пористих матеріалів;
- необхідність попереднього очищення контрольованої поверхні від

забруднень, що знижують ефективність контролю;

- неможливість здійснення контролю виробу, на поверхню якого нанесено захисне покриття;
- зниження чутливості методу через низьку температуру;
- імовірність невиявлення дефектів з великою шириною (понад 500 мкм) розкриття капілярними методами;
- зниження виявлення дефектів через зменшення часу контакту з пенетрантами;
- хімічна нестійкість до пенетранту деяких матеріалів (гум і пластмас);
- залежність якості проведення контролю від кваліфікації виконавця.



Рис. 6.5. Механізована лінія з транспортною системою рольгангів і механізмів підняття/опускання виробу у ванну з реактивами

Контрольні запитання

1. Як здійснюється контроль за якістю капілярним методом? Перелічіть технологічні стадії контролю.
2. Які дефекти можна виявити капілярним способом?
3. Які існують різновиди капілярного контролю якості? У чому полягають його особливості?
4. Назвіть переваги й недоліки капілярного методу. Які обмеження має цей метод?
5. Від чого залежить чутливість капілярного методу? Що таке верхня та нижня межа чутливості капілярного методу? Які класи чутливості встановлені для капілярного методу?
6. Назвіть дефектоскопічні комплекси, матеріали й допоміжні засоби для капілярного методу.

7. АКУСТИЧНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВИРОБІВ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Під час проведення неруйнівного контролю різних виробів ставляться різні завдання. Це привело до розроблення та використання різних акустичних методів контролю. Акустичні методи набувають усе ширшого застосування і становлять понад 60 % від усіх інших методів неруйнівного контролю.

7.1. Фізичні основи акустичних методів контролю

Під час проведення контролю якості виробів акустичними методами використовується інформація, отримана за результатами аналізу параметрів поширення пружних коливань у контрольованому об'єкті.

Під час застосування акустичних методів контролю виробів з композиційних матеріалів виникають труднощі, пов'язані, по-перше, зі зниженням чутливості у зв'язку з високим згасанням пружних коливань. Через значне згасання коливань у композиційних матеріалах при ультразвуковому контролі необхідно використовувати збуджувані коливання з частотою менше 1 МГц. Однак зменшення частоти одночасно зменшує роздільну здатність і чутливість ультразвукового контролю. По-друге, великий технологічний розкид густини, неоднорідність структури, анізотропія акустичних характеристик, низька якість контактної поверхні призводять до високого рівня структурних перешкод, порівнянних або таких, що перевищують рівень сигналів від дефектів.

Можна виокремити сім основних акустичних методів неруйнівного контролю: ехометод, тіньовий, резонансний, імпедансний, метод вільних коливань, велосиметричний, акустико-топографічний.

7.2. Ультразвукова дефектоскопія

Для виявлення дефектів у контрольованому виробі посилають ультразвукові хвилі (безперервно або у вигляді коротких імпульсів) і реєструють параметри хвиль, що пройшли через виріб або відбитих від поверхонь, на яких змінюються акустичні характеристики матеріалу. В ультразвуковій дефектоскопії використовуються хвилі різного виду: поздовжні, поверхневі, згинальні та крутні, що випромінюються в безперервному або імпульсному режимі.

Порушення й приймання ультразвуку. Існують різні методи збудження ультразвукових хвиль у досліджуваному об'єкті. Для ультразвукового контролю зазвичай застосовуються методи, у яких використовується п'єзоелектричний ефект (рис. 7.1).

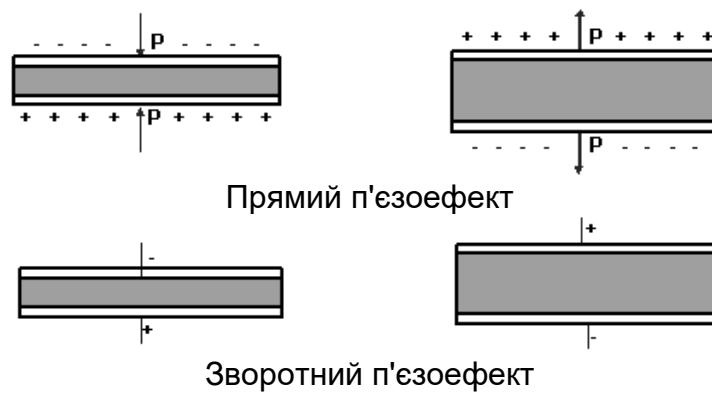


Рис. 7.1. Прямий і зворотний п'єзоефект

У цьому випадку ультразвукові коливання збуджуються за допомогою перетворювача, який перетворює електричні коливання на акустичні (зворотний п'єзоелектричний ефект). Відбиті сигнали, що потрапили на п'єзопластину, перетворюються на електричні (прямий п'єзоелектричний ефект) і реєструються вимірювальними ланцюгами.

Активний елемент п'єзоелектричного перетворювача (ПЕП) виготовляють з матеріалу, що має п'єзоелектричні властивості, торцеві поверхні його металізовані і є електродами. При подаванні на них електричної напруги товщина п'єзоелемента змінюється внаслідок зворотного п'єзоелектричного ефекту. Якщо напруга є знакозмінною, то п'єзоелемент коливається в такт із цими змінами, створюючи в навколишньому середовищі пружні коливання, тобто працює як випромінювач. І навпаки, якщо п'єзоелемент сприймає механічні коливання, то на його обкладках внаслідок прямого п'єзоефекту виникають електричні розряди.

До основних характеристик методу належать: чутливість, максимальна глибина прозвучування, мінімальна глибина (мертва зона), роздільна здатність, точність вимірювання відстані, продуктивність контролю.

Чутливість методу ультразвукової дефектоскопії визначається мінімальним розміром дефекту, що знаходиться на максимальній глибині і чітко реєструється приладом. Кількісно чутливість визначається *порогом чутливості*. Для ехометоду – це мінімальна площа штучного дефекту типу плоскодонного отвору, який виявляється при контролі. Поріг чутливості обмежується двома головними факторами: чутливістю апаратури та рівнем перешкод. Залежно від структури матеріалу змінюватиметься і поріг чутливості.

Чутливість методу ультразвукової дефектоскопії K залежить від частоти ультразвукових коливань f , товщини виробу в певному перерізі, акустичних характеристик матеріалу контрольованого виробу (коефіцієнта згасання δ і рівня структурних шумів).

Величина K збільшується зі збільшенням f , оскільки при зменшенні λ/d (d – розмір дефекту) збільшується енергія звукової хвилі, відбитої від поверхні дефекту, і підвищується спрямованість випромінювання й приймання. Однак поряд з цим при збільшенні частоти збільшується також згасання

коливань внаслідок поглинання й розсіювання та рівень структурних шумів, що призводить до зниження чутливості. Унаслідок одночасного впливу перелічених факторів залежність чутливості K від частоти ультразвукових коливань f має вигляд кривої з максимумом, тобто найвища чутливість відповідає певній частоті.

Максимальна глибина прозвучування визначається максимальною відстанню від дефекту заданого розміру, на якій він впевнено виявляється, і обмежується умовою, щоб сигнал від дефекту був більшим за мінімальний сигнал, що реєструється приладом, за рівень перешкод. Ця величина також визначається параметрами апаратури. У технічних характеристиках приладу як максимальна глибина прозвучування наводиться максимальна тривалість розгортки дефектоскопа. Максимальна глибина прозвучування обмежується тими самими факторами, які перешкоджають підвищенню чутливості.

Мінімальна глибина прозвучування, або «мертва зона», – мінімальна відстань від перетворювача або поверхні виробу до дефекту, коли він чітко виявляється, не зливаючись із зондувальним імпульсом або імпульсом від поверхні введення ультразвуку.

Роздільна здатність – мінімальна відстань між двома однаковими дефектами, коли вони реєструються окремо.

Продуктивність контролю визначається кроком і швидкістю сканування (переміщення) перетворювача. Оцінюючи час контролю, ураховують і час вивчення дефекту.

Найбільшого поширення у практиці ультразвукової дефектоскопії набули імпульсні методи, зокрема, ехометод і метод звукової тіні (тіньовий метод). Розглянемо основні методи, що застосовуються в ультразвуковій дефектоскопії:

1. *Ехоімпульсний метод*, що дає змогу реєструвати ехосигнали від дефектів (рис. 7.2).

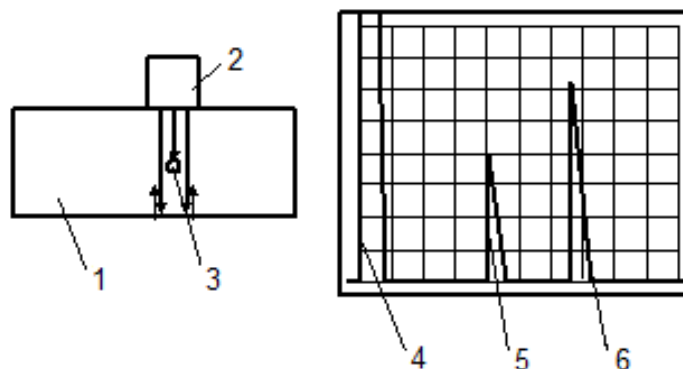


Рис. 7.2. Схема контролю ехоімпульсним методом:

1 – контрольована деталь; 2 – ПЕП; 3 – дефект; 4 – зондувальний імпульс; 5 – ехосигнал від дефекту; 6 – донний сигнал

2. *Дзеркальний ехометод*, що ґрунтується на дзеркальному відбитті

імпульсів від дефектів, орієнтованих вертикально до поверхні, з якою ведеться контроль.

3. *Ревербераційний метод*, призначений для контролю шаруватих конструкцій і який базується на аналізі тривалості реверберації ультразвукових імпульсів в одному з шарів.

4. *Тіньовий метод*, що ґрунтується на зменшенні амплітуди хвилі, що пройшла під впливом дефекту (рис. 7.3).

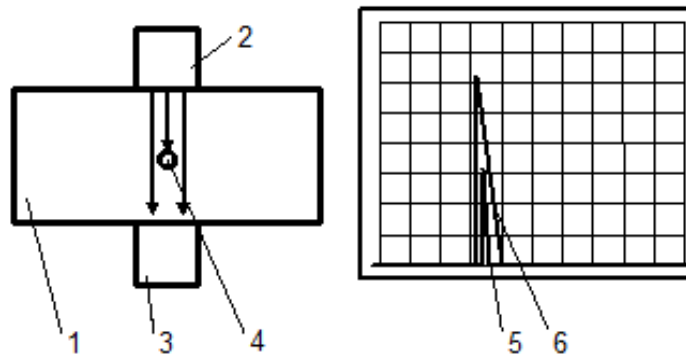


Рис. 7.3. Схема контролю тіньовим методом: 1 – контрольована деталь; 2 – випромінювальний ПЕП; 3 – приймальний ПЕП; 4 – дефект; 5, 6 – донні сигнали за наявності та відсутності дефекту

5. *Часовий тіньовий метод*, що ґрунтується на запізнюванні імпульсу, спричиненому обгинанням дефекту.

6. *Дзеркально-тіньовий метод* (рис. 7.4), що базується на ослабленні сигналу, відбитого від протилежної поверхні виробу (донного сигналу).

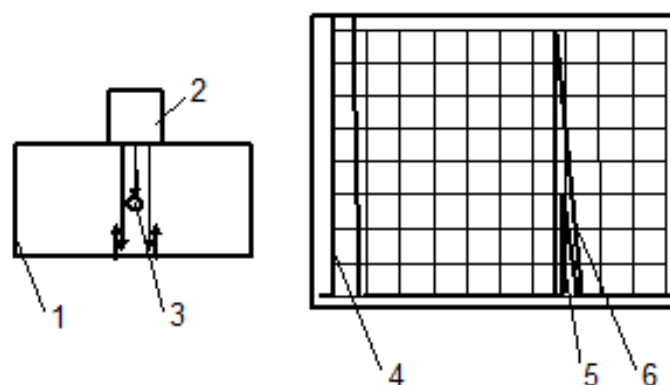


Рис. 7.4. Схема контролю дзеркально-тіньовим методом: 1 – контрольована деталь; 2 – ПЕП; 3 – дефект; 4 – зондувальний імпульс; 5, 6 – донні сигнали за наявності та відсутності дефекту

7. *Велосиметричний метод*, що базується на зміні швидкості пружних хвиль за наявності дефекту.

7.2.1. Ехоімпульсний метод

Суть ехоімпульсного методу полягає в тому, що в контрольований об'єкт посилаються короткі акустичні імпульси і реєструються інтенсивність і час надходження ехосигналів, відбитих від поверхні виробу і від різного роду дефектів.

Випромінені ультразвукові імпульси називають зондувальними. Ознакою дефекту є наявність ехосигналу, відбитого від несучільності. Відбиті ультразвукові імпульси несуть інформацію про наявність дефекту, його віддаленість від випромінювача та розміри. Розміри й місцезнаходження дефекту оцінюють за амплітудою й часом надходження відбитого ехосигналу.

Амплітуда сигналу, відбитого від дефекту, – найпростіша вимірювана характеристика, що залежить від розмірів, орієнтації, конфігурації дефекту, глибини його розташування.

Глибина розташування дефекту при ехоконтролі може бути визначена з високим ступенем точності. Якщо відомо тип ультразвукової хвилі та швидкість V її поширення в матеріалі контрольованого об'єкта, то шлях, пройдений ультразвуковим імпульсом від випромінювача до відбивача і назад, визначається формулою

$$2r = Vt,$$

де t – час затримки прийнятого відбитого імпульсу відносно зондувального; r – відстань від випромінювача до відбивача. Повний час затримки t складається з часу пробігу ультразвуку у виробі, часу пробігу ультразвуку через протектор (або призму) перетворювача і шар контактної рідини, а також з часу затримки в електронному блоці дефектоскопа. Однак час цих затримок є малим порівняно з часом пробігу ультразвукового імпульсу в контрольованому виробі, і ним можна знехтувати.

Переваги ехоімпульсного методу:

- завдяки великій кількості контрольованих параметрів (амплітуда, фаза, частота, швидкість поширення хвиль та ін.) ультразвукова дефектоскопія є одним з найбільш універсальних методів неруйнівного контролю;
- можливість вирішувати велику кількість завдань: визначати розмір, орієнтацію, конфігурацію дефекту, глибину його розташування;
- простота в застосуванні;
- висока чутливість;
- визначення координат дефектів з високою точністю;
- можливість контролю за одностороннім доступом до виробу;
- забезпечення високої продуктивності й достовірності контролю з можливістю документування результатів, оброблення на ЕОМ, формування баз даних і виведення інформації на паперові носії.

Недолік цього методу – наявність неконтрольованої «мертвої зони», розташованої під ПЕП.

Принцип роботи ехоімпульсного дефектоскопа (рис. 7.5): генератор 2 створює електричні імпульси з частотою f , що задаються синхронізатором

1, і збуджує п'єзоелемент шукача 4. Випромінені шукачем УЗ-хвилі вводяться через поверхню «а» у контрольований виріб контролера. Відбиваючись від протилежної поверхні «б» і повертаючись до шукача, хвилі перетворюються на імпульси електричної напруги, які після проходження через приймальний тракт відображаються на екрані ЕПТ 6 у вигляді піка. Блок розгортки 3 дає зображення сигналів у координатах «амплітуда – час», тому відстань між початковим сигналом 9 і донним сигналом 10 є пропорційним товщині виробу. Потрапляючи на дефект 8, промені частково відбиваються від нього, і на екрані ЕПТ з'являється ехосигнал 11 від дефекту. Відстань від початкового сигналу 9 до сигналу 11 є пропорційною глибині розташування дефекту. Контроль проводиться шляхом сканування шукачем поверхні контрольованого виробу.

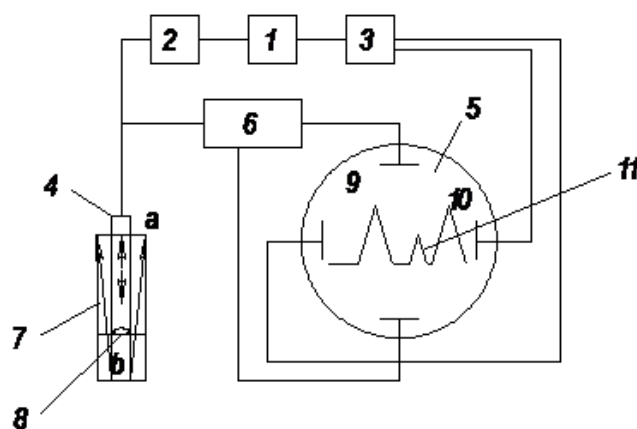


Рис. 7.5. Блок-схема еходефектоскопа: 1 – синхронізатор;
2 – генератор; 3 – генератор розгортки; 4 – шукач; 5 – приймальний тракт;
6 – індикатор (електронно-променева трубка – ЕПТ); 7 – контрольований виріб;
8 – дефект; 9 – початковий (зондувальний сигнал); 10 – донний ехосигнал;
11 – ехосигнал від дефекту

На рис. 7.6 показано ехосигнали, отримані під час контролю композиційної пластини, що використовується в аерокосмічній промисловості.

На рис. 7.6, а зображено ехосигнали від опорного зразка без дефектів. Ці два ехосигнали з високою амплітудою є відбиттям від фронтальної й тильної поверхонь виробу. На рис. 7.6, б зображено ехосигнали від виробу, пошкодженого внаслідок удару.

У цьому випадку інтервал між ехосигналами є набагато меншим, оскільки ці сигнали є відбиттям від внутрішнього розшарування. Оператор вивчає відбиття ехосигналів від непошкодженого виробу, потім порівнює його із зображенням ехосигналів від пошкодженого виробу. Будь-які змінення амплітуди або положення ехосигналів свідчать про змінення стану виробу в точці контролю. Швидкість і крок сканування вибираються з урахуванням розміру перерізу УЗ-пучка, часу, необхідного для проходження імпульсу до певної поверхні і назад, а також мінімальної кількості ехосигналів, що

пропускаються і забезпечують спрацювання сигналізатора дефектів. П'єзоелемент шукача в режимі випромінювання перетворює електричні коливання, що виробляються генератором 2, на ультразвукові, а в режимі приймання – на ультразвукові електричні.

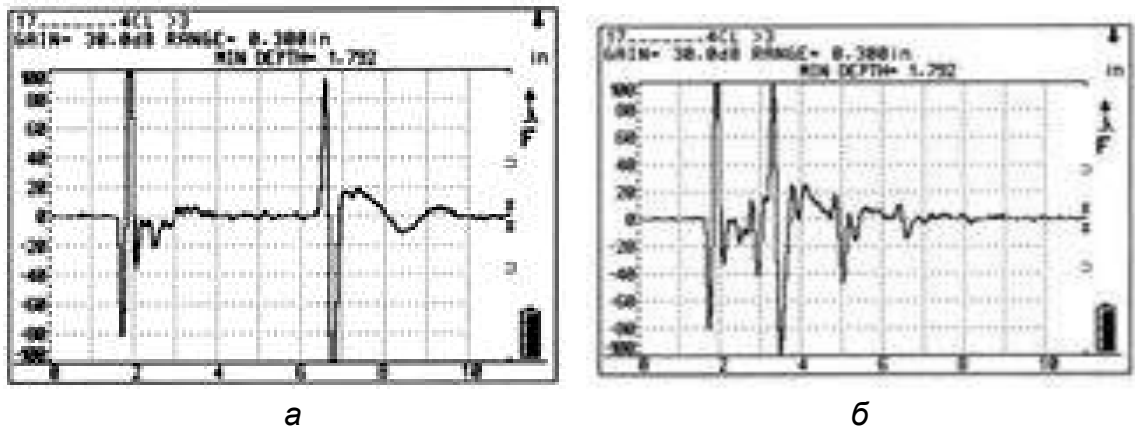


Рис. 7.6. Ехосигнали, отримані під час контролю композитної пластини:
а – ехосигнали від опорного зразка;
б – ехосигнали від виробу, у якому є дефект

7.2.2. Тіньовий метод

Тіньовий метод полягає в наскрізному прозвучуванні виробу імпульсами ультразвукових коливань. Метод ґрунтується на вимірюванні ослаблення амплітуди пружних хвиль, що пройшли через контрольований об'єкт. Порушення суцільності (тріщини, розшарування, раковини тощо) або неоднорідності КМ приводять до змінення умов поширення ультразвукових хвиль. Якщо поперечний розмір дефекту перевищує довжину хвилі, то хвиля за законами геометричної акустики практично повністю відбивається, що приводить до утворення зони звукової тіні за дефектом. У зонах з неоднорідною структурою збільшується згасання ультразвукових хвиль і підвищується рівень структурних шумів, зумовлених розсіюванням на неоднорідностях.

Для випромінювання й приймання ультразвуку використовуються два співвісно розташованих перетворювачі (рис. 7.7). Випромінювач ультразвукових хвиль, деталь, що перевіряється, і приймач утворюють акустичний тракт, по якому поширюється ультразвукова хвиля. Про наявність дефектів у контрольованому виробі судять за величиною амплітуди (рівнем) прийнятого сигналу на виході приймального перетворювача або за змінням фази або часу надходження хвилі, що огинає дефект, отже, проходить більш довгий шлях. Якщо на шляху ультразвукових хвиль від випромінювача до приймача немає дефектів, що відбивають або розсіюють ультразвукові хвилі, то рівень прийнятого сигналу є максимальним. Якщо на шляху ультразвукової хвилі є дефект (несуцільність), то рівень сигналу різко знижується, оскільки ультразвукові хвилі в зону звукової тіні проходять унаслідок дифракції хвиль.

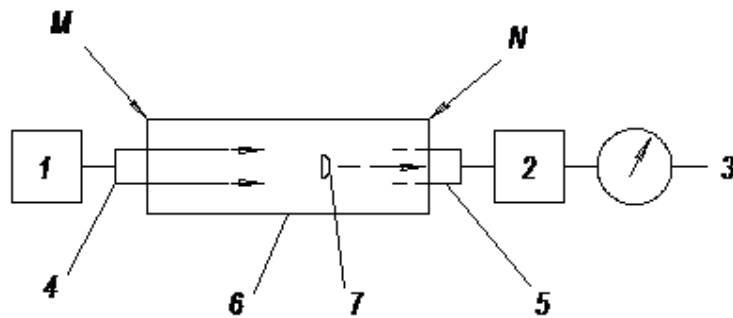


Рис. 7.7. Блок-схема ультразвукового дефектоскопа виявлення дефектів тіньовим методом: 1 – генератор; 2 – приймальний тракт; 3 – індикатор; 4 – випромінювальний шукач; 5 – приймальний шукач; 6 – контрольований об'єкт; 7 – дефект

Переваги тіньового методу:

- відсутність «мертвої зони», тому цей метод можна успішно застосовувати для контролю тонкостінних виробів;
- надійне виявлення похилих дефектів, що не дають прямого відбиття при ехометоді, оскільки цей метод характеризується низькою залежністю амплітуди сигналу від орієнтації дефекту;
- висока завадостійкість.

Недоліки:

- необхідність дотримання вимог співвісного розташування перетворювачів та їх стабільного акустичного контакту з контрольованою деталлю;
- нижча чутливість та універсальність порівняно з ехометодом;
- обмежене застосування – головним чином для контролю виробів простої форми й невеликої товщини;
- необхідність двостороннього підходу до контрольованого виробу;
- неможливість визначення глибини розташування дефекту.

7.2.3. Дзеркально-тіньовий метод

Дзеркально-тіньовий метод є комбінацією ехоімпульсного й тіньового методів. Цей метод принципово не відрізняється від тіньового, але є зручним, коли до деталі є лише односторонній доступ. При контролі цим методом використовують один або два п'єзоелектричних перетворювачі, розміщені на одній поверхні виробу. Ознакою наявності дефекту є ослаблення амплітуди (рівня) ультразвукової хвилі, що пройшла через контрольований виріб і відбилася від протилежної поверхні. Розміри дефекту оцінюють за зменшенням амплітуди «донного» сигналу.

7.2.4. Еходзеркальний метод

Еходзеркальний метод – найбільш достовірний метод для виявлення дефектів, орієнтованих вертикально. Цей метод реалізується під час

прозвучування виробу двома п'єзоелектричними перетворювачами (ПЕП), що переміщаються по поверхні таким чином, щоб фіксувати одним ПЕП сигнал, випромінюваний іншим ПЕП і двічі відбитий від дефекту й протилежної поверхні виробу (рис. 7.8).

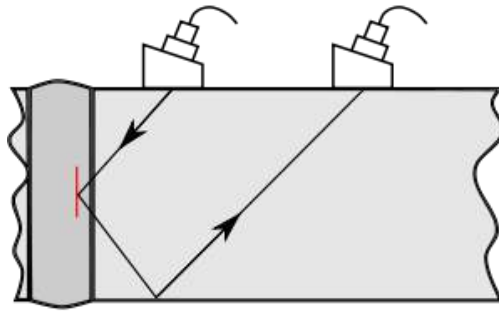


Рис. 7.8. Схема контролю еходзеркальним методом

Однією з основних переваг методу є можливість оцінювання форми дефектів розміром 3 мм і більше, які відхиляються у вертикальній площині не більш ніж на 10° . Під час оцінювання форми дефектів необхідною умовою є використання ПЕП однакової чутливості. Метод набув широкого застосування для контролю товстостінних виробів, коли потребується висока надійність виявлення вертикально орієнтованих площинних дефектів.

Методи ультразвукової дефектоскопії дають змогу виявити в композиційних матеріалах такі дефекти: розшарування й тріщини між шарами, бульбашки й газоподібні включення (пористість), тріщини, надлишковий уміст волокнистого наповнювача або сполучного, нетвердіння сполучного, змінення орієнтації волокон, зміщення армувального матеріалу, порушення співвідношення поздовжніх і продольних волокон.

Однак шляхом ультразвукової дефектоскопії неможливо визначити реальні розміри дефекту, а можна визначити лише його відбивну здатність у напрямку приймача. Ці величини корелюють, але не для всіх типів дефектів. Крім того, деякі дефекти практично неможливо виявити ультразвуковим методом через їх характер, форму або розташування в об'єкті контролю, а також складно здійснити контроль малих деталей або деталей зі складною формою.

У разі введення ультразвукових коливань у контрольований об'єкт між ультразвуковим перетворювачем і поверхнею виробу не має бути повітряного проміжку. Для усунення повітряного зазору застосовують проміжні імєрсійні середовища (машинне масло, вода, гліцерин), що ускладнює процес контролю. Під час контролю вертикальних або сильно нахилених поверхонь необхідно застосовувати густі контактні рідини, щоб запобігти їх швидкому стіканню.

Для контролю виробів із зовнішнім діаметром менше 200 мм необхідно використовувати перетворювачі з радіусом кривизни підшви, що дорівнює $(0,9...1,1)R$ (радіус контрольованого об'єкта), так звані притерті

перетворювачі, які не використовуються для контролю виробів з плоскими поверхнями.

Для підвищення роздільної здатності ультразвукового методу контролю КМ останніми роками все ширше застосовується так звана обчислювальна ультразвукова томографія. Система, що використовується в цьому випадку, забезпечує пошарове й багатопозиційне спостереження дефекту, що дає змогу виключити більшість факторів, що ускладнюють його виявлення при класичній технології УЗ-контролю. Пакет програм такої системи забезпечує збирання інформації, попереднє оброблення результатів контролю та виявлення дефектних перерізів, побудову томограм дефектних перерізів, документування результатів контролю, побудову зображень розгорнутої картини та роздруківку параметрів дефекту (рис. 7.9).



Рис. 7.9. Контроль металевих і неметалевих клеєних стільникових конструкцій

Устаткування

Сьогодні існує безліч різних ультразвукових дефектоскопів, що застосовуються практично у всіх галузях промисловості, оскільки дають змогу якісно вирішувати завдання дефектоскопії та товщинометрії. На рис. 7.10 зображено універсальний багатофункціональний багаторежимний дефектоскоп для контролю якості композитів BondMaster™ 1000e+, що може працювати в роздільно-поєднаному, резонансному й імпедансному режимах. Прилад дає змогу вибрати оптимальний варіант проведення контролю різних композитних матеріалів. Завдяки високим робочим характеристикам у поєднанні з малою масою й міцним корпусом його можна застосовувати для проведення контролю на виробництві, під час експлуатації, у центрах обслуговування та відновлення композитних матеріалів. Змінні екрани дефектоскопа забезпечують високоякісне зображення. Кольоровий і монохромний РК-екрани підходять для використання в приміщенні або на яскравому сонці. Електролюмінесцентний екран зазвичай застосовують при нормальному або недостатньому освітленні. Прилад є простим у використанні та унікальним за застосовуваними технологіями та набором функцій. Слід зазначити технологію PowerLink для автоматичного налаштування при підключенні до нього датчика. Вбудовані режими калібрування допомагають

оператору оптимізувати параметри контролю. Для кожного методу контролю пропонується широкий вибір датчиків.

На рис. 7.11 зображено низькочастотний ультразвуковий дефектоскоп УД2Н-ПМ (від 20 кГц до 2,5 МГц), який призначено для виявлення дефектів (порушення суцільності й однорідності матеріалів) у напівфабрикатах і готових виробів з композитних матеріалів, пластмас і матеріалів з великим згасанням ультразвуку, для вимірювання глибини й координат залягання дефектів, вимірювання товщини, швидкості поширення та згасання ультразвукових коливань. Можна проводити контроль із застосуванням безконтактних (таких, що працюють через повітря) перетворювачів. Прилад дає змогу реалізувати різні методики контролю виробів – з обробленням як амплітуди сигналу, так і частотного спектра або фазових складових сигналу.



Рис. 7.10. Дефектоскоп BondMaster™ 1000e+



Рис. 7.11. Низькочастотний ультразвуковий дефектоскоп УД2Н-ПМ

7.3. Ультразвукова товщинометрія

Під час оцінювання якості виробів, виконаних із композиційних матеріалів, одним з найважливіших параметрів є товщина. Зменшення товщини порівняно з розрахунковим значенням призводить до зменшення несної здатності виробу, а збільшення товщини – до збільшення маси виробу й погіршення його питомих характеристик. Тому в технічних умовах виготовлення того чи іншого вузла, агрегата або окремої деталі з КМ завжди наводяться граничні відхилення товщини виробу. Зазвичай відхилення товщини від номінального значення має становити $\pm(2...3) \%$.

Для визначення товщини обшивки, стінки й полиці лонжерона та інших елементів конструкції можна використовувати різні методи: інфрачервоний, електричний, вихрострумний, магнітний, ультразвуковий та ін. Найбільшого поширення в техніці набув метод ультразвукової товщинометрії.

Розрізняють три види контролю під час вимірювання товщини:

- 1) ручний контроль виробів з гладкими рівновіддаленими (еквідистантними) поверхнями;
- 2) ручний контроль виробів з грубими непаралельними поверхнями, наприклад виробів, внутрішня поверхня яких зазнала корозії;
- 3) автоматичний контроль у потоці.

При виконанні першого й третього видів контролю необхідною є висока точність вимірів, при виконанні другого виду контролю потребується висока чутливість, щоб можна було фіксувати відбиття від нерівної протилежної поверхні й визначати місця найбільшого локального потоншення стінок. При автоматичному контролі треба забезпечити високу продуктивність вимірювань і стежити, щоб зміна товщини не виходила за межі заданого допуску. Оскільки види контролю при вимірюванні товщини суттєво різняться, їх зазвичай проводять із застосуванням різних способів вимірювання та різних товщиномірів.

Ехометод – основний спосіб вимірювання товщини, що застосовується під час проведення *всіх трьох видів контролю*.

Резонансний метод застосовується для контролю виробів з відносно гладкими поверхнями. Зміна товщини в зоні вимірювання має перевищувати 8 %, причому вимірюється середня товщина, а не найменше її значення. Похибка вимірювання – не менше 2...5%.

Спектральний метод ґрунтується на аналізі змінення спектра широкомуглового імпульсу під час його проходження через вимірюваний шар або виріб. Метод поступається резонансному методу за точністю вимірювань. Спектральний метод придатний для автоматичного контролю. Цей метод можна використовувати для вимірювання товщини покриття на виробі.

Для вимірювання товщини найчастіше застосовується імпульсний ехометод і резонансні методи.

Імпульсні ультразвукові товщиноміри вимірюють час, за який ультразвуковий імпульс проходить до протилежної поверхні об'єкта контролю, відбивається від неї й повертається на перетворювач. Доцільно застосовувати цей метод, якщо протилежна поверхня об'єкта контролю є важкодоступною або повністю недоступною, тому що для проведення таких вимірювань доступ до протилежної поверхні об'єкта контролю не потребується. За допомогою ультразвукових товщиномірів можна виміряти товщину виробів з більшості конструкційних матеріалів (металу, пластику, кераміки, композитів, епоксидної смоли та скла), а також товщину шару рідини.

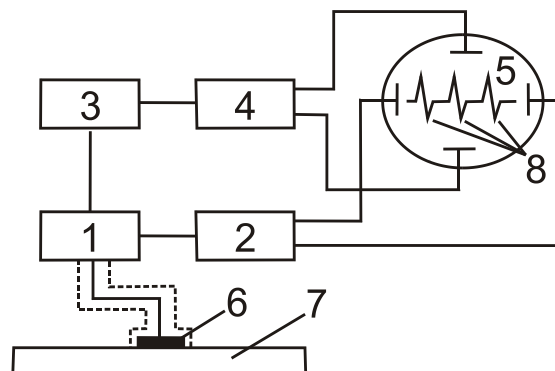
Оскільки ультразвук погано поширюється в повітрі, між перетворювачем і поверхнею об'єкта контролю наносять невелику кількість контактної рідини. Зазвичай як контактну рідину використовують гліцерин, пропіленгліколь, воду або масло.

Ультразвуковий імпульс, що випромінюється перетворювачем, проникає в об'єкт контролю, проходить до протилежної поверхні, відбивається від неї й повертається назад на перетворювач. Подібно до ехолотатора

Визначення швидкості ультразвуку є значною частиною цих розрахунків. Різні матеріали проводять ультразвукові хвилі з різною швидкістю. У деяких матеріалах, особливо в пластмасах, швидкість ультразвуку змінюється зі зміненням температури. Таким чином, налаштування ультразвукового товщиноміра на правильну швидкість ультразвуку в матеріалі, з якого виконано об'єкт контролю, є дуже важливим. Для цього використовують опорні зразки відомої товщини.

Резонансні товщиноміри використовуються головним чином для вимірювання (при односторонньому доступі) товщини виробів із металів, скла, кераміки, композиційних матеріалів, а також для виявлення розшарування тощо. Метод базується на збудженні у стінці по товщині об'єкта контролю ультразвукових коливань і визначенні частот, на яких виникають резонанси цих коливань.

У резонансному дефектоскопі-товщиномірі п'єзоелектричний перетворювач, що збуджується частотно-модульованим генератором, випромінює в контрольований об'єкт ультразвукові хвилі частотою, що безперервно змінюється.



53

У деякий момент часу, коли по товщині вимірюваного перерізу укладається ціла кількість півхвиль, утворюються стоячі хвилі (рис. 7.13).

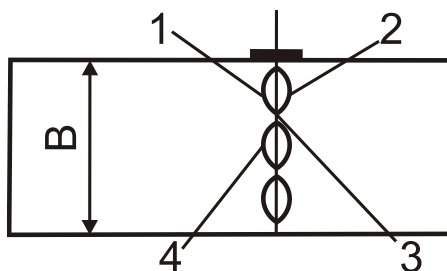


Рис. 7.13. Схема утворення стоячої хвилі у стінці контролюваного об'єкта:
1 – пряма хвиля; 2 – відбита хвиля; 3 – вузол; 4 – пучність

У найпростішому випадку, подаючи стінку об'єкта як пластину, поверхні якої з обох сторін є вільними, умову порушення пружних резонансів можна записати у вигляді

$$h = n \lambda / 2 = n c / (2 f_n),$$

де f_n – частота, що відповідає гармоніці n . Як вивипливає з формули, для вимірювання товщини об'єкта з матеріалу з відомою швидкістю звуку потрібно знати резонансну частоту й номер гармоніки коливань.

Існує два типи промислових резонансних товщиномірів – вимірювальні й контрольні:

1. Вимірювальні товщиноміри застосовуються для безпосереднього вимірювання товщини стінки h в окремих точках виробу, коли величина h є невідомою. Девіація частоти в цих приладах має бути достатньою для перекриття широкого діапазону товщин. Крім того, мають бути передбачені спеціальні відлікові пристрої, що дає змогу швидко визначити абсолютні значення h . Похибка вимірювання дорівнює 2...5 %.

2. Контрольні товщиноміри вбудовуються в технологічний цикл контролю виходу товщини стінки виробу на межі встановленого допуску. Товщина стінки при цьому є відомою, тому девіація частоти може бути невеликою, що підвищує чутливість і точність вимірювань. Продуктивність і точність контрольних товщиномірів вища, ніж вимірювальних, оскільки для введення ультразвукових коливань у контрольований об'єкт використовується імерсійний контакт, а похибка вимірювання становить 1...2 %.

За *способом передавання пружних коливань* розрізняють: контактні, імерсійні й безконтактні прилади.

За *виконанням* товщиноміри поділяють на портативні з автономним живленням (для роботи в польових умовах); переносні (для вимірювань у цехових умовах); стаціонарні (для комплектації автоматичних і напівавтоматичних установок контролю).

Устаткування

Ультразвуковий товщиномір ТУЗ-1 (рис. 7.14) призначено для вимірювання товщини різних виробів, включаючи вироби, доступ до яких є лише

з одного боку. Прилад можна використовувати у всіх галузях промисловості. За допомогою товщиноміра ТУЗ-1 вимірюється товщина стінок трубопроводів, посудин тиску, котлів та інших відповідальних та особливо небезпечних об'єктів, у тому числі для визначення ступеня корозійного й ерозійного зношення за залишковою товщиною.



Рис. 7.14. Ультразвуковий товщиномір ТУЗ-1

Товщиномір ТУЗ-1 має такі технічні характеристики:

- діапазон вимірювання (по сталі) – 0,6...300 мм;
- роздільна здатність – 0,1 мм;
- діапазон швидкості ультразвуку – 0...9999 м/с;
- місткість внутрішньої пам'яті – 2400 вимірювань;
- діапазон робочих температур – (-20...+50) °С;
- габарити – 164 x 84 x 30 мм;
- маса – 0,4 кг.

На рис. 7.15 показано ультразвуковий товщиномір УТ-31, призначений для вимірювання товщини виробів з металевих і неметалевих матеріалів при доступі до них з одного боку в процесі виготовлення, експлуатації або ремонту в різних галузях промисловості.

Великий вибір перетворювачів забезпечує широкий діапазон вимірюваних товщин (від 0,8 до 200 мм).

На рис. 7.16 показано прецизійний товщиномір з А-сканом УДТ-40. Прилад характеризується високою точністю та достовірністю контролю. Наявність А-скану виключає такі типові помилки під час вимірювання товщини, як подвоєння показань, а за допомогою В-скану можна спостерігати профіль дна виробу.



Рис. 7.15. Ультразвуковий товщиномір УТ-31



Рис. 7.16. Прецизійний товщиномір з А-сканом УДТ-40

Ультразвукові перетворювачі для товщинометрії

Стандартні перетворювачі серії 01 (рис. 7.17, а) призначено для вирішення типових завдань вимірювання.

Перетворювачі серії 02 (рис. 7.17, б) призначено для вимірювання товщини виробів у розширеному діапазоні, вони забезпечують поліпшену навколоповерхневу роздільну здатність під час контролю тонкостінних кородованих виробів.

Перетворювачі серії 04 (рис. 7.17, в) – мініатюрні перетворювачі, спеціально розроблені для вимірювання товщини малогабаритних виробів і вимірювання у важкодоступних місцях (турбінних лопатках, лонжеронах, трубах малого діаметра), а також у місцях, що потребують високої локальності

(малої плями контролю).

Перетворювачі серії Т-01 (рис. 7.17, з) – високотемпературні перетворювачі для вимірювання залишкової товщини виробів з високою температурою нагрівання (до 350 °С). Завдяки застосуванню спеціалізованих матеріалів перетворювачі мають високу температурну стабільність характеристик. Перетворювачі мають різні контактні площадки, що дає змогу працювати із виробами різної форми.



Рис. 7.17. Ультразвукові перетворювачі для товщинометрії

7.4. Дослідження якості виробів з композиційних матеріалів за допомогою методу вільних коливань

Метод вільних коливань – це метод неруйнівного контролю, який ґрунтується на збудженні пружних коливань, що вільно згасають, у контрольованому об'єкті або його частині та аналізі параметрів цих коливань.

Методи неруйнівного контролю, що базуються на вимірюванні частоти власних коливань (ЧВК), останніми роками помітно розширилися. Ці методи поділяються на методи вільних коливань і методи вимушених коливань, які, своєю чергою, поділяються на локальні й інтегральні методи контролю.

Метод вільних коливань є одним із найдавніших методів неруйнівного контролю. Якість гончарних виробів (наявність тріщин та інших дефектів) визначали за брязкітним звуком, що видається керамічним виробом під час його простукування.

Нині цей метод широко застовується в усьому світі для продажу скляного посуду. Застосовується метод вільних коливань і на залізничному транспорті, коли під час стоянки поїзда на залізничній станції обхідник шляхом простукування молотком намагається виявити дефекти, які можуть призвести до аварійної ситуації.

Методи, що ґрунтуються на вимірюванні частоти власних коливань, можна застосовувати визначення фізико-механічних властивостей матеріалів і виробів, наприклад модуля нормальної пружності (модуля Юнга) – однієї з основних характеристик пружних властивостей матеріалу. Уперше метод вимушених коливань використав К. Юнг для визначення модуля пружності.

Суть методу вільних коливань полягає в такому: коливання, штучно створені у твердому тілі, з часом згасають, пружна енергія коливань розсіюється, перетворюючись на теплову енергію внаслідок внутрішнього тертя.

Метод вільних коливань базується на фіксації змінення розсіювання

енергії в матеріалі конструкції. За наявності дефекту параметри коливальної системи змінюються, що веде до змінення амплітуди, частоти власних коливань і логарифмічного декременту їх згасання. Під час дослідження одержують віброграми вільних коливань, за темпом зменшення яких визначають величину відносного розсіювання енергії або логарифмічного декременту згасання (рис. 7.18). Логарифмічний декремент згасання обчислюють за віброграмою вільних коливань досліджуваного тіла:

$$\delta = \ln (A_i/A_{i+1}).$$

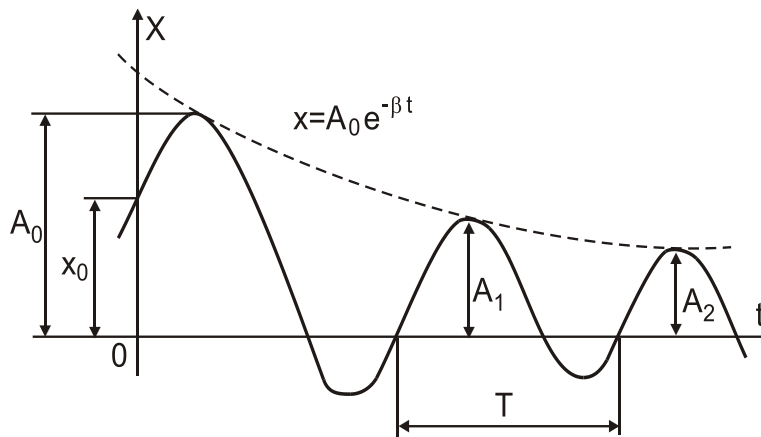


Рис. 7.18. Згасні коливання системи

Метод вільних коливань, що застосовується для контролю багатошарових, неметалевих і композиційних матеріалів, дає змогу фіксувати пори, тріщини, непроклеї, розшарування, порушення жорсткості зв'язку між шарами.

При збудженні пружних коливань у виробі, що має певні розміри, форму, масу, жорсткість, параметри вільних згасних коливань будуть характерними саме для цього виробу. Сильна залежність частоти власних коливань від форми й розмірів контрольованого виробу може ускладнювати практичне застосування методу. Проте успіхи, досягнуті у сфері аналізу спектрів ЧВК виробів різних форм і розмірів, і навіть широке застосування комп'ютерної техніки дають змогу нині істотно спростити процес контролю, що приводить, своєю чергою, до розширення областей використання цього методу.

Існує кілька способів ударного збудження пружних коливань у контрольованому виробі: механічний (електромеханічний), п'єзоелектричний, електромагнітно-акустичний та ін.

Найбільш часто застосовується електромеханічний спосіб, при якому збудником коливань у контрольованому об'єкті є пристрої, рухомі системи яких приводяться в рух електромагнітними механізмами.

Приймання сигналу здійснюється або мікрофоном (рис. 7.19, а), або п'єзоприймачем (рис. 7.19, б). П'єзоприймач менш чутливий до зовнішніх шумів, але він є додатковим навантаженням на контрольований об'єкт.

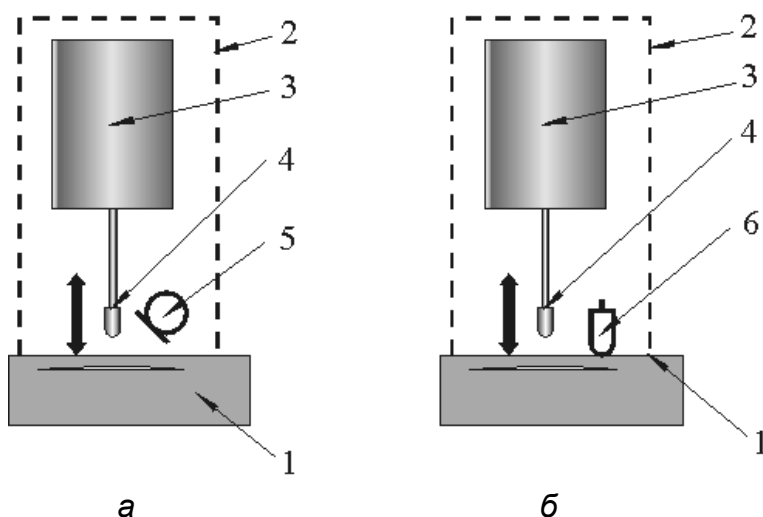


Рис. 7.19. Структурна схема дефектоскопа: а – з мікрофонним приймачем; б – з п'єзоелектричним приймачем (1 – контрольований об'єкт; 2 – корпус перетворювача; 3 – електромагніт; 4 – рухома система; 5 – мікрофон; 6 – п'єзоприймач)

Коли використовуються перетворювачі з електромагнітними ударниками та мікрофонними приймачами, ударник короткочасно контактує з контрольованим об'єктом, після чого перетворювач уже не впливає на характер вільнозгасних коливань. Тому спектр цих коливань визначається лише параметрами контрольованого об'єкта. Ударні перетворювачі перевершують п'єзоелектричні при контролі виробів із матеріалів з низькими модулями пружності або легкими (наприклад, пінопластовими) заповнювачами. Використання кількох типів перетворювачів розширює експлуатаційні можливості дефектоскопа.

Устаткування

Для реалізації методу вільних коливань у промисловості застосовують спеціальні вимірювачі частот власних коливань типу «Звук» двох модифікацій: прилади, що ґрунтуються на резонансному методі вимірювання, – «Звук-107» (рис. 7.20); прилади, що базуються на методі вільних коливань, – «Звук-203» (рис. 7.21).

З допомогою приладу «Звук-203» неможливо проводити контроль малогабаритних виробів.

Для контролю таких виробів застосовується метод вимушених коливань, реалізований у приладах «Звук-107».

Прилад «Звук-203М» – це портативний прилад, який оператор під час роботи легко утримує в руці. До складу приладу входять вбудований електретний мікрофон для приймання акустичних коливань, рідкокристалічний дисплей для індикації результатів вимірювання та плівкова клавіатура для керування роботою приладу.



Рис. 7.20. Прилад «Звук-107»



Рис. 7.21. Прилад «Звук-203»

Практично миттєво після завдання удару по контрольованому виробу на дисплеї висвічується результат в одній із заданих оператором форм: ЧВК, наведена швидкість поширення акустичних хвиль тощо. Можлива індикація й інших фізико-механічних властивостей виробів, наприклад модуля Юнга, міцності, густини, пористості тощо при введенні в прилад відповідних кореляційних або аналітичних залежностей. Живлення приладу здійснюється від акумуляторної батареї або від мережі з одночасною підзарядкою батарей. Передбачено можливість передавання на зовнішній пристрій по інтерфейсу RS-232.

Прилади типу «Звук» нового покоління працюють у комплекті із сучасними комп'ютерними засобами. Прилад «Звук-110М» складається з вимірювального стояка й електронної плати, що встановлюється в комп'ютер IBM PC/AT. Вимірювання здійснюється автоматично відразу після закріплення контрольованого виробу у вимірювальному стояку і запуску спеціальної програми, за якою аналізують спектр частот власних коливань і необхідні розрахунки.

Результати вимірювань та їх оброблення виводяться на екран монітора, зберігаються на диску та можуть бути роздруковані у зручному вигляді.

Із зарубіжних аналогів найбільш відомими є прилади типу Grindo Sonic, що випускаються бельгійською фірмою JW Lemmens NV.

Перевага методу вільних коливань – простота здійснення експерименту.

Недоліки методу:

- низька завадостійкість;
- неможливість контролю об'єктів з матеріалів з великим згасанням ультразвуку.

7.5. Метод акустичної емісії

Метод акустичної емісії набуває дедалі більшого застосування як у процесах випробування композиційних матеріалів, так і в контролі стану виробів в умовах експлуатації.

Метод використовується для аналізу процесів тріщиноутворення у виробках. Цей метод базується на дослідженні акустичних параметрів

(інтенсивності акустичних імпульсів, амплітудного й частотного спектрів імпульсів тощо) при утворенні мікротріщин у виробах під дією навантаження, рівень якого є значно нижчим від граничного (руйнівного) значення.

Метою методу акустичної емісії є виявлення, визначення координат і стеження (моніторинг) за джерелами акустичної емісії.

Явище акустичної емісії полягає в тому, що пружні хвилі випромінюються матеріалом унаслідок динамічної локальної перебудови його структури. При будь-якому зовнішньому впливі енергія, що надається матеріалу при досягненні певної величини, спричиняє в ньому структурні змінення. У металах такі структурні зміни пов'язані з пластичним деформуванням (рух дислокацій) і процесом тріщиноутворення. Таким чином, основним джерелом акустичної емісії в металах є процес пластичної деформації та поширення тріщин. Найбільш характерними джерелами акустичної емісії у композиційних матеріалах є тріщини, що розвиваються під впливом зовнішнього навантаження. У композиційних матеріалах методом акустичної емісії виявити дефекти складніше, оскільки пружні хвилі виникають і в матриці, і в армувальному матеріалі, і в зонах контакту армувального матеріалу і сполучного, які в деяких випадках мають мікронесуцільність. При контролі виробів з композиційних матеріалів виникають певні труднощі, пов'язані зі складністю розшифрування результатів контролю, обумовленої тим, що на хвильовий процес акустичної емісії накладаються паразитні акустичні параметри багаторазово відбитих хвиль.

Технічне діагностування об'єктів методом акустичної емісії проводиться лише при створенні в конструкції напруженого стану, що ініціює в матеріалі об'єкта роботу джерел акустичної емісії.

Джерела акустичної емісії поділяють на чотири класи:

- 1) пасивні, які реєструють з метою подальшого аналізу динаміки;
- 2) активні, у разі наявності яких рекомендується подальший контроль;
- 3) критично активні, що потребують проведення заходів щодо ремонту;
- 4) катастрофічно активні, за наявності яких конструкцію негайно виводять з експлуатації.

Коливання поширюються від джерела випромінювання до датчика (датчиків), де перетворюються на електричні сигнали. Прилади акустичної емісії реєструють ці сигнали й відображають дані на екрані у вигляді осцилограм, локацій, цифрових індикацій, на основі яких оператор може оцінити стан і поведінку структури матеріалу під напругою, виявити й визначити місцезнаходження дефектів (рис. 7.22). За зареєстрованим часом надходження сигналу t_i на i -й приймач (датчик) системою визначається різниця часу надходження t ($t = t_2 - t_1$) на рознесені приймачі. Потім за відомою швидкістю звуку в матеріалі й відомими координатами приймачів згідно з програмою обчислюють координати джерела (дефекту).

Перетворювач акустичної емісії, призначений для перетворення пружних акустичних коливань на електричні сигнали, і є найважливішим елементом апаратного комплексу (АЕ) контролю. Найбільшого поширення набули

п'єзоелектричні перетворювачі (ПАЕ), схема яких мало відрізняється від схеми п'єзоперетворювачів (ПЕП), що використовуються під час проведення ультразвукового контролю.

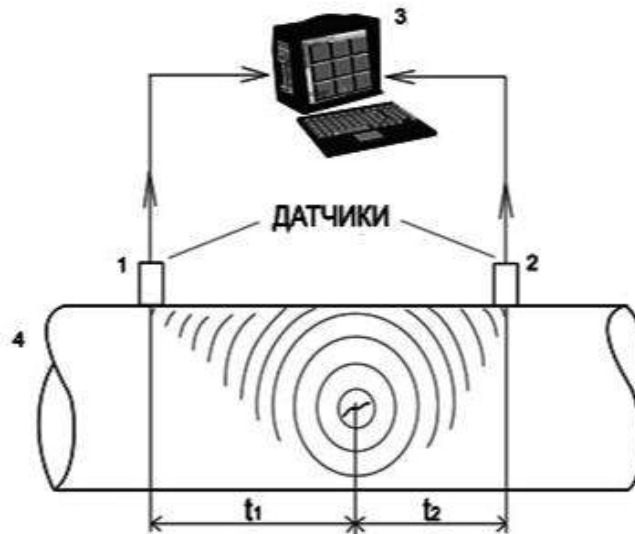


Рис. 7.22. Схема контролю методом акустичної емісії: 1 – перетворювач АЕ (приймач 1); 2 – перетворювач АЕ (приймач 2); 3 – центральний блок збору й оброблення на основі комп'ютера; 4 – об'єкт контролю; t_1 – час надходження сигналу на перший приймач; t_2 – час надходження сигналу на другий приймач

Оскільки джерелами акустичної емісії є дефекти структури матеріалу, зазвичай вважають, що координати джерела акустичної емісії й координати дефекту є еквівалентними. Однак треба враховувати, що дефекти мають певну просторову конфігурацію й довжину, тобто координати джерела акустичної емісії визначають точку в матеріалі конструкції, у малому okolí якої розвивається дефект.

Визначення координат джерел акустичної емісії ґрунтується на принципах радіолокації. Дефект, що розвивається, випромінює в навколишній простір імпульси акустичної емісії, вимірювання параметрів яких за допомогою декількох рознесених перетворювачів дає змогу визначити місце розташування джерела. Про розташування дефектів можна судити по амплітуді сигналів (чим ближче дефект до перетворювача, тим вище амплітуда сигналу) і часу їх надходження. Найбільшого застосування набули методи, у яких використовується залежність часу надходження сигналу на рознесені приймачі.

Якщо контроль методом акустичної емісії для певного виду виробу проводиться вперше, то необхідно провести серію попередніх випробувань для правильного вибору робочого режиму апаратури, вибору критерію відбраковування, уточнення часового інтервалу реєстрації, часової бази випробувань, вибору зони контролю, а також проміжного середовища. При випробуванні виробу необхідно, щоб умови напружено-деформованого стану й виду навантаження мали такий самий характер, що й для виробу в умовах експлуатації. Попередні випробування проводять до повного руйнування контрольованого об'єкта, при цьому реєструються параметри акустичної

емісії. Після руйнування об'єкта за допомогою електронної мікроскопії проводять фрактографічні вимірювання швидкості розвитку тріщини, її довжини. Потім порівнюють одержані результати з результатами експерименту. Оскільки процес тріщиноутворення безпосередньо пов'язаний з кінетикою руйнування матеріалу, метод дає змогу оцінити стан виробу в процесі експлуатації (якщо спостерігати процес тріщиноутворення в динаміці).

Устаткування

Сучасні цифрові прилади й багатоканальні системи акустико-емісійного контролю НВФ «Діатон» мають високу надійність, зручний інтерфейс користувача. Апаратура, набір акустико-емісійних перетворювачів, стандартне та спеціалізоване програмне забезпечення акустико-емісійних систем розраховані на контроль будь-яких об'єктів, для діагностики яких застосовується метод акустичної емісії (рис. 7.23).

Переваги методу акустичної емісії:

1. Метод дає змогу проконтролювати весь об'єкт повністю з використанням одного або кількох датчиків, установлених нерухомо на поверхні об'єкта, завдяки чому можна досліджувати важкодоступні або недоступні поверхні контрольованого об'єкта.

2. На відміну від сканувальних методів неруйнівного контролю, метод акустичної емісії не потребує ретельної підготовки поверхні об'єкта контролю. Отже, результати контролю не залежать від стану поверхні та якості її оброблення.



Рис. 7.23. Система «Малахіт» АС-15А

3. Метод дає змогу виявляти й реєструвати лише дефекти, що розвиваються, завдяки чому можна класифікувати дефекти не за розмірами (або за іншими непрямими ознаками – формою, положенням, орієнтацією дефектів), а за ступенем їх небезпеки (вплив на міцність) для контрольованого об'єкта.

4. Положення й орієнтація об'єкта не впливають на виявлення дефектів.

5. Висока продуктивність методу акустичної емісії, що значно перевищує продуктивність таких методів неруйнівного контролю, як

ультразвуковий, радіографічний тощо.

6. Дистанційність методу акустичної емісії – можливість проведення контролю при значному віддаленні оператора від досліджуваного об'єкта, що дає змогу ефективно використовувати його для контролю відповідальних великогабаритних конструкцій без виведення їх з експлуатації.

7. Можливість відстеження різних технологічних процесів та оцінювання технічного стану об'єкта в експлуатації, що дає змогу запобігти аварійній руйнації контрольованого об'єкта.

8. Висока ефективність методу.

Особливість методу акустичної емісії, яка обмежує його застосування, – це в деяких випадках складність виокремлення сигналів акустичної емісії із перешкод. Тому, коли сигнали акустичної емісії є малими за амплітудою, виокремлення корисного сигналу з перешкод є складним завданням.

Усі індикації, спричинені джерелами акустичної емісії, доцільно оцінювати іншими методами неруйнівного контролю. Метод акустичної емісії може бути використаний також для оцінювання швидкості розвитку дефекту з метою завчасного припинення випробувань і запобігання руйнуванню виробу.

Метод акустичної емісії дає змогу отримувати величезні масиви інформації, оперативно та з мінімальними витратами регулювати й продовжувати експлуатаційний цикл відповідальних промислових об'єктів, допомагає в прогнозуванні ймовірності виникнення аварійних руйнувань і катастроф. Широкі можливості методу акустичної емісії надає і щодо різних властивостей матеріалів і конструкцій.

7.6. Контроль багатошарових конструкцій з композиційних матеріалів імпедансним методом

Імпедансний метод належить до акустичних методів неруйнівного контролю і в багатьох випадках може забезпечити контроль якості виробів з плоскою й криволінійною поверхнею, при цьому фіксуються розшарування, непростеї, ослаблена адгезія, ступінь полімеризації.

Метод ґрунтується на збудженні в контрольованому об'єкті пружних коливань та аналізі змінення механічного імпедансу дефектної ділянки об'єкта контролю порівняно з бездефектною ділянкою при переміщенні перетворювача по поверхні виробу.

Механічним імпедансом, або повним механічним опором Z (силою реакції об'єкта), називають відношення збурювальної сили F до коливальної швидкості V частинок середовища в зоні прикладання сили:

$$Z = F / V.$$

Механічний імпеданс є параметром конструкції, тобто для багатошарових конструкцій механічний імпеданс у зоні застосування збурювальної сили визначається всіма елементами цієї конструкції, об'єднаними в одну механічну систему.

У бездефектній зоні виробу імпеданс визначається всіма шарами виробу, що коливаються як єдине ціле, причому його модуль має відносно велике значення $|Z_1|$. Якщо в конструкції є дефекти (розшарування, непроклеї тощо), то імпеданс дефектної ділянки $|Z_2|$ буде меншим за імпеданс у бездефектній зоні $|Z_1|$. Це пов'язано з тим, що в дефектній зоні, наприклад, якщо датчик розташований над розшаруванням, то ділянка обшивки коливатиметься, як зафіксована по контуру пластина, не жорстко зв'язана з конструкцією, і, природно, сила реакції буде значно меншою. При цьому відбувається зміщення фази між прийнятим сигналом і напругою на виході збуджувального генератора, що свідчить про наявність і параметри ефекту.

Для оцінювання змінення механічного імпедансу використовують ультразвукові дефектоскопи з перетворювачами (рис. 7.24). Перетворювач являє собою стрижень 5, на торцях якого розміщені п'єзоелемент 2, що збуджує коливання, і вимірювальний п'єзоелемент 6. Між об'єктом контролю 11 і п'єзоелементом 6 знаходиться контактний наконечник 9 зі сферичною поверхнею, призначений для знімання значень механічного імпедансу в бездефектній і дефектній зонах контрольованого об'єкта. П'єзоелемент 2 з'єднано з генератором 4, який задає напругу U_1 . П'єзоелемент 6 приймає змінення механічного імпедансу системи. У ньому механічні коливання перетворюються на напругу U_2 , яка надходить на підсилювач 10, а потім – на реєструвальний пристрій 8. Маса 3 підвищує потужність випромінювання у стрижень 5. Генератор і підсилювач з'єднані з блоком оброблення сигналу 7, на виході якого встановлено індикатор 8. Блок 7 керує сигнальною лампочкою 1 і самописцем, що реєструє дефекти під час використання приладу в системах механізованого контролю.

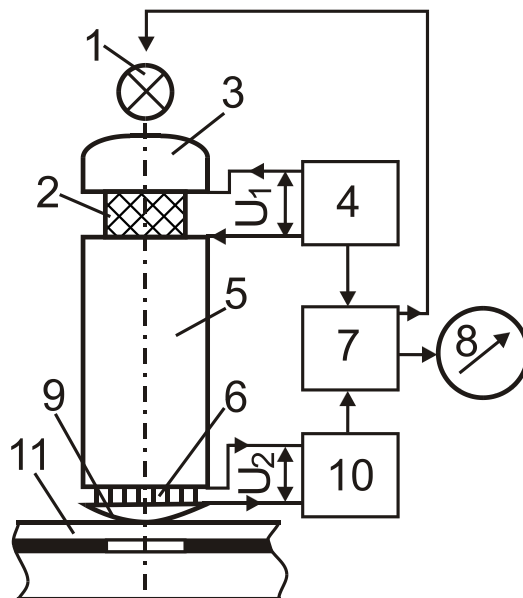


Рис. 7.24. Структурна схема імпедансного дефектоскопа:

1 – сигнальна лампочка; 2 – п'єзоелемент, що збуджує коливання; 3 – маса (для підвищення потужності випромінювання у стрижень); 4 – генератор; 5 – стрижень; 6 – вимірювальний п'єзоелемент; 7 – блок оброблення сигналу; 8 – індикатор; 9 – контактний наконечник зі сферичною поверхнею; 10 – підсилювач; 11 – об'єкт контролю

Устаткування

Портативний імпедансний дефектоскоп ДАМІ-С (рис. 7.25) призначено для виявлення дефектів у композиційних матеріалах і стільникових структурах, а також для виявлення корозії в неферомагнітних сплавах у різних авіаційних конструкціях. Перетворювач автоматично налаштовується на об'єкт контролю з урахуванням густини та структури матеріалу.

За допомогою дефектоскопа ДАМІ-С можна проводити контроль якості шаруватих конструкції з неметалевих матеріалів (вуглецевих), грубих стільникових та інших структур з регулярно мінливим імпедансом поверхні та (або) змінною товщиною, листових конструкцій з неферомагнітних матеріалів.

Імпедансний дефектоскоп ІД-401 (рис. 7.26), призначений для контролю композиційних матеріалів, дає змогу виявляти дефекти типу розшарування, непроклею, порушення суцільності контрольованого об'єкта, може експлуатуватися в лабораторних, цехових і польових умовах.



Рис. 7.25. Універсальний дефектоскоп композиційних матеріалів ДАМІ-С



Рис. 7.26. Імпедансний дефектоскоп ІД-401

Імпедансний дефектоскоп ІД-91М (рис. 7.27) призначено для виявлення розшарувань і непроклеїв у виробках із шаруватих пластиків і композиційних матеріалів. Використовується під час виробництва й експлуатації авіакосмічної техніки.



Рис. 7.27. Імпедансний дефектоскоп ІД-91М

Комплектується двома типами перетворювачів: суміщеним (SP) і

роздільно-суміщеним (RSP). Мінімальний розмір дефекту, що виявляється у виробх з композиційних матеріалів суміщеним перетворювачем, – 5 мм.

Максимальна глибина виявлення дефекту у виробх з композиційних матеріалів роздільно-суміщеним перетворювачем – 13 мм (у конструкціях з алюмінієвих сплавів до 3 мм), суміщеним перетворювачем – 4 мм (1,5 мм).

Імпедансний експрес-тестер ТЕРІ (рис. 7.28) розроблено для застосування в цивільній авіації й призначено для імпедансного експрес-контролю багатошарових паяних, клеєних композитних матеріалів і конструкцій зі стільниковим наповнювачем на наявність дефектів типу розшарування або непроклею. ТЕРІ належить до приладів індикаторного типу і не є засобом вимірювання. ТЕРІ є спрощеною модифікацією дефектоскопа ДАМІ-С і повністю сумісний із ПЕП, що застосовуються. Прилад простий у роботі та налаштуванні.



Рис. 7.28. Імпедансний експрес-тестер ТЕРІ

Оскільки при контролі в польових умовах доводиться дуже часто переходити з одного типу матеріалу на інший, важливо, щоб налаштування було якомога простішим і займало мало часу. У ТЕРІ процес налаштування повністю автоматизовано. Необхідно встановити перетворювач на бездефектну ділянку, і прилад самостійно виставить необхідне значення порога спрацьовування сигналізації дефекту. Водночас передбачено можливість ручного налаштування. Працюючи, оператор закріплює прилад ременем на руці, завдяки чому його рухи не обмежуються і зручність роботи підвищується.

ТЕРІ застосовується в цивільній авіації як сучасна альтернатива технічно застарілих методик механічного простукування стільникових конструкцій, підвищуючи об'єктивність і достовірність контролю.

Для налаштування дефектоскопів і вибору оптимальних режимів роботи застосовуються стандартні робочі зразки (РСЗ). Для контролю тришарових стільникових конструкцій використовується РСЗ, виконаний у вигляді панелі розміром 300 х 300 мм. Панель складається з обшивок і стільникового наповнювача. Дефекти в панелі імітуються шляхом створення в стільниковому наповнювачі круглих заглибин діаметром 30, 20 і 10 мм і глибиною 3 мм. Матеріали обшивок і стільникового наповнювача, а також технологія виготовлення РСЗ мають відповідати матеріалам і технологіям

виготовлення натурального виробу.

Імпедансний метод застосовується для контролю клеєних вузлів, у тому числі тришарових конструкцій з металевими й неметалевими обшивками та легкими (стільники, пінопласти) заповнювачами між ними. Цим методом перевіряють якість клейових з'єднань обшивок з іншими елементами жорсткості авіаконструкції, а також виявляють розшарування у виробках із шаруватих пластиків.

Чутливість акустичного імпедансного методу залежить від жорсткості обшивки або окремого дефектного шару; модуля пружності внутрішнього елемента конструкції; співвідношення між жорсткістю обшивки або окремого шару та жорсткістю всієї конструкції в цілому; шорсткості та кривизни поверхні об'єкта контролю.

Чутливість імпедансного методу обмежує розкид механічних імпедансів у бездефектних зонах об'єкта контролю, що обумовлено змінністю товщини клейового шва, неоднорідностями виробу, які не є бракувальними ознаками, інтерференційними явищами, які створюють фон, що утруднює виявлення дрібних дефектів.

Пружний опір зони контакту перетворювача з виробом зменшує чутливість перетворювача до змінення механічного імпедансу системи. Пружний опір обумовлюється невеликою площею контакту наконечника перетворювача з об'єктом контролю.

Недолік методу – виявлення лише дефектів, розташованих на порівняно невеликій глибині.

Контрольні запитання

1. Як здійснюється контроль якості методом вільних коливань?
2. Які дефекти можна виявити методом вільних коливань?
3. Назвіть переваги й недоліки методу вільних коливань.
4. Як здійснюється контроль якості ультразвуковим методом?
5. Які обмеження методу необхідно враховувати під час контролю якості КМ?
6. Які дефекти можна виявити ультразвуковим методом?
7. Яке обладнання застосовується для ультразвукової дефектоскопії КМ?
8. Що розуміють під роздільною здатністю методу ультразвукової дефектоскопії? Що таке максимальна та мінімальна глибина прозвучування? Як можна зменшити «мертву зону»?
9. У чому полягає суть ехометоду ультразвукової дефектоскопії? Від чого залежить чутливість ехометоду?
10. Назвіть особливості тіньового методу ультразвукової дефектоскопії.
11. У чому полягає суть методу акустичної емісії? У яких випадках доцільно застосовувати цей метод?
12. Які дефекти можна виявити методом акустичної емісії? На якому

принципі ґрунтується їх виявлення?

13. У чому полягає особливість застосування методу акустичної емісії під час контролю КМ?

14. Назвіть переваги й недоліки методу акустичної емісії.

15. Як визначаються координати джерел акустичної емісії?

16. У чому полягає суть імпедансного методу контролю якості?

17. Які вироби з КМ дає змогу контролювати імпедансний метод?

18. Які дефекти можна виявити імпедансним методом?

19. Яке обладнання застосовується для дефектоскопії КМ імпедансним методом?

20. Від чого залежить чутливість імпедансного методу?

8. ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИМ МЕТОДОМ

За електричними властивостями багато полімерних композиційних матеріалів належить до діелектриків.

Під впливом електричного поля в таких КМ відбуваються чотири фізичні процеси: поляризація, електропровідність, втрати електричної потужності (діелектричні втрати) і пробій діелектриків.

Здатність діелектриків проводити електричний струм оцінюється величиною об'ємного питомого опору ρ_v .

Здатність діелектрика поляризуватися під впливом електричного поля характеризує діелектрична проникність ε . Чим інтенсивніше відбувається процес поляризації, тим більше значення ε .

Потужність, що розсіюється в діелектрику, називають діелектричними втратами. Величину діелектричних втрат прийнято оцінювати за допомогою тангенса кута діелектричних втрат $\tan \delta$.

Пробій діелектрика – явище утворення в матеріалі каналу наскрізної електропровідності під впливом електричного поля певної напруженості. Напруженість електричного поля, при якій настає пробій діелектрика одиначної товщини, називають електричною міцністю $E_{пр}$.

Кожна з наведених характеристик є досить чутливою до змінення структури КМ, поглинання матеріалом вологи, утворення у виробах з КМ різних дефектів – пор, тріщин, розшарувань тощо.

Особливо чутливими до змінення структури КМ, порушення співвідношення між сполучними й армувальними матеріалами, наявності вологи, утворення пор, раковин, непроклеїв та інших дефектів є діелектрична проникність ε і тангенс кута діелектричних втрат $\tan \delta$.

Саме ці дві характеристики КМ найчастіше використовуються як для контролю технологічного процесу виготовлення, так і дефектоскопії готових виробів з КМ.

Під впливом електричного поля КМ відбувається поляризація, тобто

процес обмеженого зміщення й орієнтації зв'язаних електричних зарядів. Величину відносної діелектричної проникності обчислюють за формулою

$$\varepsilon = C_d / C_0, \quad (8.1)$$

де C_d – ємність конденсатора з КМ; C_0 – ємність конденсатора без КМ (у вакуумі).

Відносна діелектрична проникність КМ завжди більша за одиницю.

Оскільки КМ є гетерогенними структурами, у них виникають різні види поляризації, обумовлені властивостями компонентів і структурою матеріалу.

Існують такі види поляризації: електронна, іонна, дипольно-релаксацийна, іонно-релаксацийна, електронно-релаксацийна, міграційна (структурна), спонтанна та ін.

Електронна й іонна поляризації належать до миттєвих видів поляризації з малим часом установаження ($10^{-15} \dots 10^{-13}$ с). Ці два механізми поляризації відбуваються пружно й супроводжуються розсіюванням енергії.

Електронна поляризація пов'язана з пружним зміщенням і деформацією електронних оболонок атомів або йонів. Цей вид поляризації виникає у всіх діелектриках.

Іонна поляризація пов'язана зі зміщенням пружно зв'язаних йонів на відстані менше періоду ґратки в твердих тілах з іонною будовою.

Інші види поляризації належать до уповільнених і завжди супроводжуються розсіюванням енергії.

Дипольно-релаксацийна поляризація пов'язана з частковою орієнтацією під дією електричного поля дипольних молекул, що знаходяться в хаотичному тепловому русі. При цьому поворот диполів у напрямку поля пов'язаний із опором середовища, що призводить до втрат енергії. У твердих органічних сполуках дипольно-релаксацийна поляризація спричиняє поворот радикалів відносно молекули.

Іонно-релаксацийна поляризація виникає, коли під дією електричного поля слабозв'язані йони речовини перекидаються на відстань, більшу за період ґратки.

Структурна (міграційна) поляризація виникає в діелектриках з неоднорідною структурою, до яких належать усі КМ.

Діелектрична проникність КМ визначається природою вихідних компонентів, структурою КМ і залежить від температури, вологості матеріалу та частоти зовнішнього електричного поля.

Наприклад, з усіх розглянутих видів поляризації склопластики належать до матеріалів, у яких відбуваються майже всі види поляризації, оскільки смоли мають електронну й дипольно-релаксацийну поляризацію, а склонаповнювач – іонно-релаксацийну. У КМ завжди виникає міграційна (структурна) поляризація.

Діелектричну проникність багатокомпонентного діелектрика (полімер + наповнювач + вода + повітря) ε можна розрахувати за формулою

$$\varepsilon^k = \sum_{i=1}^n \theta_i \varepsilon_i^k, \quad (8.2)$$

де ε_i , θ_i – діелектрична проникність та об'ємна частка i -го компонента системи; n – кількість компонентів; k – коефіцієнт, що враховує орієнтацію частинок відносно напрямку поля. Коефіцієнт k може набувати значень від -1 до $+1$. Для ортотропних і трансверсально-ізотропних КМ при розташуванні обкладок конденсатора вздовж шарів $k = -1$. У разі розташування обкладок конденсатора поперек шарів $k = +1$.

Якщо наповнювач хаотично розподілено у сполучному, то діелектричну проникність КМ визначають за формулою

$$\ln \varepsilon = \sum_{i=1}^n \theta_i \ln \varepsilon_i. \quad (8.3)$$

Для шаруватого двокомпонентного середовища формула набуває вигляду:

- для розташування вздовж шарів:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \theta + \varepsilon_2 (1 - \theta); \quad (8.4)$$

- для розташування перпендикулярно до шарів:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \theta + \varepsilon_1 (1 - \theta)}. \quad (8.5)$$

На рис. 8.1 показано залежність діелектричної проникності від частоти, з якої випливає, що зі збільшенням частоти ε зменшується. Це пояснюється тим, що різні види поляризації мають різний час релаксації, який стає більшим від часу дії електричного поля. Час релаксації – це характеристичний час, протягом якого кількість спочатку орієнтованих частинок зменшується в рази. Як видно із залежності $\varepsilon (\lg f)$, знаючи частоту, що відповідає стрибкам ε , можна визначити види поляризації в КМ.

Діелектричні втрати – це енергія, що розсіюється в діелектрику під дією змінного поля і спричиняє нагрівання матеріалу. Відомо три основні види діелектричних втрат:

1) втрати на електропровідність, обумовлені струмами витоку через наявність у діелектрику невеликої кількості вільних зарядів;

2) поляризаційні втрати, спричинені уповільненими видами поляризації;

3) іонізаційні втрати, які виникають при йонізації газоподібних включень у КМ при високих значеннях напруженості електричного поля $E \geq E_{пр}$;

4) втрати, що виникають через неоднорідність структури.

Матеріали з дипольно-релаксаційною й іонно-релаксаційною поляризацією мають великі втрати. До таких матеріалів належать поліуретани, ебоніт, оргскло, фенольно-формальдегідні смоли, епоксидні смоли, неорганічне скло. У твердих неоднорідних діелектриках можуть бути всі види втрат одночасно.

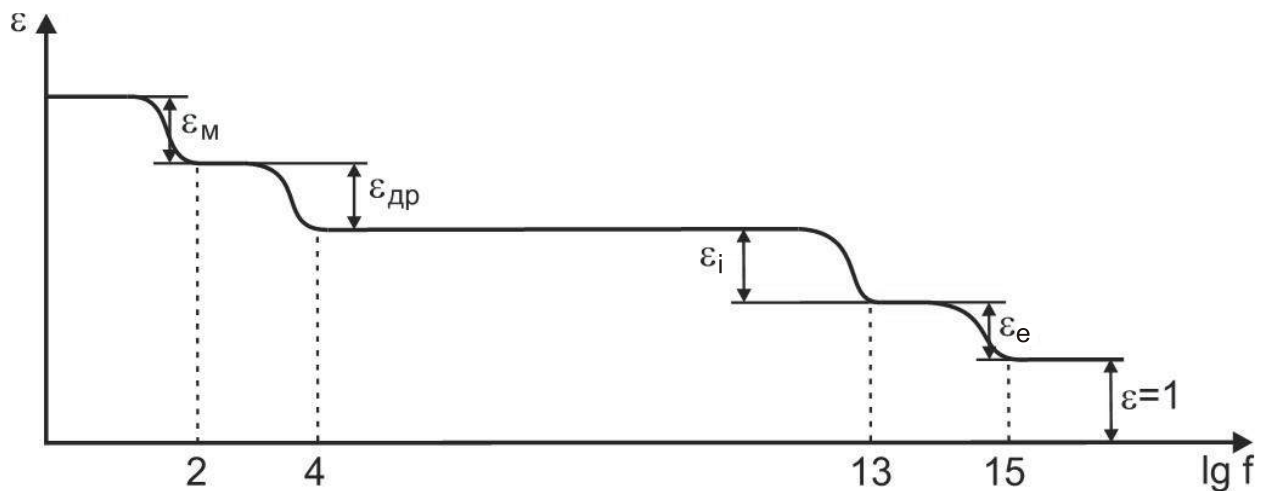


Рис. 8.1. Залежність діелектричної проникності від частоти

Діелектричні втрати характеризуються або величиною питомих втрат, які визначаються або відношенням розсіяної потужності P до одиниці об'єму, або кутом втрат δ , або його тангенсом $\operatorname{tg} \delta$.

Кутом діелектричних втрат δ називають кут, що доповнює до 90° кут зсуву фаз між струмом і напругою в ємнісному колі (рис. 8.2).

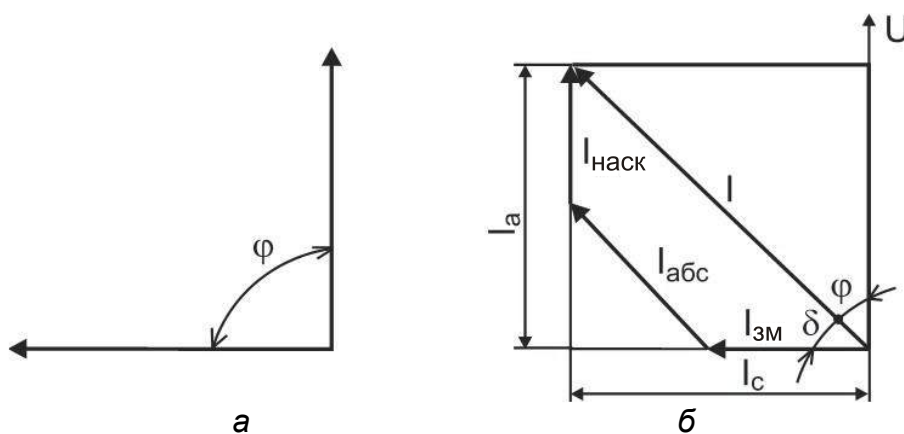


Рис. 8.2. Векторна діаграма: а – ідеального діелектрика; б – діелектрика з втратами

Діелектричні втрати КМ, що знаходиться в змінному електричному полі, обчислюють за такою формулою:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (8.6)$$

де P_a – потужність, що розсіюється в матеріалі; U – напруга; ω – кутова частота електричного поля; C – ємність.

Тангенс кута діелектричних втрат можна визначити, знаючи активну I_a і реактивну I_p складові струму, що проходить через діелектрик:

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_p. \quad (8.7)$$

Так само, як і діелектрична проникність, величина $\operatorname{tg} \delta$ залежить від структури КМ, температури, вологості, частоти прикладеної напруги та інших факторів.

До електричних методів можна віднести *метод електричного пробою*, який використовується для виявлення наскрізних неполадок або пористості в листових композиційних матеріалах, а також ліквідаційних зон матриці або наповнювача. Для цього матеріал поміщають між двома пластинами з прикладеною до них критичною різницею потенціалів. За електричною міцністю досліджуваного КМ можна робити висновки про наявність дефектів у ньому.

Прилади та засоби вимірювання

Для вимірювання опору R , індуктивності L , ємності C застосовують вимірники RLC (рис. 8.3, 8.4). Основна відмінність вимірників один від одного полягає в діапазоні тестових частот. Оскільки модуль комплексного опору залежить від частоти, набір частот визначає діапазон вимірюваних значень ємності й індуктивності.



Рис. 8.3. Вимірник RLC серії LCR-800 (виробник GW Instek)



Рис. 8.4. Цифровий портативний вимірник RLC AM-3023

У сучасних вимірниках тест-сигнал формується за допомогою технології прямого цифрового синтезу, що дає широку сітку частот. Комплексний опір обчислюється через значення струму й напруги на елементі, що визначаються шляхом цифрового оброблення. Діапазон частот до 1 МГц забезпечує вимірювання ємності від 2 пФ та індуктивності від 1 мкГн.

Контрольні запитання

1. Назвіть особливості контролю якості КМ електричним методом.
2. Які дефекти можна виявити електричним методом?
3. За якими діелектричними характеристиками можна оцінити якість КМ? Які з цих параметрів найчастіше використовуються для контролю технологічного процесу виготовлення й дефектоскопії готових виробів з КМ?
4. Яке обладнання застосовується під час контролю електричним методом?

9. ГОЛОГРАФІЧНА ІНТЕРФЕРОМЕТРІЯ

Голографічний метод – це метод неруйнівного контролю, що ґрунтується на аналізі інтерференційної картини, яка спостерігається при взаємодії опорного й розсіяного контрольованим об'єктом полів когерентних хвиль з подальшим відновленням зображення об'єкта. Інтерференція спостерігається при складанні двох хвиль, коли за умови їх когерентності, тобто постійної різниці фаз цих хвиль, виникає характерний просторовий розподіл інтенсивності світла – інтерференційна картина. Фотопластинка-детектор реєструє це у вигляді світлих і темних смуг (або інтерферограм), що чергуються.

Голографічна дефектоскопія проводиться виходячи з реєстрації змін деформованого стану виробів, що пов'язано з наявністю дефектів. Регулярна інтерференційна картина, утворена при навантаженні досліджуваної деталі, спотворюється в дефектних місцях (у тріщинах, раковинах, на непроклеєних ділянках багат шарових конструкцій). Наприклад, у разі тріщини інтерференційні смуги на різних її «берегах» зазнають зламу чи зсуву. Навантаження досліджуваної деталі при голографічній дефектоскопії може бути статичним або вібраційним. Іноді деталь піддають локальному нагріванню або охолодженню. При голографічному записі оптичної інформації про хвильові процеси використовують лазери – інтенсивні когерентні джерела випромінювання. На рис. 9.1 зображено схему установки для отримання голограм.

Голограму отримують унаслідок інтерференції поділеного на дві частини монохроматичного випромінювання лазера: пучка, розсіяного об'єктом, що голографується, і прямого (опорного) пучка, що потрапляє на фотопластинку, минаючи об'єкт. Промінь лазера 1 розщеплюється напівпрозорим дзеркалом 2 на два пучки. Пучок, що пройшов через дзеркало, називають опорним. Лінза 3 та увігнуте дзеркало 4 формують у ньому плоскі хвилі. Їх промені проходять паралельно один до одного. Інший пучок, що висвітлює об'єкт 8, називають об'єктним. За допомогою лінзи 10 і дзеркала 9 він також розширюється й висвітлює предмет 7.

Якщо спрощено уявити об'єкт як точку, то відбиті від нього хвилі матимуть сферичну форму з центром у цій точці. Якщо обидва пучки когерентні, то інтерференційна картина утворюється у всьому обсязі, де перекриваються пучки. Світлочутливе середовище зазнаватиме певних змін, обумовлених впливом світлової енергії.

У тих місцях, де світлові хвилі посилюють одна одну, фотоемульсія засвічується більше, а там, де хвилі послаблюють одна одну, – менше. Після проявлення одержують голограму – записану на фотопластинці інтерференційну картину взаємодії хвиль опорного й об'єктного пучків.

Голограма містить усю необхідну інформацію про об'єкт. При відновленні записаного на фотопластинці зображення голограма підсвічується лише опорним променем. Унаслідок цього виникають два видимих об'ємних

зображення об'єкта, що голографується, – дійсне й уявне.

Голографічну інтерферометрію застосовують для виявлення структурних неоднорідностей, раковин, розривів, сторонніх включень, короблення, а також для визначення величин деформації, відхилень від еталона, порівнянних з довжиною хвилі випромінювання лазера, що використовується. За голограмою можна виконувати прямі вимірювання розмірів об'єкта, знаходити координати окремих точок, вивчати рельєф, форму тощо. Голографічна інтерферометрія дає змогу реєструвати як амплітудну, так і фазову інформацію, що міститься у хвильовому фронті. Тому за допомогою голограм можна розглядати об'єкт з різних точок зору, фотографувати зображення окремих деталей об'єкта, розташованих на різній відстані від спостерігача.

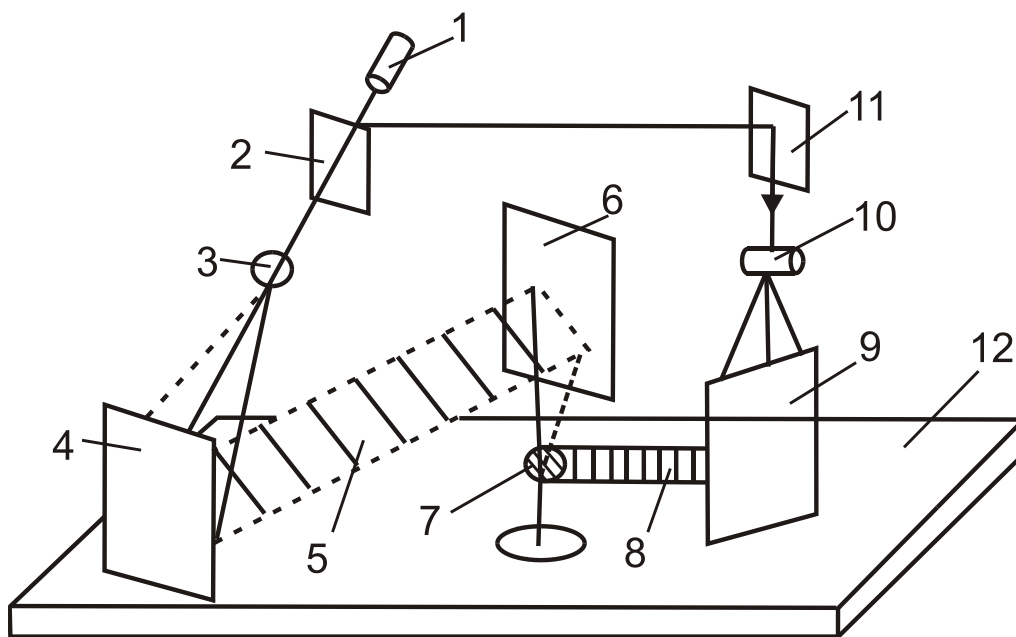


Рис. 9.1. Схема установки для отримання голограм за схемою Лейта: 1 – лазер, джерело когерентного випромінювання; 2, 4, 9, 11 – дзеркала; 3, 10 – розширювальні лінзи; 5 – опорний пучок; 6 – фотопластинка; 7 – контрольований об'єкт; 8 – об'єктний пучок; 12 – масивна основа

Переваги голографічного методу:

- безконтактність;
- висока чутливість;
- можливість одночасного дослідження порівняно великих поверхонь;
- об'ємність зображення;
- дискретна або аналогова реєстрація швидких і повільних процесів змінення стану досліджуваних об'єктів;
- можливість дослідження об'єктів з дифузно-відбивними поверхнями, що неможливо у звичайній інтерферометрії;
- порівняльна простота голографічних установок.

Недоліки цього методу:

- процес запису й оброблення голограм досить трудомісткий, оскільки низька чутливість фотоматеріалів потребує експозицій близько кількох секунд;

- вологе оброблення фотопластинок або обслуговування обладнання термопластичного запису та візуальне зчитування інтерферограм потребує спеціальних навичок операторів;

- великі масиви інформації зберігаються на фотопластинках або фотографіях з голограм.

Завдання отримання, зберігання, зчитування та оброблення голографічних інтерферограм вирішується з допомогою сучасної відео- та обчислювальної техніки.

Практичне застосування голографічних методів неруйнівного контролю потребує виконання таких умов:

1. Необхідною є підтримка механічної стабільності об'єкта контролю протягом усього часу експонування голограми з високою точністю (порядку довжини хвилі світла). Тому голографічні установки мають бути оснащені надійною системою віброзахисту (масивними основами, демпферами тощо).

2. Доцільним є застосування лазерів великої потужності для скорочення часу експозиції.

3. Реєструвальні середовища, що застосовуються для фіксації голограм, повинні мати високу просторову роздільну здатність (близько 3000–4000 ліній на 1 мм). Найчастіше для реєстрації голограм використовуються галогенідосрібні світлочутливі емульсії. Технологія отримання інформації за допомогою голографічних інтерферограм дуже чутлива до найменших проявів усадки емульсії, що призводить до спотворення записаної інтерференційної картини й отримання неправильних результатів її розшифрування. Тому необхідно зменшити усадку до мінімуму. Наприклад, виготовлені в заводських умовах голографічні фотопластинки дуже часто мають повністю зняті залишкові напруження всередині емульсійного шару, що може спотворити результативну інтерференційну картину. Для зняття цих напружень пластинки кожної партії спочатку без порушення заводської упаковки на кілька (3–5) діб можна помістити в атмосферу підвищеної вологості (85...90 %) при кімнатній температурі. Потім перенести в умови нормальної вологості до видалення зайвої вологи з упаковки.

Мікроструктура поверхні об'єкта контролю має істотно змінюватися в процесі отримання голограми. Допустимі зміни мікрорельєфу поверхні становлять частки мікрометра.

Існує кілька варіантів методу голографічної інтерферометрії, наприклад інтерферометрія в реальному часі, метод двох експозицій або тимчасового інтервалу та ін.

Інтерферометрія в реальному часі

Після експонування та фотооброблення голограму встановлюють на місце знімання, освітлюють лазерним пучком і спостерігають крізь неї за

об'єктом після його навантаження. Голограма має бути точно поміщена в положення, яке вона займала під час експонування. Інтерференційна картина в цьому випадку виникає внаслідок інтерференції двох фронтів світлових хвиль: відбитого від об'єкта в момент спостереження та відновленого з голограми предметного пучка. Інтерференційні лінії є геометричним місцем точок однакових переміщень, здійснених об'єктом.

Голографічна інтерферометрія в реальному часі дає змогу спостерігати й реєструвати процеси, що відбуваються в тілі, яке деформується в часі. Однак необхідно дотримуватися певних умов. По-перше, щоб інтерференційна картина спостерігалася взагалі і щоб по ній можна було судити про зміни об'єкта, його положення й освітлення при спостереженні через оброблену голограму мають бути точно такими ж, як при отриманні голограми. Це означає, що і предмет, і оптичні деталі голографічної установки мають залишатися у фіксованому положенні протягом часу між експонуванням і спостереженням або можуть бути повернені у вихідне положення з великою точністю. Поєднати інтерференційну структуру, утворену предметним та опорним пучками під час спостереження, зі структурою, зареєстрованою на голограмі, необхідно з точністю до часток відстані між інтерференційними смугами. По-друге, усадка емульсії, що супроводжує процес оброблення фотографічної пластинки, спричиняє неминучі спотворення відновлених хвильових фронтів і відповідне спотворення інтерференційної картини. Крім того, доки фотопластинка не висохне повністю, усадка триває, що ускладнює встановлення голограми за допомогою вихідного опорного пучка.

Двоекспозиційна інтерферометрія

Метод голографічної інтерферометрії може бути реалізований в інший спосіб. На ту саму пластинку двома експозиціями послідовно записуються голограми від об'єкта в початковому й деформованому стані (рис. 9.2).

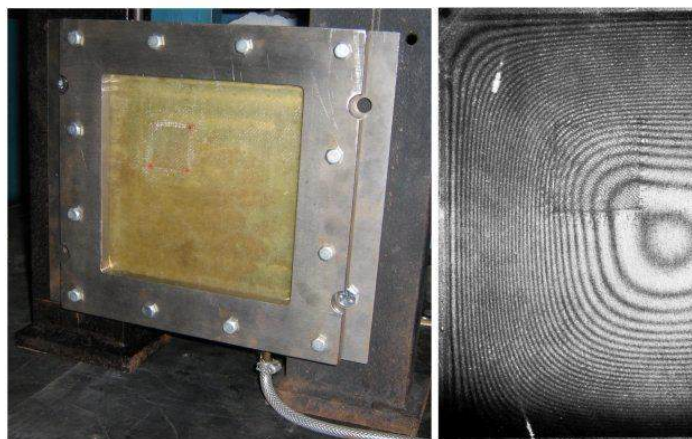


Рис. 9.2. Дослідження дефектів 8-шарового склопластикового композиційного матеріалу

Деформація контрольованого об'єкта може бути обумовлена різними причинами, наприклад, механічним або тепловим впливом. При обох експозиціях використовується однакова опорна хвиля. Спотворення, зумовлені усадкою емульсії, є однаковими для обох відновлених хвиль і тому не впливають на розташування смуг, що утворюються при їх інтерференції.

Електронна спекл-інтерферометрія

Електронна спекл-інтерферометрія багато в чому схожа на голографічну інтерферометрію. У цих методах як джерело когерентного випромінювання використовується лазер. Методи мають близькі оптичні схеми і по суті самі результати вимірювань у вигляді інтерферограм. Відмінність полягає в тому, що голографічна інтерферометрія фіксує повну інформацію про геометрію тіла, а спекл-інтерферометрія використовує електронну фотографію особливо тонкої зернистої структури світла, відбитого дифузним об'єктом при лазерному освітленні, – поле спеклів (англ. *spark* – іскра, спалах, пробиск). Очі спостерігача сприймають це як іскорки на ділянці, освітленій лазером. Детектор (фотопластинка, відеокамера) фіксує спекл у вигляді зернистої структури на зображенні. Для голографії спекл є шумом, що погіршує зображення, але в спекл-інтерферометрії це носій інформації, оскільки спекл-структура залежить від форми поверхні й добре відображає її змінення. Запис і зіставлення двох спекл-структур, що легко проводяться на ЕОМ в цифровій формі, виявляють змінення в положенні або геометрії тіла у вигляді такої системи ліній, як і в голографії, тобто інтерферограми, причому з тією ж чутливістю.

Зменшення інформативності спекл-інтерферограми порівняно з голографічною внаслідок заміни об'ємної картини на плоску в цьому випадку є несуттєвим, а методично неоднорідний процес голографічної інтерферометрії замінюється єдиним, технологічно зв'язаним циклом з більш широкими можливостями автоматизації.

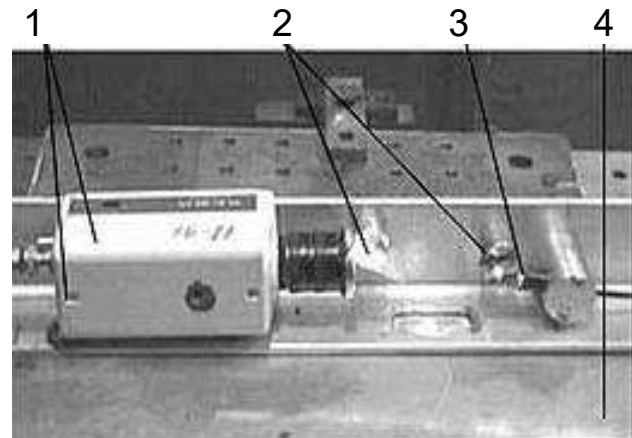
Важливою особливістю електронної спекл-інтерферометрії є те, що можна записати практично необмежену кількість експозицій, а потім брати їх довільні комбінації. Кожне поєднання відображатиме зсув об'єкта між експозиціями. Можна порівнювати кадри як статичного стану, так і кадри, зроблені під час руху об'єкта; необхідно лише підібрати час експозиції та час між експозиціями. Отже, послідовність поєднань експозицій покаже рух об'єкта з субмікронною точністю.

З використанням електронної спекл-інтерферометрії було створено систему нового покоління для вимірювання напружень у пружних тілах і конструкціях – ЛІМВН-ТВ, у якій поєднуються ідеї та методи голографічної інтерферометрії, розроблені раніше для аналізу залишкових напружень, з перевагами сучасної комп'ютерної техніки. Крім дослідження напружень ця система дає змогу вирішувати й інші завдання: визначення місць застосування й величини навантажень, що діють на пружне тіло, напружень в

тонких плівках і зв'язків їх механічних характеристик з напруженнями, розподілених й локальних неоднорідностей структури тіла, наявності мікротріщин і внутрішніх розшарувань, відшарувань, передумов їх виникнення тощо. Вимірювання проводяться в режимі реального часу. Переносна малогабаритна вимірювальна система складається з блока інтерферометра та комп'ютерного блока. Блок інтерферометра складається з опорно-юстирувальної конструкції і корпусу, у який вмонтовано напівпровідниковий лазер з довжиною хвилі 640 нм, технічну відеокамеру з високою чутливістю (0,1 люкс) і роздільною здатністю 600 телевізійних ліній та інші елементи оптичної схеми: напрямні дзеркала, що формують опорний і предметний світлові пучки. Комп'ютерний блок у мобільному варіанті складається з переносної ЕОМ, що має відеовхід для під'єднання звичайної відеокамери. За відсутності відеовходу як аналого-цифрового перетворювача може бути використаний зовнішній пристрій типу Cap View, що приєднується до ЕОМ через USB-порт. На рис. 9.3 показано загальний вигляд комп'ютерного інтерферометра ЛІМВН-ТВ та один із варіантів компоновки оптичної схеми.



а



б

Рис. 9.3. Комп'ютерний інтерферометр ЛІМВН-ТВ (а – загальний вигляд; б – оптична схема): 1 – відеокамера; 2 – система поділу променів із двох напівпрозорих дзеркал і матового скла; 3 – напівпровідниковий лазер; 4 – об'єкт вимірювань

Визначення залишкових напружень

Суть способу визначення залишкових напружень методом зондувальної лунки в поєднанні з голографічною інтерферометрією полягає в такому. Під час першої експозиції записується голограма околу майбутньої лунки на поверхні об'єкта у вихідному стані. Потім створюється збурення поверхні тіла (наприклад, шляхом висвердлювання або травлення малої лунки), унаслідок чого виявляються залишкові напруження (вилучення малого об'єму приводить до локальних пружних переміщень, пропорційних залишковим напруженням). Далі записується голограма збуреної в такий спосіб поверхні тіла. Унаслідок накладання голограм при їх одночасному відновленні пружні

переміщення поверхні в околі лунки відображаються у вигляді інтерферограми, що є наочною і простою для розшифровування. У разі реєстрації нормальної компоненти переміщень (перпендикулярної до початкової поверхні тіла) смуги інтерферограми є лініями рівня, тобто однакових переміщень, що відрізняються за висотою на половину довжини хвилі лазерного випромінювання $\lambda/2 \sim 0,3$ мкм (рис. 9.4).

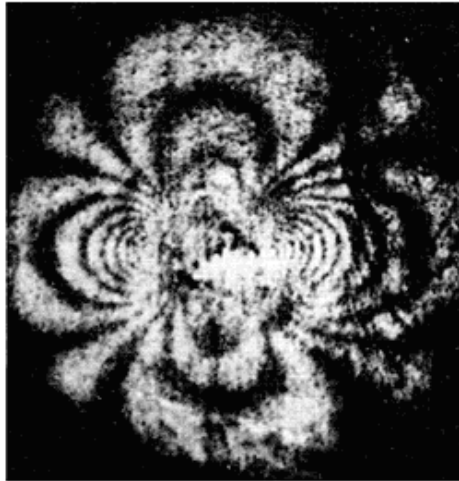


Рис. 9.4. Інтерферометричні лінії рівня пружних переміщень поверхні тіла із залишковим напруженням в околі зондувальної лунки

Осі симетрії інтерференційної картини збігаються з напрямками екстремальних (головних) розтягувальних і стискальних залишкових напружень. Величина напружень є пропорційною кількості інтерференційних смуг, причому ціна смуги залежить від пружних властивостей матеріалу, діаметра й глибини лунки і визначається за графіками (рис. 9.5), розрахованими шляхом розв'язання тривимірної задачі теорії пружності.

Обсяг необхідних обчислень для отримання значень напружень є дуже малим, їх може виконати оператор відразу при отриманні та спостереженні інтерференційної картини. При цьому, на відміну від тензометрування, де вимірювання виконуються для окремих точок, цей метод реєструє лінії рівня переміщень по всій ділянці поверхні тіла в околі зондувальної лунки, що дає змогу візуально визначати напрямки головних напружень і робити якісні висновки про властивості напружень ще до підрахунку числових значень відповідних величин.

Для визначення залишкових напружень застосовуються портативні голографічні системи для вимірювання напружень кількох видів під загальною назвою «ЛІМВН» (лазерно-інтерферометричний метод визначення напружень). За допомогою цих систем, наприклад, було виконано експертну роботу зі встановлення причин саморуйнування корпусу одного з космічних апаратів під час зберігання.

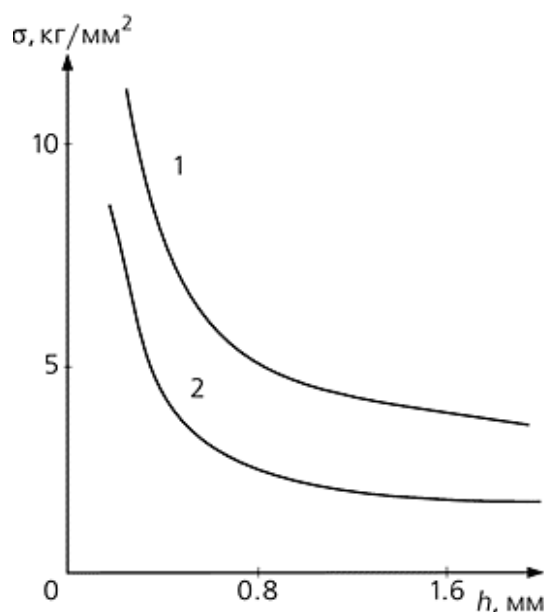


Рис. 9.5. Графіки ціни смуги (напруження σ залежно від глибини зондувальної лунки h):
1 – при вимірюваннях тільки по чорних смугах; 2 – при вимірюваннях як по чорних, так і по білих смугах

Контрольні запитання

1. У чому полягає суть голографічного методу контролю якості?
2. Назвіть переваги голографічного методу.
3. Перелічіть основні умови, які слід виконувати при застосуванні голографічного методу.
4. Які варіанти методу голографічної інтерферометрії вам відомі?
5. У чому полягає особливість інтерферометрії у реальному часі та двоекпозиційної інтерферометрії?

10. РЕНТГЕНОДЕФЕКТОСКОПІЯ І РАДІОГРАФІЯ

За останні п'ятдесят років рентгеноскопія пройшла шлях від спроб отримання зображення до застосування сучасних мультифокусних рентгєнівських нанометрових трубок. Перший проєкційний рентгєнівський мікроскоп з'явився на початку 50-х років минулого століття. Рентгєнівські промені були відкриті понад сто років тому (1895 р.) німецьким фізиком Вільгельмом Конрадом Рєнтгєном і названі його ім'ям. Однак практичне використання цих променів для контролю малих об'єктів тоді було обмеженим, оскільки важко отримати малу фокусну пляму, і висока роздільна здатність зображення залишалася недосяжною. У середині минулого століття були отримані пучки рентгєнівських променів, що виходять з точки мікронних розмірів, проте широке застосування технології обмежувалося складністю й високою вартістю обладнання. Наприкінці 1970-х років у британському інституті

Харвелла було розроблено «міні-фокусну» систему рентгеноскопії з роздільною здатністю 30 мс, але обладнання залишалося складним у керуванні й дорогим.

Першу комерційно успішну рентгенівську мікрофокусну трубку з фокусною плямою розміром 5 мкм було розроблено й запатентовано 1982 року німецьким інженером Альфредом Рейнгольдом, який започаткував фірму FEINFOCUS. Винахід був узятий як стандарт для систем рентгенівського контролю, і безліч виробників стали пропонувати системи на основі технології, розробленої FEINFOCUS.

Вимоги до систем контролю постійно підвищуються. Розмір фокусної плями тепер має бути меншим за 1 мкм. Нині розроблено нанофокусні рентгенівські трубки.

Рентгенодефектоскопія ґрунтується на поглинанні рентгенівських променів, яке залежить від густини середовища й атомного номера елементів, що утворюють матеріал середовища.

На рис. 10.1 зображено схему рентгенівського просвічування. Наявність таких дефектів, як тріщини, раковини або включення стороннього матеріалу, приводить до того, що промені, які проходять крізь матеріал, послаблюються різною мірою. Реєструючи розподіл інтенсивності променів, що проходять, можна визначити наявність і розташування неоднорідностей матеріалу (рис. 10.2).

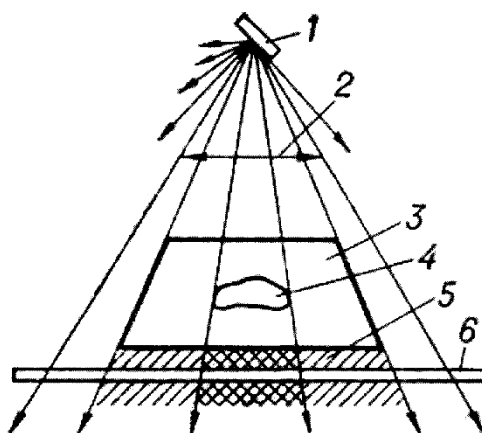


Рис. 10.1. Схема рентгенівського просвічування: 1 – джерело рентгенівського випромінювання; 2 – пучок рентгенівських променів; 3 – деталь; 4 – внутрішній дефект у деталі; 5 – рентгенівське зображення за деталлю; 6 – реєстратор рентгенівського випромінювання

Метод застосовують для виявлення пор, сторонніх включень, нерівномірного кроку укладання тощо.

Інтенсивність променів реєструють декількома методами. Фотографічними методами одержують знімок деталі на плівці. Візуальний метод базується на спостереженні зображення деталі на флуоресціювальному екрані. Найбільш ефективним цей метод є при використанні електронно-оптичних перетворювачів.

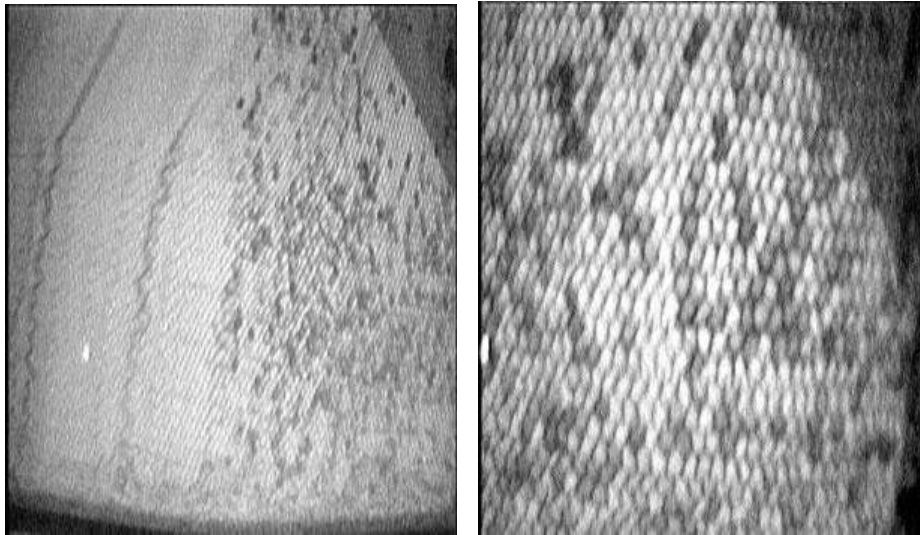


Рис. 10.2. Знімок агрегату, що містить вологу в стільниках, та його збільшений фрагмент, отриманий рентгеноскопічним методом

При ксерографічному методі отримують зображення на металевих пластинках, покритих шаром речовини, поверхні якого надається електростатичний заряд. На пластинах, які можуть використовуватися багаторазово, одержують контрастні знімки. Іонізаційний метод ґрунтується на вимірюванні інтенсивності електромагнітного випромінювання за його іонізуючою дією, наприклад, на газ. У цьому випадку індикатор можна встановити на достатній відстані від виробу, що дає змогу контролювати вироби, нагріті до високої температури.

Чутливість методів рентгенодефектоскопії визначається відношенням протяжності дефекту в напрямку просвічування до товщини деталі в цьому перерізі та для різних матеріалів становить 1...10 %.

Устаткування

До комплекту рентгенівського апарата входять:

- високовольтний генератор;
- рентгенівська трубка;
- система охолодження рентгенівської трубки;
- цифровий пульт керування;
- високовольтний кабель.

Для комплектації рентгенівських апаратів мають застосовуватися високостабілізовані високовольтні генератори. Таким обладнанням є, наприклад, генератори фірми Spellman (рис. 10.3). Генератори мають високу стабільність струму й напруги (довгочасна стабільність не менше 0,1 %) і забезпечують високу швидкість виходу на встановлену високу напругу.

При цьому досягається висока точність визначення параметрів та їх точна відтворюваність під час проведення контролю.



Рис. 10.3. Генератор Spellman XRV160

Сьогодні кращі металокерамічні рентгенівські трубки виготовляються швейцарською фірмою COMET (рис. 10.4). Рентгенівські апарати комплектуються трубками як з панорамною (360°), так і з прямокутною ($30^\circ \dots 40^\circ$) діаграмою рентгенівського випромінювання в діапазоні напруги на аноді трубки від 100 до 450 кВ.

Металокерамічні трубки COMET відповідають усім вимогам безпеки та можуть бути використані для цілодобової роботи.

Охолодження анода рентгенівської трубки апарата залежно від типу трубки (уніполярна або біполярна) проводиться з використанням водяного або масляного охолодження (рис. 10.5).



Рис. 10.4. Рентгенівська трубка MXR-350HP-11



Рис. 10.5. Система охолодження OL-4503 для біполярної трубки

В уніполярних трубках (на напругу до 225 кВ) анод трубки охолоджується дистильованою водою або антифризом. У біполярних трубках (320, 350, 420, 450 кВ) анод трубки охолоджується маслом, а масло охолоджується водою та повітрям. Як приклад можна навести системи охолодження фірми Kluver (Німеччина), у яких за допомогою помпи забезпечується циркуляція рідини між рентгенівською трубкою та теплообмінником з водяним (повітряним) охолодженням.

Цифровий пульт керування, що входить до комплекту рентгенівського апарата, показано на рис. 10.6.



Рис. 10.6. Цифровий пульт керування

10.1. Рентгенотелевізійні системи

Рентгенотелевізійні системи призначено для отримання видимого зображення на моніторі. Рентгенівське зображення об'єкта перетворюється рентгенооптичним перетворювачем (РЕОП) на видиме зображення, яке, своєю чергою, перетворюється на стандартний аналоговий або цифровий відеосигнал.

Відеосигнал передається на аналоговий монітор для отримання зображення в реальному часі та в комп'ютерну систему архівування та поліпшення рентгенівських зображень «ВідеоРен».

На рис. 10.7 показано універсальний рентгенотелевізійний комплекс «Артикон 305». Комплекс легко адаптується до завдань повністю автоматизованого контролю й відбраковування виробів. Максимальна маса контролюваного об'єкта становить 100 кг, висота – до 500 мм, поперечний розмір – до 350 мм.



Рис. 10.7. Універсальний рентгенотелевізійний комплекс «Артикон 305»

Програмне забезпечення, що поставляється в комплекті з комплексами цифрового оброблення й архівування рентгенівських зображень, дає змогу проводити автоматичний пошук дефектів, вимірювати геометричні

розміри дефектів зображення та профілю густини, калібрувати їх за оптичною густиною.

Радіографія – метод отримання на детекторах видимого зображення внутрішньої структури об'єкта контролю, що просвічується іонізуювальним випромінюванням. В основі радіаційних методів виявлення дефектів лежать закони ослаблення іонізуювальних випромінювань речовиною і способи реєстрації інтенсивності випромінювання за об'єктом, що просвічується. Як реєстратори випромінювання в радіографічному методі неруйнівного контролю найчастіше використовуються рентгенівські плівки. У разі просвічування контрольованих об'єктів на рентгенівську плівку розташування, форма й розміри внутрішніх дефектів визначаються за фотографічним зображенням тіншової проєкції виробу – рентгенівським знімком.

Залежно від виду випромінювання розрізняють рентгенографію, гамографію, бетатронну, мікротронну й нейтронну радіографію.

Рентгенографія застосовується переважно в цехових і рідше в польових умовах у випадках, коли до якості виробу ставляться високі вимоги, гамографія – для контролю виробів великої товщини, а також стиків, розташованих у важкодоступних місцях, у польових і монтажних умовах. Бетатронна й мікротронна радіографія є ефективною під час дефектоскопії виробів великої товщини в основному в цехових умовах. Нейтронна радіографія застосовується для контролю сполук важких металів, водородовмісних матеріалів і радіоактивних виробів.

Цифрова радіографія – це метод, що базується на використанні здатності деяких люмінофорів формувати приховане зображення в зернах кристалів люмінофору, що утворюють покриття пластини. Електрони, що утворюються в них унаслідок опромінення рентгенівським або гамма-випромінюванням, захоплюються на енергетичні рівні й залишаються на них протягом тривалого часу. З цього стану електрони можна вивести шляхом збудження лазерним пучком. Оскільки зчитування інформації, записаної на флуоресцентну пластину, є можливим лише з використанням сучасної комп'ютерної техніки, цей вид запису отримав назву комп'ютерної, або цифрової, радіографії.

У цифровій радіографії для отримання зображення використовується спеціальна запам'ятовувальна флуоресцентна пластина багаторазового використання. Пластини мають типові для рентгенівської плівки розміри (6 x 24, 6 x 48, 10 x 24, 10 x 48, 18 x 24, 24 x 30, 30 x 40 та 35 x 43 см) та експонуються аналогічно плівці в касетах або гнучких конвертах. Для запам'ятовування зображень у пластині використовується шар із фотостимульованою пам'яттю – складна хімічна сполука. Найчастіше використовуються сполуки типу $BaFBr_{1-x}Eu_{2+}$.

Комплекс цифрової радіографії «Градiєнт» із запам'ятовувальними флуоресцентними пластинами (рис. 10.8) характеризується гнучкістю, надійністю, високими роздільною здатністю й чутливістю, великим динамічним діапазоном і простотою експлуатації.



Рис. 10.8. Комплекс цифрової радіографії «Градiєнт»

Комплекс цифрової радіографії «Градiєнт» зі сканером Duerr і запам'ятовувальними пластинами розроблено спеціально для застосування в неруйнівному контролі, тому підходить для використання як з рентгенівськими, так і з ізотопними джерелами. Комплекси дають змогу вирішувати широкий спектр завдань неруйнівного контролю в електроенергетиці, авіакосмічній, нафтогазовій, автомобільній та інших галузях промисловості.

Під дією рентгенівського або гамма-випромінювання електрони всередині «флуоресцентних» кристалів збуджуються й переходять у квазістабільний стан. Спеціальний зчитувач сканує експоновану пластину лазерним пучком. При цьому електрони вивільняються з пастки, що супроводжується емісією видимого світла, довжина хвилі якого відрізняється від довжини хвилі випромінювання лазера, що сканує. Це світло збирається фотоприймачем і конвертується в цифровий сигнал, що перетворюється на цифрове зображення.

Касета або гнучкий конверт із запам'ятовувальною пластиною експонується аналогічно плівці, тобто розташовується за об'єктом контролю. Пластина є гнучкою і може експонуватися без касети або гнучкого конверта, якщо це потрібно. Завантаження й розвантаження пластини з касети або гнучкого конверта проводяться на світлі, не потребується спеціальна темна кімната. Оскільки чутливість пластини є значно вищою, ніж плівки, час експозиції пластини в 5–10 разів менший. Після експонування пластину виймають з касети або гнучкого конверта й поміщають у сканер цифрової радіографії.

У сканері зображення зчитується. Час зчитування зображення становить від 10 секунд до декількох хвилин і залежить від розміру використовуваної пластини й вибраної просторової роздільної здатності. Зображення виводиться на монітор комп'ютера, архівується й протоколюється. За допомогою програмного забезпечення, що поставляється у складі комплексу

цифрової радіографії, зчитане зображення може бути поліпшено із застосуванням різних фільтрів, а також зроблено пошук дефектів, визначено їх лінійні розміри, згенеровано різні форми висновків тощо. Після зчитування зображення інформація з пластини стирається, і пластина знову готова до роботи.

Для розшифрування радіографічних знімків застосовуються негатоскопи.

Негатоскоп (рис. 10.9) являє собою освітлювальний прилад з екраном, що рівномірно світиться, яскравість якого можна плавно змінювати.

Яскравість забезпечують три галогенні лампи змінної напруги. Регулюється яскравість зміненням напруги живлення цих ламп. Для захисту контрольованих радіографічних знімків від теплового випромінювання використовується інфрачервоний фільтр.



Рис. 10.9. Негатоскоп Н 85/220

10.2. Детектори рентгенівського й радіографічного контролю

Як *детектори радіографічного контролю* можуть застосовуватися фоточутлива плівка, фотопапір, напівпровідникова пластина. Найбільш широко застосовується рентгенівська плівка. У радіографії використовується властивість рентгенівських плівок чорніти після відповідного фотооброблення під дією іонізувального випромінювання.

Плівка є тонкою підкладкою з нітроцелюлози або ацетатцелюлози, на яку наноситься шар фотографічної емульсії, що являє собою суспензію мікроскопічних кристалів бромистого срібла в желатині. Емульсійні шари покривають захисним шаром желатину завтовшки 0,001 мм.

Розрізнення дефектів підвищується, якщо застосовувати кольорову радіографію, тобто просвічувати об'єкт контролю з реєстрацією зображення на кольорову рентгенівську плівку. Унаслідок цього отримують знімки з контрастами кольорів, що визначаються змінням густини матеріалу, перепадом товщин.

Крім рентгенівської плівки для реєстрації результатів просвічування застосовуються напівпровідникові перетворювачі, дія яких ґрунтується на властивості деяких матеріалів змінювати провідність під дією рентгенівського випромінювання. Тіньове рентгенівське зображення об'єкта, що просвічується, перетворюється напівпровідниковою пластиною на двовимірний рельєф провідності за допомогою електрорентгенографічного апарата. Перетворювачем в електрорентгенографічному апараті є ксерорентгенографічна пластина, що реагує на рентгенівські промені, які пройшли крізь об'єкт, зміненням параметрів електричного поля таким чином, що залишковий заряд є пропорційним зміненню інтенсивності випромінювання. За допомогою барвників-пігментів електростатичне зображення з пластини переноситься на папір.

Контрольні запитання

1. У якому разі застосовуються рентгеноскопія та радіографія? Як здійснюється контроль за якістю цими методами?
2. Які дефекти можна виявити рентгеноскопічним і радіографічним методами?
3. Які джерела проникного випромінювання використовуються в цих методах?
4. Яке обладнання застосовується для дефектоскопії КМ рентгеноскопічним і радіографічним методами?

11. ТЕПЛОВИЙ МЕТОД НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ІНФРАЧЕРВОНА ТЕРМОГРАФІЯ

Теплові методи неруйнівного контролю (ТНК) з'явилися на початку 60-х років минулого століття і нині є напрямом, що швидко розвивається.

У теплових методах неруйнівного контролю використовується теплова енергія, що поширюється в об'єкті контролю. Розподіл температури по поверхні об'єкта є основним параметром в тепловому методі, оскільки дає інформацію про особливості процесу теплопередачі, режим роботи об'єкта, його внутрішню структуру та наявність прихованих внутрішніх дефектів. Інформацію про дефекти дають локальні неоднорідності температурного поля на поверхні об'єкта контролю. Методи теплового контролю ґрунтуються на взаємодії теплового поля об'єкта з термодинамічними чутливими елементами (термопарою, фотоприймачем, рідкокристалічним індикатором тощо), перетворенні параметрів поля (інтенсивності, температурного градієнта, контрасту, променистості тощо) на електричний сигнал та його передаванні на реєструвальний прилад.

Активний метод теплового контролю використовується, якщо в процесі експлуатації контрольований об'єкт не піддається достатньому

тепловому впливу (наприклад, деталі з композиційних матеріалів) або температура об'єкта під час експлуатації не змінюється. Передбачається нагрівання об'єкта спеціальними зовнішніми джерелами енергії для створення теплових потоків під час контролю. Для неруйнівного контролю матеріалів і виробів застосовується переважно активний метод.

Існують різні способи активного теплового контролю виробів. Може здійснюватися короточасне локальне нагрівання виробу з подальшою реєстрацією температури тієї самої (при односторонньому контролі) або протилежної поверхні (при двосторонньому контролі). Таким чином, досліджується вся поверхня виробу, причому виміряна температура дефектних областей істотно відрізнятиметься від температури бездефектних ділянок. При іншому способі теплового контролю може бути використана система сканування, що складається з жорстко закріплених один відносно одного джерела нагрівання і реєструвального приладу (наприклад, радіометра), що переміщаються з постійною швидкістю вздовж поверхні зразка. Для теплового контролю елементів конструкцій аерокосмічних апаратів можна застосовувати, наприклад, радіометри спеціального призначення ІІ-30А та ІІ-40А, які є основними частинами складних дефектоскопічних комплексів. Завдяки мінімальним розмірам приймального оптичного блока ІІ-30А можна проводити контроль у важкодоступних місцях досліджуваних об'єктів. Така реєстрація може бути здійснена також приладом «Термопрофіль». При одночасному нагріванні всієї поверхні зразка подальша одночасна реєстрація температурного розподілу може бути виконана за допомогою тепловізора.

Суть активного теплового контролю полягає в аналізі температурного відгуку на заданий зовнішній тепловий вплив.

Залежно від характеру одержуваної інформації розрізняють:

- теплову дефектоскопію – визначення наявності дефекту та його розташування в об'єкті контролю;
- теплову дефектометрію – методи й засоби кількісного оцінювання глибини залягання дефектів, їх розмірів;
- теплову томографію – метод візуалізації внутрішніх перерізів об'єкта за допомогою теплових ефектів, який дає змогу провести повне розшифрування внутрішньої структури об'єкта. Його можна реалізувати імпульсним опроміненням об'єкта плоским рівномірним пучком променів з послідовною реєстрацією «теплових відбитків» дефектів або неоднорідностей теплофізичних параметрів контрольованої структури на протилежній стороні виробу за допомогою швидкодіючого тепловізора.

Перші два методи вже є достатньо розробленими й широко використовуються в практиці теплового контролю. Теплова томографія лише розробляється.

В авіакосмічній промисловості активний тепловий контроль застосовується для виявлення дефектів структури композиційних матеріалів, готових панелей, клейових з'єднань, захисних покриттів тощо.

Пасивний метод теплового контролю не потребує зовнішнього

джерела теплового впливу, теплове поле в об'єкті контролю виникає під час його виготовлення або експлуатації. При пасивному контролі можна використовувати як постійно діюче природне теплове навантаження об'єкта (наприклад, двигун, контактні електричні з'єднання під навантаженням тощо), так і перехідні теплові процеси (наприклад, контроль авіаційних стільникових панелей).

Тепловізійна технічна діагностика з використанням пасивного методу набула широкого застосування в енергетиці, промисловості. Основна перевага методу – контроль об'єктів без виведення з експлуатації та без будь-якого впливу на них. Очевидно, що успішному впровадженню теплового методу контролю сприяє розвиток засобів вимірювання, переважно тепловізійної техніки. Частка завдань теплового контролю, що вирішуються з допомогою тепловізорів, є настільки великою, що часто використовується термін «тепловізійний контроль». Як приклад можна навести промисловий тепловізор Optris PI (рис. 11.1) з такими технічними характеристиками:

- температурний діапазон – $(-20...900) ^\circ\text{C}$;
- розміри – 45 x 45 x 62 мм;
- маса – 250 г;
- висока чутливість: NETD 0,08 К;
- частота розгортки – 100 Гц;
- змінні об'єктиви: стандартний, ширококутний і довгофокусний;
- USB-інтерфейс, живлення по USB;
- кабель завдовжки 1,5 або 20 м;
- ПЗ PI Connect (сумісне з Windows XP/Vista);
- аналогові вхід і вихід, тригер.



Рис. 11.1. Промисловий тепловізор Optris PI (виробник Optris GmbH, Німеччина)

Тепловий неруйнівний контроль можна здійснювати такими методами:

1. *Вібротепловізійний метод* є особливо перспективним для аналізу виробів, що працюють в умовах вібрації. У матеріалах з дефектами структури під впливом вібрації виникають температурні поля, що обумовлено розсіюванням енергії коливань на дефектах і перетворенням її на теплоту. В областях порушення гомогенності структури виникають локальні нагрівання

об'єкта. На термограмах пластин, що вібрують, та інших об'єктів чітко виявляються дефекти у вигляді розшарувань, несучільностей тощо.

2. *Вихрострумотепловий метод* базується на радіоімпульсному збудженні металевих об'єктів полем індуктора, прийманні теплового відгуку приповерхневим перетворювачем під час і після теплового впливу, а також на аналізі амплітудно-часової інформації. Тепловий процес визначається теплофізичними та одночасно електромагнітними параметрами об'єкта, що дає змогу в одному експерименті проводити дослідження як тепловими, так і вихрострумовими методами. Зокрема, коефіцієнт температуропровідності є чутливим до хімічного складу та структури матеріалів (до розміру зерна, фазового складу). За допомогою вихрострумотеплового методу також здійснюється теплова товщинометрія феромагнітних і тонкостінних виробів, виробів з грубою поверхнею та ін.

Теплографічний тепловий неруйнівний контроль композитів є ефективним для контролю тонкостінних оболонок з полімерних композиційних матеріалів, міцність яких істотно залежить від дефектів у вигляді розшарувань, непростеїв тощо. Цей метод полягає в нагріванні (тепловому навантаженні) виробу та спільній реєстрації термограм і голографічних інтерферограм нагрітої поверхні. При цьому виявлення дефектів здійснюється за наявності аномалій інтерференційних смуг, а вивчення їх довжини та глибини залягання – на основі аналізу термограм контрольованої зони виробу при нагріванні галогенними лампами.

Тепловий контроль може бути контактним і безконтактним.

Для безконтактного теплового контролю може бути використаний метод інфрачервоної дефектоскопії. Усі композиційні матеріали, що використовуються в техніці, поділяються на дві основні групи: такі, що пропускають променистий потік, і такі, що його не пропускають. До КМ, що пропускають ІЧ-проміння, належать пластмаси, склопластики і органопластики, до КМ, що не пропускають ІЧ-проміння – усі електропровідні матеріали (вуглепластики, боропластики, металеві матеріали). Прозорість матеріалів для ІЧ-випромінювання багато в чому залежить від типу наповнювача та сполучного, типу структури (регулярності укладання наповнювача, способу переплетення, діаметра волокна тощо), від показників заломлення матеріалів наповнювача та сполучного, адгезії наповнювача та сполучного та ін.

Залежно від ступеня пропускання променистого потоку пластмаси та композиційні полімерні матеріали можна поділити на групи:

- зі спрямованим пропусканням (рис. 11.2, а) (різних типів органічне скло, полістирол, вініпласт, затверділі поліефірні й епоксидні смоли, поліетилен тощо); для таких матеріалів дотримується умова $\alpha = \alpha_1$;
- зі спрямованим розсіювальним пропусканням (рис. 11.2, б);
- з розсіювальним (дифузним) пропусканням (рис. 11.2, в) (склопластики, склоорганопластики, азбопластики, пінопласти тощо);
- зі змішаним пропусканням;
- непрозорі (що не пропускають ІЧ-променів).

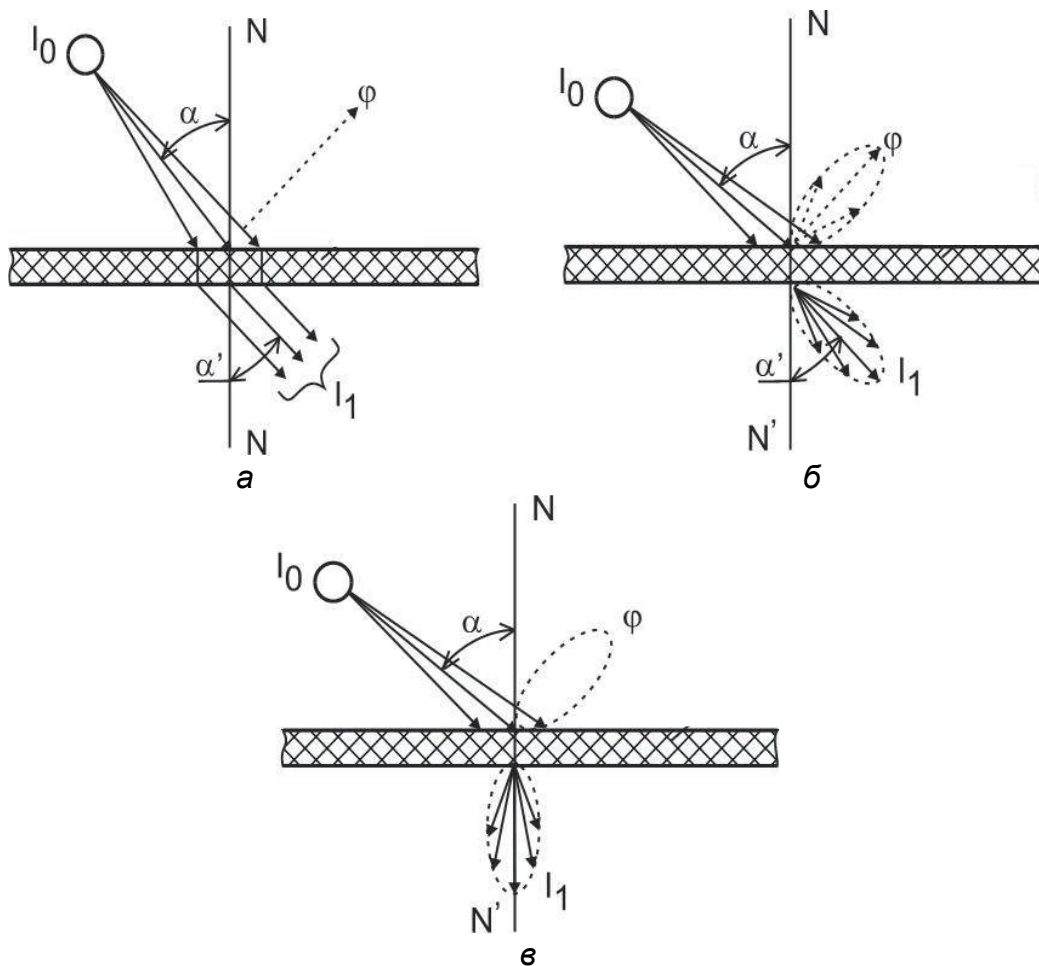


Рис. 11.2. Поділ матеріалів на групи залежно від ступеня пропускання променистого потоку

Виявлення дефектів у композиційних матеріалах за допомогою ІЧ-методу ґрунтується на реєстрації випромінювання, що відбито або пройшло через досліджуване середовище.

Процес контролю дефектів здійснюється в такий спосіб. Потік інфрачервоного випромінювання, що формується випромінювачем, прямує на виріб. Спектр випромінюваного сигналу залежить від типу ІЧ-джерела, оптичних властивостей досліджуваного матеріалу, товщини виробу та інших факторів. Однак, урахувуючи, що багато видів пластмас і склопластиків мають вікна прозорості на різних довжинах хвиль, доцільніше використовувати джерела з широким спектром випромінювання. Ще однією важливою вимогою, що ставляться до ІЧ-джерел, є забезпечення постійної інтенсивності випромінювання.

Випромінювання, що пройшло через виріб із закладеною інформацією про властивості і структуру матеріалу, надходить на приймач, у якому енергія випромінювання перетворюється на електричний сигнал і посилюється в блоці підсилювачів до потужності, необхідної для роботи фотомодуляційної лампи. Фотомодуляційна лампа перетворює електричний сигнал на світловий, який фіксується на фотоматеріалі (плівці, пластинці, папері). Яскравість світлового сигналу пропорційна інтенсивності випромінювання, що

пройшло через виріб.

Блок-схему пристрою для методу інфрачервоної дефектоскопії зображено на рис. 11.3.

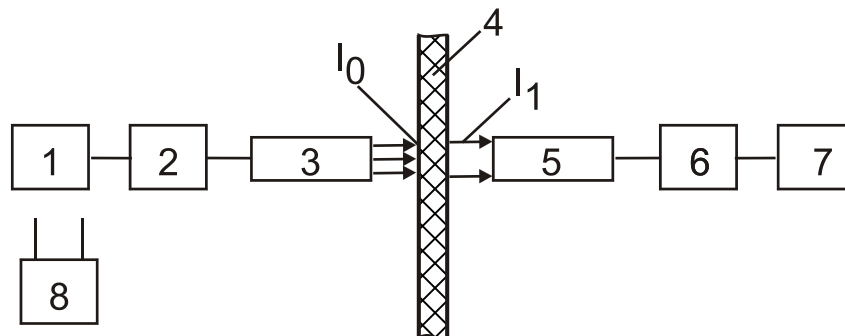


Рис. 11.3. Блок-схема пристрою для методу інфрачервоної дефектоскопії КМ:

- 1 – звуковий генератор; 2 – підсилювач; 3 – джерело ІЧ-випромінювання;
- 4 – досліджуваний зразок КМ; 5 – приймач ІЧ-випромінювання;
- 6 – підсилювач; 7 – реєструвальний пристрій; 8 – блок живлення

Випромінювальна частина установки, призначена для отримання ІЧ-випромінювання у вигляді імпульсів прямокутної форми з частотою проходження 30 кГц, складається зі звукового генератора, підсилювача струму і джерела ІЧ-випромінювання. Як джерело випромінювання використовується інжекторний лазер, у якому електричні імпульси перетворюються на ІЧ-випромінювання. Приймальна частина установки складається з приймача – фотодіода, чутливого до ІЧ-випромінювання, підсилювача і реєструвального пристрою. Як реєструвальний пристрій використовується осцилограф. Блок живлення дає змогу здійснити живлення однополярною стабілізованою напругою 12 В.

Можливість виявлення дефектів і внутрішньої структури матеріалу ґрунтується на яскраво вираженій залежності між оптичною густиною досліджуваного матеріалу та інтенсивністю променистої енергії. Під час перенесення променистої енергії змінюється її величина і спектральний склад. Величина енергії змінюється внаслідок поглинання та розсіювання потоку випромінювання середовищем, у якому цей потік поширюється.

Змінення спектрального складу потоку випромінювання обумовлено тим, що окремі складові компоненти середовища по-різному поглинають і розсіюють ІЧ-випромінювання.

Використовуючи інфрачервоний метод, можна на кожен виріб отримувати фотодокумент, що характеризує внутрішній стан контрольованого виробу. Таким чином, у кожному виробі можна визначити параметри променистого потоку, за якими оцінюють якість матеріалу у виробі як у процесі його виготовлення, так і під час експлуатації. Метод застосовується для виявлення зміщення армувального матеріалу, утворення складок нахлисту шарів ділянок з підвищеною пористістю, розшарувань, непроклеїв, сторонніх включень тощо (рис. 11.4–11.6).

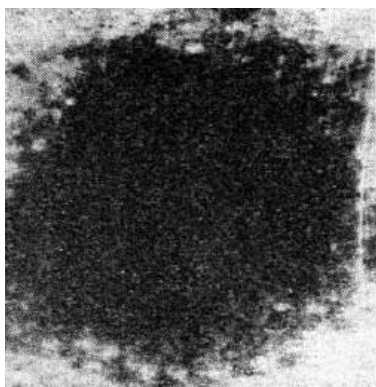


Рис. 11.4. Фотодефектограма плити зі скловолокна з внутрішньою раковиною (темна ділянка), краї якої мають підвищену пористість

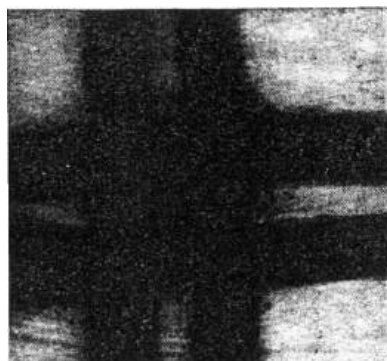


Рис. 11.5. Фотодефектограма плити зі склотекстоліту завтовшки 25 мм зі штучними складками, закладеними в двох шарах на глибині 12 мм

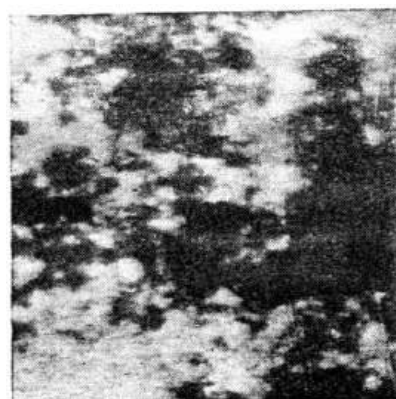


Рис. 11.6. Фотодефектограма плити зі скловолокна завтовшки 7 мм з підвищеною пористістю

Крім того, для теплового контролю можуть застосовуватися термофарби, термопапери, термолюмінофори, рідкокристалічні термоіндикатори та ін.

Переваги теплового контролю:

- дистанційність;
- висока швидкість оброблення інформації;
- висока продуктивність випробувань;
- висока роздільна здатність;
- висока чутливість;
- можливість контролю при одно- та двосторонньому підходах до виробу;
- теоретична можливість контролю будь-яких матеріалів;
- багатопараметричний характер випробувань;
- поєднання зі стандартними системами оброблення інформації;
- можливість потокового контролю та створення автоматизованих систем контролю та керування технологічними процесами;
- можливість отримати фотодокумент, що характеризує внутрішній стан виробу, що контролюється.

Контрольні запитання

1. У чому полягає суть теплового методу контролю якості?
2. Назвіть переваги й недоліки інфрачервоного методу.
3. Які дефекти можна виявити інфрачервоним методом?
4. Яке обладнання застосовується під час контролю тепловим методом?

12. КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЗАХИСНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПОКРИТТІВ

На елементи авіаційних металевих конструкцій наносять шар захисних покриттів, щоб забезпечити їх корозійний і тепловий захист, підвищити герметичність і поліпшити декоративний вигляд. Для цього використовують діелектричні матеріали, зокрема різні лаки, фарби, емалі, кераміку, пластик, а також епоксидні, полімерні та інші матеріали. Крім того, для надійності елементи авіаційних конструкцій з алюмінієвих сплавів перед нанесенням лакофарбових покриттів анодують.

Якість таких покриттів необхідно контролювати неруйнівними методами контролю. Контролюють їх товщину, а також дефекти або пошкодження покриттів (проколи, розшарування, бульбашки).

Особливо небезпечними є наскрізні порушення цілісності захисних покриттів, через які корозійно-агресивне середовище може взаємодіяти з металеву поверхню.

12.1. Вимірювання товщини захисних діелектричних покриттів

Для визначення товщини захисних діелектричних покриттів застосовується метод вихрових струмів, який забезпечує локальне та безконтактне вимірювання при односторонньому доступі до конструкції з достатньою точністю.

Основою методу є залежність параметрів (наприклад, опору) від відстані до провідної поверхні.

Однак на точність вимірювань впливають кривизна поверхні, відстань до краю деталі, наявність отворів і виступів.

Сучасні вихрострумові товщиноміри випускають фірми Elcometer (Англія), Institut Dr. Foster та Fischer (Німеччина), «Кром» (Україна, Дніпро), «Леотест-Медіум» (Україна, Львів).

Товщиноміри ВТА фірми «Леотест-Медіум» випускають для різних діапазонів вимірюваних товщин (табл. 12.1). Прилади ВТА можуть застосовуватися для вимірювання товщини анодно-оксидних покриттів алюмінієвих сплавів.

Таблиця 12.1

Товщиномір	Діапазон вимірюваних товщин захисних покриттів, мм	Похибка вимірювання, %
ВТА-03	0...0,3	2,0
ВТА-4	0...5	1,0
ВТА-20	0...20	1,5
ВТА-40	0...80	1,5

На рис. 12.1 показано багатифункціональний електромагнітний

товщиномір захисних покриттів усіх типів «Константа К5».

Прилад дає змогу контролювати геометричні й електрофізичні характеристики виробів, а також якість підготовки поверхні. За допомогою товщиноміра можна контролювати гальванічні, лакофарбові, плакувальні, порошкові, пластикові, анодно-оксидні та інші спеціальні покриття завтовшки 120 мм на металевих виробах (Стандарт ISO 2808).



Рис. 12.1. Товщиномір захисних покриттів «Константа К5»

Фірмою DeFelsko випускається кілька різних товщиномірів покриттів.

Ультразвуковий товщиномір покриттів PosiTector 200 (рис.12.2) застосовується для вимірювання товщини покриттів на композиційних матеріалах. За допомогою PosiTector 200 можна також вимірювати товщину окремих шарів.

Товщиномір покриттів PosiTector 6000 показано на рис. 12.3. Принцип його роботи базується на вихрострумовому методі вимірювання товщини покриттів. Прилад можна застосовувати для вимірювання товщини покриття на будь-яких металах.

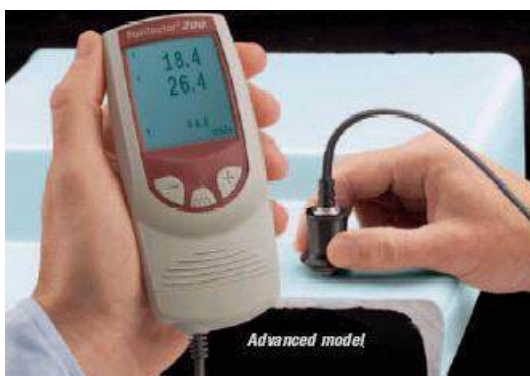


Рис. 12.2. Ультразвуковий товщиномір покриттів PosiTector 200



Рис. 12.3. Товщиномір покриттів PosiTector 6000

На рис. 12.4 зображено вихрострумівий товщиномір покриттів PosiTest DFT, який застосовується для вимірювання товщини покриттів на всіх металах. Прилад забезпечує високу якість контролю.



Рис. 12.4. Товщиномір покриттів PosiTest DFT

Маленький магнітний товщиномір PosiPen (рис. 12.5) призначено для вимірювання товщини захисного покриття на сталі. Завдяки компактності приладу та мініатюрному датчику можна вимірювати товщину покриття у важкодоступних місцях, а також на невеликих ділянках деталей з маленькою площиною для встановлення датчика.

Магнітний товщиномір покриттів PosiTest F/G (рис. 12.6) – нескладний бюджетний прилад для вимірювання товщин шарів фарб та емалей, гальванічних покриттів на сталі.



Рис. 12.5. Магнітний товщиномір покриттів PosiPen



Рис. 12.6. Магнітний товщиномір покриттів PosiTest F/G

12.2. Дефектоскопія захисних діелектричних покриттів

Для контролю порушення суцільності захисних покриттів завтовшки до 500 мкм застосовують «мокрый» метод, який полягає у вимірюванні опору контуру «мокрый» електрод – металева основа деталі.

«Мокрий» електрод – просочена електролітом губка, яка притискається до контрольованого покриття. У місцях наскрізного порушення

покриття електроліт проникає в пошкодження, і опір різко зменшується. Такі пристрої випускає фірма Elektro – Physik (Німеччина). Прилад 204 Pin Hole Detector призначено для контролю покриттів завтовшки до 300 мкм, прилад 269 Pin. Hole Detector – покриттів завтовшки до 500 мкм.

Для дефектоскопії покриття більшої товщини цей метод використовувати не можна через капілярний ефект, який перешкоджає заповненню електролітом тонких отворів і пошкоджень покриттів.

Для контролю цілісності покриттів великої товщини застосовують *електроіскровий* метод, який базується на електричному пробі повітряних проміжків між щупом і металевою основою контрольованої деталі.

Електроіскрові дефектоскопи Pro Test випускає фірма Elektro – Physik (Німеччина), «Корона-2М» – фірма «Інтроскоп» (Молдова), «Пульсар 2J» (Україна, Львів).

Дефектоскоп «Пульсар 2J» забезпечує контроль наскрізних дефектів діаметром не менше 0,3 мм в ізоляційних покриттях завтовшки до 9,5 мм. Швидкість переміщення щупа – до 0,35 м/с. Відстань між двома дефектами, які фіксуються окремо, – не менше 15 мм. Можливою є світлова та звукова індикація дефектів.

Електроіскровий дефектоскоп для контролю суцільності діелектричних покриттів «Корона-2» (рис. 12.7) застосовується для контролю покриттів завтовшки до 10 мм.



Рис. 12.7. Електроіскровий дефектоскоп «Корона-2»

12.3. Адгезіометрія

Адгезіометром з автоматичним навантаженням Positest AT-A (рис. 12.8) вимірюють адгезію покриттів до підкладок. У приладі передбачено можливість самоцентрування (рис. 12.9), а також установлення необхідної швидкості відриву. Адгезіометр Positest AT-A компенсує неспіввідповідність. Нерівна поверхня покриття призводить під час випробування до неоднакових зусиль відриву та отримання випадкових показань. Для отримання результатів адгезії з кращою повторюваністю і таких, що піддаються інтерпретації, необхідно, щоб відривне зусилля, прикладене до випробуваного упора, рівномірно розподілялося по випробуваній поверхні. Самоцентрований зі швидким захопленням виконавчий механізм і сферична шарнірно закріплена головка упора забезпечують рівномірний розподіл відривного зусилля по випробуваній поверхні, запобігаючи односторонньому відриву.



Рис. 12.8. Адгезіометр Positest AT

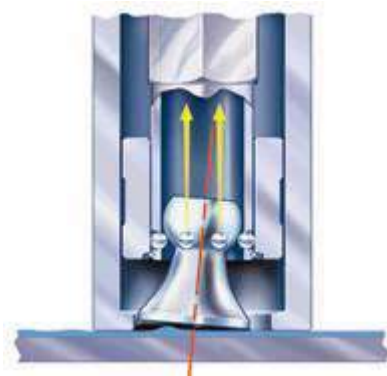


Рис. 12.9. Механізм самоцентрування

Адгезіометр PosiTest AT (рис. 12.10) вимірює адгезію покриттів до металу та інших підкладок. У приладі є індикатор швидкості відриву й максимального тиску при відриві, а також передбачено можливість самоцентрування.



Рис. 12.10. Адгезіометр PosiTest AT

12.4. Контроль міцності покриття при ударі

Для контролю міцності покриття при ударі призначено прилад «Удар-Тестер» (рис. 12.11). Конструкція приладу виконана відповідно до сучасних вимог міжнародного стандарту ISO 6272. Прилад застосовується у заводських лабораторіях під час вхідного контролю покриття, у процесі виробництва, а також у польових умовах під час проведення експлуатаційних робіт.



Рис. 12.11. Прилад «Удар-Тестер»

Контрольні запитання

1. У яких випадках необхідним є контроль захисних діелектричних покриттів?
2. Які різновиди контролю захисних діелектричних покриттів ви знаєте?
3. Як контролюють товщину захисних діелектричних покриттів? Яке обладнання використовують для цього?
4. Назвіть основні методи дефектоскопії діелектричних захисних покриттів. Яке обладнання застосовується в кожному методі?
5. Які різновиди ультразвукових товщиномірів вам відомі?
6. На чому ґрунтуються принципи роботи імпульсних ультразвукових товщиномірів? Яку точність вимірювання товщини забезпечує цей метод?
7. У якому разі застосовуються резонансні ультразвукові товщиноміри?

ТЕСТИ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Кількісні характеристики контрольованого параметра визначаються:
 - а) руйнівними методами;
 - б) неруйнівними методами;
 - в) метрологічними методами.
2. Безперервність контролю під час технологічного процесу виготовлення виробів та їх експлуатації забезпечується:
 - а) руйнівними методами;
 - б) неруйнівними методами;
 - в) метрологічними методами.
3. Контроль за альтернативною ознакою дає змогу:
 - а) поділити вироби на придатні й дефектні;
 - б) визначити категорії та класи, до яких належить контрольований виріб;
 - в) реєструвати точні числові значення параметрів, що визначають якість виробу.
4. Неруйнівними методами:
 - а) можна безпосередньо визначати такі параметри, як міцність, живучість тощо;
 - б) можна опосередковано визначати такі параметри, як міцність, живучість тощо, із застосуванням аналітичних методів і спеціальних еталонів;
 - в) неможливо оцінити змінення характеристик міцності.
5. Універсальними є:
 - а) руйнівні методи;
 - б) неруйнівні методи;
 - в) універсальних немає.
6. Суцільний контроль якості виробів у дрібносерійному й середньосерійному виробництві проводять:
 - а) руйнівними методами;
 - б) неруйнівними методами;
 - в) метрологічними методами.
7. Ресурс виробу при заданих навантаженнях можна визначити:
 - а) руйнівними методами;
 - б) неруйнівними методами;
 - в) метрологічними методами.

8. До руйнівних методів належать:

- а) випробування на розтяг;
- б) акустичні методи;
- в) оптичні методи.

9. До неруйнівних методів належать:

- а) випробування на розтяг;
- б) визначення твердості;
- в) УЗ-методи контролю.

10. Метрологічний контроль застосовують для такого:

- а) визначення точності й чутливості застосовуваних методів та апаратури;
- б) виявлення дефектів виробів;
- в) безпосереднього визначення кількісних характеристик контрольованого параметра.

11. Візуально-оптичний метод базується:

- а) на візуальному огляді об'єкта контролю неозброєним оком або за допомогою оптичних засобів;
- б) на капілярному проникненні індикаторної рідини в порожнину поверхневого або наскрізного дефекту;
- в) на реєстрації змінення деформованого стану виробу, пов'язаного з наявністю дефектів.

12. Візуально-оптичний метод дає змогу проводити контроль виробів:

- а) простої форми;
- б) складної форми;
- в) будь-якої форми.

13. Візуально-оптичний метод дає змогу виявляти:

- а) дефекти на глибині;
- б) підповерхневі дефекти;
- в) поверхневі дефекти.

14. При візуально-оптичному методі застосовуються:

- а) п'єзоперетворювачі;
- б) лупи, мікроскопи, ендоскопи;
- в) негатоскопи.

15. Ендоскопи – це

- а) прилади із жорстким робочим модулем для огляду важкодоступних місць;
- б) прилади з гнучким робочим модулем для огляду важкодоступних

місць;

в) прилади з мініатюрною відеокамерою на робочому кінці.

16. Візуально-оптичним методом можна контролювати:

- а) будь-які матеріали;
- б) тільки КМ і неметали;
- в) лише метали.

17. Поточний контроль виробів візуально-оптичним методом:

- а) можливий;
- б) неможливий;
- в) у поодиноких випадках можливий.

18. Контроль виробів із нанесеним покриттям візуально-оптичним методом:

- а) можливий;
- б) неможливий;
- в) у поодиноких випадках можливий.

19. На чутливість візуально-оптичного методу температура:

- а) впливає;
- б) не впливає;
- в) іноді впливає.

20. При візуально-оптичному методі контролю поверхня освітлюється:

- а) природним світлом;
- б) УФ-світлом;
- в) рентгенівським випромінюванням.

21. Капілярний метод ґрунтується:

- а) на капілярному проникненні індикаторної рідини в порожнину дефекту на невеликій глибині;
- б) на капілярному проникненні індикаторної рідини в порожнину поверхневого або наскрізного дефекту;
- в) на реєстрації змінення деформованого стану виробу, пов'язаного з наявністю дефектів.

22. Капілярний метод дає змогу проводити контроль виробів:

- а) простої форми;
- б) складної форми;
- в) будь-якої форми.

23. Капілярний метод дає змогу виявляти:

- а) дефекти на глибині;

- б) підповерхневі дефекти;
- в) поверхневі дефекти.

24. Види капілярного методу відрізняються один від одного:

- а) типом дефектів, що виявляються;
- б) технологічними стадіями контролю;
- в) остаточною стадією огляду.

25. При кольоровому методі капілярного контролю поверхня освітлюється:

- а) природним світлом;
- б) УФ-світлом;
- в) рентгенівським випромінюванням.

26. При люмінесцентному методі капілярного контролю поверхня освітлюється:

- а) природним світлом;
- б) УФ-світлом;
- в) рентгенівським випромінюванням.

27. Пенетрат – це:

- а) індикаторна рідина;
- б) проявник;
- в) очисник.

28. Як проявник використовується:

- а) люмінофор;
- б) пенетрант;
- в) порошок з високою адсорбувальною здатністю.

29. Чутливість капілярного методу – це:

а) здатність надійно (із заданою ймовірністю) виявляти в певних умовах мінімальний за розмірами поверхневий дефект за його індикаторним слідом;

б) здатність надійно (із заданою ймовірністю) виявляти в певних умовах максимальний за розмірами поверхневий дефект за його індикаторним слідом;

в) здатність надійно (із заданою ймовірністю) виявляти в певних умовах мінімальний за розмірами дефект на глибині.

30. Від вибору методик контролю чутливість капілярного методу:

- а) залежить;
- б) не залежить;
- в) залежить у деяких випадках.

31. Від якості підготовки поверхні чутливість капілярного методу:

- а) залежить;
- б) не залежить;
- в) залежить у деяких випадках.

32. Верхня межа чутливості визначається:

а) максимальною величиною розкриття протяжного дефекту, що обмежує його виявленість дефектоскопічними методами й відповідною технологією внаслідок вимивання індикаторної рідини з гирла дефекту;

б) мінімальною величиною розкриття протяжного дефекту, що обмежує його виявленість дефектоскопічними методами й відповідною технологією через втрату забарвлювальної здатності і малих кількостей індикаторної рідини;

в) максимальною величиною розкриття протяжного дефекту, що обмежує його виявленість дефектоскопічними методами й відповідною технологією через втрату забарвлювальної здатності і малих кількостей індикаторної рідини.

33. Нижня межа чутливості визначається:

а) максимальною величиною розкриття протяжного дефекту, що обмежує його виявленість дефектоскопічними методами й відповідною технологією внаслідок вимивання індикаторної рідини з гирла дефекту;

б) мінімальною величиною розкриття протяжного дефекту, що обмежує його виявленість дефектоскопічними методами й відповідною технологією через втрату забарвлювальної здатності і малих кількостей індикаторної рідини;

в) максимальною величиною розкриття протяжного дефекту, що обмежує його виявленість дефектоскопічними методами й відповідною технологією через втрату забарвлювальної здатності і малих кількостей індикаторної рідини.

34. У капілярному методі передбачається:

- а) чотири класи чутливості;
- б) 10 класів чутливості;
- в) 24 класи чутливості.

35. Капілярним методом можна контролювати:

- а) будь-які матеріали;
- б) тільки КМ і неметали;
- в) лише метали.

36. Поточний контроль виробів капілярним методом:

- а) можливий;
- б) неможливий;
- в) можливий у поодиноких випадках.

37. До пористих матеріалів капілярний метод:

- а) застосовується;
- б) не застосовується;
- в) застосовується в особливих випадках.

38. Контроль виробів із нанесеним покриттям капілярним методом:

- а) можливий;
- б) неможливий;
- в) можливий у поодиноких випадках.

39. На чутливість капілярного методу:

- а) впливає температура;
- б) не впливає температура;
- в) іноді впливає температура.

40. Капілярний метод дає змогу виявляти дефекти розміром:

- а) менше 500 мкм;
- б) більше 500 мкм;
- в) більше 500 мм.

41. Метод УЗ-дефектоскопії базується:

- а) на реєстрації параметрів УЗ-хвиль, що пройшли через виріб або відбитих від поверхонь, на яких змінюються акустичні характеристики матеріалу;
- б) на порушенні вільно згасаючих коливань у контрольованому об'єкті й аналізі параметрів цих коливань;
- в) на дослідженні акустичних параметрів при утворенні й розвитку тріщин у виробах під дією навантаження.

42. УЗ-методом можна виявити:

- а) пори, тріщини, розшарування;
- б) дислокації, вакансії, межі зерен;
- в) порушення геометрії деталі.

43. Для контролю якості ПКМ застосовують УЗ-хвилі з частотою:

- а) більше 10 МГц;
- б) менше 1 МГц;
- в) з будь-якою.

44. Високочастотні методи УЗ-контролю є неефективними для ПКМ:

- а) через високу вартість обладнання;
- б) через сильне поглинання хвиль середовищем;
- в) через відбиття хвиль від поверхні ПКМ.

45. При збудженні та прийманні УЗ-коливань використовується:

- а) п'єзоелектричний ефект;
- б) фотоелектричний ефект;
- в) термоЕРС.

46. П'єзоелектричні перетворювачі:

- а) змінюють частоту акустичних коливань;
- б) перетворюють електричні коливання на акустичні і навпаки;
- в) перетворюють світлову енергію на акустичні коливання.

47. Чутливість методу УЗ-дефектоскопії – це:

- а) мінімальний розмір дефекту, що знаходиться на максимальній глибині й чітко реєструється приладом;
- б) максимальний розмір дефекту, що знаходиться на максимальній глибині й чітко реєструється приладом;
- в) мінімальний розмір дефекту, що знаходиться на поверхні й чітко реєструється приладом.

48. Максимальна глибина прозвучування – це:

- а) мінімальна глибина, де дефект заданого розміру чітко виявляється;
- б) максимальна глибина, де дефект заданого розміру чітко виявляється;
- в) глибина, де дефект заданого розміру не виявляється.

49. «Мертва зона» – це:

- а) мінімальна відстань між двома однаковими дефектами, при якій вони реєструються окремо;
- б) максимальна відстань від поверхні виробу до дефекту, де він чітко виявляється;
- в) мінімальна відстань від поверхні виробу до дефекту, де він чітко виявляється.

50. Роздільна здатність УЗ-дефектоскопії – це:

- а) мінімальна відстань між двома однаковими дефектами, при якій вони реєструються окремо;
- б) максимальна відстань від поверхні виробу до дефекту, де він чітко виявляється;
- в) мінімальна відстань від поверхні виробу до дефекту, де він чітко виявляється.

51. Ехоімпульсний метод ґрунтується:

- а) на зменшенні амплітуди хвилі, що пройшла, під впливом дефекту;
- б) на зміні швидкості УЗ-хвиль за наявності дефекту;
- в) на реєстрації ехосигналу від дефекту.

52. Дзеркально-тіньовий метод базується:

- а) на ослабленні сигналу, відбитого від протилежної поверхні виробу (донного сигналу);
- б) на зменшенні амплітуди хвилі, що пройшла, під впливом дефекту;
- в) на зміні швидкості УЗ-хвиль за наявності дефекту.

53. Зондувальними називають:

- а) випромінювані УЗ-імпульси;
- б) імпульси, відбиті від протилежної поверхні виробу;
- в) імпульси, відбиті від дефекту.

54. Донними називають:

- а) випромінювані УЗ-імпульси;
- б) імпульси, відбиті від протилежної поверхні виробу;
- в) імпульси, відбиті від дефекту.

55. Глибину розташування дефекту:

- а) можна визначити ехоімпульсним методом;
- б) можна визначити тіньовим методом;
- в) неможливо визначити УЗ-методом.

56. УЗ-дефектоскопія належить:

- а) до акустичних методів контролю якості;
- б) до магнітних методів контролю якості;
- в) до капілярних методів контролю якості.

57. Ехоімпульсний метод дає змогу проводити контроль:

- а) при тристоронньому доступі до виробу;
- б) при двосторонньому доступі до виробу;
- в) при односторонньому доступі до виробу.

58. Ехоімпульсним методом визначити координати дефекту:

- а) неможливо;
- б) можна;
- в) можна лише випадково.

59. Наявність «мертвої зони» – це:

- а) перевага тіньового методу;
- б) перевага ехометоду;
- в) недолік ехометоду.

60. Наявність «мертвої зони» є характерною ознакою:

- а) тіньового методу;
- б) ехометоду;
- в) будь-якого УЗ-методу.

61. Розмір «мертвої зони»:

- а) має бути якнайменшим;
- б) має бути якнайбільшим;
- в) не має значення.

62. Тіньовий метод УЗ-дефектоскопії ґрунтується:

- а) на зменшенні амплітуди хвилі, що пройшла, під впливом дефекту;
- б) на зміні швидкості УЗ-хвиль за наявності дефекту;
- в) на реєстрації ехосигналу від дефекту.

63. Звукова тінь утворюється, якщо:

- а) поперечний розмір дефекту є більшим за довжину хвилі;
- б) поперечний розмір дефекту є меншим за довжину хвилі;
- в) поперечний розмір дефекту дорівнює довжині хвилі.

64. Для отримання й приймання УЗ-хвиль тіньовим методом перетворювачі:

- а) мають знаходитися поруч;
- б) мають бути співвісними;
- в) не мають знаходитися на одній осі.

65. «Акустичний тракт» під час УЗ-контролю – це:

- а) розетка – з'єднувач УЗ-хвиль – контрольована деталь;
- б) випромінювач УЗ-хвиль – контрольована деталь – приймач;
- в) контрольована деталь – приймач.

66. При контролі тіньовим методом УЗ-дефектоскопії про наявність дефекту судять:

- а) за зменшенням амплітуди (рівня) сигналу;
- б) за збільшенням амплітуди (рівня) сигналу;
- в) за рівністю зондувального й прийнятого сигналів.

67. При тіньовому методі УЗ-дефектоскопії «мертва зона»:

- а) ускладнює контроль;
- б) полегшує контроль;
- в) відсутня.

68. Для тіньового методу необхідним є:

- а) тристоронній доступ до виробу;
- б) двосторонній доступ до виробу;
- в) односторонній доступ до виробу.

69. Тіньовим методом УЗ-дефектоскопії визначити глибину розташування дефекту:

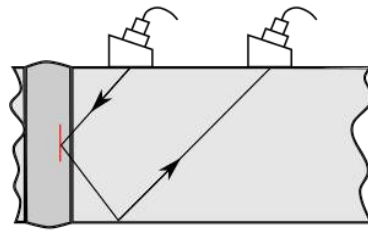
- а) неможливо;
- б) можна;
- в) можна лише випадково.

70. Тіньовий метод застосовується для контролю:

- а) виробів складної форми;
- б) виробів простої форми;
- в) виробів будь-якої форми.

71. На рисунку показано схему:

- а) ехометоду УЗ-дефектоскопії;
- б) тіньового методу УЗ-дефектоскопії;
- в) еходзеркального методу УЗ-дефектоскопії.



72. Для проведення УЗ-контролю між перетворювачем і контрольованим виробом:

- а) має бути повітряний зазор;
- б) не має бути повітряного зазору;
- в) наявність повітряного зазору не впливає на якість контролю.

73. Для проведення УЗ-контролю між перетворювачем і контрольованим виробом наноситься:

- а) іммерсійна рідина;
- б) люмінофор;
- в) пенетрант.

74. Для тіньового методу УЗ-дефектоскопії:

- а) «мертва зона» є мінімальною;
- б) «мертва зона» є максимальною;
- в) «мертвої зони» немає.

75. При збільшенні частоти чутливість до методу УЗ-дефектоскопії:

- а) підвищується;
- б) знижується;
- в) не змінюється.

76. Координати дефекту під час реалізації УЗ-контролю можна визначити:

- а) ехоімпульсним методом;
- б) тіньовим методом;
- в) неможливо визначити.

77. Поріг чутливості УЗ-дефектоскопії обмежується:

- а) лише чутливістю апаратури;
- б) лише рівнем перешкод, що залежить від структури;
- в) чутливістю апаратури та рівнем перешкод, що залежить від структури.

78. Продуктивність УЗ-контролю визначається:

- а) кроком і швидкістю сканування;
- б) кількістю виявлених дефектів;
- в) співвідношенням виявлених і невиявлених дефектів.

79. Метод вільних коливань базується:

- а) на реєстрації параметрів УЗ-хвиль, що пройшли через виріб;
- б) на порушенні вільно згасаючих коливань у контрольованому об'єкті й аналізі параметрів цих коливань;
- в) на реєстрації параметрів УЗ-хвиль, відбитих від поверхонь, на яких змінюються акустичні характеристики матеріалу.

80. Метод вільних коливань належить:

- а) до акустичних методів контролю якості;
- б) до магнітних методів контролю якості;
- в) до капілярних методів контролю якості.

81. Метод вільних коливань дає змогу визначити такі механічні характеристики:

- а) міцність;
- б) твердість;
- в) модуль пружності.

82. Коливання в контрольованому об'єкті згасають:

- а) унаслідок внутрішнього тертя;
- б) унаслідок зовнішнього тертя;

в) у разі виникнення резонансу.

83. Метод вільних коливань можна застосовувати:

- а) тільки для металів;
- б) тільки для кераміки;
- в) для металів, кераміки, КМ і багатошарових конструкцій.

84. Найчастіше вільні коливання у виробі збуджуються:

- а) електромеханічним наконечником;
- б) проникними речовинами;
- в) акустичною емісією.

85. При методі вільних коливань сигнал приймається:

- а) мікрофоном або п'єзоприймачем;
- б) оком;
- в) вухом.

86. Методом вільних коливань визначити координати дефекту:

- а) неможливо;
- б) можна;
- в) можна лише випадково.

87. Методом вільних коливань можна виявити:

- а) пори, тріщини, розшарування, порушення жорсткості зв'язку між шарами;
- б) дислокації, вакансії, межі зерен;
- в) порушення складу сполучного, порушення геометрії деталі.

88. Методом вільних коливань визначити глибину розташування дефекту:

- а) неможливо;
- б) можна;
- в) можна лише випадково.

89. Метод акустичної емісії застосовують:

- а) для виявлення пор, тріщин;
- б) для моніторингу тріщин, що розвиваються під дією навантаження;
- в) для виявлення розшарувань, непростеїв.

90. Метод акустичної емісії базується:

- а) на порушенні вільно згасаючих коливань у контрольованому об'єкті й аналізі параметрів цих коливань;
- б) на реєстрації параметрів УЗ-хвиль, відбитих від поверхонь, на яких змінюються акустичні характеристики матеріалу;

в) на дослідженні акустичних параметрів при утворенні й розвитку тріщин у виробих під дією навантаження.

91. При виявленні активних джерел акустичної емісії (АЕ) рекомендується:

- а) подальший контроль;
- б) проведення ремонту;
- в) негайне виведення конструкції з експлуатації.

92. При виявленні критично активних джерел АЕ рекомендується:

- а) подальший контроль;
- б) проведення ремонту;
- в) негайне виведення конструкції з експлуатації.

93. При виявленні катастрофічно активних джерел АЕ рекомендується:

- а) подальший контроль;
- б) проведення ремонту;
- в) негайне виведення конструкції з експлуатації.

94. Під час контролю виробу методом АЕ визначають:

- а) розміри тріщини;
- б) конфігурацію тріщини;
- в) координати гирла тріщини, що розвивається.

95. Визначення координат джерел АЕ ґрунтується:

- а) на основах радіолокації;
- б) на основах електромагнітної взаємодії;
- в) на законах оптики.

96. Під час проведення контролю виробу методом АЕ умови навантаження:

- а) мають бути за стандартною схемою;
- б) мають бути такими, як під час експлуатації;
- в) можуть бути довільними.

97. Метод АЕ дає змогу оцінювати технічний стан об'єкта:

- а) перед введенням в експлуатацію;
- б) у процесі експлуатації;
- в) після руйнування.

98. Метод АЕ дає змогу оцінити:

- а) орієнтацію тріщини;
- б) розмір тріщини;

в) швидкість розвитку тріщини.

99. Імпедансний метод належить:

- а) до акустичних методів контролю якості;
- б) до магнітних методів контролю якості;
- в) до капілярних методів контролю якості.

100. Імпедансний метод базується:

- а) на збудженні в контрольованому об'єкті й аналізі змінення механічного імпедансу дефектної ділянки порівняно з бездефектною при переміщенні перетворювача по поверхні виробу;
- б) на реєстрації параметрів УЗ-хвиль, відбитих від поверхонь, на яких змінюються акустичні характеристики матеріалу;
- в) на дослідженні акустичних параметрів при утворенні й розвитку тріщин у виробах під дією навантаження.

101. Механічний імпеданс – це:

- а) механічна напруга;
- б) питомий електричний опір;
- в) повний механічний опір.

102. Імпедансний метод застосовується для виявлення:

- а) розшарувань, непроклеїв;
- б) пор, сторонніх включень;
- в) порушення геометрії.

103. Імпедансний метод дає змогу виявляти дефекти:

- а) на невеликій глибині;
- б) на великій глибині;
- в) на будь-якій глибині.

104. Чи можна застосовувати імпедансний метод у процесі експлуатації виробу:

- а) можна;
- б) не можна;
- в) в окремих випадках?

105. Імпедансний метод застосовується до виробів:

- а) тільки з плоскою поверхнею;
- б) тільки з криволінійною поверхнею;
- в) з плоскою та криволінійною поверхнями.

106. Для оцінювання змінення механічного імпедансу застосовуються:

- а) УЗ-дефектоскопи з перетворювачами;

- б) УФ-лампи;
- в) мікрофони.

107. За наявності дефектів типу розшарувань і непростеїв механічний імпеданс дефектної ділянки порівняно з бездефектною буде:

- а) більшим;
- б) меншим;
- в) таким самим.

108. Механічний імпеданс є:

- а) характеристикою матеріалу та визначається його структурою;
- б) характеристикою кількості шарів та визначається їх товщиною;
- в) характеристикою конструкції та визначається всіма елементами конструкції.

109. За електричними властивостями ПКМ належать:

- а) до провідників;
- б) до напівпровідників;
- в) до діелектриків.

110. Здатність ПКМ поляризуватися характеризується:

- а) ϵ ;
- б) ρ ;
- в) $\operatorname{tg} \delta$.

111. Величина $\operatorname{tg} \delta$ характеризує:

- а) здатність поляризуватися;
- б) здатність проводити струм;
- в) діелектричні втрати.

112. Величина ϵ характеризує:

- а) здатність поляризуватися;
- б) здатність проводити струм;
- в) діелектричні втрати.

113. Величина ρ характеризує:

- а) здатність поляризуватися;
- б) здатність проводити струм;
- в) діелектричні втрати.

114. Для контролю ступеня затвердіння сполучного використовують зміну:

- а) ϵ або $\operatorname{tg} \delta$;
- б) НВ;

в) σ_B .

115. Чи можна застосовувати електричний метод у процесі експлуатації виробу:

- а) можна;
- б) не можна;
- в) можна в окремих випадках?

116. Метод електричного пробою застосовується:

- а) для виявлення наскрізних дефектів;
- б) для визначення ρ ;
- в) для визначення міцності.

117. Для виявлення пористості метод електричного пробою:

- а) застосовується;
- б) не застосовується;
- в) застосовується залежно від опору матеріалу.

118. Про наявність дефектів можна судити:

- а) за виглядом об'єкта контролю;
- б) за зміненням електричних характеристик;
- в) за зміненням співвідношень між електричними характеристиками.

119. Голографічний метод ґрунтується:

- а) на реєстрації параметрів УЗ-хвиль, відбитих від поверхонь, акустичні характеристики матеріалу яких змінюються;
- б) на реєстрації змінення деформованого стану виробу, пов'язаного з наявністю дефектів;
- в) на дослідженні акустичних параметрів при утворенні й розвитку тріщин у виробах під дією навантаження.

120. Голографічний метод належить:

- а) до електричних методів;
- б) до оптичних методів;
- в) до акустичних методів.

121. Під час реалізації контролю голографічним методом як джерела випромінювання використовуються:

- а) УЗ-перетворювачі;
- б) лазери;
- в) НВЧ-генератори.

122. Реєструвальні середовища мають характеризуватися:

- а) мінімальною просторовою роздільною здатністю;

- б) середньою просторовою роздільною здатністю;
- в) високою просторовою роздільною здатністю.

123. Дотримання механічної стабільності протягом усього часу експонування голограми з високою точністю:

- а) є необхідною умовою;
- б) є достатньою умовою;
- в) не потребується.

124. Інтерферометрія в реальному часі полягає в такому:

а) після експонування та фотооброблення голограми встановлюють місце знімання, освітлюють лазерним пучком і спостерігають крізь неї за об'єктом після навантаження;

б) на ту саму пластину двома експозиціями послідовно записують голограми від об'єкта в початковому й деформованому станах;

в) на ту саму пластину двома експозиціями послідовно записують голограми від об'єкта в початковому й деформованому станах, освітлюють лазерним пучком і спостерігають крізь неї за об'єктом після навантаження.

125. Двоєкпозиційна інтерферометрія полягає в такому:

а) після експонування й фотооброблення голограми встановлюють місце знімання, освітлюють лазерним пучком і спостерігають крізь неї за об'єктом після навантаження;

б) на ту саму пластину двома експозиціями послідовно записують голограми від об'єкта в початковому й деформованому станах;

в) на ту саму пластину двома експозиціями послідовно записують голограми від об'єкта в початковому й деформованому станах, освітлюють лазерним пучком і спостерігають крізь неї за об'єктом після навантаження.

126. Спостерігати й реєструвати процеси, що відбуваються при деформуванні тіла у часі, дає змогу:

- а) двоєкпозиційна інтерферометрія;
- б) інтерферометрія в реальному часі;
- в) однокпозиційна інтерферометрія.

127. Спотворення, обумовлені усадкою емульсії, є мінімальними під час реалізації:

- а) двоєкпозиційної інтерферометрії;
- б) інтерферометрії у реальному часі;
- в) спекл-інтерферометрії.

128. Голографічний метод є:

- а) контактним;
- б) безконтактним;

в) залежно від поставлених завдань.

129. Рентгенівська дефектоскопія базується:

- а) на поглинанні рентгенівських променів об'єктом контролю та на реєстрації розподілу інтенсивності променів, що проходять;
- б) на випромінюванні рентгенівських променів об'єктом контролю та на реєстрації розподілу інтенсивності цих променів;
- в) на заломленні рентгенівських променів об'єктом контролю та на реєстрації розподілу інтенсивності цих променів.

130. Негатоскопи застосовуються:

- а) як джерела випромінювання;
- б) як блок живлення;
- в) для розшифрування рентгенографічних знімків.

131. Рентгенографію доцільно застосовувати:

- а) в умовах цеху;
- б) у польових умовах;
- в) у домашніх умовах.

132. Радіографію доцільно застосовувати:

- а) в умовах цеху;
- б) у польових умовах;
- в) у домашніх умовах.

133. Рентгенівську дефектоскопію застосовують для виявлення:

- а) пор, тріщин, сторонніх включень, нерівномірного кроку укладання тощо;
- б) залишкових напружень;
- в) розміру зерна.

134. Чутливість методу рентгеноскопії визначається:

- а) протяжністю дефекту;
- б) товщиною деталі;
- в) відношенням протяжності дефекту в напрямку просвічування до товщини деталі в цьому напрямку.

135. Поглинання рентгенівських променів матеріалом залежить:

- а) від чутливості фотоплівки;
- б) від рівня залишкових напружень;
- в) від густини середовища та атомних номерів елементів, з яких утворюється матеріал середовища.

136. При реєстрації візуальним методом інтенсивності рентгенівських

променів, що пройшли через виріб, отримують:

- а) на плівці;
- б) на флуоресцентному екрані;
- в) на металевих пластинах, покритих шаром речовини, якій надано електростатичного заряду.

137. Знімок деталі на плівці одержують при застосуванні:

- а) ксерографічного методу реєстрації рентгенівського випромінювання;
- б) візуального методу реєстрації рентгенівського випромінювання;
- в) фотографічного методу реєстрації рентгенівського випромінювання.

138. Під час проведення радіографічного контролю як детектор використовується:

- а) негатоскоп;
- б) фоточутлива плівка, фотопапір або напівпровідникова пластина;
- в) око.

139. Тепловий метод ґрунтується:

- а) на реєстрації параметрів УЗ-хвиль, відбитих від поверхонь, акустичні характеристики матеріалу яких змінюються;
- б) на реєстрації змінення деформованого стану виробу, пов'язаного з наявністю дефектів;
- в) на реєстрації поширення теплового поля в об'єкті контролю.

140. Інформацію про дефекти під час реалізації теплового методу несуть:

- а) локальні неоднорідності температурного поля на поверхні об'єкта контролю;
- б) локальні неоднорідності магнітного поля на поверхні об'єкта контролю;
- в) локальні неоднорідності на поверхні об'єкта контролю.

141. При застосуванні активного методу теплового контролю:

- а) передбачається нагрівання об'єкта спеціальними зовнішніми джерелами енергії для створення теплових потоків;
- б) не передбачається нагрівання об'єкта спеціальними зовнішніми джерелами енергії для створення теплових потоків;
- в) передбачається охолодження об'єкта спеціальними зовнішніми пристроями.

142. Активний метод теплового контролю застосовується:

- а) якщо в процесі експлуатації об'єкт нагрівається;

- б) якщо в процесі експлуатації об'єкт не піддається тепловому впливу;
- в) у будь-якому випадку.

143. Пасивний метод теплового контролю застосовується:

- а) якщо в процесі експлуатації об'єкт нагрівається;
- б) якщо в процесі експлуатації об'єкт не піддається тепловому впливу;
- в) у будь-якому випадку.

144. Для виявлення дефектів КМ тепловим методом застосовується:

- а) активний тепловий контроль;
- б) пасивний тепловий контроль;
- в) залежно від погоди.

145. ІЧ-дефектоскопія – це:

- а) контактний метод теплового контролю;
- б) безконтактний метод теплового контролю;
- в) акустичний метод контролю.

146. ІЧ-дефектоскопія проводиться:

- а) лише при односторонньому доступі до виробу;
- б) лише при двосторонньому доступі до виробу;
- в) при односторонньому та двосторонньому доступі до виробу.

147. ІЧ-дефектоскопія дає можливість:

- а) проводити потоковий контроль;
- б) контролювати лише деякі вироби вибірково;
- в) контролювати вироби лише в процесі експлуатації.

148. Тепловізори застосовують:

- а) як джерело теплової енергії;
- б) для реєстрації неоднорідності теплового поля;
- в) для ремонту дефектних деталей.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Інженерне матеріалознавство. Метали, полімери, кераміка, композити / Я. С. Карпов, В. В. Остапчук, О. Г. Попова, І. М. Тараненко. – Харків : ХАІ, 2020. – 396 с.

Неметалеві та композиційні матеріали / О. О. Вамболь, В. В. Остапчук, В. Я. Самойлов, М. І. Семішов, М. А. Шевцова. – Харків : ХАІ, 2010. – 107 с.

Popova, O. G. Non-destructive inspection of composite structures : textbook / O. G. Popova, M. A. Shevtsova, I. M. Taranenko. – Kharkiv : KhAI, 2023.– 76 p.

ЗМІСТ

1.	Методи контролю якості й вимоги до них.....	3
2.	Вибір ефективних методів і засобів контролю якості.....	4
3.	Особливості будови композиційних матеріалів.....	5
3.1.	Хаотично армовані композити.....	8
3.2.	Односпрямовані композити (1D).....	9
3.3.	Шаруваті композитні матеріали (2D).....	10
3.4.	Просторово армовані композити (3D, 4D і більше).....	11
3.5.	Волокнисті армувальні елементи.....	12
4.	Особливості контролю якості виробів з композиційних матеріалів.....	22
5.	Візуально-оптичний метод контролю авіаційної техніки.....	30
6.	Виявлення дефектів у виробах з композиційних матеріалів методом капілярної дефектоскопії.....	33
6.1.	Основні принципи методу.....	34
6.2.	Дефектоскопічні матеріали та способи їх нанесення.....	35
6.3.	Чутливість капілярного методу контролю.....	38
7.	Акустичні методи контролю якості виробів з композиційних матеріалів.....	41
7.1.	Фізичні основи акустичних методів контролю.....	41
7.2.	Ультразвукова дефектоскопія.....	41
7.2.1.	Ехоімпульсний метод.....	45
7.2.2.	Тіньовий метод.....	47
7.2.3.	Дзеркально-тіньовий метод.....	48
7.2.4.	Еходзеркальний метод.....	48
7.3.	Ультразвукова товщинометрія	51
7.4.	Дослідження якості виробів з композиційних матеріалів за допомогою методу вільних коливань.....	57
7.5.	Метод акустичної емісії.....	60
7.6.	Контроль багатошарових конструкцій з композиційних матеріалів імпедансним методом.....	64
8.	Визначення характеристик композиційних матеріалів електричним методом.....	69
9.	Голографічна інтерферометрія.....	74
10.	Рентгенодефектоскопія і радіографія.....	81
10.1.	Рентгенотелевізійні системи.....	85
10.2.	Детектори рентгенівського й радіографічного контролю.....	88
11.	Тепловий метод неруйнівного контролю якості композиційних матеріалів та інфрачервона термографія.....	89
12.	Контроль якості захисних діелектричних покриттів.....	96
12.1.	Вимірювання товщини захисних діелектричних покриттів.....	96
12.2.	Дефектоскопія захисних діелектричних покриттів.....	98

12.3. Адгезіометрія.....	100
12.4. Контроль міцності покриття при ударі.....	101
Тести для самоперевірки.....	102
Бібліографічний список.....	122

Навчальне видання

**Попова Олена Георгіївна
Остапчук Валентина Віталіївна
Тараненко Ігор Михайлович**

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ КОМПОЗИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Редактор Т. О. Іващенко

Зв. план, 2026

Підписано до видання 30.09.2026

Ум. друк. арк. 6,9. Обл.-вид. арк. 7,81. Електронний ресурс

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Вадима Манька, 17
<http://www.khai.edu>

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001