

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Н. С. СОЛОМОНЮК, С. В. КОПІЙКА

**ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ З КУРСІВ
«КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ВИРОБІВ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ
МАТЕРІАЛІВ», «ДІАГНОСТИКА ТА ДЕФЕКТОСКОПІЯ»**

Методичні вказівки

Рекомендовано Методичною радою НУК

УДК 658.562.4

С60

Автори: Н. С. Соломонюк, канд. техн. наук;

С. В. Копійка, канд. техн. наук

Рецензент С. П. Гейко, канд. техн. наук

Рекомендовано Методичною радою НУК

Соломонюк Н. С.

С60 Лабораторні роботи з курсів «Контроль якості виробів із композиційних матеріалів», «Діагностика та дефектоскопія» : методичні вказівки / Н. С. Соломонюк, С. В. Копійка. – Миколаїв : НУК, 2021. – с.

Вміщено методичні вказівки до лабораторних робіт з курсів «Контроль якості виробів із композиційних матеріалів», «Діагностика та дефектоскопія», методики визначення різних дефектів структури в матеріалах та матеріали для вивчення технічно-апаратного оформлення дефектоскопії.

Призначено для студентів спеціальності «Проектування та виробництво конструкцій із композиційних матеріалів» та інших матеріалознавчих спеціальностей. Можуть бути використані також аспірантами й магістрантами матеріалознавчих, кораблебудівних та машинобудівних спеціальностей вищих навчальних закладів під час виконання дослідницьких робіт.

УДК 658.562.4

© Соломонюк Н. С., Копійка С. В., 2021

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2021

ЗМІСТ

Лабораторна робота № 1. Визначення можливих видів дефектів та методів їх контролю для заданого об'єкта.	5
Лабораторна робота № 2. Визначення типу п'єзодатчиків та області їх використання в акустичних методах дефектоскопії.	15
Лабораторна робота № 3. Виявлення дефектів у матеріалі луно-імпульсним методом.	23
Лабораторна робота № 4. Використання методу акустичної емісії в операціях дефектоскопії.	32
Лабораторна робота № 5. Визначення товщини діелектричних плівок та покриттів магнітним товщиноміром.	38
Лабораторна робота № 6. Виявлення зовнішніх дефектів у матеріалі капілярним методом.	45

ВСТУП

Методичні вказівки допомагають студентам самостійно опанувати способи виявлення можливих дефектів структури матеріалу, їх типи та орієнтуватися в методах їх контролю для полімерних композиційних матеріалів (ПКМ).

Вказівки включають у себе методику виконання лабораторних робіт. У кожній роботі сформульовано мету, вказано устаткування та матеріали, що необхідні для її виконання. Наведена послідовність виконання конкретних завдань.

Для якісного виконання роботи й самоконтролю студентів запропоновано контрольні питання в кінці розділу кожної лабораторної роботи.

У залежності від програми, курсу, що викладається, обладнання в лабораторії та наявності необхідних матеріалів викладач може обирати відповідні теми, роботи та завдання.

У кінці методичних вказівок наведено посилання на необхідні довідкові матеріали.

Перед виконанням кожної лабораторної роботи студенти повинні ознайомитися з методикою її проведення, будовою обладнання і послідовністю роботи на ньому.

Студенти мають оформити роботу у відповідності з вимогами ЄСКД. Звіт про роботу повинен містити тему, мету, скорочену методику експерименту, описання обладнання та технологій, що застосовуються. Результати експериментів оформлюються у вигляді таблиць, графіків. Розрахунки необхідних величин представляються з вказівкою вихідних даних і розмірностей. Виконання лабораторної роботи завершується захистом оформленої роботи.

ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВИХ ВИДІВ ДЕФЕКТІВ ТА МЕТОДІВ ЇХ КОНТРОЛЮ ДЛЯ ЗАДАНОГО ОБ'ЄКТА

Мета роботи: навчитися визначати можливі види дефектів у заданій конструкції та методи, за якими їх можна виявити.

Устаткування та обладнання: об'єкт контролю або його описання, мікроскоп, лінійка, лупа.

Теоретичні відомості

Композиційні матеріали за структурою є гетерогенними, або неоднорідними матеріалами. Ступінь неоднорідності структури залежить від дефектів, що виникають у процесі переробки матеріалу у виріб, дефектів їх сировини, дефектів, що виникають при експлуатації.

Дефектами структури є неоднорідності, що знижують фізико-механічні характеристики, які встановлені відповідними ГОСТами, ДСТУ, ТУ і под. На якість виробів значно впливають, як правило, дефекти, що пов'язані з недосконалою технологією виготовлення.

Основні *технологічні процеси* і можливі дефекти при виготовленні представлено нижче.

При *пресуванні* дефекти виникають через порушення режимів підготовки сировини, поганому стані технологічного обладнання, порушення технології.

Нерівномірний обігрів або охолодження призводить до утворення на виробі поверхневих здуть, розшарувань, тріщин, короблень, значної поруватості матеріалу. Особливо це важливо для великогабаритних конструкцій.

Зношування деталей прес-форми може призвести до зміни геометричних розмірів, створення поверхневих пошкоджень.

Порушення режимів тиску при пресуванні призводить до утворення значної поруватості, низької адгезії сполучника та армуючого матеріалу.

Недостатнє прогрівання і час витримки призводять до неповного отвердіння матеріалу, нерівномірного усадження, утворення тріщин та розшарувань, внутрішніх напружень.

У процесі підготовки армуючого матеріалу та укладання може порушуватися взаємне орієнтування заповнювача, співвідношення поздовжніх і поперечних волокон, утворюватися зморшки.

При *контактному формуванні* виробів складної конфігурації в окремих шарах утворюються складки, повітряні включення, порушується орієнтація волокна, з'являється зайва кількість сполучника.

При отвердінні на поверхні матеріалу можуть виникнути напливи і підтікання сполучника, оголення армуючого матеріалу, короблення та зморшки.

Передчасне вилучення виробу з матриці може призвести до неповного отвердіння.

При *вакуумному формуванні* можливі:

- порушення орієнтації армуючого матеріалу;
- оголення структури в зовнішніх шарах;
- наявність ділянок з неповним отвердінням;
- короблення, зморшки, усадочні явища.

При виготовленні матеріалу методом *намотування* можливі:

- відхилення значень в'язкості сполучника від заданого, що призводить до нерівномірного просочування армуючого матеріалу, нерівномірних фізико-механічних властивостей, напливання сполучника на поверхні виробу;

- підвищений уміст летючих речовин, що призводить до утворення раковин, поруватості, розтріскування;

- зниження летючих речовин – утворюються розшарування, з'являються місця з недостатнім склеюванням окремих шарів тканини;

- неправильне налаштування обладнання, що намотує, може призвести до появи зморшок.

При *методі наплення* найбільш поширеними дефектами виступають:

- неоднорідність структури;
- неупорядкованість орієнтації заповнювача;
- різнотовщинність, низька якість поверхні виробу;
- підвищений уміст пор, повітряних раковин, інородних включень.

При *пултрузії* характерними дефектами можуть бути:

- низька міцність та жорсткість на зсув уздовж волокон;
- нерівномірність розподілу сполучника;
- розриви волокон;
- поруватість;
- розшарування і под.

У процесі *механічної обробки* поверхні утворюються сліди, подряпини, сколювання, оголення скловолокна, викрошування сполучника, утворюються тріщини й розшарування.

При *експлуатації* у виробх із КМ виникають мікротріщини, утворюються: порушення адгезійного зв'язку полімеру і заповнювача, мікротріщини у сполучнику, розриви волокон, викрошування сполучника. Зайве зволоження призводить до гігроскопичного, капілярного поглинання води.

У таблиці 1.1 представлені можливі дефекти на різних етапах використання композиційного матеріалу та методи їх контролю.

Таблиця 1.1. Дефекти та методи їх контролю

Фактори, завдяки яким виникають дефекти	Дефекти	Методи контролю*
У вихідній сировині		
Коливання температури зовнішнього середовища	Підвищена або знижена в'язкість сполучника, желатинізація сполучника	УЗ, МРХ
Коливання вологості	Підвищена вологість	МРХ, Е

зовнішнього середовища	заповнювача	
Коливання дозування компонентів сполучника	Зміна в'язкості сполучника, зайвий уміст деяких компонентів	МРХ, Е, УЗ
Зміна хімічного складу сполучника	Знижена адгезійна спроможність та зміна фізико-механічних властивостей (ФМВ) сполучника	УЗ, МРХ
Недоліки гідрофобно-адгезійної обробки заповнювача	Зниження адгезії заповнювача і сполучника	ІЧ
Порушення режимів витягування волокна при його виробництві	Дефекти волокон: поверхневі тріщини, внутрішні порожнини, зміна діаметра і под.	О, ІЧ, УЗ
У процесі формування і після виготовлення виробу		
Коливання дозування сполучника та заповнювача	Неповне твердіння, нерівномірний розподіл сполучника і заповнювача, зниження ФМВ, напливи сполучника	УЗ, МРХ
Порушення теплового режиму формування і термообробки	Розшарування, внутрішні та поверхневі тріщини, поруватість	ІЧ, УЗ, МРХ, К
Помилки в укладанні, орієнтуванні армуючого матеріалу	Зміна анізотропії ФМВ	П, УЗ, МРХ
Недоліки в технологічному обладнанні, порушення технологічного режиму переробки	Непроклеювання, розшарування, поруватість, підвищена шорсткість, оголення арматури, складування шарів, усадочні явища	ІЧ, УЗ, МРХ
Попадання чужорідних включень	Включення	ІЧ, МРХ
Порушення геометричних форм, помилки в укладанні	Порушення форми виробу	УЗ, М, МРХ, ОМ, І, МТ
Нерівномірні зусилля при пресуванні та намотуванні	Порушення геометричних розмірів і форми виробу, неоднорідність фізико-механічних властивостей, поруватість	УЗ, ІЧ, МРХ
Порушення режимів механічної обробки	Мікротріщини, оголення заповнювача, викрошування сполучника	ІЧ, МРХ, К
Помилки, що виникають при проектуванні й розрахунках конструкції	Конструктивні дефекти	В
При експлуатації виробів		

Недотримання режимів експлуатації	Поверхневі тріщини, викрошування сполучника, розшарування	УЗ, ІЧ, АЕ
Недотримання умов зовнішнього середовища	Попадання внутрішньої вологи, температурна деструкція	МРХ, Е
Моральне і фізичне зношування	Деструкція матеріалу, розшарування, зменшення тримальної здатності	УЗ, ІЧ, МРХ

*УЗ – ультразвуковий, МРХ – мікрорадіохвильовий, Е – електричний, ІЧ – інфрачервоний, О – оптичний, К – капілярний, П – поляризаційний, М – магнітний, ОМ – оптично-механічний, І – інтерферентний, МТ – метричний, В – візуальний, АЕ – акустичної емісії.

Для ПКМ відомо декілька класифікацій дефектів.

Класифікація дефектів склопластику Х.Т. Кортеля.

Поділяє всі дефекти на два класи. До *першого класу* відносяться дефекти, що є результатом армування склопластику волокнами кінцевої довжини.

До *другого класу* відносяться порушення суцільності полімерної матриці, які можуть бути причиною цілої низки дефектів:

1. Технологічні дефекти (поверхневі подряпини, газові пухирі, інородні вclusions, зморшки і дрібні тріщини).
2. Початкове вигинання волокон, що збільшує місцеві концентрації напружень.
3. Місцеві тріщини полімерного сполучника, що утворюються внаслідок концентрації напружень навколо включень циліндричної, сферичної, еліптичної та інших форм.
4. Місцеві тріщини полімерного сполучника, що виникають унаслідок концентрації напружень при щільному пакуванні арматури з полімерних волокон.

Класифікація дефектів за Кортелем застосовується для армованих пластиків, що виготовлені з тканинних армуючих матеріалів, хаотично розташованих волокон та КМ, які отримано методом намотування.

Інша *класифікація за Смірновим та Мещераковим* відноситься тільки до технологічних дефектів пластиків. Майже всі види дефектів, що

розглядаються у класифікації, можуть бути виявлені візуально або за допомогою дефектологічної апаратури.

Зовнішні дефекти:

- нерівності декоративного шару (тонкого поверхневого шару смоли або гелькоату);
- порожнини в декоративному шарі;
- тріщини в декоративному шарі;
- проявлення текстури волокна внаслідок недостатньої товщини декоративного шару або витискання його при викладанні армуючого матеріалу;
- відшарування верхнього шару від основного матеріалу.

Внутрішні дефекти:

- повітряні включення, порожнини між шарами армуючого матеріалу, частіше – круглої форми;
- поруватість (мікроскопічні та субмікроскопічні газові порожнини) можуть локалізуватись у сполучнику між шарами і всередині склонитки;
- тріщини у сполучнику – виникають частіше між шарами. Іноді можуть перетинати склонитку;
- неповна полімеризація характеризується вираженою липкістю поверхні матеріалу, різким запахом розчинника або компонентів сполучника;
- розшарування є одним з найпоширеніших дефектів унаслідок недостатньої адгезії між шарами та неправильних режимів формування;
- сторонні включення (дрібний шлаковий пил, земля, дрібні друзки, обірвані частинки волокна);
- відхилення співвідношення смоли й армуючого матеріалу;
- зміщення склотканини за товщиною пластику, що призводить до місцевого потовщення плівки сполучника.

Приклад:

Норми допустимих дефектів для склопластику на основі поліефірних смол ПН-S, що застосовуються на суднах водотоннажністю 5 тонн і більше.

Допускаються дефекти, що знижують фізико-механічні властивості склопластику не більше ніж на 10–15 %.

Дефекти нормуються окремо для кожної з двох груп конструкцій:

- 1) настил палуби, платформи,
- 2) полотнища перегородок поздовжнього і поперечного набору.

Для *I групи*:

- розмір розшарування або повітряних включень у матеріалі, розташованому між приформовками набору повинен бути не більше 5 см²;
- сумарна площа розшарувань на площу конструкції дорівнює 0,5 м² у всіх шарах по товщині не повинна перевищувати 20 см²;
- відстань між краями окремих дефектів має бути не менше 5 см, інакше площі близько розташованих дефектів підсумовуються і два дефекти вважаються одним;
- при наявності дефектів один над одним, їх загальна площа не повинна перевищувати 8 см².

Для *II групи* норми допустимих дефектів є жорсткішими:

- у двох верхніх прилеглих до приформовки шарах матеріалу одиночний дефект повинен бути менше 30 мм²;
- допустима сумарна площа більш дрібних дефектів – 20 см² на площу рівну 0,5 м²;
- у всіх інших шарах під приформовкою одиночний дефект повинен бути не більше 3 см²;
- при розташуванні дефектів один над одним їх сумарна площа повинна бути не більше 5 см².

У двох зовнішніх поверхневих шарах

- не допускаються дефекти, площі яких більше 30 мм²;
- сумарна площа інших дрібних дефектів – 20 см² на 0,5 м².

Таким чином, при дефектоскопії конструкцій І групи насамперед перевіряється, чи є в матеріалі поодинокі дефекти, що перевищують допустимі, підраховується загальна кількість дефектів по всій товщині матеріалу, за винятком двох зовнішніх, і виконуються висновки.

Висновок про якість зовнішніх шарів робиться окремо аналогічним чином.

Оскільки неможливо піддати контролю всю поверхню великогабаритних корпусних конструкцій, то ділянки для контролю розраховуються за умови $0,5 \text{ м}^2$ контрольованої площі на $4\text{--}5 \text{ м}^2$ загальної площі конструкції. Місця розташування цих ділянок кожен раз визначається окремо.

Значимість розмірів дефектів визначається на етапі проєктування і конструювання виробів на базі знань механіки руйнування та прогнозування довговічності композиційних конструкцій.

Хід роботи

Для заданого об'єкта контролю (табл. 1.2):

- 1) визначити можливі дефекти заданої конструкції;
- 2) обрати дієвий метод контролю якості;
- 3) призначити необхідні параметри контролю;
- 4) розробити методику контролю якості об'єкта;
- 5) зробити висновки.

Таблиця 1.2. Варіанти завдань для опрацювання

№ варіанта	Тип виробу (об'єкт)	Параметри виробу (об'єкта)	Матеріал виробу	Технологія виготовлення виробу
1	Відкрита циліндрична оболонка	Товщина 10 мм	Епоксидний склопластик	Контактне формування, холодне твердіння
	Закрита циліндрична	Товщина оболонки 5 мм,	Епоксидний склопластик	Контактне формування з

2	оболонка з ребрами жорсткості	висота ребер 15 мм		холодним твердінням – для оболонки, вакуум-формування – для ребер
3	Окрема лопать	Розмір у плані 200×200 мм, середня товщина профіля 15 мм	Епоксидний вуглепластик	Пресування в жорсткій формі при підвищеній температурі
4	Оболонка супутникової антени	Товщина оболонки 10 мм	Поліефірний склопластик, армований шаром металізованого скловолокна з періодичністю 2 мм	Контактне формування з холодним твердінням
5	Профіль з органічного волокна	Ширина 200 мм, швидкість руху стрічки 100 мм/с	Епоксидний органопластик	Пултрузія, гаряче твердіння
6	Пластина	Розміри 50×1000×1000 мм	Епоксидний компаунд, наповнений крейдою ($\phi_k = 40\%$ за об'ємом)	Вільне лиття
7	Оболонка корпусу каное	Товщина 3 мм, довжина 3000 мм	Епоксидний вуглепластик	Пружне формування при підвищеній температурі
8	Полімерний шар лакофарбового покриття сталевих ванни	Товщина 1 мм	—	Нанесення методом напилення

9	Щогла для яхти	Довжина 10 м, діаметр у комелі 200 мм, Товщина оболонки 5 мм	Епоксидний вуглепластик	Пружне формування гумовим мішком при підвищеній температурі в жорсткій матриці
10	Сферичний балон тиску	Ємність 50 л, товщина стінки 10 мм, діаметр полюсного отвору 50 мм	Епоксидний вуглепластик	Намотування
11	Зовнішня оболонка корпусу судна	Довжина 15 м, товщина оболонки 10 мм	Полієфірний склопластик	Контактне формування з холодним твердінням
12	Сферична замкнута оболонка відсіку приладів глибоководного апарата	Діаметр 3 м, глибина занурення 2000 м	Епоксидний склопластик	Намотування з підпресуванням в автоклаві
13	Глибоководний буй	Діаметр мікросфер 70 мкм, діаметр керамічної сфери 50 мм, можлива поруватість пластика 10 % з діаметром пори до 5 мм	Епоксидний сферопластик з керамічними замкнутими сферами	Вільне заливання у форму
14	Заготовка у вигляді паралелепіпеда	Розміри 200×200×10	Феромагнітний сплав	Вільне лиття
15	Лонжерон двотавровий для лопаті гвинта	Товщина стінки 20 мм, Товщина полки	Епоксидний вуглепластик	Автоклавне формування

	вертольота	23 мм, Довжина лонжерона 6 м Висота двотавра 120 мм		
--	------------	---	--	--

Контрольні питання

1. Що називається дефектом?
2. Причини появи дефектів у матеріалі при виготовленні.
3. Причини появи дефектів у конструкції при механічній обробці.
4. Причини появи дефектів у конструкції при експлуатації.
5. Класифікація дефектів склопластика за Х.Т. Кортелем.
6. Класифікація дефектів за Смірновим та Мещеряковим.
7. Які зовнішні дефекти можливі в матеріалі?
8. Які внутрішні дефекти можливі в матеріалі?

Лабораторна робота № 2

ВИЗНАЧЕННЯ ТИПУ П'ЄЗОДАТЧИКІВ ТА ОБЛАСТЕЙ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В АКУСТИЧНИХ МЕТОДАХ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

Мета роботи: визначити типи п'єзодатчиків, методи дефектоскопії, у яких вони використовуються, їх обмеження та навчитися розшифровувати їх маркування.

Устаткування та обладнання: різні типи п'єзодатчиків маркованих і немаркованих.

Теоретичні відомості

Ультразвукова дефектоскопія відноситься до активних методів акустичного неруйнівного контролю. Технологія активних методів включає в себе первинну дію на об'єкт контролю ультразвуковими хвилями від зовнішнього джерела з наступним аналізом результатів впливу.

Ультразвуковою хвилею є процес розповсюдження пружних коливань ультразвукової частоти в матеріальному середовищі. При цьому кожна частинка, що бере участь у русі хвиль, коливається коло положення своєї рівноваги і передає свою енергію сусіднім частинкам. Хвилі з частотою $f=16 - 20000$ Гц відносяться до звукових (ці частоти є межами чутності звуків для вуха людини). Пружні коливання з частотою $f=20000 - 10^9$ Гц є ультразвуковими. Якщо $f < 16$ Гц – це інфразвук, то $f > 10^9$ Гц – гіперзвук.

Здебільшого для взаємодії з об'єктом контролю використовуються поздовжні або поперечні ультразвукові хвилі. Поздовжньою є хвиля, у якій коливання окремих частинок відбувається в напрямку розповсюдження хвилі (хвилі тиску або стискання) (рис. 2.1, *а*). Поперечною (зсувною) є хвиля, у якій окремі частинки коливаються в напрямку, що є перпендікулярним до напрямку розповсюдження хвилі (рис. 2.1, *б*). Поперечні хвилі розповсюджуються тільки у твердому середовищі.

Швидкістю розповсюдження звукової хвилі (c) називається швидкість переміщення точок визначеної фази коливань у матеріальному середовищі.

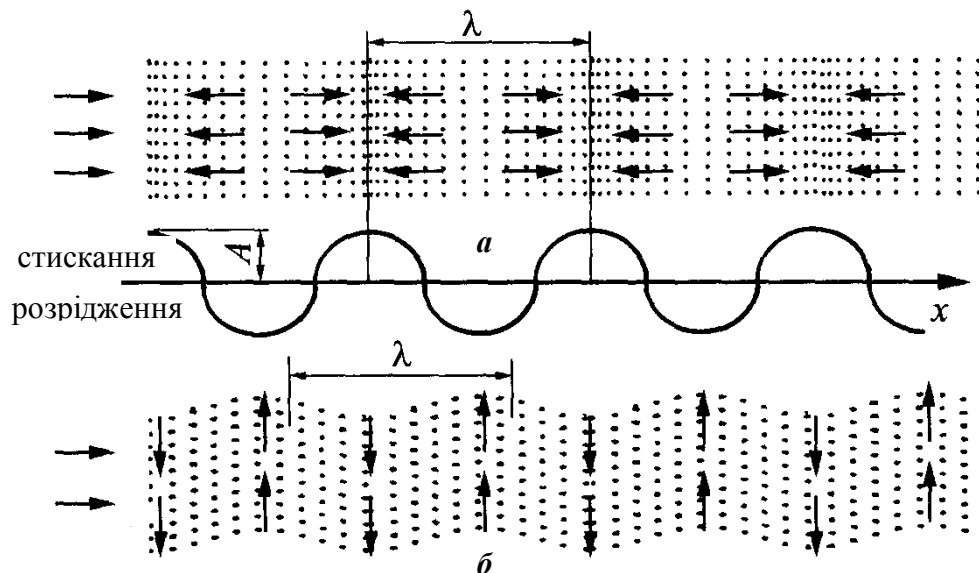


Рис. 2.1. Види хвиль у просторі:

а – поздовжня; *б* – поперечна

Швидкість розповсюдження поздовжньої хвилі в необмеженому твердому тілі визначається виразом

$$c_{\text{повзд}} = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu)}{\rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}} = \sqrt{\frac{2G \cdot (1 - \mu)}{\rho \cdot (1 - 2\mu)}}, \quad (2.1)$$

де E – модуль Юнга; G – модуль зсуву, μ – коефіцієнт Пуассона; ρ – густина матеріалу.

Швидкість розповсюдження поперечної хвилі:

$$c_{\text{попер}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho \cdot (1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \approx 0,55 c_{\text{повзд}}. \quad (2.2)$$

Мінімальна відстань між двома точками, що коливаються в одній фазі називається довжиною ультразвукової хвилі λ . Довжина хвилі залежить від частоти і швидкості розповсюдження хвилі:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.3)$$

де f – частота коливань хвилі, Гц.

Значення швидкостей поздовжніх і поперечних ультразвукових хвиль у різних середовищах наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Швидкості поширення поздовжніх і поперечних ультразвукових хвиль у різних середовищах

№	Матеріал	Швидкість поздовжніх хвиль, м/с	Швидкість поперечних хвиль, м/с	Густина середовища, кг/м ³
1	Алюміній	6260	3080	2700
2	Мідь	4700	2260	8900
3	Сталь Ст-3	5930	3250	7800
4	Скло	5500	3420	2500
5	Чавун	3500 ÷ 5600	2200 ÷ 3200	7200
6	Полістирол	2350	1120	1100
7	Гума	1480	–	1300
8	Епоксидна смола	2580	–	1200
9	Трансформаторна олія	1380	–	900

10	Повітря	331	–	1,3
----	---------	-----	---	-----

До того ж звукові хвилі характеризуються хвильовим спротивом звуку, або звуковим імпедансом

$$z = \rho c . \quad (2.4)$$

Речовини з більшим z називають звукотвердими (метали), а з малим z – звуком'якими (вода, поліакріл).

Ультразвукові перетворювачі.

Для створення та приймання ультразвукових коливань використовують електроакустичні перетворювачі (п'єзоперетворювачі). Генерація та реєстрація ультразвукових хвиль в електроакустичних перетворювачах базуються на п'єзоелектричному ефекті.

Прямий п'єзоелектричний ефект полягає в поляризації матеріалу при впливі на нього розтягуючих або стискаючих навантажень. Зворотний п'єзоелектричний ефект полягає у створенні стискаючих або розтягуючих напружень при поляризації матеріалу (рис. 2.2).

П'єзоелектричні властивості мають деякі керамічні матеріали (табл. 2.2).

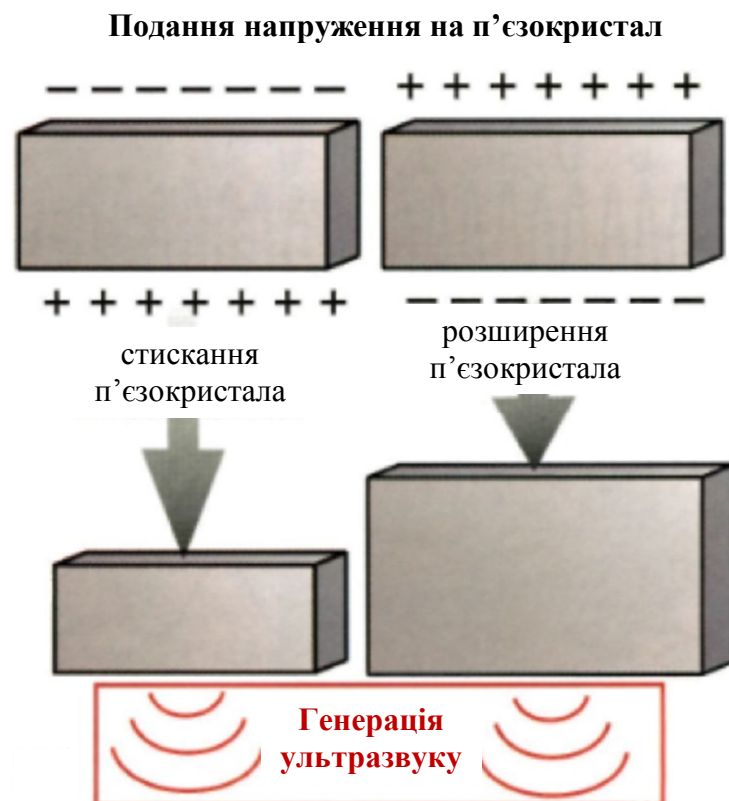


Рис. 2.2. Зворотний п'єзоелектричний ефект

Таблиця 2.2. Властивості деяких п'єзоматеріалів, що використовуються для перетворювачів в ультразвуковій дефектоскопії

П'єзоматеріал	Густина ρ , кг/м ³	Швидкість звуку в матеріалі c , м/с	Характеристичний імпеданс, $Z \cdot 10^{-6}$ кг/м ² ·с	Діелектрична константа ϵ	Модуль пружності E , ГПа	П'єзокоefficient ϵ_p , Н/м ² ·В	Допустима температура, °С	Добротність Q
Кварц Х-зрізу	2650	5760	15,2	4,5	0,86	0,17	550	10 ⁶
Полівінілденфторид (ПВДФ)	1300–1800	1500–2500	2,0–4,5	11–13	1,7	0,10–0,13	150	≤ 15
Титанат барію	5500	5680	31,2	1200	1,80	16,70	130	400
Цирконат-титанат свинцю (ЦТС-19)	7400	3000–3600	22–27	1400–2050	2,00	13–19	200	50
Метаніобат свинцю	6200	3300	20,5	300	0,046	5,1	300	15
Ніобат літію	4640	7320	34	30	233	1,9	1160	>1000

Поверхні п'єзоелемента металізовані і є електродами. При поданні на них електричної напруги пластина змінює свою товщину внаслідок дії зворотного п'єзоелектричного ефекту. Якщо напруга знакозмінна, то пластина коливається у відповідності до цих змін, створюючи в загальному середовищі пружні коливання. При цьому пластина працює як випромінювач і частота її коливань відповідає частоті напруги, що подається.

Якщо п'єзоелектрична пластина приймає імпульс тиску, то на її поверхнях, унаслідок прямого п'єзоелектричного ефекту з'являються заряди, значення яких можна виміряти. У цьому випадку п'єзопластина працює як приймач.

Конструкції основних типів ультразвукових перетворювачів показані на рис. 2.3.

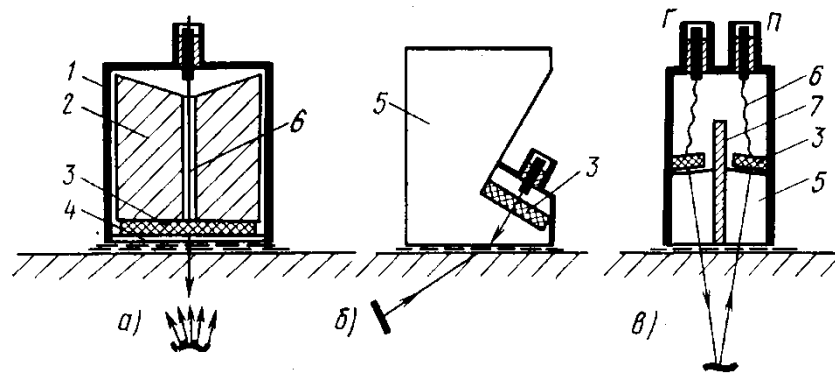


Рис. 2.3. Конструкції основних типів ультразвукових п'єзоперетворювачів:

а – прямий, *б* – нахилений (призматичний), *в* – роздільно-сумісний;

1 – корпус, 2 – демпфер, 3 – п'єзопластина, 4 – захисна пластина (протектор),

5 – призма, 6 – струмопідвід, 7 – акустичний екран

Розрізняються *прямі* перетворювачі, що випромінюють у контрольний об'єкт поздовжні хвилі нормально до поверхні (рис. 2.3, *а, в*), і *нахилені* (рис. 2.3, *б*), за допомогою яких у виробі утворюють поперечні, поверхневі, нормальні і поздовжні хвилі. За конструкцією перетворювачі поділяються на *роздільні*, що генерують або приймають ультразвукові хвилі (рис. 2.3, *а, б*), *сумісні*, у яких один п'єзоелемент є випромінювачем і приймачем та *роздільно-сумісні*, що мають два п'єзоелемента в одному корпусі (рис. 2.3, *в*).

У залежності від геометричних розмірів об'єкта, дефекту, що шукається, типу матеріалу, схеми контролю можуть бути використані нахилені перетворювачі з кутом введення від 40° до 75° і робочою частотою від 1 до 5 МГц. Такі перетворювачі дозволяють генерувати частотні коливання, що є для об'єкта контролю джерелом поперечних ультразвукових хвиль, швидкість розповсюдження яких залежить від типу матеріалу.

Прямі перетворювачі використовуються в основному для визначення товщини виробу.

Нахилені перетворювачі використовуються у випадках, коли встановити датчик-перетворювач безпосередньо над поверхнею, що контролюється, неможливо через конструктивні особливості об'єкта контролю (наприклад, зварні та кутові з'єднання, поверхні зі складним профілем) або через його

підвищену шорсткість. Максимальна шорсткість поверхні (R_z) для застосування ультразвукового контролю не повинна перевищувати 40 мкм.

Для визначення внутрішніх дефектів у об'єкті контролю частіше використовуються нахилені перетворювачі, оскільки вони дозволяють ефективно сканувати його за вертикаллю. Прямі перетворювачі не завжди відповідають цьому призначенню, оскільки не дозволяють визначати наявність «нижніх дефектів» під «верхніми дефектами». Сигнал відбивається від «верхнього дефекту» і не дозволяє зафіксувати «нижній дефект». При використанні нахиленого перетворювача при переміщенні його по горизонтальній поверхні скануються дефекти, що розташовані в нормальній до поверхні виробу площині.

Хід роботи

Частина 1. Розшифрування маркування п'єзодатчиків.

1. Отримані п'єзоперетворювачі аналізуються, розбираються (за необхідністю та можливістю).
2. Виконується рисунок будови п'єзодатчика.
3. Випикується їх маркування та розшифровується за схемою (рис. 2.4) та таблицею 2.2.

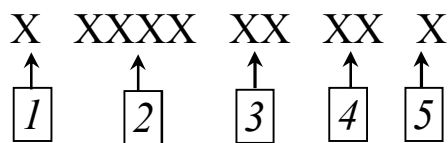


Рис. 2.4. Символи маркування п'єзодатчика для УЗК

Таблиця 2.3. Розшифрування маркування п'єзодатчика для УЗК

Група знаків	Символ	Розшифрування
Група 1	П або И	«приемник» або «излучатель»
Група 2	Цифра 1	1 – контактний 2 – імерсійний 3 – контактено-імерсійний
	Цифра 2	1 – прямий

		2 – нахилений
	Цифра 3	1 – сумісний 2 – роздільно-сумісний 3 – роздільний
	Буква 4	Н – неплаский Ф – неплаский фокусуючий (для пласких перетворювачів буква 4 – відсутня)
Група 3	Цифри	Номінальна частота в МГц
Група 4	Цифри або букви і цифри (не є обов’язковими)	Кут падіння УЗ у градусах Указують на додаткові характеристики перетворювача Наприклад: • вид захисту перетворювача (Б – берилій, П – плівка та ін.); • температуростійкість (Т – при температурі об’єкта, що контролюється вище 50 °С) та ін.

Частина 2. Маркування п’єзодатчиків.

1. Отримані п’єзоперетворювачі аналізуються, розбираються (за необхідністю та можливістю).
2. Виконати рисунок будови п’єзодатчика.
3. За схемою (рис. 2.4) та таблицею 2.2 складається їх маркування.

Контрольні питання

1. Визначення ультразвукової дефектоскопії.
2. Що таке ультразвукова хвиля?
3. Чим відрізняються поздовжні й поперечні ультразвукові хвилі?
4. Як розраховується швидкість ультразвукової хвилі в матеріальному середовищі?
5. Що визначає частота ультразвукової хвилі?

6. Показати зв'язок між довжиною, швидкістю та частотою УЗ.
7. Що таке звуковий імпеданс?
8. Які речовини є звукотвердими, а які звуком'якими?
9. Що таке п'єзоперетворювачі, для чого вони використовуються?
10. Яка різниця між прямим і зворотним п'єзоелектричним ефектом?
11. Конструкції основних типів ультразвукових п'єзоперетворювачів.
12. Коли використовуються прямі й нахилені перетворювачі?

Лабораторна робота № 3

ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ У МАТЕРІАЛІ ЛУНОІМПУЛЬСНИМ МЕТОДОМ

Мета роботи: навчитися налаштовувати луноімпульсний дефектоскоп та виявляти внутрішні дефекти в матеріалах, їх розмір та глибину залягання.

Устаткування та обладнання: зразки матеріалів для контролю якості, луноімпульсний дефектоскоп, набір датчиків.

Теоретичні відомості

Одним з основних методів неруйнівного контролю є ультразвуковий метод контролю (УЗК). Поряд з іншими фізичними методами (рентгенографічний, капілярний, магнітопорошковий контроль і под.) він є надійним і високоефективним засобом для виявлення можливих дефектів.

Суть ультразвукового методу полягає у випромінюванні у виріб і подальшому прийнятті відбитих ультразвукових коливань (промисловий діапазон частот ультразвукових хвиль становить 0,5–10 МГц) за допомогою спеціального обладнання (ультразвукового дефектоскопа, п'єзоперетворювачів (див. л. р. № 2) і подальшому аналізі отриманих даних з метою визначення наявності дефектів та їх еквівалентного розміру, форми (об'ємний / площинний), виду (точковий / протяжний) та глибини залягання. Параметри виявлених дефектів визначаються за допомогою ультразвукових

дефектоскопів. Так, наприклад, за часом поширення ультразвуку у виробі (якщо відома швидкість поширення ультразвукових хвиль у різних матеріалах) визначають відстань до дефекту, а за амплітудою відбитого імпульсу – його відносний розмір.

Для проведення ультразвукового контролю, у залежності від конкретних умов (матеріалу, його товщини, геометричних особливостей поверхонь контролю, мінімальних розмірів дефектів, що виявляються та ін.), існує досить широкий асортимент способів контролю.

На сьогодні існують наступні методи УЗК:

- луноімпульсний;
- тіньовий та дзеркально-тіньовий;
- імпульсний фазовий;
- ревербераційний;
- імпедансний;
- велосиметричний.

До головних переваг ультразвукового контролю якості відносяться:

- висока точність і швидкість дослідження, а також його низька вартість;
- безпека для людини (на відміну, наприклад, від рентгенівської дефектоскопії);
- висока мобільність завдяки застосуванню портативних ультразвукових дефектоскопів;
- можливість проведення УЗК (в окремих випадках) на діючому об'єкті, тобто на час проведення контролю не потрібне виведення контрольованої деталі або об'єкта з експлуатації;

До основних недоліків УЗК відносяться:

- метод вимагає наявності спеціально підготовлених фахівців, спеціалізованого обладнання та допоміжних засобів контролю;
- неможливо дати відповідь на питання про реальні розміри дефекту, тому що розмір дефекту визначається за його відбивною здатністю і за

результатами контролю отримується еквівалентний розмір дефекту (наприклад, якщо у виробі наявні два дефекта одного розміру і форми, що розташовані на одній глибині, але один заповнений повітрям, а інший – шлаком, то вони будуть утворювати відбиті імпульси різної амплітуди і можуть бути оцінені як дефекти, що мають різні розміри);

- при УЗК металів з великозернистою структурою або армованих пластиків виникають труднощі (завади) через значне розсіювання і сильне затухання ультразвуку;

- потрібна підготовка поверхні контролю для введення ультразвукових хвиль у матеріал (очищення поверхні контролю від забруднень, створення необхідної шорсткості поверхні не вище Rz 40 і хвилястості не більше 0,015) через те, що навіть невеликий повітряний зазор між п'єзоперетворювачем і виробом може стати перешкодою для поширення ультразвукових хвиль;

- необхідність нанесення на контрольну ділянку виробу контактних рідин (спеціальні гелі, гліцерин, мінеральне масло та ін.) для забезпечення стабільного акустичного контакту.

Сутність контролю **луноімпульсним методом** (рис. 3.1, *а*) полягає в тому, що в деталь посилають короткі імпульси (тривалістю 1–3 мкс) ультразвукових коливань з інтервалом 1–5 мс.

Випромінюючий перетворювач можна одночасно використовувати в якості приймача. У момент посилення імпульсу на екрані приладу виникає сплеск (рис. 3.1, *б*). Ультразвуковий імпульс проходить через деталь і, відбиваючись від її задньої стінки, повертається до випромінювача. Відбитий сигнал також реєструється приладом. Якщо на шляху ультразвуку в деталі є дефект, то на екрані приладу з'явиться додатковий сигнал (рис. 3.1, *в*).

Величина цього сигналу дає уявлення про розміри дефекту, а інтервал між введенням у виріб початкового імпульсу і прийомом відбитого сигналу дозволяє визначити глибину його залягання. Реєстрація сигналів здійснюється шляхом перетворення коливань в електричні імпульси відбитих хвиль,

підсилення і реєстрації на екрані електронно-променевої трубки дефектоскопа.

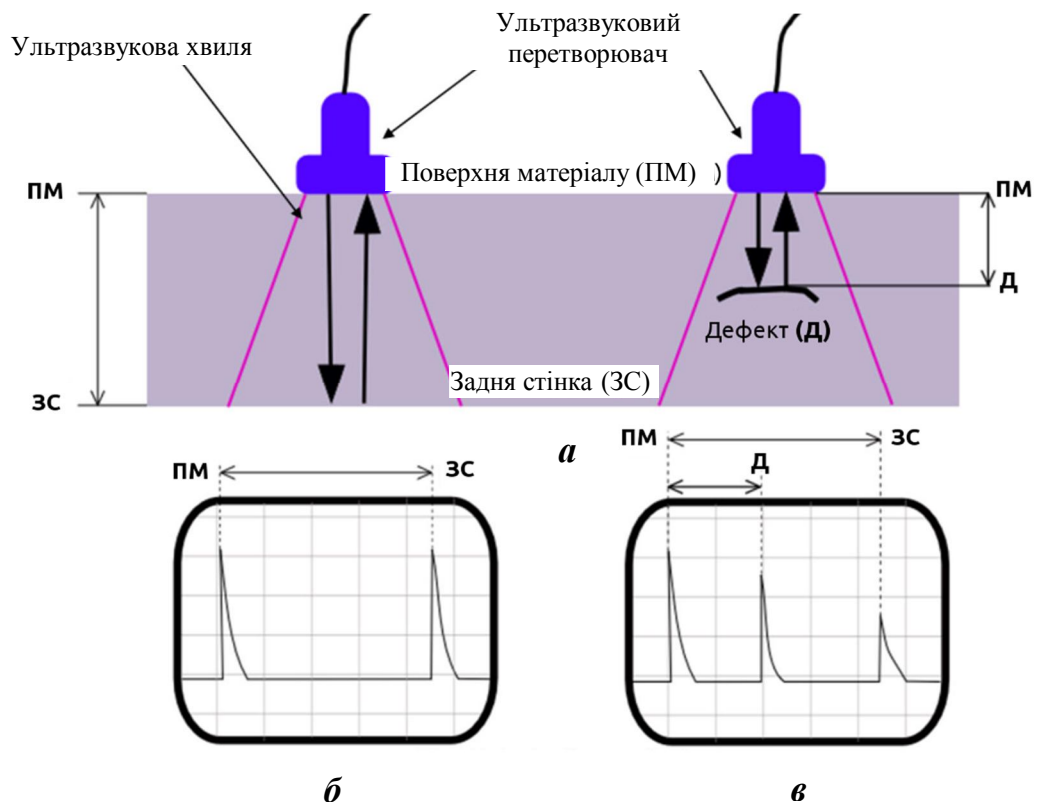


Рис. 3.1. Ультразвуковий метод контролю якості матеріалу:

а – схема луноімппульсного УЗК; *б* – імпульс на екрані ЕПТ на бездефектній ділянці; *в* – імпульс на екрані ЕПТ ділянки з дефектом

На сьогодні цей метод набув найбільшого поширення. З його допомогою перевіряють лопатки роторів турбін і компресорів авіаційних двигунів, контролюють цапфи осьових шарнірів втулок вертольотів, циліндри двигунів внутрішнього згоряння, барабани коліс, відповідальні кріпильні деталі. Метод також застосовується для визначення товщини стінок деталей, структури матеріалу при односторонньому доступі до виробу, що перевіряється. Для отримання надійних результатів контролю дефектоскоп налаштовують за еталонною деталлю з відомим розташуванням «дефекту».

На рис. 3.2 наведена принципова схема імпульсного ультразвукового дефектоскопа.

Генератор радіоімпульсів 3 збуджує п'єзопластину передавального датчика 2. Ультразвукові коливання поширюються в контрольованій деталі, відбиваються від її задньої стінки (донний сигнал) і потрапляють на п'єзопластину приймального датчика 1, збуджуючи її. При цьому на гранях п'єзопластини виникає змінна напруга, яка фіксується і посилюється в підсилювачі 4, надходить на вертикальні відхиляючі пластини електронно-променевої трубки (ЕПТ) 5 осцилографа. Одночасно генератор горизонтальної розгортки 6 подає пилкоподібну напругу на горизонтальні відхиляючі пластини ЕПТ 5. Генератор радіоімпульсів 3 збуджує п'єзопластину передавального датчика короткими імпульсами, між якими утворюються тривалі паузи. Це дозволяє чітко розрізнити на екрані ЕПТ 5 сигнал початкового (зондуючого) імпульсу I, сигнал від дефекту II і донний сигнал III.

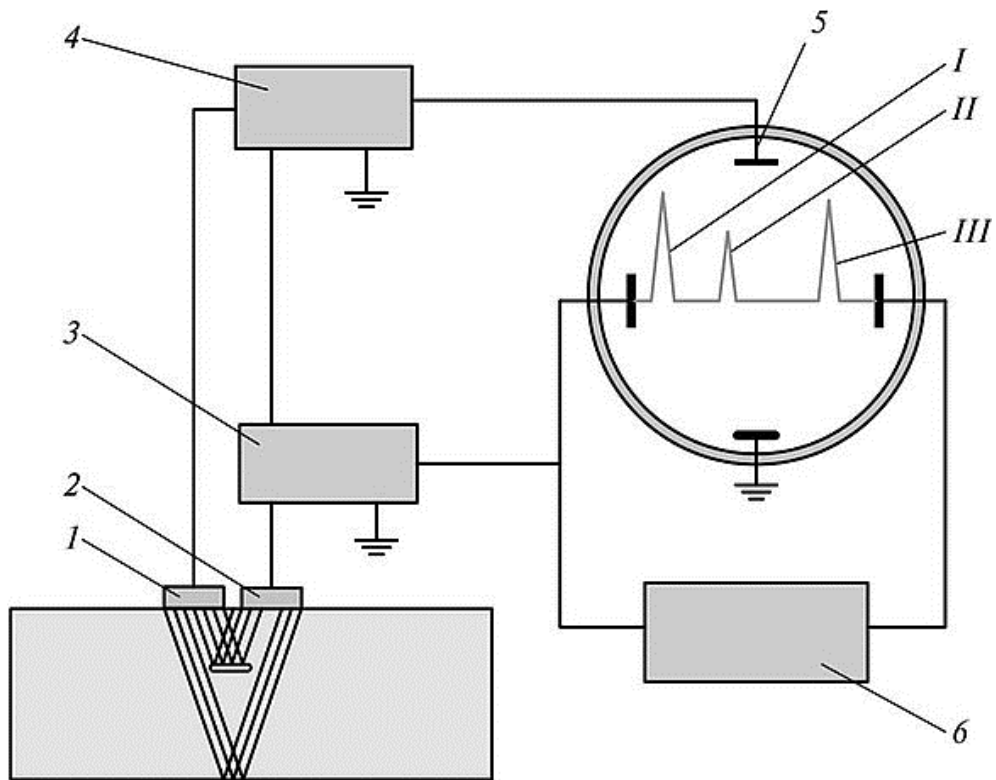


Рис. 3.2. Блок-схема імпульсного ультразвукового дефектоскопа:

1 – приймальний датчик; 2 – передавальний датчик; 3 – генератор радіоімпульсів; 4 – підсилювач; 5 – електронно-променева трубка осцилографа; 6 – генератор горизонтальної розгортки; I – зондуючий імпульс; II – луносигнал від дефекту; III – донний сигнал

Типовий вигляд сигналограми дефектоскопа представлено на рис. 3.3.

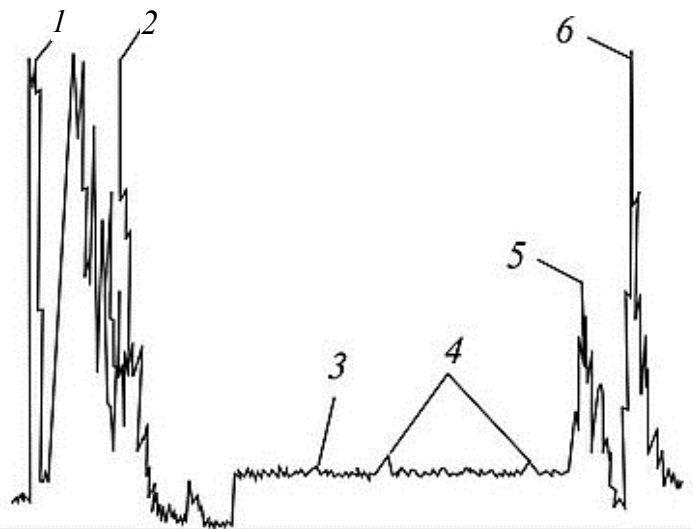


Рис. 3.3. Типове зображення сигналів на індикаторі дефектоскопа:

1 – зонduючий імпульс; 2 – завади перетворювача; 3 – стробуючі імпульси; 4 – структурні завади констpукційного матеріалу; 5 – луносигнал від дефекту; 6 – донний сигнал

Важливою характеристикою чутливості ультразвукового контролю є розмір «мертвої зони». Її наявність – один з основних недоліків лунометоду, який у деяких випадках обмежує його застосування, знижує надійність і ефективність контролю. «Мертва зона» становить собою непридатний до контролю поверхневий шар, у якому сигнал від дефекту (штучного відбивача) не відділяється від початкового (рис. 3.4).

Розмір «мертвої зони» залежить від роздільної здатності методу. Роздільна здатність – здатність окремо приймати і відтворювати сигнали від двох і більше відбивачів, розташованих поблизу один від одного в напрямку розповсюдження УЗ-хвиль. При малій роздільній здатності неможливо спостерігати окремі дефекти, що розташовані близько один до одного або поблизу поверхні виробу, що призводить до появи «мертвих зон».

Величину мертвої зони x можна визначити за формулою

$$x = \frac{c(\tau_i + \tau_p)}{2}, \quad (3.1)$$

де c – швидкість звуку в матеріалі, τ_i – тривалість зонуючого імпульсу, τ_p – час розгортки імпульсу (тривалість вільних коливань п'єзоелемента).

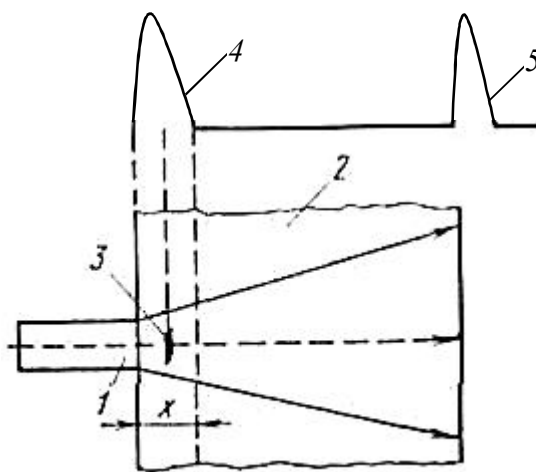


Рис. 3.4. «Мертва зона» при УЗК:

1 – розмір «мертвої зони»; 2 – об'єкт контролю; 3 – дефект у «мертвій зоні»;
4 – зонduючий імпульс; 5 – донний сигнал

Одним із шляхів підвищення роздільної здатності і, отже, скорочення мертвої зони є зменшення тривалості зондуючого імпульсу шляхом механічного демпфування п'єзоелемента перетворювача, електричної компенсації коливань п'єзоелемента в режимі випромінювання і под.

Механічне демпфування полягає в тому, що до п'єзоелемента приклеюють масивний демпфер, жорсткий зв'язок з яким призводить до того, що після дії збуджуючого імпульсу на п'єзоелемент вільні коливання останнього швидко згасають. Однак при такому демпфуванні знижується добротність коливального контуру і потужність УЗ-коливань.

Для підвищення ефективності ультразвукового контролю застосовується комплексне прозвучування виробів за допомогою прямих і роздільно-сполучених перетворювачів, які дозволяють виявляти дефекти, що розташовані поблизу поверхні виробу.

Однак позбутися «мертвої зони» повністю неможливо. Для виявлення дефектів у ній застосовується подвійне прозвучування виробу: у напрямку зліва направо і справа наліво.

«Мертву зону» також можна зменшити, змінивши конструкцію і розміри перетворювача, збільшивши частоту прозвучування, вибравши правильно крок і напрямок сканування.

Хід роботи

Визначення швидкості звуку в матеріалі.

1. За інструкцією з експлуатації для дефектоскопа УК-10ПМ проводиться ознайомлення з принципом його роботи.
2. Збирається стенд для проведення досліджень, вмикається та налаштовується дефектоскоп на тестовому зразку з оргскла.
3. Вимірюється час поширення ультразвукових коливань τ у запропонованих зразках (сталь, фторопласт, склотекстоліт, ебоніт, оргскло та ін.).

4. За допомогою вимірювального інструмента (лінійки або штангенциркуля) вимірюється довжина зразків l і визначається швидкість поширення ультразвукових коливань за формулою

$$c = \frac{l}{\tau}. \quad (3.2)$$

5. Для підвищення точності вимірювання часу поширення, вимірювання на кожному зразку проводиться не менше трьох разів.

6. Результати усереднюються і порівнюються з довідковими даними.

Отримані результати записуються в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1. Вимірювання швидкості коливань у різних матеріалах

Матеріал	l , мм	τ_1 , мкс	τ_2 , мкс	τ_3 , мкс	$\tau_{\text{ср}}$, мкс	$c_{\text{вим}}$, м/с	$c_{\text{дов}}$, м/с
сталь							
.....							
Органічне скло							

Визначення дефекту та його розміру в матеріалі.

1. Проводиться вимірювання часу поширення ультразвукових коливань для зразків з дефектом. Для підвищення точності, виконується не менше двох разів. Результати усереднюються.

2. Глибина залягання дефекту за променем розраховується як

$$s = c\tau_i, \quad (3.3)$$

де τ_i – час, який витрачається УЗ для досягнення дефекту при знаходженні датчика в різних позиціях по довжині деталі; i – номер позиції датчика по довжині деталі.

3. Довжина тріщини визначається за моментом початку і закінчення появи імпульсу УЗ при відбитті від дефекту, за формулою

$$l_{mp} = l_i n, \quad (3.4)$$

де l_i – заданий крок переміщення датчика по довжині деталі при вимірюванні глибини залягання тріщини; n – кількість вимірювань глибини тріщини від моменту початку і закінчення появи імпульсу УЗ при відбитті від дефекту.

4. Отримані результати записуються в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2. Вимірювання розміру дефекту в залежності від типу

Матеріал	τ_1 , мкс	τ_2 , мкс	τ_3 , мкс	$\tau_{\text{сер}}$, мкс	c , м/с	s , мм	n	l_b , мм	l_{mp} , мм
....									

5. За роботою виконуються висновки.

Контрольні питання

1. Які існують методи УЗК?
2. Переваги ультразвукового контролю.
3. Основні недоліки УЗК.
4. Призначення і фізична сутність ультразвукового луноімпульсного методу контролю.
5. Як визначається відстань до дефекту та його передбачуваний розмір?
6. Коло застосування луноімпульсного УЗК.
7. Що таке «мертва зона» при УЗК і від чого залежить її розмір?
8. Фактори, що впливають на чутливість ультразвукового контролю?
9. Принцип роботи ультразвукового луноімпульсного дефектоскопа.
10. Як виконується вибір параметрів ультразвукового контролю?

Лабораторна робота № 4

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ В ОПЕРАЦІЯХ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

Мета роботи: опанування методу акустичної емісії (АЕ) в операціях експлуатаційного контролю.

Устаткування та матеріали: установка АФ-15, декілька зразків різних матеріалів, гідравлічний прес, штангенциркуль.

Теоретичні відомості

Акустична емісія – це випромінювання матеріалом акустичних коливань при його навантаженні, що викликане динамічним локальним перебудуванням його структури. Схема контролю представлена на рис. 4.1.

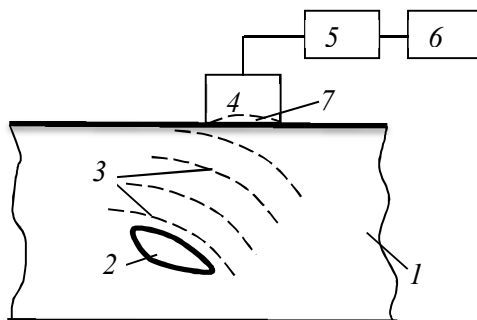


Рис. 4.1. Схема контролю дефектів методом АЕ:

1 – об'єкт контролю, 2 – джерело АЕ, 3 – хвилі напружень, 4 – приймач хвиль (механоелектричний перетворювач), 5 – підсилювач, 6 – обробна та реєструюча апаратура, 7 – хвиля на поверхні матеріалу

Вигляд приладу контролю акустико-емісійним методом представлено на рис. 4.2.



Рис. 4.2. Прилад акустико-емісійного контролю

При вивченні АЕ розглядаються динамічні процеси на мікро- і макрорівнях. На мікрорівні вивчаються джерела АЕ, що обумовлені процесами перебудови структури матеріалу. Наприклад, утворення, пересування та зникнення дислокацій. Тепловий рух атомів у межах кристалічної решітки отримав назву «білий шум», його енергія становить $E/f = 4 \cdot 10^{-21}$ Дж·с.

На макрорівні пружні хвилі виникають при пластичній деформації і руйнуванні об'єктів (рис. 4.3).

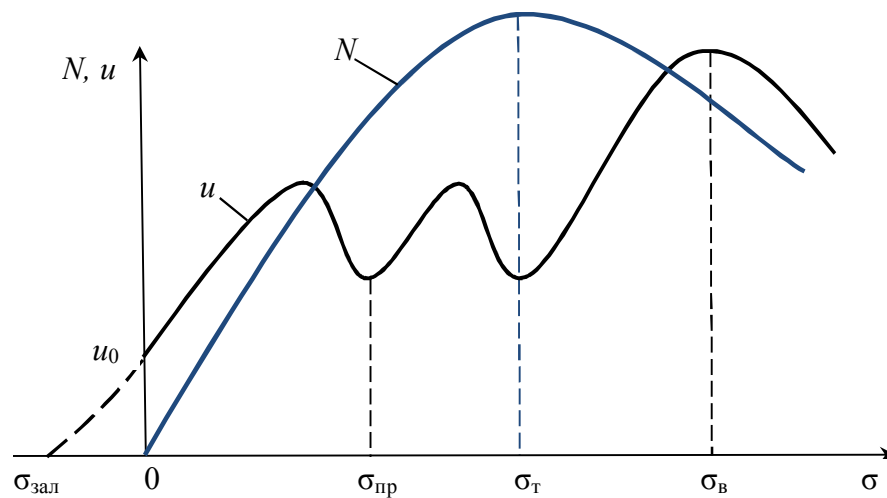


Рис. 4.3. Крива залежності активності АЕ від навантаження, що прикладається до матеріалу з вираженою ділянкою текучості:

N – сумарна кількість імпульсів акустичної емісії в залежності від навантаження σ ; u – енергія, що виділяється джерелом АЕ і переноситься пружними хвилями, які виникають у матеріалі (u_0 – початковий рівень енергії); $\sigma_{\text{зал}}$ – залишкові напруження в матеріалі, $\sigma_{\text{пр}}$ – границя пружності, $\sigma_{\text{т}}$ – границя текучості, $\sigma_{\text{в}}$ – границя міцності матеріалу

Генерація хвиль виникає, наприклад, при динамічному розвантаженні ділянок матеріалів, що прилягають до берегів тріщин, і також змінюють швидкість її руху. При розвантаженні матеріалу і наступному його навантаженні до того ж рівня механічних напружень σ_1 , активності АЕ не виникає, доки σ не стане більше σ_1 . Цей ефект отримав назву ефекта Кайзера, який відкрив таку поведінку матеріалів у 1950 році.

Значний вплив на форму сигналу надає сам датчик. Коли широкосмуговий сигнал емісії впливає на резонансний датчик, створюється ефект дзвіночка, який дзвенить на певній частоті, незалежно від способу свого збудження. Таким чином, на форму сигналу на виході датчика одночасно впливають багато чинників: шляхи поширення хвиль, наявність різних мод, що поширюються з різними швидкостями, й ефект перетворення вхідного сигналу датчиком.

Спрощена функціональна схема приладу акустичної емісії АФ-15 представлена на рис. 4.4.

Відповідно до попередніх досліджень з'ясовано, що частота коливань сигналу акустичної емісії від руйнування компонентів ПКМ лежить у межах 100 кГц – 500 кГц. Тому налаштування приладу виконується для вказаного

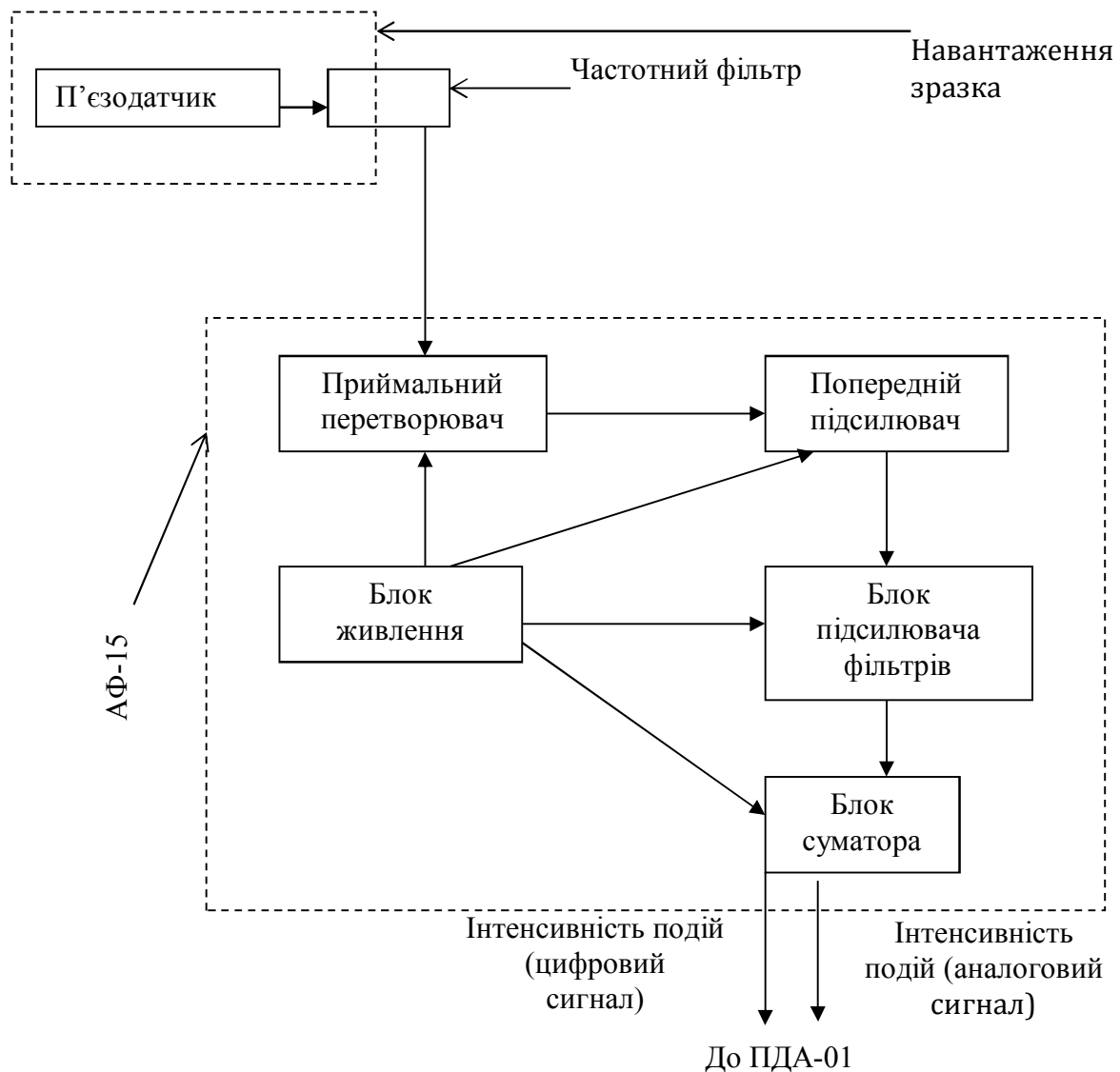


Рис. 4.4. Функціональна схема приладу акустичної емісії

частотного діапазону. Налаштування дає можливість вилучити з акустичного потоку побічні коливання для збільшення точності вимірювань. Для збільшення чутливості методу приймач коливань (п'єзодатчик) установлюється на поверхні об'єкта контролю із застосуванням імерсійної

рідини. При підключенні датчика до приладу використовується захищений від електричних завад коаксиальний кабель.

Для одночасної реєстрації двох параметрів динамічних процесів (ступінь руйнування та рівень навантаження) може бути застосований аналоговий самописець ПДА-01, що дозволяє на бланку отримати діаграми в координатах «навантаження – інтенсивність АЕ». Самописець має можливість виводу даних у цифровому вигляді на ПЕОМ.

Результат діагностики руйнувань зразка ПКМ показано на рис. 4.5.

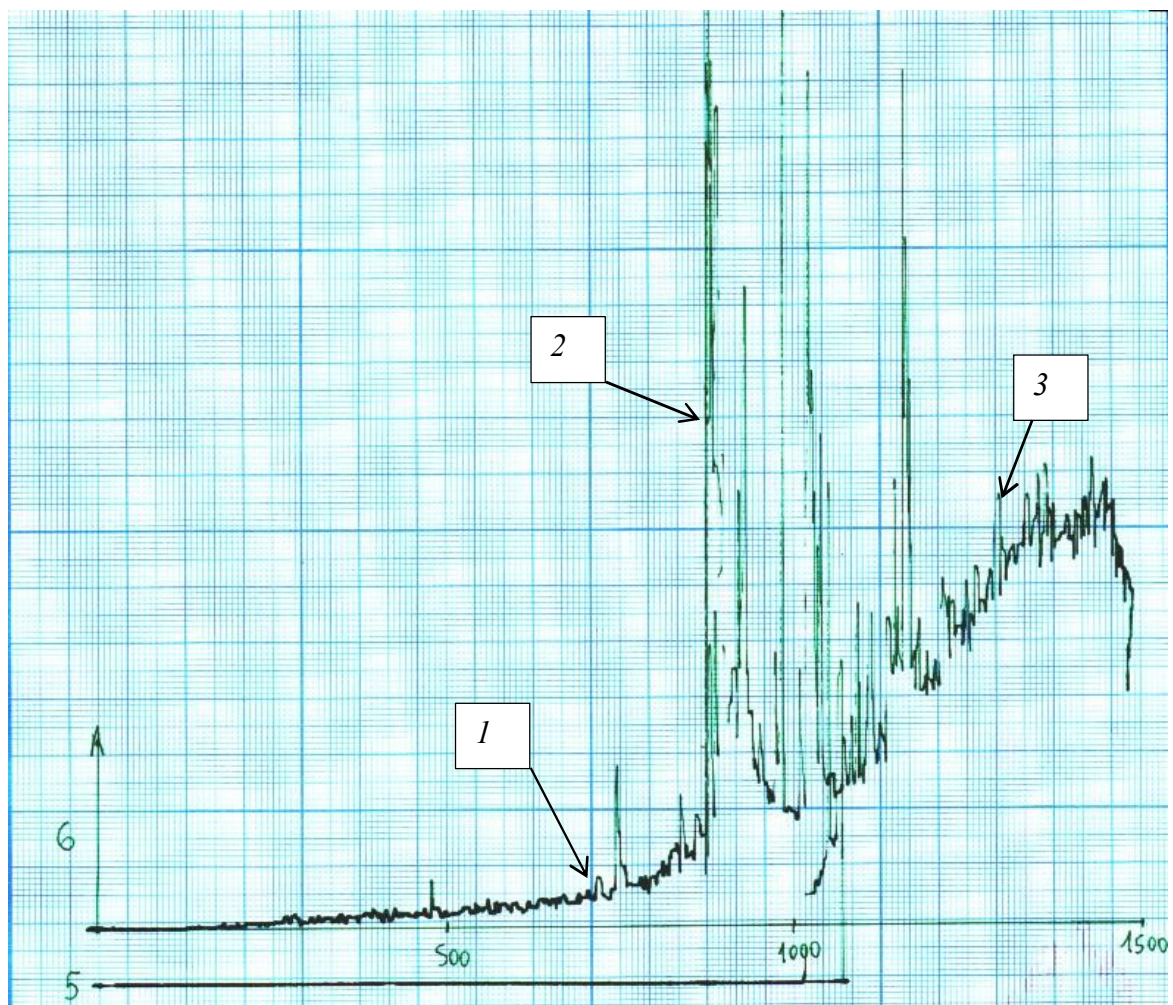


Рис. 4.5. Результат діагностики приладом АФ-15:

1 – утворення мікроруйнувань при навантаженні; 2 – утворення макротріщини (злиття мікроруйнувань); 3 – подальше накопичення мікроруйнувань

Хід роботи

Фіксація мікроруїнувань приладом АФ-15.

1. За інструкцією з експлуатації для приладу АФ-15 проводиться ознайомлення з принципом його роботи.
2. Збирається стенд для проведення досліджень, послідовно коаксиальним кабелем підключається п'єзоприймач – блок фільтра високих частот – роз'єм «входу А» задньої стінки субблоку (СБ) підсилювачів фільтрів, роз'єм «виходу ВЧ» задньої стінки СБ підсилювачів фільтрів підключається кабелем з роз'ємом «Вход АІ» передньої панелі СБ амплітуди.
3. Налаштовується обмеження частоти сигналів акустичної емісії 200 кГц – 500 кГц кнопками фільтрів високих та низьких частот приладу на блоках СБ підсилювачів фільтрів.
4. На передній панелі СБ підсилювачів фільтрів обирається канал (І або ІІ), синхронізація внутрішня.
5. Налаштовується СБ суматора: обирається відлік подій емісії обиранням кнопки «Подія», множинник «1».
6. На поверхню зразка наноситься крапля імерсійної рідини, встановлюється п'єзоприймач.
7. Прилад вмикається кнопкою передньої панелі «Мережа».
8. За допомогою кнопок «Ослаблення» СБ підсилювача фільтрів добиваються періодичної появи показників емісії не більше 1–2 одиниць найменшого розряду при відсутності навантаження зразка.
9. Починають навантаження зразка зі швидкістю, що забезпечує можливість фіксувати показники. Показники навантаження (Н) та інтенсивності емісії (од) фіксуються з кроком 10 Н та заносяться у відповідні стовпчики таблиці 4.1.
10. При досягненні рівня сили 200 Н розвантажують зразок до 0 Н та повертаються до п. 9. Розвантаження необхідно для ознайомлення з ефектом Кайзера.

11. Навантаження проводять до повного руйнування зразка.

Таблиця 4.1. Рівень акустичної емісії

Крок навантаження	Рівень навантаження, Н	Рівень механічних напружень, МПа	Інтенсивність акустичної емісії, од
1			
2			
.....			

12. За даними табл. 4.1 будується графік залежності інтенсивності акустичної емісії від механічного напруження зразка.

13. За роботою робляться висновки.

Контрольні питання

1. Що таке акустична емісія?
2. Джерела АЕ на мікро- та макрорівні.
3. Область застосування метода АЕ.
4. Як змінюється активність акустичної емісії при навантаженні матеріалу?
5. Пояснити поняття «білий шум».
6. Що таке ефект Кайзера?
7. Які чинники впливають на форму сигналу на виході датчика?

Лабораторна робота № 5

ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПЛІВОК ТА ПОКРИТТІВ МАГНІТНИМ ТОВЩИНОМІРОМ

Мета роботи: навчитися налаштовувати магнітний товщиномір та вимірювати ним товщину різних матеріалів та покриттів.

Устаткування та матеріали: магнітні товщиноміри МТ-41НЦ 21м, BENETECH GM211, різні види матеріалів (плівки та інші матеріали з покриттям товщиною до 2 мм).

Теоретичні відомості

Магнітні товщиноміри призначені для контролю товщини захисних покриттів на виробах з ферромагнитних матеріалів. Процес вимірювання виконується за принципом оцінювання сили взаємодії магніту товщиноміра і основи покриття, що вимірюється. Зміна товщини покриття змінює силу взаємодії магніту і основи, яка вимірюється спеціально відкаліброваною шкалою.

За принципом дії всі магнітні товщиноміри можна поділити на три групи:

- пондеромоторної дії;
- індукційні;
- магнітостатичні.

Пондеромоторний метод базується на реєстрації сили відриву постійного магніту або сердечника електромагніту від поверхні виробу і на оцінці товщини покриття, що контролюється за значенням цієї сили. У першому випадку – сила визначається пружинними динамометрами, у другому – за зміною струму намагнічування.

Дана група приладів у наш час використовується рідко, оскільки має велику кількість суб'єктивних похибок.

Значне поширення отримали *індукційні* товщиноміри, у яких практично всі недоліки товщиномірів пондеромоторної дії відсутні. Принцип їх дії базується на вимірюванні змін магнітного спротиву ланцюга, що складається з ферромагнітної основи виробу, вимірювального перетворювача та немагнітного прошарку між ними, що відповідає товщині покриття. Індукційний вимірювальний перетворювач живиться синусоїдальним струмом.

До третьої групи магнітних товщиномірів відносяться *магнітостатичні*. Принцип їх дії базується на визначенні напруженості магнітного поля в просторі між постійним магнітом (або електромагнітом) і феромагнітним матеріалом основи. Схему дії магнітостатичних товщиномірів з перетворювачем Холла наведено на рис. 5.1. У більшості сучасних магнітних товщиномірів використовується двополюсна магнітна система з постійними стрижньовими і П-подібними магнітами.

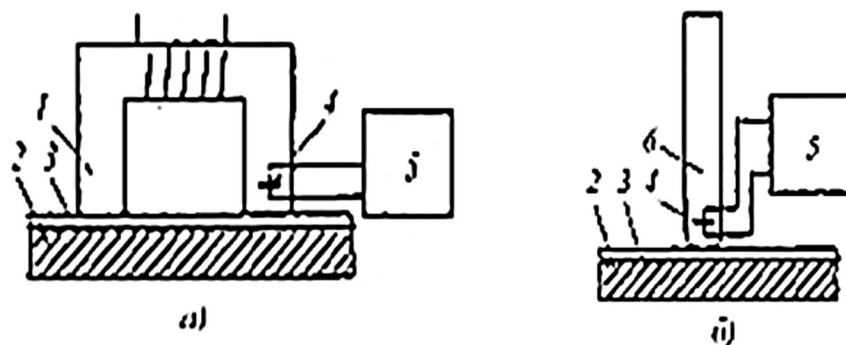


Рис. 5.1. Схеми дії магнітостатичних товщиномірів (*а* – з П-подібним електромагнітом; *б* – зі стрижньовим постійним магнітом):

1 – електромагніт; 2 – феромагнітна деталь; 3 – немагнітне покриття;
4 – перетворювач Холла; 5 – вимірювальний прилад; 6 – постійний магніт

При роботі з магнітними товщиномірами необхідно враховувати фактори, що впливають на результати вимірювань: коливання магнітних властивостей покриття або основи, стан поверхні, форму виробу і под. У значній мірі вплив цих факторів обумовлено розмірами та формою магніту, топографією і напруженістю магнітного поля. У зв'язку з підвищенням вимог до точності та надійності виробничого контролю товщини покриттів різко зросли вимоги до їх метрологічного забезпечення.

Для вимірювання товщини покриттів ізоляції трубопроводів до 100 мм застосовують прилади з однополюсними перетворювачами на постійних магнітах з використанням ефекту Холла (рис. 5.3, *б*).

Спеціальна схема живлення перетворювача Холла дозволяє практично повністю виключити вплив зміни температури на похибку вимірювань. У результаті – прилад має відносну похибку вимірювань не більше 3 % у всьому діапазоні робочих температур від -10 до $+50$ °C, що навіть перевищує за точністю індукційні товщиноміри, оскільки більшість з них мають додаткову похибку вимірювань, що обумовлена вимірюванням температури зовнішнього середовища.

До того ж магнітостатичні товщиноміри мають простішу схему і більшу технологічність у виконанні вимірювального перетворювача (відсутня необхідність намотування котушок), це робить їх розвиток перспективнішим у порівнянні з індукційними товщиномірами.

Іншою важливою перевагою магнітостатичних товщиномірів є відсутність змінного магнітного поля, що створюється вимірювальним перетворювачем і може призводити до втрат на віхрові струми при контролі електропровідних немагнітних покриттів. Узагальнену структурну схему магнітостатичного товщиноміра наведено на рис. 5.2.

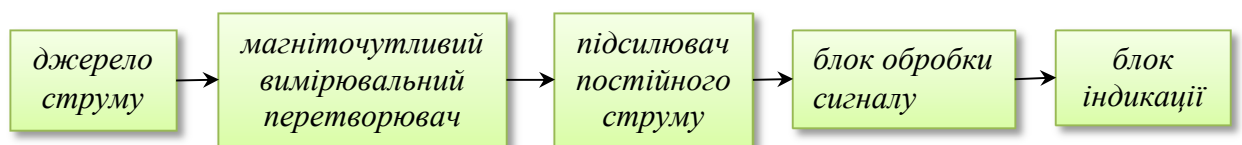


Рис. 5.2. Структурна схема магнітостатичного товщиноміра

Джерело струму живить магніточутливий вимірювальний перетворювач. У якості вимірювального перетворювача можуть використовуватись магніторезистори, перетворювачі Холла, ферозонди, рамки зі струмом та інші магніточутливі елементи. Напруження з вимірювального перетворювача через підсилювач постійного струму потрапляє у блок обробки сигналу, де воно перетворюється в сигнал товщини покриття. Цей сигнал передається у блок індикації.

У даній роботі використовуються магнітостатичні товщиноміри МТ-41НЦ-М та BENETECH GM211 з діапазоном вимірювання 0,004–2,0 мм або

МТ-41НЦ-01 з діапазоном вимірювання 0,50–12,0 мм, що поділені на піддіапазони (таблиця 5.1).

Границя допустимої основної похибки не більше

$$\Delta x = 0,05x + 1,0,$$

де x – значення, що вимірюється.

Указане значення допустимої основної похибки забезпечується при умовах, указаних у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Піддіапазони та характеристики роботи товщиномірів

Характеристика	МТ-41НЦ-М	МТ-41НЦ-01
Піддіапазони	I – 4–22 мкм II – 20–220 мкм III – 0,2–2 мм	I – 0,5–1,5 мм II – 1,0–2,5 мм III – 2,0–12 мм
Шорсткість поверхні основи	на I піддіапазоні ≤ Ra 1,25 мкм, на II та III піддіапазоні ≤ Rz 20 мкм	≤ Rz 40 мкм
Товщина феромагнітної основи	≥ 2 мм	≥ 10 мм
Відстань від центра перетворювача до края основи	≥ 13 мм	≥ 50 мм
Радіус кривизни поверхні, що контролюється	≥ 30 мм	≥ 150 мм
Температура зовнішнього середовища	(20 ± 5) °C	
Настроювання прилада проводиться за зразком основи, виготовленої з тієї ж марки сталі, що і для виробу, який контролюється		
До початку роботи товщиномір повинен знаходитись у нормальних умовах не менше 3 годин		

Хід роботи

Частина 1. Визначення товщини покриття або плівки.

1. Підключається товщиномір до джерела живлення (електрична мережа або батарея), натискається кнопка ВКЛ. При цьому повинен

ввімкнутися індикатор «ОТСУТСТВИЕ ИЗМЕРЕНИЙ». Товщиномір прогрівається впродовж 3 хв.

2. Готуються калібровочні зразки (міри товщини) – 0,020; 0,22; 0,50; 1,00; 1,50; 2,00; 2,50; 12,00 мм для настроювання товщиноміра.

Фактичні значення мір товщини можуть відрізнятися від вказаних 5–10 %.

3. Вмикається I піддіапазон і встановлюється наконечник перетворювача (щуп) на феромагнітну основу і обертанням ручки «НИЖНИЙ» на індикаторі вимірювань установлюється нульове значення.

При цьому індикатор «ОТСУТСТВИЕ ИЗМЕРЕНИЙ» не повинен світитися.

При роботі на II та III діапазонах обертанням ручки «НИЖНИЙ» установлюється показання індикатора, що відповідає мірі товщини, яка використовується.

Допустиме відхилення при установці ± 2 одиниці молодшого розряду.

4. Установлюється щуп на міру товщини, яка відповідає верхній границі даного піддіапазону товщиноміра або близька до неї, розташованій на зразку феромагнітної основи.

Обертанням ручки «ГРУБО» і «ПЛАВНО» установлюється на цифровому індикаторі значення, що відповідає товщині встановленої міри.

Допустиме відхилення при установці ± 2 одиниці молодшого розряду.

5. При переході на інший піддіапазон, а також при зміні матеріалу основи виконується налаштування товщиноміра за пунктами 4 та 5.

6. Товщина покриття або плівки вимірюється на заданій площині декілька разів, знаходиться її середнє значення та похибка вимірювання, абсолютна та відносна. Дані вносяться в таблицю 5.2.

Похибка прямих вимірювань розраховується за формулою

$$\Delta x = t(\alpha, n) S_x, \quad (5.1)$$

де $t(\alpha, n)$ – значення коефіцієнта Стюдена для довірчої ймовірності α при кількості вимірювань n , S_x – середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_{\text{сеп}})^2}{n(n-1)}}. \quad (5.2)$$

Результат представляється у вигляді

$$x = x_{\text{сеп}} \pm \Delta x. \quad (5.3)$$

Таблиця 5.2. Результати вимірювання товщини покриття або плівки

№ вимірювання, i	Товщина зразків t , мм	$t - t_{\text{сеп}}$, мм	$(t - t_{\text{сеп}})^2$, мм ²
1			
2			
...			
$t_{\text{сеп}}$, мм			

Частина 2. Визначення браку в товщині покриття або плівки.

За необхідністю визначення браку покриття або товщини плівки (розбракуванні) вмикається перемикач «РАЗБРАКОВА ВКЛ».

1. Установлення границь розбракування проводиться за спеціальними мірами товщини (що вироблені та атестовані відомчою метрологічною службою) або можна використовувати безпосередньо одну з деталей з партії, що контролюється, також атестовану відомчою метрологічною службою.
2. Перетворювач (щуп) установлюється на вказану міру і регулюються показання індикатора обертанням ручок «РАЗБРАКОВКА+» та «РАЗБРАКОВКА–» таким чином, щоб індикатори «БРАК+» та «БРАК–» знаходились на границі світіння і згасання.

3. Установлюється щуп на ділянку, що контролюється, фіксується товщина покриття або виробу за індикатором та визначається наявність брака за індикаторами «БРАК+» та «БРАК-».
4. Результати записуються у звіт та робляться висновки.

Контрольні питання

1. Для чого призначені магнітні товщиноміри?
2. На які групи за принципом дії поділяються магнітні товщиноміри?
3. Принцип роботи пondeмоторних товщиномірів.
4. Принцип роботи індукційних товщиномірів.
5. Принцип роботи магнітостатичних товщиномірів.
6. Умови роботи товщиноміра МТ-41НЦ-М.
7. Які фактори впливають на результат вимірювання товщиноміром?
8. Схема магнітостатичного товщиноміра.
9. Послідовність роботи з товщиноміром.

Лабораторна робота № 6

ВИЯВЛЕННЯ ЗОВНІШНІХ ДЕФЕКТІВ У МАТЕРІАЛІ КАПІЛЯРНИМ МЕТОДОМ

Мета роботи: знайти зовнішні дефекти на різних зразках матеріалу за допомогою капілярного методу контролю якості.

Устаткування та матеріали: зразки композиційних матеріалів, набір для капілярного контролю (індикаторний пенетрант, очисник, гасник, проявник), мікроскоп, лупа, лінійка.

Теоретичні відомості

Капілярна дефектоскопія — метод дефектоскопії, оснований на проникненні контрастних речовин під дією капілярного тиску в поверхневі дефектні шари виробу, що контролюється. У результаті подальшої обробки

проявником підвищується світло- і кольороконтрастність дефектної ділянки відносно неушкодженої з виявленням кількісного та якісного складу пошкоджень (до тисячних часток міліметра).

Капілярний контроль поділяється на *кольоровий* та *люмінесцентний*.

Люмінесцентний метод контролю застосовується для виявлення зовнішніх дефектів, в основному тріщин, а також для контролю на непроникність. Цей метод оснований на властивості деяких рідин флюорескувати під впливом ультрафіолетових променів. У якості флюорескуючих рідин використовують суміші мінеральної олії з гасом або бензином. Кінцевою операцією є огляд поверхні деталі з освітленням невидимими ультрафіолетовими променями.

Кольоровий метод контролю (метод фарб) оснований на виявленні дефектів за допомогою розчинів барвників, що проникають усередину дефектів. На відміну від люмінесцентних методів, кольорові не потребують джерел ультрафіолетових променів і дозволяють визначати поверхневі дефекти в матеріалах та виробах при звичайному денному світлі. Ця особливість кольорових методів робить їх найбільш прийнятними для використання в «польових» умовах (рис. 6.1).

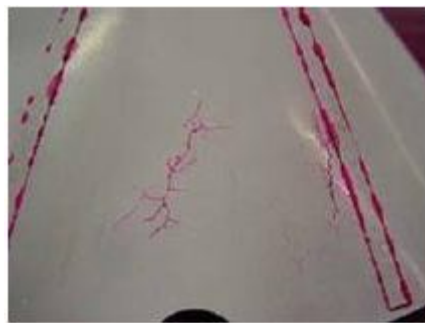


Рис. 6.1. Дефекти, що виявлені капілярним методом контролю

Процес капілярного контролю складається з 5 етапів:

1. Попереднє очищення поверхні (рис. 6.2, *a*).

Щоб барвник міг проникнути в дефекти на поверхні, її попередньо слід очистити водою або органічним очищувачем. Усі забруднюючі речовини (масла, іржа і под.), будь-які покриття (лакофарбові, металізація) повинні бути видалені з контрольованої ділянки. Після цього поверхня висушується, щоб усередині дефекту не залишалося води або очищувача.

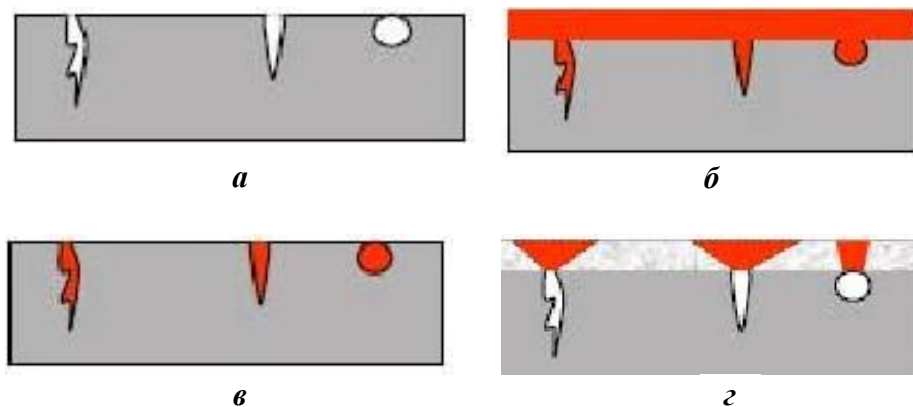


Рис. 6.2. Послідовність капілярного контролю:

а – підготовка поверхні до контролю; **б** – нанесення на поверхню індикаторного пенетранта; **в** – очищення поверхні від надлишків індикаторного пенетранта; **г** – нанесення на поверхню проявника

2. Нанесення індикаторного пенетранта (рис. 6.2, б).

Пенетрант (зазвичай червоного кольору) наноситься на поверхню шляхом розпилення, пензлем або зануренням об'єкта контролю у ванну, для якісного просочення і повного покриття. Завдяки своїм особливим якостям, під дією капілярних сил він проникає в найдрібніші дефекти, які мають вихід на поверхню об'єкта контролю.

Контроль виконується, як правило, при температурі 5–50 °С, витримка пенетранта на поверхні – 5–30 хв.

3. Видалення надлишків пенетранта (рис. 6.2, в).

Надлишок пенетранта видаляється протиранням серветкою, промиванням водою або тим же очищувачем, що і на стадії попереднього очищення. При цьому пенетрант повинен бути вилучений тільки з поверхні контролю, але ніяк не з порожнини дефекту. Потім поверхня висушується серветкою без ворсу або струменем повітря.

4. Нанесення проявника (рис. 6.2, з).

Після просушування одразу ж на поверхню контролю тонким рівним шаром наноситься проявник (зазвичай білого кольору).

Проявник розчиняє барвник, який залишився всередині дефекту, і за допомогою дифузії «витягує» пенетрант, що залишився в дефекті, на поверхню об'єкта контролю. Наявні дефекти видно досить контрастно. Індикаторні сліди у вигляді ліній указують на тріщини або подряпини, окремі точки – на пори.

5. Контроль.

Виявлення наявних дефектів починається безпосередньо після закінчення процесу проявлення. Під час контролю виявляються і реєструються індикаторні сліди (рис. 6.3). Інтенсивність забарвлення говорить про глибину і ширину розкриття дефекту, чим блідніше забарвлення, тим дефект дрібніше. Інтенсивне забарвлення мають глибокі тріщини. Після проведення контролю проявник видаляється водою або



очищувачем.

Рис. 6.3. Вигляд дефекту на поверхні після нанесення проявника

Дефектоскопічні матеріали для кольорової дефектоскопії вибирають у залежності від вимог, що висуваються до контрольного об'єкта, його стану та умов контролю. Їх комплектують у цільові набори, у які входять повністю або частково взаємообумовлені сумісні дефектоскопічні матеріали. Сумісність дефектоскопічних матеріалів у наборах або поєднаннях є обов'язковою. Склади набору не повинні погіршувати експлуатаційні якості матеріалу контрольного об'єкта.

Згідно ГОСТ 18442-80 «Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования» клас чутливості контролю визначається в залежності від розміру виявлених дефектів. Як параметр розміру дефекту приймається поперечний розмір дефекту на поверхні об'єкта контролю, так звана ширина розкриття дефекту. Мінімальна величина розкриття виявлених дефектів називається нижнім порогом чутливості й обмежується тим, що дуже мала кількість пенетранта, затримується в порожнині невеликого дефекту. Слід пенетранта виявляється недостатнім, щоб отримати контрастну індикацію при даній товщині шару проявника.

Існує також верхній поріг чутливості, який визначається тим, що з широких, але неглибоких дефектів пенетрант вимивається при усуненні надлишків пенетранта з поверхні.

Виявлення індикаторних слідів, відповідно цим ознакам, слугує підставою для аналізу про допустимість дефекту за його розміром, характером та положенням.

ГОСТом 18442-80 встановлено 5 класів чутливості (по нижньому порогу) у залежності від розмірів дефектів (таблиця 6.1).

Таблиця 6.1. Класи чутливості капілярного контролю

Клас чутливості	Шорсткість поверхні не грубіше	Ширина розкриття дефекту, мкм
I	Rz 2,5	Менше 1
II	Rz 20	Від 1 до 10
III	Rz 40	Від 10 до 100
IV	Rz 80	Від 100 до 500
Технологічний	Не оброблена	Не нормується

Основною умовою отримання достовірних результатів при проведенні капілярного контролю є забезпечення належного рівня підготовки об'єкта:

- поверхня контрольованої ділянки повинна бути захищена від оливо, мастил та інших забруднень;

- поверхня контрольованої ділянки повинна бути промита і знежирена органічним розчинником;
- шорсткість зони контролю повинна бути не більше Rz 20 мкм.

Хід роботи

1. Проводиться попереднє очищення та просушування поверхні контрольованого виробу водою або органічним очищувачем.
2. Наноситься пенетрант (зазвичай червоного кольору) на поверхню шляхом розпилення, пензлем або зануренням об'єкта контролю у ванну, для якісного просочення і повного покриття. Витримка пенетранта на поверхні – не менше 5 хв.
3. Надлишки пенетранта видаляються протиранням серветкою або промиваються водою, або тим же очищувачем, що і на стадії попереднього очищення.

Пенетрант вилучається тільки з поверхні контролю, залишаючись у порожнині дефектів. Поверхня висушується серветкою без ворсу або струменем повітря.

4. Наноситься проявник на контрольовану поверхню тонким рівним шаром. Індикаторні сліди вказують на наявність дефектів.
5. Проводиться виявлення і реєстрація наявних дефектів. Можна застосувати лупу або мікроскоп з невеликим збільшенням. Вимірюються розміри дефектів.

Після проведення контролю проявник видаляється водою або очищувачем.

6. Усі отримані дані заносяться в протокол.

Контрольні питання

1. Призначення капілярної дефектоскопії.
2. Чим відрізняються кольоровий і люмінесцентний капілярний контроль?

3. Етапи капілярного контролю.
4. Для чого призначений індикаторний пенетрант?
5. Для чого призначений проявник?
6. За якими ознаками визначаються параметри дефекту?
7. Класи чутливості капілярного контролю.
8. Умови отримання достовірних результатів при проведенні капілярного контролю.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. ГОСТ 18442-80 «Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования» – Методы : сборник стандартов. Москва. ИПК Издательство стандартов, 2005. 38 с.
2. ГОСТ 18353-79 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов» – Методы : сборник стандартов. Москва. ИПК Издательство стандартов, 2005. 12 с.
3. ГОСТ 23479-79 «Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования» – Методы : сборник стандартов. Москва. ИПК Издательство стандартов, 2005. 11 с.
4. Потапов А. И., Пеккер Ф. П. Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов. Ленинград, 1977. 192 с.
5. Гершберг М. В., Илюшин С. В., Смирнов В. И. Неразрушающие методы контроля судостроительных стеклопластиков. Ленинград : «Судостроение», 1971. 199 с.
6. ГОСТ 20415-82. Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения. Москва, 1982.
7. Матвеев А. С. Ультразвуковые приборы ЦНИИТМАШ. Москва, 1958.
8. Неразрушающий контроль. Справочник : в 8 томах / под ред. В. В. Клюева. Москва : Машиностроение, 2006.
9. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник : в 2-х книгах / под ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Машиностроение, 1986.
10. <http://impuls.moldline.net>
11. <http://ultracon-service.com.ua/uds2-73descr.shtml>
12. <http://www.abata.ru>

13. Троицкий В. А., Карманов М. Н., Троицкая Н. В. Неразрушающий контроль качества композиционных материалов – ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. office@paton.kiev.ua

14. Воробей В. В., Маркин В. Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций : монография. Новосибирск : Наука, 2006. 190 с.

15. Левшина Е. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи) : учеб. пособие для вузов. Ленинград : Энергоатомиздат, 1983. 320 с.

16. Евтихий Н. Н. и др. Измерение электрических и неэлектрических величин : учеб. пособие для вузов / под общ. ред. Н. Н. Евтихьева. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 352 с.

17. Строителев В. Н. Методы и средства измерений, испытаний и контроля. Москва : Европейский центр по качеству, 2002. 152 с.

18. Рябов В. П., Поздняк Е. С. Методы и средства измерений, испытаний и контроля : учеб. пособие. Москва : МГУП, 2009. 157 с.

19. Раннев Г. Г., Тарасенко А. П. Методы и средства измерений : учебник для ВУЗов. 3-е изд., стер. Москва : Академия, 2006. 336 с.

20. Ланге Ю. В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. Москва : Машиностроение, 1992. 272 с.

21. Мурашов В. В. Методы и средства акустического контроля многослойных конструкций и изделий из полимерных материалов. *Контроль. Диагностика*. 12. 2016. № 10 (14489). С. 16–29.

22. Ланге Ю. В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. Москва : Машиностроение, 1991. 272 с.

23. Покровский А. В., Петина О. С. Опыт применения дефектоскопов АД 64М и АД-42ИМ для неразрушающего контроля многослойных конструкций. АНТК им. А. Н. Туполева. <http://www.defectoscop.ru>.

24. Ланге Ю. В. и др. Применение спектрального анализа в низкочастотных акустических дефектоскопах. *Дефектоскопия*. 1995. № 10. 10 с.

25. Ланге Ю. В. и др. Спектры импульсных сигналов преобразователей низкочастотных акустических дефектоскопов. *Дефектоскопия*. 1995. № 10. 7 с.

26. Ланге Ю. В. и др. Новые низкочастотные акустические дефектоскопы для неразрушающего контроля многослойных конструкций : доклад 14-й Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика».

27. Афанасьев В. П. и др. Методика выбора информативных параметров сигналов при разработке акустического метода свободных колебаний. *Дефектоскопия*. 1990. № 9. С. 19–24.

28. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / под ред. В. В. Клюева. Машиностроение, 1995.

29. Гондаревский В. П., Кузнецов М. Л. Импедансный контроль качества сотовых конструкций с углепластиковыми обшивками. *Заводская лаборатория*. 1993. № 12. С. 35–38.

30. Yu. V. Lange The mechanical impedance analysis method of nondestructive testing. *Nondestructive Testing and Evaluations*.

Навчальне видання

СОЛОМОНЮК Наталя Сергіївна

КОПІЙКА Сергій Васильович

**ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ З КУРСІВ
«КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ВИРОБІВ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ
МАТЕРІАЛІВ», «ДІАГНОСТИКА ТА ДЕФЕКТОСКОПІЯ»**

Методичні вказівки

Комп'ютерна правка й коректура *О. Г. Костенко*

Комп'ютерне верстання *В. В. Москаленко*