

ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ БУДИНКІВ І СПОРУД ТА КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВИМИ МЕТОДАМИ

4.1. Дефектоскопія металів

Контроль якості матеріалів із застосуванням ультразвукових коливань вирізняється різноманіттям методів, типів застосовуваних хвиль, широким діапазоном частот (розд. 1, 3) [81]. Ефективна реалізація його можливостей, стосовно дефектоскопії конкретних видів металів і виробів на їхній основі, полягає в коректній постановці задачі при виборі чи розробці методики контролю. Вона містить у собі такі основні етапи:

1. Вибір схеми контролю. На цьому етапі виробляється вибір методу дефектоскопії, типу пружних хвиль, способу введення і прийому ультразвукових коливань до досліджуваного матеріалу, діапазону частот, типу п'єзoeлектричних перетворювачів.

2. Підготовка виробу до контролю. На цьому етапі складається перелік вимог до якості поверхні, поділ великогабаритних виробів і виробів різної товщини на ділянки для послідовного контролю.

3. Складання переліку вимог до технічних характеристик апаратури – установлення, вибір і настроювання частоти проходження та модуляції зондувального сигналу, чутливості приймального тракту, швидкості розгорнення осцилографічного індикатора і т. п.

4. Складання правил пошуку дефектів – вибір дискретності та швидкості сканування.

5. Оцінка результатів контролю. Практично на цьому етапі виконується апробація правильності формування рішень по етапах 1– 4. Залежно від кінцевої задачі неруйнівного контролю визначається наявність, місце розташування дефектів, вимір їхніх розмірів, тощо.

Алгоритм розв’язання цієї задачі наведено рис. 4.1.



Рис. 4.1 – Алгоритм розв’язання задачі неруйнівного контролю якості матеріалів ультразвуковим методом

Зупинимося докладніше на змісті кожного з етапів. Вибір схеми контролю. Для розв’язання задач дефектоскопії в матеріалах, що характеризуються високою щільністю структури, до яких відносяться і метали, найчастіше застосовують луна-метод (розд. 3). При цьому для виявлення дефектів, що знаходяться вдалині й поблизу поверхні масивних виробів, товщина яких значно перевершує довжину хвилі зонду-

вального сигналу, використовують подовжні та поперечні хвилі (розд.1).

Подовжні хвилі, як правило, використовують у тому випадку, коли ультразвукові коливання необхідно ввести нормально чи під невеликим кутом до поверхні, а поперечні – коли кут уведення повинний бути значним (35° і більше). Це обумовлено зручністю і найбільш вигідними умовами для порушення хвиль кожного типу: подовжніх – нормальним чи похилим перетворювачем з невеликим кутом уведення, поперечних – похилим перетворювачем з кутом падіння між першим і другим критичними кутами.

У тому випадку, коли є можливість вибору, то краще застосувати поперечні хвилі у зв'язку з меншою їхньою довжиною (λ) (при постійній частоті) у порівнянні з подовжніми. Це підвищує чутливість приймально-передавального тракту до дефектів структури матеріалу і дозволяючи здатність методу контролю. Якщо ж необхідне збільшення довжини хвилі й зменшення загасання пружних коливань, наприклад, при контролі виробів із грубозернистих металів, доцільне застосування подовжніх хвиль.

Вибір кута нахилу перетворювача для збудження поперечних і подовжніх хвиль визначається необхідним обсягом наскрізного прозвучування контрольованого обсягу виробу, розмірами передбачуваних дефектів структури матеріалу. Необхідно враховувати можливість використання хвиль, відбитих і від поверхні виробу, розташованої протилежно поверхні введення пружних коливань. Найефективнішим варіантом у цьому випадку є застосування поперечних хвиль, що падають на поверхню, яка відбиває, під кутом більше третього критичного. При такому введенні зондувального сигналу виключається ефект трансформації хвиль.

При виборі кута нахилу п'єзоелектричних перетворювачів враховують також умови одержання максимального відбитого сигналу від дефектів у виробі, що найчастіше зустрічаються або найсуттєвіших. Для більш повного виявлення всіх можливих дефектів, що можуть мати різну орієнтацію в просторі (матеріалі об'єкта контролю), введення пружних хвиль рекомендується робити під декількома кутами.

Для прикладу розглянемо процес контролю наявності вертикальної тріщини в металі (рис.4.2.).

Вертикальна тріщина імітована розрізом. Визначення такого виду дефекту найефективніше здійснюється за дифракцією подовжніх хвиль на її кінці, розташованому всередині об'єкта контролю. У цьому випадку контроль наявності тріщини стає можливим при нормальній (рис.4.2, а) чи похилій (рис.4.2, б) схемі сполученого тракту “введен-

ня – прийом” ультразвукового сигналу.

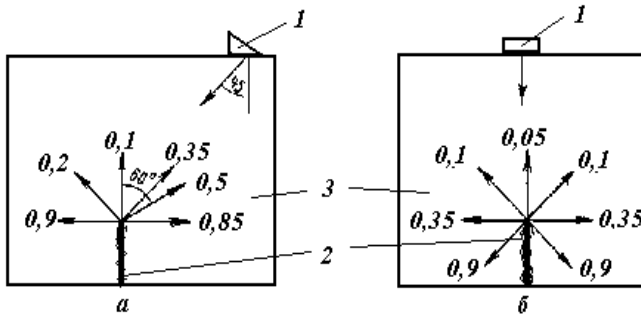


Рис. 4.2 – Дифракційне розсіяння подовжніх хвиль у місці закінчення тріщини матеріалу об’єкта контролю при похилому (а) та нормальному (б) падінні фронту пружної хвилі:

1 – ультразвукові прийомно-передавальні перетворювачі; 2 – тріщини в матеріалі об’єкта контролю; 3 – об’єкт контролю. (Стрілки вказують напрям розповсюдження випромінених і відбитих пружних хвиль)

Очевидно, що у випадку застосування похилої схеми амплітуда інформаційного сигналу від ребра тріщини, отримана при використанні похилого перетворювача, буде приблизно в 7 разів більше, ніж при використанні перетворювача, що реалізує тракт “уведення – прийом” ультразвукового сигналу за нормальною схемою. З огляду на те, що конструкція похилих перетворювачів передбачає наявність додаткової призми, через яку проходить пружна хвиля, а також збільшення шляху проходження ультразвукових коливань у досліджуваному матеріалі, фактичне збільшення амплітуди інформаційного тіньового сигналу буде не значне.

Очевидно, що у випадку застосування похилої схеми амплітуда інформаційного сигналу від ребра тріщини, отримана при використанні похилого перетворювача, буде приблизно в 7 разів більше, ніж при використанні перетворювача, що реалізує тракт “уведення – прийом” ультразвукового сигналу за нормальною схемою. З огляду на те, що конструкція похилих перетворювачів передбачає наявність додаткової призми, через яку проходить пружна хвиля, а також збільшення шляху проходження ультразвукових коливань у досліджуваному матеріалі, фактичне збільшення амплітуди інформаційного тіньового сигналу буде не значне.

Збільшення амплітуди інформаційного тіньового сигналу, а отже, і досягнення вищої ймовірності контролю, формується у випадку засто-

сування роздільної схеми тракту “випромінювання – прийом” пружних хвиль. Причому, у розглянутому випадку найкращим є випромінювання подовжніх хвиль під кутом $\theta = 45^\circ$, а прийом – під кутом $\theta = 60^\circ$. При цьому амплітуда інформаційного сигналу, в порівнянні зі сполученим варіантом тракту “випромінювання – прийом”, зростає приблизно в 10 разів.

Найефективнішою є схема наскрізного прозвучування матеріалу, тобто розташування випромінюючого і прийомного п'єзоелектричних перетворювачів на протилежних гранях об'єкта контролю. При такому варіанті формується максимальна амплітуда інформаційного сигналу. Однак на практиці найчастіше одна з цих поверхонь виявляється недоступною для установки п'єзоелектричних перетворювачів, що не дає можливості реалізувати цей метод прозвучування.

Поперечні хвилі, як правило, використовують для виявлення дефектів, що розташовуються на незначному віддаленні від поверхні об'єкта контролю. У даному випадку для виявлення дефектів використовуються кутовий ефект. Він полягає у фіксуванні інформаційного сигналу після подвійного відбиття – від поверхні об'єкта контролю і дефекту (розд. 3). При цьому не рекомендується використовувати в тракті “випромінювання – прийом” кути падіння пружної хвилі близькі до $\theta = 60^\circ$. Це пояснюється тим, що при відбитті від дефекту може відбуватися трансформація поперечних хвиль у подовжні і, як наслідок, – амплітуда відбитого (інформаційного) сигналу буде значно знижена.

Поверхневі хвилі застосовують переважно для дефектоскопії довгомірних виробів, дефекти структури яких знаходяться безпосередньо біля поверхні матеріалів або розташовуються на глибині, яка не перевищує довжину поверхневої хвилі.

Ця область застосування поверхневих хвиль обґрунтовується їхнім меншим коефіцієнтом загасання в порівнянні з подовжніми чи поперечними (об'ємними) хвилями. Так, амплітуда поверхневої хвилі спадає в далекій зоні перетворювача зі збільшенням відстані (r) пропорційно величині $A \sim r^{-0,5}$. Зниження амплітуди об'ємних хвиль відбувається пропорційно $A \sim r^{-1}$. У зв'язку з цим поверхневі хвилі з достатньою вірогідністю реєструють дефекти матеріалу на відстані $l = 0,5 \dots 1$ м від місця введення ультразвукових коливань.

Оскільки поверхнева хвиля повторяє вигини поверхні об'єкта контролю, то при значних її нерівностях може виникати додаткове загасання цього виду пружних хвиль. У такому випадку найчастіше застосовують луна-метод. Значно рідше використовується тіньовий метод контролю.

Застосування при ультразвуковому контролі якості поверхневих хвиль особливо ефективно в тому випадку, коли дефекти матеріалу знаходяться на поверхні або залягають під поверхнею об'єкта контролю, доступ до якої утруднений.

Наприклад, на основі використання цього типу хвиль стає можливим здійснення експлуатаційного контролю деяких залізобетонних і металевих конструкцій. При цьому контроль всієї конструкції може забезпечуватися по всій довжині конструкції з одного положення п'єзоелектричного перетворювача.

Подальший аналіз методів використання поверхневих хвиль показує, що для виявлення дефектів, які розташовуються безпосередньо поблизу поверхні виробу, застосовують вимір параметрів так званої головної хвилі. При поширенні в досліджуваному матеріалі цей тип поверхневої хвилі поширюється прямолінійно і не повторяє вигини поверхні виробу. У кожній точці поверхні головної хвилею породжується поперечна хвиля, напрямком поширення якої орієнтований усередину матеріалу під кутом, рівним третьому критичному. У зв'язку з цим амплітуда головної хвилі швидко спадає зі збільшенням відстані від місця випромінювання пружної хвилі.

З погляду практики ультразвукового контролю основна відмінність головних хвиль від поверхневих полягає в практичній нечутливості до дефектів, що розташовані на поверхні виробу. Так, наприклад, на частоті $f = 1,5$ МГц головні хвилі не реагують на нерівності поверхні виробу зі сталі глибиною до $h \leq 0,5$ мм. У той же час вони дають змогу виявляти дефекти на глибині $h = 1 \dots 10$ мм від поверхні об'єкта контролю.

Обмеження застосування головних хвиль полягає в загальному високому рівні перешкод, що виникають у процесі проведення контролю. Другим недоліком методу є формування помилкових сигналів від поперечних коливань, що породжуються при поширенні головних хвиль в обмеженому обсязі. У зв'язку з цим головні хвилі застосовують тоді, коли товщина об'єкта контролю перевищує $h \geq 10 \dots 12$ мм. У цьому випадку помилкові інформаційні сигнали від поперечних хвиль виявляються розташованими по часовій осі на достатній відстані від інформаційних сигналів головної хвилі, що дає можливість їх селектувати.

Вимоги до поверхні матеріалу об'єкта контролю, на якій встановлюють чи переміщують ультразвуковий перетворювач. Головною вимогою, що ставиться до поверхні контрольованого виробу, є забезпечення стабільності акустичного контакту "п'єзоелектричний перетворювач – матеріал об'єкта контролю" (розд. 2.2). Це має велике зна-

чення для забезпечення надійності процесу пошуку дефектів і ще більше при вимірі їхніх розмірів і конфігурації.

Поверхня виробу з нерівностями порядку $h \approx 0,01 \cdot \lambda$, при введенні пружних хвиль через рідину, забезпечує цілком задовільні результати при контролі контактним способом. Значні (порядку довжини хвилі) нерівності поверхні матеріалу знижують надійність контролю навіть при використанні імерсійного способу акустичного контакту, що висуває найменші вимоги до якості поверхні. Якщо нерівності мають регулярний характер, то вони спричинюють відхилення променів пружних хвиль подібно дифракційним ґраткам в оптиці. Нерегулярні нерівності зумовлюють розсіювання і випадкове відхилення напрямку променів від заданого кута введення.

Надійному введенню ультразвукових коливань в об'єкт контролю перешкоджають іржа, що відшаровується, окалина, деякі види фарб. У цих випадках необхідне зачищення поверхні наждаком, механічною, або піскоструминною обробкою.

Вимоги до якості підготовки поверхні залежать від властивостей середовища акустичного контакту "п'єзоелектричний перетворювач – матеріал об'єкта контролю". Так, при контролі контактним способом рідина повинна мати змочувальні властивості й не спричинювати корозію металу і матеріалу п'єзоелектричного перетворювача. Таким вимогам, наприклад, задовольняють машинні мастила, деякі розчини на основі крохмалю. Для проведення контролю на виробих із грубою поверхнею, у випадку утруднень з її підготовкою, поліпшення акустичного контакту "п'єзоелектричний перетворювач – матеріал" забезпечується застосуванням гліцерину, що має підвищений хвильовий опір у порівнянні з машинним мастилом.

При використанні імерсійного і щілинного способів акустичного контакту як контактну рідину найчастіше застосовують воду. Для усунення бульбашок повітря, що можуть бути додатковими центрами розсіювання ультразвукових хвиль, рекомендується відстоювати воду протягом 1-2 годин. Запобігання корозії в цьому випадку досягається додаванням інгібіторів – речовин, що сповільнюють корозію.

Складання вимог до технічних характеристик апаратури. На цьому етапі підготовки вимірювального процесу вибирають частоту проходження і модуляції зондувального сигналу. Значення цих параметрів контрольної-вимірювальної апаратури встановлюється залежно від коефіцієнта загасання пружних хвиль у досліджуваному матеріалі та ступені шорсткості поверхні введення. Частота модуляції зондувального сигналу повинна бути якомога більш високою, тому що від цієї характеристики залежить дозволяюча здатність застосовуваного мето-

ду контролю.

Виходячи з практики можна установити, що ультразвуковий контроль якості металевих виробів у яких невелике загасання пружних хвиль, рекомендується виконувати на високих частотах $f = 2 \dots 10$ МГц. Дослідження об'єктів, які виготовлені з матеріалів з великим коефіцієнтом загасання, слід виконувати на більш низьких частотах $f = 0,5 \dots 2$ МГц.

Приймально-передавальний тракт апаратури настроюють на деякий поріг чутливості, при якому надійно фіксуються дефекти структури матеріалу з необхідними (мінімальними) розмірами. Цей рівень називається рівнем фіксації дефекту.

При ультразвуковому неруйнівному контролі якості луна-методом рівень фіксації дефекту настроюють з використанням штучного відбивача пружних хвиль. Цей відбивач виконується в контрольному зразку матеріалу, якість поверхні й акустичні властивості якого близькі контрольованим виробам.

Процес настроювання чутливості підсилювального тракту контрольно-вимірювальної апаратури при ручному способі контролю зводиться до досягнення максимальної амплітуди луна-сигналу від заданого відбивача. Цей ефект одержують при переміщенні п'єзоелектричного перетворювача по поверхні контрольного зразка. Далі, якщо необхідно, коректують чутливість апаратури атенуатором вхідного підсилювача для досягнення необхідного рівня фіксації дефекту з урахуванням відсікання рівня шумів.

Настроювання чутливості контрольно-вимірювального пристрою звичайно виконують, виходячи з припущення, що штучний дефект розташований на максимальній відстані від приймально-передавального перетворювача, оскільки в цьому випадку він дає мінімальну амплітуду відбитого інформаційного сигналу. Після настроювання апаратури, у процесі пошуку дефектів установлюють так звану пошукову чутливість. Її величина, як правило, вдвічі вища, ніж рівень фіксації дефекту. Така операція дає можливість підвищити надійність виявлення дефекту структури матеріалу і збільшити крок сканування. При виявленні інформаційного сигналу, відбитого від дефекту, чутливість підсилювального тракту повертають до рівня фіксації. При цьому, за величиною виявленого дефекту визначається необхідність відбраковування виробу.

При ультразвуковому неруйнівному контролі якості тінновим чи дзеркально-тінновим методом із застосуванням імерсійного способу акустичного контакту "матеріал – п'єзоелектричний перетворювач", для настроювання апаратури як штучні дефекти застосовують екрани з

непрозорого для ультразвуку матеріалу, наприклад пінопласту, що закріплюють на поверхні виробу. Установлення рівня фіксації дефекту і пошукового рівня виконуються за методикою, аналогічно описаної вище.

При реалізації автоматичного контролю необхідною умовою забезпечення надійності є обов'язкова багаторазова перевірка ймовірності виявлення заданого штучного дефекту при випадкових змінах умов сканування. Так, наприклад, при автоматичній дефектоскопії труб передбачене п'ятикратне дослідження контрольного зразка зі штучним дефектом з поворотом його на кут $\theta = 60 \dots 80^\circ$ при стовідсотковій надійності виявлення цього дефекту.

Пошук дефектів ведуть шляхом переміщення (сканування) приймально-передавального перетворювача щодо об'єкта контролю. При цьому приймально-передавальний перетворювач переміщують так, щоб забезпечити виявлення дефектів у всьому обсязі контрольованого матеріалу. Звичайно здійснюють зворотно-поступальне прямолінійне переміщення перетворювача.

Швидкість сканування при ручному переміщенні перетворювачів обмежується фізіологічними можливостями контролера і звичайно складає $V_{\text{скан}} = 0,05 \dots 0,2$ м/с. При автоматичному контролі якості швидкість сканування обмежується частотою проходження зондувальних імпульсів та інерційністю реєстратора дефектів, обумовленою числом імпульсів, від якого спрацьовує реєстратор.

Крок сканування повинний забезпечити поширення пружних хвиль у всьому обсязі контрольованого виробу. У зв'язку з цим цей параметр визначають по мінімальній ширині діаграми спрямованості приймально-передавального перетворювача, який роблять не менш половини розміру п'єзоелектричного елемента.

Визначення місця розташування дефекту для компактних (точкових) дефектів, розміри яких значно менші, ніж ширина діаграми спрямованості перетворювача, зводиться до пошуку положення перетворювача, що відповідає максимуму луна-сигналу і визначенню координат дефекту. Дефекти, розміри яких перевершують ширину діаграми спрямованості перетворювача, відносяться до класу протяжних. Для них виконують вимір координат крайніх точок. Опис процедури виміру геометричних розмірів таких дефектів наведено далі.

У принципі вимір розмірів дефектів у матеріалі досліджуваного виробу виконується досить приблизно. Це зв'язано з тим, що розмірність дефекту, як правило, порівнянна з довжиною хвилі ультразвукових коливань і шириною діаграми спрямованості акустичного полю перетворювача. Так, при вимірі дефектів, розміри яких удвічі більші,

ніж довжина хвилі, можливе визначення їхніх розмірів з погрішністю $\delta_{\text{вим}} = 10 \dots 20 \%$. Слід зазначити, що на практиці помилки в оцінці розміру невеликих дефектів вважаються цілком задовільним результатом, якщо вони розташовуються в області $\delta_{\text{вим}} = 150 \dots 200 \%$.

Існує три основних способи оцінки розмірів дефектів.

Перший спосіб полягає у визначенні розмірів дефекту по вимірній максимальній амплітуді інформаційного сигналу, відбитого від дефекту.

Другий – у визначенні положення крайніх точок дефекту по зміні амплітуди луна-сигналу при переміщенні п'єзоелектричного перетворювача.

Третій – полягає у визначенні і вимірі координат крайніх точок дефекту, які фіксуються по максимуму луна-сигналу.

Кожний з цих способів практично ґрунтується на моделюванні параметрів інформаційного сигналу при відбитті його від спеціального штучного дефекту, геометричні розміри якого заздалегідь відомі. Для виготовлення моделі необхідно попереднє вивчення технологічного процесу виробництва об'єкта контролю для виявлення типових дефектів, які потрібно виявити в процесі натурних досліджень. Модель виготовляється з матеріалу, аналогічного матеріалу об'єкта контролю.

При реалізації першого способу виміру розв'язується задача визначення розмірів штучного дефекту у формі плоскодонного отвору. У моделі цей дефект розташовують на тій самій глибині, що й природний. Розміри дефекту, форму і його місце розташування проєктують так, щоб при дослідженнях цей дефект забезпечував луна-сигнал такої ж амплітуди, як і дефект природного походження. Зразок зі штучним дефектом виготовляється з аналогічного матеріалу, що й об'єкт контролю. При неможливості виготовлення такої моделі вибирають матеріал, що характеризується подібним акустичним опором і коефіцієнтом загасання пружних хвиль. Поверхні об'єкта контролю і зразка повинні мати однакову шорсткість.

Знайдена в результаті таких досліджень площа плоскодонного отвору називається еквівалентною площею дефекту ($S_{\text{ед}}$). Надалі ця величина порівнюється з реальною площею дефекту ($S_{\text{д}}$) для встановлення параметра, що називається коефіцієнтом виявлення дефекту:

$$K_{\text{вд}} = S_{\text{ед}} / S_{\text{д}} . \quad (4.1)$$

На практиці встановлені наближені значення цієї величини для деяких типів виробів. Так, наприклад, у прокаті реальні дефекти, як правило, мають плоску форму й орієнтовані перпендикулярно напрямку

ультразвукових коливань. Таке розташування дефекту аналогічне розташуванню дефекту в моделі. Усереднене значення коефіцієнта виявлення дефекту в цьому випадку знаходиться в межах $K_{\text{вд}} = 0,15 \dots 0,4$. Така величина $K_{\text{вд}}$ свідчить про досить високу надійність виміру розміру дефекту.

У зварених швах, у яких форма й орієнтація дефектів відрізняються значною розмаїтістю, значення коефіцієнта виявлення дефекту складає $K_{\text{вд}} = 0,01 \dots 0,1$. Більш точне значення коефіцієнта виявлення може бути встановлене для конкретного типу розглянутих об'єктів контролю, з урахуванням специфіки виробу, звареного шва і т. п. Однак навіть і в цьому випадку середньоквадратичне відхилення помилки контролю складає $\delta_{\text{вим}} = 50 \dots 100 \%$.

Другий спосіб виміру розмірів дефектів полягає в тім, щоб при переміщенні перетворювача по зміні амплітуди інформаційного сигналу знайти конкретні точки розташування п'єзоелектричного перетворювача, пов'язані з крайніми точками дефекту, і вимірити їхні координати. Унаслідок за цими координатами розраховується розмір дефекту. Знайдені в результаті таких вимірювальних операцій розміри дефекту називаються умовними. Причому розрізняють умовну довжину (довжину і ширину) і умовну висоту дефекту. Остання характеристика визначається в напрямку, перпендикулярному поверхні введення пружних хвиль.

Практична реалізація цього способу до виміру довжини дефекту характеризується такими особливостями.

При проведенні контролю, як правило, амплітуда луна-сигналу при переміщенні перетворювача поблизу краю дефекту змінюється по-різному і залежить від форми та розмірів дефекту. Причому в деяких випадках не спостерігається постійної закономірності зміни амплітуди луна-сигналу. У зв'язку з цим виявляється скрутним визначення конкретних положень перетворювача, що відповідають границі дефекту.

Практика застосування ультразвукового імпульсного методу дає змогу розробити в розглянутому випадку наступні основні критерії, що уможливають визначення тих точок розташування перетворювача, які відповідають границі дефекту [4, 8, 9]. В основі цих критеріїв покладені методи порівняння характеристик інформаційного сигналу при розташуванні перетворювача в двох характерних точках:

- 1 – практично над дефектом структури матеріалу;
- 2 – на ділянці матеріалу об'єкта контролю без дефекту.

У першому випадку, при розташуванні п'єзоелектричного перетворювача в області розташування дефекту, наявність дефекту прогно-

зується по зміні амплітуди інформаційного сигналу в таких відношеннях:

а) зменшення абсолютного значення амплітуди луна-сигналу до рівня фіксації контрольно-виміральною апаратурою;

б) зменшення амплітуди луна-сигналу в два рази від максимального значення, що реєструється на даному об'єкті контролю.

Застосування другого способу виявляється неефективним при контролі виробів, у яких характерними є дефекти округлої форми. Це зумовлено тим, що в даному випадку практично піддається зміні тільки діаграма спрямованості перетворювача.

Порівняння цих двох способів оцінки розмірів дефекту стосовно варіанта їхньої плоскої конфігурації, і розташованим перпендикулярно напрямку акустичної осі, дає можливість зробити висновок, що перший з них доцільно застосовувати до точкових дефектів, а другий – до протяжних. Оцінюючи вірогідність і надійність фіксування границь дефекту слід зазначити, що кращими характеристиками в цьому випадку володіє спосіб “б”.

Однак при наявності реальних дефектів, що відрізняються значною довжиною, може спостерігатися його різна відбивна здатність пружних хвиль у різних точках своєї поверхні. Це може бути спричинено, наприклад, значним скривленням поверхні дефекту, частковим з'єднанням протилежних поверхонь дефекту в деяких місцях і т. п. У результаті цього при переміщенні п'єзоелектричного перетворювача амплітуда луна-сигналу може зазнавати значних змін і, як наслідок, великий протяжний дефект може бути зафіксований як кілька дефектів незначних розмірів.

Враховуючи викладене, можна зробити висновок про необхідність застосування диференційованого підходу до оцінки розмірів дефекту в кожному випадку. При цьому слід вказати на необхідність попереднього аналізу особливостей контрольованих матеріалів, форми і розмірів типових дефектів для забезпечення потрібного ступеня надійності та вірогідності процесу контролю.

Важливою характеристикою дефектів структури досліджуваного матеріалу в даному випадку є так званий параметр Релея. Цей параметр побічно відбиває ступінь розсіювання пружних хвиль при відбитті їх від поверхні дефекту. Практично розсіювання пружних хвиль при поширенні їх на нерівній поверхні представляється можливим описати таким виразом [4, 8]:

$$P_R = 2k\sigma_h \cdot \cos \theta, \quad (4.2)$$

де k – хвильове число; σ_h – середньоквадратичне відхилення від середнього значення висоти шорсткості поверхні; θ – кут падіння фронту пружної хвилі на дефект.

Як приклад рис.4.3 ілюструє характерні виміри амплітуди інформаційного сигналу при вимірі умовної висоти дефекту структури металу. Причому, в цьому випадку вибрані ситуації, при яких дефекти характеризуються великим (рис.4.3, *a*) і малим параметрами Релея (рис.4.3, *б*).

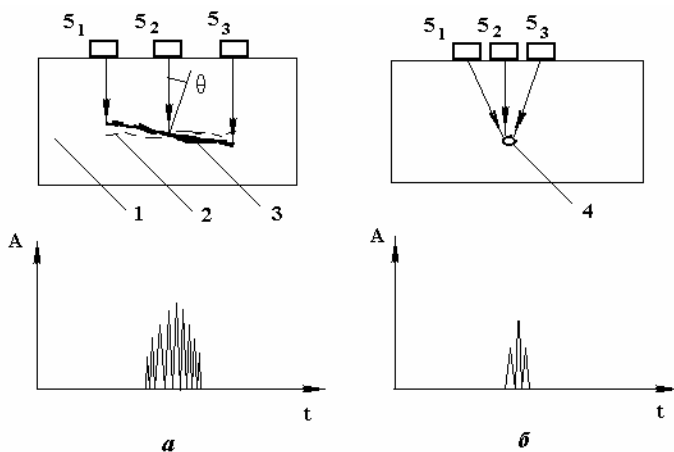


Рис.4.3 – Характерні положення п'єзоелектричного перетворювача і часові діаграми інформаційного сигналу при оцінці розмірів дефекта з великим (*a*) і малим (*б*) параметрами Релея:

1 – об'єкт контролю; 2 – горизонтальний дефект; 3 – похилий дефект з великим параметром Релея; 4 – дефект з малим параметром Релея; 5₁– п'єзоелектричний перетворювач в декількох типових точках контролю

Якщо в контрольованому виробі існує дефект із великим параметром Релея, тобто з невеликим кутом нахилу (θ) і його внутрішня поверхня характеризується значною шорсткістю (рис.4.3, *a*), то ознакою його зміни по висоті служить переміщення луна-сигналу по екрану осцилографічного індикатора більше, ніж для компактного округлого дефекту (рис.4.3, *б*). При обстеженні дефекту округлої форми також спостерігатиметься переміщення луна-сигналу, хоча й у значно меншому діапазоні. У цьому випадку таке переміщення пов'язане зі зміною відстані до дефекту, що знаходиться в межах діаграми спрямованості перетворювача.

Важливим моментом, який необхідно враховувати, є те, що при цьому вимірюванню підлягає саме параметр переміщення інформаційного імпульсу по лінії розгорнення осцилографічного індикатора, а не переміщення перетворювача по поверхні виробу.

У тому випадку, коли дефект, що характеризується великим параметром Релея, розміщується паралельно поверхні об'єкта контролю, на якій розташовується п'єзоелектричний перетворювач, або має незначний розвиток по висоті, (рис.4.3, *a*, поз.2), то переміщення перетворювача буде таким самим, як і при контролі округлого дефекту (рис.4.3, *б*), і на екрані осцилографічного індикатора спостерігатиметься переміщення інформаційного імпульсу не більше, ніж у випадку варіанта "б".

За цією ознакою розрізняють дефекти, що змінюються по висоті від тих, які не змінюються чи змінюються незначно (так звані дефекти, нерозвинені по висоті).

При виконанні контролю похилим п'єзоелектричним перетворювачем практиці найчастіше мають місце випадки дослідження дефекту з малим параметром Релея (рис.4.4, *a*). При цьому спостерігаються інтенсивні амплітуди луна-сигналів, що формуються в результаті дифракції хвиль на краях дефекту, а від шорсткості поверхні дефекту спостерігаються відображення з малими амплітудами.

Виходячи з цього, у даному випадку сигнали від крайових точок дефекту не можна порівнювати із сигналами від середньої частини дефекту, як у другому способі контролю. Вимір параметрів дефекту виконують, визначаючи координати точки, що дає максимум луна-сигналу, тобто третім способом.

Необхідно зазначити, що при проведенні контролю з використанням похилих п'єзоелектричних перетворювачів умовна висота так званого компактного дефекту (рис.4.4. *в*) може виявлятися більше, ніж у випадку використання прямого перетворювача.

Дослідження реальних тріщин у зварених з'єднаннях металу показують, що вони відносяться як до дефектів з великим параметром Релея (протяжні тріщини з нерівною внутрішньою поверхнею), так і до класу дефектів з малим параметром Релея. Значення цієї характеристики дефекту залежить від фізики процесу утворення тріщин.

Одним із варіантів способу виміру параметрів дефектів по максимуму луна-сигналу є дифракційно-часовий спосіб. Він передбачає використання двох роздільних п'єзоелектричних перетворювачів (рис.4.5).

Цей метод неруйнівного контролю ефективний у тому випадку, коли другий перетворювач розташовується поблизу точки максимуму

дифракційної хвилі. При реалізації контролю застосовують однотипні (рис.4.5, *a*), або трансформовані хвилі (рис.4.5). Так, наприклад, одним з варіантів контролю з використанням трансформованих хвиль є випромінювання поперечної хвилі, з виділенням на боці прийомного перетворювача подовжньої хвилі (рис.4.5, *б*).

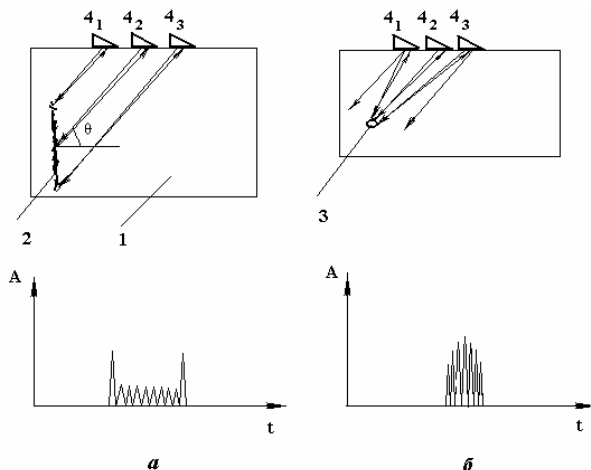


Рис.4.4 – Характерні положення п'єзоелектричного перетворювача і часові діаграми інформаційного сигналу при оцінці розмірів дефекту з великим (*a*) і малим (*б*) параметрами Релея:

1 – об'єкт контролю; 2 – дефект з великим параметром Релея; 3 – дефект з малим параметром Релея; 4_і – п'єзоелектричний перетворювач в декількох типових точках контролю

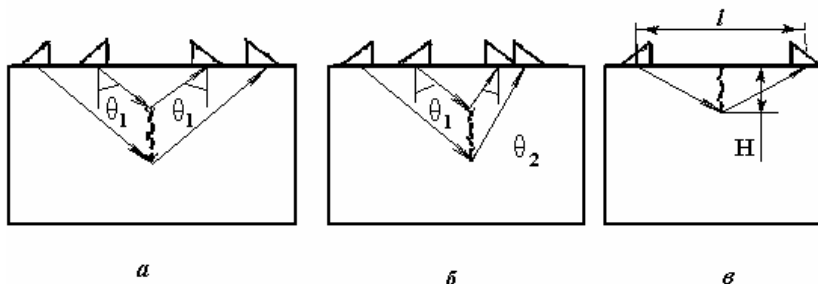


Рис. 4.5 – Методи розташування п'єзоелектричних перетворювачів при дифракційно-часовому методі виміру розмірів дефектів

У тому разі, якщо контроль здійснюється з використанням однотипних хвиль, поширення яких характеризується деякою величиною швидкості (c), то розмір дефекту визначається за формулою

$$H = c \cdot \Delta t (\sec\theta_1 - \sec\theta_2), \quad (4.3)$$

де $\Delta t = t_1 - t_2$ – різниця часу приходу сигналів від нижнього (t_1) і верхнього (t_2) краю дефекту.

Для визначення глибини тріщин, що поширюються від поверхні об'єкта контролю, застосовують метод контролю за часом поширення ультразвукових коливань (рис. 4.5, *в*). Для цього використовують перетворювачі подовжніх хвиль з широкою діаграмою спрямованості. У процесі контролю вимірюють такі величини:

1 – час поширення ультразвуку в матеріалі об'єкта контролю без тріщини або фіксують час пробігу головної хвилі (t_r), який приймають за опорний сигнал;

2 – час приходу дифракційного сигналу від краю тріщини в глибині об'єкта контролю. Цей параметр фактично дорівнюватиме:

$$t_d = t_r + \Delta t, \quad (4.4)$$

де $\Delta t = f(H)$.

Глибину тріщини визначають за виразом

$$H = \sqrt{\left(\frac{c \cdot t_d}{2}\right)^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2} = \frac{c}{2} \sqrt{t_d^2 - t_r^2} = \frac{l}{2} \sqrt{\left(\frac{\Delta t}{t_r} + 1\right)^2} - 1. \quad (4.5)$$

При дослідженні структури матеріалів тінювим і дзеркально-тінювим методами розміри дефектів визначають за допомогою спеціальних діаграм, які за основний інформаційний параметр використовують ступінь ослаблення ультразвукового сигналу нижче заданого рівня.

При вирішенні питання допустимості дефекту в об'єкті контролю важливе значення має оцінка його форми. З позицій експлуатаційної надійності особливо небезпечними є площинні дефекти великої площі, але з малим розкриттям (тріщини, тонкі непровари). Об'ємні дефекти – пори, включення шлаків, найчастіше вважаються припустимими, якщо їхні розміри не перевершують визначеної величини. Дефекти у вигляді низки окремих пор, волосяні мікропори, непровари з великим розкриттям чи заповнені шлаком, з погляду впливу на експлуатаційні властивості, займають проміжне положення.

Слід зауважити, що визначення характеру дефекту є однією з найбільш важких задач для ультразвукового контролю. Дотепер багато методик, інструкцій і норм оцінки якості об'єктів контролю виходять з апіорного припущення про неможливість визначення характеру дефекту за допомогою ультразвуку. Однак досягнення останніх років в області розробок методик і ультразвукових контрольно-вимірвальних засобів підтверджують на реальність розв'язання цієї складної задачі. Так, наприклад, амплітудно-частотні характеристики пружної хвилі, відбитої від дефекту структури матеріалу, можна зобразити у вигляді інтеграла Фур'є по хвильовому вектору (k). Це дає можливість зробити висновок про те, що знаючи спектральний склад хвиль, відбитих в усіх напрямках від дефекту, можна побудувати точне зображення дефекту. Практика досліджень показує, що для досить повного одержання зображення форми дефекту необхідно досліджувати і трансформувати таку інформацію в спектрі частот відбитого сигналу наступного діапазону: $f_{\max}/f_{\min} = 3 \dots 5$. При цьому зміна кутів відбиття пружної хвилі від дефекту матеріалу повинна знаходитися в межах $\theta = 90 \dots 120^\circ$.

Практична реалізація теоретичних положень цього напрямку визначення форми дефекту має два основних напрямки (розд. 7.3, 7.4):

1. Вивчення залежності амплітуди інформаційного сигналу від напрямку розсіювання пружної хвилі;
2. Вивчення спектральних характеристик інформаційного сигналу.

Перший напрямок досліджується більш широко, тому що його реалізація не потребує створення спеціальної широкополосної апаратури, виготовлення спеціалізованих приймально-передавальних ультразвукових перетворювачів. Однак, теоретичні передумови другого напрямку дають змогу зробити висновок про його більш високу інформативність.

Для забезпечення можливості розрізнення площинних і об'ємних дефектів структури матеріалу розроблений ряд методів, що відрізняються способом обробки інформації. Найбільш розповсюдженими з цих методів є такі:

- A. метод дослідження амплітуд інформаційного сигналу при повороті похилого перетворювача;
- B. метод відношення максимальних амплітуд при прямому і дзеркальному відображеннях інформаційного сигналу;
- C. метод реєстрації пружних хвиль, трансформованих на дефекті;
- D. метод порівняння амплітуд трансформованої і нетрансформованої пружних хвиль;

Е. спектральний метод.

Розглянемо докладніше основні положення кожного методу.

При використанні першого методу вимірюють обгинаючу послідовності амплітуд луна-сигналів при повороті похилого перетворювача. Максимальна амплітуда сигналу вимірюється при напрямку променя ультразвукового сигналу нормально до поверхні дефекту. У тому випадку, якщо при повороті перетворювача на кут $\theta = 10 \dots 15^\circ$ спостерігається зменшення сигналу в 2...4 рази, то це свідчить про площинний характер дефекту. Якщо ж амплітуда інформаційного сигналу знижується слабкіше, то дефект має об'ємний характер.

При другому методі розрізнення характеру дефекту використовується луна-дзеркальний спосіб контролю. При контролі якості виробу вимірюється відношення максимальних амплітуд сигналів при прямому і дзеркальному відбиттях. У випадку об'ємної форми дефекту формується відношення амплітуд більше одиниці. У випадку площинних дефектів відношення цих амплітуд менше одиниці.

У третьому способі при дослідженні об'єкта контролю використовують дельта-метод (рис.4.6).

Він полягає в реєстрації хвиль, які трансформуються на дефекті. У цьому випадку застосовують два п'єзоелектричних перетворювачі. Один з цих перетворювачів – похилий (рис.4.6, поз.3), випромінює поперечну хвилю, а другий (рис.4.6, поз.1) приймає подовжню, котра виникає при трансформуванні на дефекті, а також подовжні хвилі, відбиті від протилежної площини виробу.

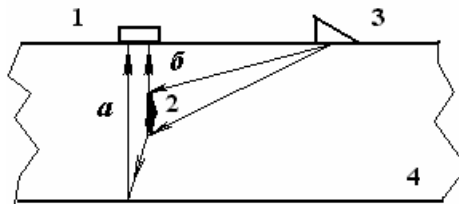


Рис. 4.6 – Типове розташування п'єзоелектричних перетворювачів при дослідженні об'єкта контролю дельта-методом:

1 – п'єзоелектричний перетворювач, приймаючий подовжню пружну хвилю; 2 – дефект виробу; 3 – п'єзоелектричний перетворювач, випромінюючий поперечну пружну хвилю; 4 – об'єкт контролю; а – пружна хвиля, яка трансформувалась на нижньому краю дефекту і відбилась від протилежної поверхні об'єкта контролю; б – пружна хвиля, яка трансформувалась на верхньому краю дефекту

Можлива зміна функцій перетворювачів 1 і 3 на протилежні. При цьому для контролю використовується поперечна хвиля, відбита від протилежної площини виробу.

Отже, на прийомний перетворювач 2 приходять два інформаційних сигнали: a – пружна хвиля, трансформована на його нижньому краї і та, що відбилася від протилежної поверхні виробу і b – пружна хвиля, трансформована в подовжню на верхньому краю дефекту. У випадку об'ємного дефекту амплітуда першого інформаційного сигналу 2 буде більша, тому що цей сигнал виникає в результаті відбиття, а не дифракції пружної хвилі. Амплітуда другого інформаційного сигналу 1 буде менша, оскільки він пов'язаний з дифракційним процесом пружної хвилі при огинанні дефекту.

У випадку площинного дефекту обидва сигнали виникають у результаті дифракції пружної хвилі на його краях. Причому, амплітуда другого сигналу буде більша, ніж першого, оскільки при його поширенні від дефекту напрямком на прийомний перетворювач ближче до максимуму дифракції.

При четвертому методі також використовується ультразвуковий луна-метод. Для введення поперечної пружної хвилі (u_t) використовується похилий п'єзоелектричний перетворювач. Випромінена таким похилим перетворювачем поперечна хвиля (u_i) частково трансформується в подовжню (u_l) на дефекті матеріалу. Порівнянню підлягають амплітуди луна-сигналів трансформованої і нетрансформованої хвиль. Для об'ємних дефектів відношення амплітуд, отриманих у результаті трансформування подовжньої та поперечної хвиль (u_l/u_t) невелике, а для площинних дефектів (за винятком випадку нормального падіння пружної хвилі на дефект) воно на 13...16 дБ більше. Для прийому трансформованих подовжніх хвиль у похилий перетворювач уводять додатковий п'єзоелемент.

При п'ятому методі установлення форми дефекту використовується спектральний метод. Реалізація такої методики вимагає застосування спеціальної апаратури, що включає аналізатор спектра, який забезпечує дослідження амплітудно-частотної характеристики луна-сигналів при зміні частоти ультразвукових коливань у 3...5 разів. Генератор зондувальних імпульсів спектроскопа дозволяє змінювати частоту заповнення в діапазоні близько $\Delta f \approx 10\%$ від одного циклу збудження до іншого. Для випромінювання і прийому інформаційних сигналів застосовують широкосмуговий перетворювач з перемінною товщиною п'єзоелемента.

Луна-сигнали від дефектів стробують за часом приходу і подають на аналізатор спектра. Лінія розгорнення осцилографічного індикатора

такого приладу відповідає зміні частоти модуляції зондувальних імпульсів, тому на його екрані обгинаюча імпульсів різної частоти формує спектр луна-сигналів (рис.4.7).

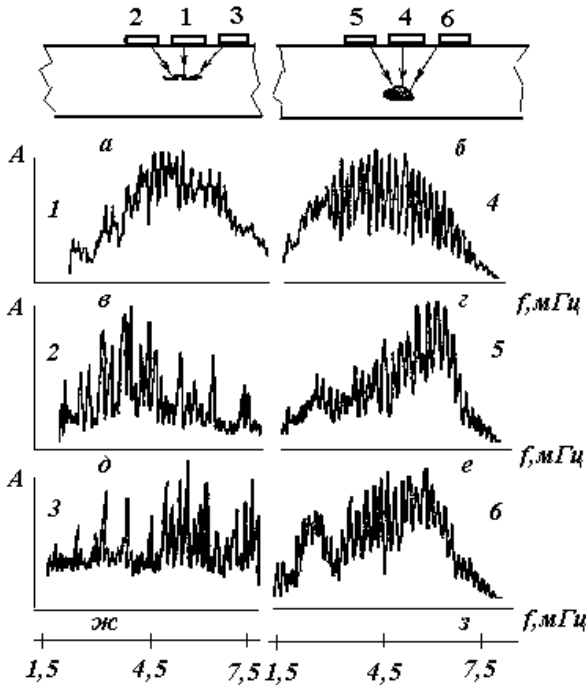


Рис. 4.7 – Амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) інформаційних сигналів для різних форм дефектів:

a, б – типові положення сполучених п'єзоелектричних перетворювачів відносно плоского дефекту (*a*) і відносно об'ємного дефекту (*б*); *в, д, ж* – АЧХ інформаційного сигналу, відбитого від плоского дефекту при положеннях перетворювача 1, 2, 3; *з, е, з* – АЧХ інформаційного сигналу, відбитого від об'ємного дефекту при положеннях перетворювача 4, 5, 6

Форма таких сигналів може бути монотонна і немонотонна (осцилююча).

Другий варіант форми сигналів спостерігається в тому випадку, якщо вони є результатом інтерференції двох луна-сигналів, близьких по амплітуді. Наприклад, така інтерференція спостерігається при похилому падінні пружної хвилі на площинний дефект матеріалу (рис.4.7, поз.2, 3). При нормальному падінні на дефект (рис.4.7, поз.1)

інтерферуючі сигнали (прямий та відбитий) збігаються по фазі і спектр АЧХ має монотонний характер.

Сигнали від об'ємних дефектів виявляються практично у всіх випадках монотонними (рис.4.7, поз.4, 5, 6). Цей ефект спостерігається тому, що сигнал пружної дифрагуючої хвилі і хвилі зісковзування має значно меншу амплітуду, ніж сигнал, безпосередньо відбитий від дефекту, з яким і відбувається інтерференція. У результаті таких явищ з'являється можливість визначати форму дефекту по спектру (АЧХ) луна-сигналу.

Розглянутий метод визначення форми дефекту має суттєвий недолік, який виявляється в появі помилки при дефектах, котрі мають як плоскі, так і округлі ділянки. У таких випадках для підвищення надійності контролю, тобто найбільш точного розпізнавання характеру дефекту, слід одержувати амплітудно-частотні спектри сигналів від дефекту, забезпечуючи одержання луна-сигналів під різними кутами падіння з різних боків об'єкта контролю. Обробка такої великої інформації про дефект можлива з використанням ПЕОМ.

Практика показує, що оцінка форми, виконана на реальних дефектах і їхніх моделях, при зміні ракурсу введення пружних хвиль на $\pm 15^\circ$ і триразової зміни частоти модуляції зондувального сигналу, дає змогу одержати ймовірність визначення характеру дефектів (з погляду віднесення їх до класу округлих, плоских чи проміжних) близько 85...90 % [7,8].

При цьому обробку інформації ведуть на ПЕОМ шляхом порівняння з амплітудно-частотними спектрами сигналів, отриманими від моделей дефектів. Отже, для реалізації цього напрямку ультразвукового контролю, на додаток до відповідної контрольно-виміральної апаратури, необхідне і спеціалізоване програмне забезпечення.

Його алгоритм повинен включати базу даних, яка містить інформацію, одержану при дослідженні моделей, блок вводу вимірвальних даних та блок порівняння відповідних величин.

4.2. Ультразвукова дефектоскопія об'єктів контролю з неметалевих і багатошарових матеріалів

4.2.1. Фізико-механічні характеристики матеріалів об'єкта контролю

Вибір застосовуваних методів і засобів ультразвукового контролю якості значною мірою залежить від фізико-механічних характеристик контрольованих матеріалів і, насамперед, від ступеня анізотропності їхньої структури [82, 83]. Виходячи з цієї характеристики розрізняють такі види матеріалів: ізотропні, трансверсально-ізотропні й ортотропні.

Розглянемо характерні риси цих матеріалів, виходячи з позицій організації надійного ультразвукового контролю якості.

Ізотропні матеріали. Фізико-механічні властивості таких матеріалів практично не залежать від напрямку формування структури в технологічному процесі їхнього виробництва. Ізотропні матеріали розділяються на гомогенні (однорідні) та гетерогенні (різнорідні).

До гомогенних матеріалів відносяться аморфні (скло, гума, пластмаса) і дрібнодисперсні (кераміка, металокераміка). Представниками класу гетерогенних матеріалів є матеріали з грубозернистою структурою – бетон, асфальт, гірські породи.

За акустичними властивостями деякі гомогенні матеріали, наприклад скло і деякі види кераміки (порцеляна, п'єзокераміка), наближаються до металів. У більшості інших ізотропних неметалічних матеріалів швидкість поширення пружних хвиль значно нижче, а коефіцієнт загасання більше, ніж у металах. Особливо високий коефіцієнт загасання пружних хвиль характерний для гетерогенних матеріалів.

Серед дефектів, що найчастіше зустрічаються в ізотропних матеріалах, є тріщини, пори, раковини, тобто дефекти, які властиві металевим об'єктам.

Трансверсально-ізотропні матеріали. Для цього класу матеріалів характерним є суттєве розходження фізико-механічних властивостей у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Такі матеріали також розділяються на два основні класи – однорідні і неоднорідні.

Характерними представниками неоднорідних трансверсально-ізотропних матеріалів є листові матеріали, в яких швидкість поширення пружних хвиль уздовж листа значно більше, ніж по його товщині. До них, зокрема, відносяться деревинно-волокнисті плити, фанера, папір, картон, гетинакс.

В однорідних трансверсально-ізотропних матеріалах не спостерігається істотна зміна швидкості поширення пружних коливань при зміні напрямку введення пружних хвиль.

У трансверсально-ізотропних і ортотропних середовищах найчастіше спостерігаються дефекти у вигляді розшарування.

Ортотропні матеріали. Цей вид матеріалів характеризується різними фізико-механічними властивостями у трьох взаємно перпендикулярних напрямках.

Характерними, що найчастіше підлягають контролю якості, є ортотропні композиційні матеріали (композити). За структурою вони складаються з матриці (сполучної, звичайно на основі синтетичних смол) і армуючої речовини. Як армуючу використовують тканини, скляні, вуглецеві волокна.

На практиці, у промисловості широке поширення одержали такі ортотропні матеріали як текстоліт, склопластик, вуглепластик.

У композиційних матеріалах характерними дефектами є неправильне розташування арматури, а також ділянки матеріалу підвищеного чи зниженого змісту сполучної речовини.

Багатошарові конструкції. Такі конструкції складаються із шарів двох або декількох різнорідних матеріалів, ступінь анізотропії фізико-механічних властивостей яких може бути різною.

Прикладами двошарових конструкцій є просочене сполучною речовиною скловолокно, намотане на металеве оправлення.

Характерним прикладом тришарової конструкції є панель, що складається з двох обшивань високої щільності, між якими розташований заповнювач з малою питомою вагою, наприклад пінопласт, стільникова структура (структура у формі бджолиних стільників з металевої фольги, склопласту, паперу).

У багатошарових матеріалах найчастішим дефектом, що зустрічається, є відсутність чи ослаблення з'єднання між елементами конструкції. Неруйнівні ультразвукові методи контролю якості неметалевих і багатошарових матеріалів розділяють на високочастотні, з частотою модуляції зондувального сигналу вище $f_m > 0,5$ МГц, і низькочастотні: $f_m \leq 0,5$ МГц.

При високочастотних методах контролю застосовують, в основному, луна-тінювий і дзеркально-тінювий методи.

У низькочастотних методах використовують пружні коливання, довжина хвилі яких значно перевищує розмір неоднорідності неметалічних і композиційних матеріалів. Це принципово змінює методика і засоби контролю. У зв'язку з цим реалізація як високочастотних, так і

низькочастотних методів стосовно неметалевих матеріалів найчастіше викликає необхідність їхньої модифікації.

4.2.2. Контроль якості неметалічних і багат шарових будівельних матеріалів методами відбиття і наскрізного проходження пружних хвиль

Луна-метод у його традиційному вигляді, з використанням частоти модуляції зондувального сигналу $f_m > 0,5$ МГц застосовують для контролю гомогенних ізотропних матеріалів типу скла, щільної кераміки, деяких пластмас.

Для забезпечення надійного контролю якості матеріалів з підвищеним коефіцієнтом загасання ультразвукових коливань необхідне зниження частоти модуляції до величин $f_m \leq 0,1$ МГц. При цьому відбувається збільшення довжини хвилі й, у зв'язку з цим, для підвищення ймовірності контролю необхідне рішення задачі звуження діаграми спрямованості перетворювачів і скорочення тривалості зондувальних імпульсів.

У високочастотному методі останню задачу розв'язують, використовуючи взаємодію різних мод коливань у перетворювачі, що виготовляється у формі прямокутної п'єзопластини. У низькочастотному перетворювачі цей ефект досягається при використанні взаємодії коливань прямокутної п'єзопластини по її довжині та ширині. З цією метою власні частоти коливань по цих напрямках роблять кратними один одному [8].

Звуження діаграми спрямованості випромінюючого п'єзоелектричного перетворювача досягається застосуванням мозаїчних перетворювачів. Конструктивно такі перетворювачі являють собою декілька невеликих п'єзоелементів, розташованих, наприклад, у лінію, у вигляді прямокутника чи по окружності [8].

При контролі якості неметалевих і багат шарових матеріалів тіньовий метод використовується у варіанті виміру амплітуди інформаційного сигналу або часового відрізка. Перевагою цього методу при використанні низьких частот модуляції зондувального сигналу є відсутність мертвої зони і слабкий вплив на параметри інформаційного сигналу структурних неоднорідностей матеріалу.

Основними областями застосування тіньового методу є контроль розшарування багат шарових конструкцій з металів і неметалів типу склотек-столітових панелей, тришарових панелей з легким заповнювачем, автомобільних і авіаційних шин. При проведенні контролю фіксують не тільки амплітуду і час приходу інформаційного сигналу, але

й початкову фазу наскрізного сигналу. У дефектному виробі, у зв'язку з дифракцією пружної хвилі на краю дефекту, змінюється фаза цього сигналу й у результаті цього перший напівперіод коливань змінює полярність на протилежну [8].

При контролі якості неметалічних і багатошарових матеріалів поряд з безпосереднім та імерсійним способами акустичного контакту застосовують метод безконтактного введення пружних хвиль (розд.2.2). Хвильовий опір неметалів типу пластмас, гуми на порядок менше, ніж металів. У зв'язку з цим коефіцієнт прозорості ультразвукових коливань границі двох середовищ “повітря – матеріал об'єкта контролю” збільшується в 10...100 разів у порівнянні з тим, що спостерігається при контролі металів. Це дає можливість забезпечити достатній рівень як зондувального, так і інформаційного сигналів.

Контроль якості виробів тіньовим методом роблять, як правило, на спеціальних установках.

На рис.4.8 показана схема ультразвукової установки для контролю якості тороподібних пластмасових, резинових конструкційних елементів. Такий елемент 1 частково занурюють у ванну 2 з рідиною 3. П'єзоелектричний випромінювач 4 з циліндричною діаграмою спрямованості занурюють у рідину і розміщують у центрі порожнини конструкційного елемента.

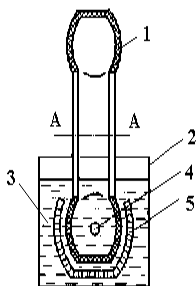


Рис. 4.8 – Схема ультразвукової установки для контролю якості тороподібних конструкційних елементів тіньовим методом:

1 – об'єкт контролю; 2 – ванна з рідиною 3; 4 – п'єзоелектричний випромінювач з циліндричною діаграмою спрямованості; 5 – п'єзоелектричні дискретні приймачі

Серію дискретних п'єзоелектричних приймачів 5 розташовують у рідині по окружності зовні конструкційного елемента. Зондувальні сигнали від випромінювача 4 вводяться імерсійним способом у матеріал. Вони проходять через нього і надходять у вигляді інформаційних сигналів на кожний з дискретних п'єзоелектричних приймачів 5. Сигнали від них через підсилювачі подають на реєстратор. При проведен-

ні контролю якості такого тороподібного конструкційного елементу його обертають навколо осі “А – А”. Для дослідження застосовується частота модулювання зондувального сигналу $f_m = 100 \dots 150$ кГц. Для забезпечення умов змочування матеріалу контрольованого конструкційного елементу як імерсійну рідину використовують воду з домішками спирту.

Швидкість поширення ультразвукових коливань у воді й пластмасі або гумі близькі за своїми значеннями, тому переломлення пружних хвиль на границі розділу середовищ “вода – матеріал об’єкта контролю” практично не відбувається.

При контролі якості конструкційних елементів зі спеціальними технологічними нерівностями зовнішньої поверхні, в деяких випадках виникає періодична зміна амплітуди наскрізного інформаційного сигналу, пов’язана з різним загасанням ультразвуку в шарах контрольованого матеріалу різної товщини. Для усунення цього явища в імерсійну рідину вводять домішки, що підвищують загасання ультразвуку, наприклад оцтову кислоту.

Ревербераційний метод або метод багаторазових відбиттів, як правило, застосовується для контролю якості склейки двошарових матеріалів типу “метал – пластмаса” при товщині шарів $H_c \geq 1,5$ мм. Контроль якості виконується на частотах $f = 2 \dots 5$ МГц. У цьому випадку використовується два наступних варіанти ревербераційного луна-методу.

У першому варіанті ультразвукові пружні коливання вводять у шар металу (рис.4.9).

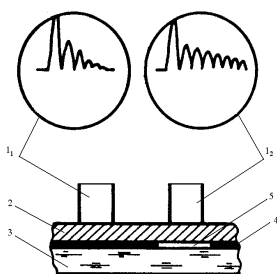


Рис. 4.9 – Контроль якості двошарових матеріалів “метал – пластмаса” ревербераційним луна-методом при введенні пружних хвиль з боку шару металу:

I_1, I_2 – положення п’єзоелектричного перетворювача та осцилограма відповідно при якісному матеріалі та при дефекті матеріалу типу “непроклей”;
 2 – метал двошарового матеріалу;
 3 – пластмаса двошарового матеріалу;
 4 – клейовий прошарок; 5 – дефект матеріалу типу “непроклей”

При контролі в металевому шарі двошарової конструкції спостерігаються багаторазово відбиті луна-сигнали, що формуються при відбитті від границі металевому шару, і від шару пластмаси. Дефект з’єд-

нання “метал – пластмаса” (непроклей) збільшує коефіцієнт відбиття ультразвукових коливань на границі розділу двох середовищ – “метал – пластмаса”, що приводить до збільшення часу реверберації імпульсу за рахунок його поширення в шарі металу. По параметрі часу ревербераційного процесу і роблять висновок про якість з’єднання металу та пластмаси в такому двошаровому матеріалі.

В другому варіанті пружні коливання ультразвукової частоти вводять у шар пластмаси (рис.4.10).

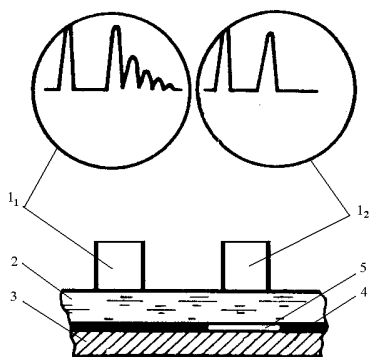


Рис. 4.10 – Контроль якості двошарових матеріалів “метал – пластмаса” ревербераційним луна-методом при введенні пружних хвиль з боку шару пластмаси:

I_1, I_2 – положення п’єзоелектричного перетворювача та осцилограма відповідно при якісному матеріалі та при дефекті матеріалу типу “непроклей”;
 2 – пластмаса двошарового матеріалу;
 3 – метал двошарового матеріалу;
 4 – клейовий прошарок; 5 – дефект матеріалу типу “непроклей”

У зоні доброякісного склеювання такого матеріалу ультразвукові коливання переходять із шару пластмаси через клейовий шар у метал. Багаторазово відбиваючись в останньому, пружна хвиля зображується на осцилографічному індикаторі у вигляді серії загасаючих імпульсів, тобто у вигляді ревербераційного процесу.

При введенні ультразвукових коливань з боку металу ймовірність виявлення дефектів типу “непроклей” зростає при збільшенні коефіцієнта відбиття пружних хвиль від границі розділу середовищ “метал – пластмаса”. Для цього повинна бути малою різниця хвильових опорів металевого (Z_m) і неметалічного (Z_n) шарів двошарового матеріалу. Так, наприклад, з високим ступенем надійності виявляються дефекти розміром $H > 5$ мм типу порушення адгезії клею з металом у з’єднаннях із пластмасою виду склопластик у другому шарі.

У цьому випадку хвильовий опір (Z_n) зменшується від величини $Z_n = (3...4) \cdot 10^6$ Па·с/м, що спостерігається при надійному з’єднанні металу з пластмасою, до $Z_n = 0$ Па·с/м, яка встановлюється з появою дефекту типу “непроклей”. У з’єднаннях металу з пінопластом зміна хвильового опору (Z_n), у випадку дефекту типу “непроклей”, дуже

мала, оскільки величина хвильового опору (Z_n) близька до нуля. Це пояснює те, що в цьому разі виявляються тільки значні зони відсутності адгезії клею до металу, а відсутність адгезії клею до пінопласту знайти не вдається.

Введення пружних хвиль при контролі ревербераційним луна-методом виконують контактним або імерсійним способом на частотах $f_{\text{узк}} = 1 \dots 25$ МГц. Частоту вибирають такою, щоб довжина хвилі зондувального сигналу складала не більш як дві товщини (H_m) металевого шару двошарового матеріалу:

$$\lambda \leq 2 \cdot H_m. \quad (4.6)$$

У зв'язку з таким положенням, зі зменшенням товщини металу необхідно підвищувати частоту ($f_{\text{узк}}$) ультразвукових коливань.

Дослідження неметалевих та багатошарових будівельних матеріалів з різними методами акустичного контакту.

При ультразвуковому контролі якості неметалічних і багатошарових матеріалів широке розповсюдження одержали низькочастотні методи. У зв'язку з різною структурою і широким спектром фізико-механічних властивостей, розмірів дефектів об'єктів контролю значний практичний інтерес становить аналіз практики використання не тільки методів ультразвукового контролю, але й способів акустичного контакту "п'єзоелектричний перетворювач – матеріал об'єкта контролю". Особливо це стосується способу сухого точкового акустичного контакту, що характеризується високою надійністю передачі та прийому пружних хвиль.

Найбільш велике поширення в плані використання сухого точкового контакту в даний час одержали імпедансний, велосиметричний і метод вільних коливань.

При реалізації сухого точкового контакту (розд. 2.2) п'єзоелектричні перетворювачі дефектоскопів, що реалізують перераховані вище методи, постачають контактними насадками з робочими поверхнями, найчастіше у формі сфер. Радіус кривизни таких насадок залежить від розміру п'єзоелектричного перетворювача, частоти випромінювання і складає $R_n = 2 \dots 25$ мм.

При проведенні контролю насадку перетворювача притискають до сухої поверхні об'єкта контролю із силою (P_0), що значно перевищує амплітуду динамічних пружних деформацій (P_n) п'єзоматеріалу, що

виникають під дією електричних ультразвукових коливань. Оскільки площа контакту “п'єзоелектричний перетворювач – досліджуваний матеріал” мала, то такі перетворювачі мають кругову діаграму спрямованості.

Через зону такого точкового контакту на досліджуваний матеріал діє динамічна зосереджена сила (P), що збуджує в ньому пружні ультразвукові коливання. Комплексне відношення цієї сили до коливальної швидкості (V_m) матеріалу в зоні контакту з перетворювачем називають механічним імпедансом (ξ). Величина цього параметра розраховується за формулою

$$\xi = P/V_m. \quad (4.7)$$

На відміну від акустичного імпедансу і хвильового опору матеріалу механічний імпеданс (ξ) є параметром матеріалу об'єкта контролю і, зокрема, залежить від наявності в ньому дефектів.

Для аналізу коливань п'єзоелектричного перетворювача, навантаженого на об'єкт контролю за допомогою сухого точкового контакту, використовують метод електромеханічних аналогій. У цьому методі механічна сила еквівалентно прирівнюється електричній напрузі, коливальна швидкість – електричному струму, а механічний імпеданс – комплексному електричному опору. При використанні таких аналогій стає можливим побудова схем заміщення механічних і електромеханічних систем, що потім аналізують відомими в електротехніці методами [59].

Для випромінюючого ультразвукового перетворювача із сухим точковим контактом, навантаженого на досліджуваний виріб, розроблена така схема заміщення (рис.4.11) [10, 12].

Випромінюючий перетворювач представлений генератором динамічної сили (V), еквівалентним генератору ЕДС, що характеризується деяким внутрішнім комплексним електричним опором (Z_n). Перетворювач навантажений на електричний опір (Z_n). Цей опір (Z_n) еквівалентний відповідному механічному імпедансу матеріалу об'єкта контролю. Внутрішній комплексний електричний опір перетворювача (Z_n) шунтовано електричним опором (Z_k), що еквівалентно пружному опору контактної зони “матеріал об'єкта контролю – точковий контакт перетворювача”.

Схема заміщення прийомного п'єзоелектричного перетворювача зображена на (рис.4.12).

У цьому випадку матеріал об'єкта контролю представлений генератором коливальної швидкості (I), за аналогією з генератором струму.

Генератор струму (I) шунтований комплексним електричним опором (Z_{Π}), що еквівалентно механічному імпедансу матеріалу об'єкта контролю.

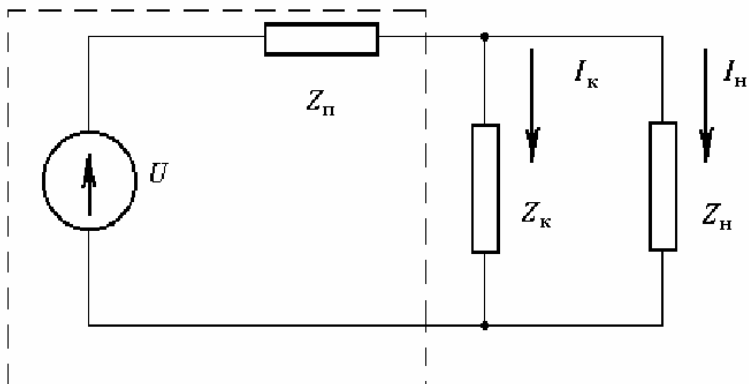


Рис. 4.11 – Електрична схема заміщення випромінюючого п'єзоелектричного перетворювача

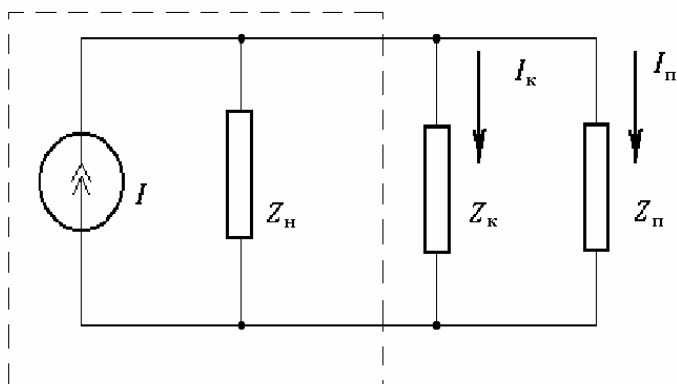


Рис. 4.12 – Електрична схема заміщення прийомного п'єзоелектричного перетворювача

Паралельно комплексному електричному опором (Z_{H}) включений комплексний електричний опір (Z_{κ}), еквівалентний пружному опором

зони контакту “приймний перетворювач – матеріал об’єкта контролю”, і вхідний електричний опір ($Z_{\text{п}}$) прийомного перетворювача.

Аналіз приведених електричних схем заміщення випромінюючого і прийомного п’єзоелектричних перетворювачів (рис.4.11, 4.12) показує, що пружний опір зони контакту “перетворювач – матеріал об’єкта контролю” ($Z_{\text{к}}$) суттєво впливає на режим роботи перетворювача і передачу пружних коливань через зону контакту.

Зі зменшенням пружного опору зони контакту “перетворювач – матеріал об’єкта контролю” ($Z_{\text{к}}$) передача енергії пружних хвиль погіршується, і, як наслідок, – чутливість перетворювача до зміни опору ($Z_{\text{п}}$), еквівалентного механічному імпедансу матеріалу об’єкта контролю, знижується. При $|Z_{\text{к}}| \ll |Z_{\text{п}}|$ зміна $Z_{\text{п}}$ уже практично не впливає на режим роботи перетворювача.

Слід зазначити, що пружний опір зони контакту “перетворювач – матеріал об’єкта контролю” ($Z_{\text{к}}$) зменшується зі збільшенням частоти модуляції зондувального сигналу, що використовується при контролі якості. У цьому випадку його шунтуюча дія збільшується і сухий точковий контакт стає неефективним. Тому застосування такого типу контакту, як правило, обмежується частотами $f_{\text{узк}} < 40...60$ кГц.

Для контролю якості неметалічних і багатошарових матеріалів досить велике поширення одержав імпедансний метод (рис.4.13). Він заснований на зміні режиму коливань ультразвукового перетворювача під впливом зміни механічного імпедансу ($Z_{\text{п}}$) матеріалу об’єкта контролю в зоні контакту з перетворювачем (розд. 3).

Перетворювач контрольно-вимірювального пристрою, що реалізує імпедансний метод контролю, являє собою складену конструкцію, в яку входять металевий ультразвуковий трансформатор 1, в торцях якого розміщені випромінюючий 2 і приймний 3 п’єзоперетворювачі.

Уведення пружних хвиль здійснюється через контактну насадку 4 зі сферичною поверхнею. П’єзоелектричний випромінювач з’єднаний з генератором 5 ультразвукових коливань, а п’єзоелектричний приймач підключений до підсилювача 6. Генератор і підсилювач з’єднані з блоком 7 обробки сигналу з індикатором 8 на виході пристрою. Тип застосовуваного індикатора (осцилографічний або цифровий) залежить від призначення такого пристрою – для дослідницьких робіт чи контролю якості матеріалів на технологічній лінії.

При поширенні пружних хвиль у матеріалі багатошарового об’єкта контролю без дефекту комплексний імпеданс ($Z_{\text{п}}$) формується всіма шарами виробу, що сприймають пружні коливання як єдине ціле.

Дефект такого матеріалу, наприклад, типу “непроклей” чи розшарування, послабляє механічний зв’язок шарів у загальній масі матеріа-

лу об'єкта контролю. Зміна комплексного імпедансу (Z_n) впливає на комплексний коефіцієнт передачі п'єзоелектричного перетворювача $P = U_1/U_2$, де U_1 і U_2 – комплексні значення електричної напруги відповідно на випромінюючому і прийомному перетворювачах.

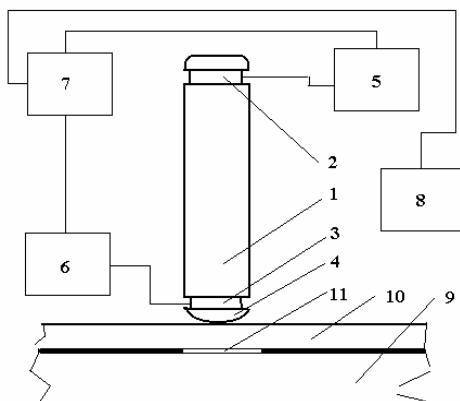


Рис. 4.13 – Функціональна схема імпедансного контрольно-вимірювального пристрою:

1 – ультразвуковий трансформатор; 2 – п'єзоелектричний випромінювач; 3 – п'єзоелектричний приймач; 4 – сферична насадка; 5 – генератор ультразвукових коливань; 6 – підсилювач; 7 – блок обробки інформації (АЦП або ЦАП); 8 – індикатор; 9 – нижній шар матеріалу; 10 – верхній шар матеріалу; 11 – дефект об'єкта контролю

Як правило, при контролі якості напруга випромінюючого перетворювача встановлюється постійною $U_1 = \text{const}$, тому модуль коефіцієнта передачі інформаційного сигналу пропорційний напрузі на ультразвуковому прийомному перетворювачі (U_2).

Дослідження і практика застосування ультразвукового імпедансного методу контролю показують, що зміна комплексного імпедансу (Z_n) призводить і до зміни фази між напругами U_1 і U_2 , а також відбивається на власній частоті прийомного перетворювача.

Якщо прийомний п'єзоелектричний перетворювач не навантажений на контрольований виріб, тобто знаходиться в режимі холостого ходу, то напруга (U_2) на ньому теоретично дорівнює нулю. Проте в дійсності напруга $U_2 \neq 0$, тому що на п'єзоелементі прийомного перетворювача присутня деяка статична деформація.

У зв'язку з цим напруга (U_2) виявляється пропорційною наступній величині:

$$U_2 \sim |V| \cdot \omega \left(m_n + \frac{m_n}{2} \right), \quad (4.8)$$

де $|V|$ – амплітуда коливальної швидкості складеного перетворювача; m_n – маса контактної насадки; m_n – маса вимірювального елемента перетворювача.

У результаті такого фізичного взаємозв'язку залежність напруги на прийомному перетворювачі (U_2) від комплексного імпедансу (Z_n) виявляється нелінійною.

Одним з методів ослаблення цього ефекту є зменшення маси контактної насадки (m_n) при виготовленні її з матеріалу, що характеризується малою питомою масою і високою зносостійкістю. Зокрема, такі характеристики має корунд, який у більшості випадків і застосовується для розв'язання такої задачі.

Отже, при проведенні контролю наявність дефекту багат шарового матеріалу виявляється фактично за зміною величини комплексного імпедансу (Z_n).

З огляду на викладене вище впливає, що зміну цього параметра фіксують за такими вимірюваними величинами:

а) за величиною комплексного коефіцієнта передачі п'єзоелектричного перетворювача $|P|$;

б) за зміною фази (Φ) між сигналами випромінюючого і прийомного перетворювачів;

в) за одночасною зміною коефіцієнта передачі п'єзоелектричного перетворювача $|P|$ і фази (ϕ) між сигналами випромінюючого і прийомного перетворювачів;

г) за зміною власної частоти прийомного перетворювача, відносно встановленої в режимі виміру на ділянці матеріалу без дефекту.

Відповідно до цього розрізняють амплітудний, фазовий, амплітудно-фазовий і частотний варіанти імпедансного методу. П'єзоелектричні перетворювачі, що застосовуються при імпедансному методі контролю якості можуть мати одну чи дві зони дотику з матеріалом об'єкта контролю.

У першому випадку фактично застосовуються сполучені прийомно-передавальні перетворювачі, у другому – роздільні п'єзоелектричні перетворювачі (розд. 2.1).

Однак на відміну від стандартної схеми в імпедансному методі для випромінювання і прийому пружних хвиль використовують роздільні п'єзоелементи, які розміщені в загальному корпусі й акустично ізольовані один від одного (рис.4.14).

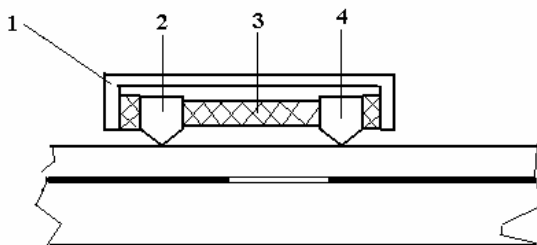


Рис. 4.14 – Конструкція блоку роздільно-сумісних п'єзоелектричних перетворювачів, які використовують при імпедансному методі контролю якості:
 1 – корпус; 2 – випромінюючий п'єзоелектричний перетворювач; 3 – акустичний ізолятор; 4 – прийомний п'єзоелектричний перетворювач

В області неруйнівного контролю якості такі перетворювачі називаються роздільно-сумісними (РС-перетворювачі).

Відстань (базу виміру) (l) між зонами контакту випромінюючого 2 і прийомного 4 п'єзоелектричних перетворювачів з матеріалом об'єкта контролю вибирають в межах $l \leq 7 \dots 10$ мм. Роздільні перетворювачі, як правило, використовують при імпульсному режимі випромінювання ультразвукових коливань.

На відміну від контролю сполученими перетворювачами, у роздільних перетворювачах дефект матеріалу в більшості випадків зумовлює збільшення амплітуди інформаційного сигналу. Це пов'язано з тим, що при зменшенні величини комплексного імпедансу (Z_n) амплітуда пружних коливань, порушуваних у матеріалі об'єкта контролю випромінюючим перетворювачем, зростає, що адекватно відбивається на амплітуді сигналу, який надходить на прийомний перетворювач.

Порівняння технічних характеристик контролю якості багатошарових конструкцій з використанням сполучених і РС-перетворювачів показує, що чутливість останніх вище до дефектів, які розташовуються відносно глибоко від поверхні матеріалів. У той же час чутливість РС-перетворювачів до підповерхневих дефектів і дефектів, що розташовуються на незначній глибині матеріалу виявляється нижче, ніж при використанні сполучених перетворювачів.

У сучасних розробках імпедансних контрольно-вимірювальних пристроїв при використанні сполучених перетворювачів використовується імпульсний режим порушення пружних хвиль. У системі “перетворювач – матеріал об'єкта контролю” збуджують ударні імпульси вільно загасаючих коливань. При цьому, в зоні дефекту зменшується

як амплітуда, так і несуча частота пружних хвиль, що перетворюються в електричні імпульси на виході прийомного перетворювача.

У цьому випадку для підвищення чутливості контролю застосовують аналіз амплітудно-частотних характеристик інформаційного сигналу. Таке поєднання методики введення пружних хвиль і обробки прийнятого сигналу суттєво підвищує як інформативність цього методу, так і вірогідність контролю якості.

Імпедансний метод контролю якості застосовується не тільки для контролю двошарових конструкційних матеріалів. Цей метод одержав широке розповсюдження і для контролю клеєних вузлів, у тому числі тришарових конструкцій з металевими і неметалевими обшиваннями і легкими, у вигляді стільників, наприклад з пінопласту, заповнювачами між ними.

Піддаються контролю якості клейові з'єднання обшивань з іншими елементами твердості. В будівництві, наприклад, виявляють розшарування у виробих із шаруватих пластмас. Мінімальний розмір дефектів, що виявляються цим методом контролю, складає $S_{\text{деф}} \geq 7 \text{ мм}^2$.

Основним недоліком імпедансного методу є порівняно невелика глибина ($H_{\text{деф}}$) залягання дефектів, що виявляються. Причому, величина ($H_{\text{деф}}$) безпосередньо залежить від твердості основи і перебуває з цим параметром у прямому взаємозв'язку - чим менше твердість основи, тим менше глибина ($H_{\text{деф}}$) залягання дефектів, що виявляються.

При дослідженні багатошарових конструкцій, що відрізняються твердою основою, товщина обшивання, яка доступна контролю, зменшується зі збільшенням характеристичного імпедансу її матеріалу. Дані максимальної глибини ($H_{\text{деф.м}}$) залягання дефектів, що виявляються, для деяких матеріалів наведені в табл. 4.1.

Проведення контролю якості з використанням РС-перетворювачів дає змогу виявляти дефекти багатошарових матеріалів під обшиваннями з алюмінієвих сплавів на глибині $H_{\text{деф}} \leq 3 \text{ мм}$. У матеріалах з обшиваннями з пластмас, наприклад типу органічне скло, глибина виявлення дефекту складає $H_{\text{деф}} \leq 15 \text{ мм}$.

Як було зазначено вище, розмір дефекту, що мінімально виявляється, у цьому випадку пов'язаний з відстанню між РС-перетворювачами (бази виміру) і складає, як правило, $l_{\text{деф}} \geq 7 \dots 10 \text{ мм}$.

Додатковим фактором, що обмежує область застосування імпедансного методу для контролю якості багатошарових конструкцій, є велика механічна гнучкість матеріалу обшивання, що у деяких випадках утрудняє забезпечення надійного і постійного акустичного контакту.

Таблиця 4.1

Максимальна глибина залягання дефектів, що виявляються, при контролі якості багат шарових матеріалів ультразвуковим імпедансним методом РС-перетворювачами

Матеріал обшивання багат шарової конструкції	Максимальна глибина виявлення дефекту ($H_{\text{деф. м}}$), мм
Сталь	1,5
Сплави титану	1,8
Сплави алюмінію	2,0
Пластмаса	6,0

Другим обмежуючим фактором є природний розкид значень механічного імпедансу ($Z_{\text{н}}$) матеріалу в бездефектних зонах контрольованого виробу. Зміна цієї величини формується під час технологічного процесу виготовлення матеріалу.

Зазначені особливості процесу контролю якості багат шарових матеріалів імпедансним методом необхідно враховувати на етапі постановки задач вимірювального процесу, оскільки через їхній прояв може суттєво знижуватися чутливість методу, а в деяких випадках можуть сформуватися умови, що виключають можливість його застосування.

Контроль якості багат шарових матеріалів імпедансним методом з використанням сполучених перетворювачів, порушуваних гармонійними коливаннями, виконується з частотою, регульованою в діапазоні від 1,5 до 10 кГц. При використанні імпульсного режиму введення пружних хвиль сполученим і РС-перетворювачами частота модуляції зондувального сигналу розташовується в межах $f = 2 \dots 18$ кГц. Конкретна величина частоти модуляції зондувального сигналу встановлюється у відповідності зі значенням механічного імпедансу об'єкта контролю.

Наступним з методів неруйнівного контролю неметалічних і багат шарових матеріалів, що має значне практичне поширення, є ультразвуковий велосиметричний метод. Він заснований на зміні швидкості й часу поширення пружних хвиль у матеріалі об'єкта контролю під впливом дефекту, що розташовується на шляху поширення фронту ультразвукової хвилі (розд. 3). Цей метод відноситься до групи методів наскрізного проходження пружних коливань. В об'єкті контролю збуджують безупинні чи імпульсні низькочастотні ультразвукові коливання частотою $f = 20 \dots 70$ кГц.

Дефекти реєструють за зміною зрушення фази прийнятого сигналу або за зміною часу поширення хвилі в матеріалі на ділянці між випро-

мінюючим і прийомним перетворювачами дефектоскопа. Ці параметри меншою мірою залежать від сили притиснення п'єзоелектричних перетворювачів до виробу, стану акустичного контакту.

У зв'язку з цим, велосиметричний метод характеризується підвищеною стабільністю даних вимірів.

Ультразвуковий велосиметричний метод застосовується в декількох модифікаціях.

У першому варіанті цього методу контролю приймально-передавальний перетворювач контрольно-вимірювального пристрою складається з розташованих у загальному корпусі випромінюючого і прийомного п'єзоелементів з фіксованою відстанню (базою виміру) ($l = \text{const}$) між ними (рис.4.15).

Причому база виміру встановлюється приблизно рівній довжині хвилі зондувального сигналу (λ). Така конструкція блоку перетворювачів забезпечує формування випромінюваної асиметричної пружної хвилі, що поширюється в об'єкті контролю.

При співвідношенні товщини матеріалу (H_1) і довжини хвилі (λ) випромінюваного зондувального сигналу $H_1 \ll \lambda$ у матеріалі формується вигинна хвиля, фазова швидкість поширення якої (c_n) зростає зі збільшенням товщини матеріалу (H_1) [13]. Ця залежність описується наступним математичним виразом:

$$c = \sqrt{\omega * K_\phi}, \quad (4.9)$$

$$K_\phi = \sqrt[4]{E/3\rho((1-v^2))},$$

де ω – колова частота; E – модуль нормальної пружності; v – коефіцієнт Пуассона; ρ – питома щільність матеріалу.

Виходячи з цього випливає, що значення коефіцієнта (K_ϕ) залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу об'єкта контролю.

При відсутності дефекту досліджуваного матеріалу пружна хвиля поширюється по всій товщині виробу. При наявності дефекту ультразвукові коливання проходять меншу відстань – від поверхні виробу до дефекту (рис.4.15). У зв'язку з цим, поява дефекту зменшує фазову швидкість пружних коливань. Зміна фази сигналу, при встановленій базі виміру (l), визначається з використанням залежності:

$$2\pi \cdot l / \lambda = \omega \cdot l / c. \quad (4.10)$$

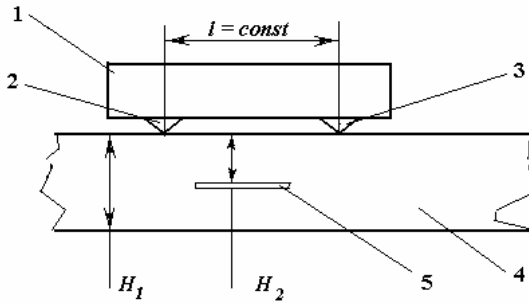


Рис. 4.15 – Ультразвуковий велосиметричний метод контролю якості неметалічних матеріалів з використанням фіксованої бази вимірів:

- 1 – корпус перетворювачів; 2 – випромінюючий п'єзоелектричний перетворювач; 3 – прийомний п'єзоелектричний перетворювач; 4 – досліджуваний матеріал; 5 – дефект матеріалу; H_1 – товщина матеріалу; H_2 – глибина залягання дефекту; l – відстань між перетворювачами

1 .

Отже, різниця фаз, що визначає наявність дефекту, може бути розрахована за формулою

$$\Delta\varphi = \frac{2l}{K} \sqrt{\frac{f}{2\pi}} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{H_2}} - \sqrt{\frac{1}{H_1}} \right) . \quad (4.11)$$

У другому варіанті велосиметричного методу контролю, за аналогією з першим, також застосовується розміщення п'єзоелектричних перетворювачів на фіксованій базі виміру. Однак замість безупинного в ньому використовується імпульсне випромінювання пружних коливань. Зміна фазової швидкості імпульсних пружних хвиль, що поширюються в матеріалі з дефектами, реєструється за зсувом нулів інформаційних сигналів, що фіксуються прийомним перетворювачем.

Третій варіант велосиметричного методу полягає в дослідженні матеріалу безупинними ультразвуковими коливаннями при співвідноному розташуванні випромінювача і приймача пружних хвиль (рис.4.16). Причому, п'єзоелектричні перетворювачі встановлюються по різні боки об'єкта контролю.

При відсутності дефектів матеріалу у вигляді розшарування, порушення з'єднання між елементами конструкції, безупинні пружні коливання проходять через виріб у виді подовжньої хвилі (рис.4.16, поз. $1_1, 2_1$).

У шарах матеріалу, розділених дефектом, подовжня хвиля пружних коливань трансформується і поширюється у формі асиметричних хвиль нульового порядку (рис.4.16, поз. $I_2, 2_2$).

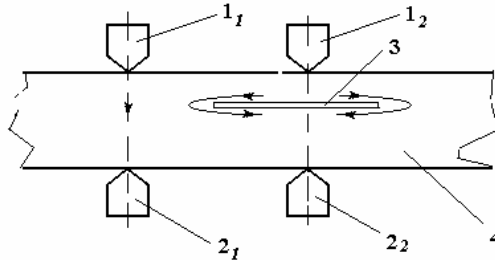


Рис. 4.16 – Ультразвуковий велосиметричний метод контролю якості неметалічних матеріалів з використанням співвісного розташування перетворювачів: $1_1, 2_1$ – розташування випромінюючого і прийомного перетворювачів на ділянці матеріалу без дефекту; $1_2, 2_2$ – розташування випромінюючого і прийомного перетворювачів на ділянці матеріалу з дефектом; 3 – дефект матеріалу; 4 – досліджуваний матеріал

Ці хвилі, через обгинання дефекту, проходять більший шлях і рухаються з меншими швидкостями, ніж подовжня хвиля. У наслідок такого явища, яке спостерігається в зоні дефекту, фаза хвилі інформаційного сигналу в точці прийому відстає від фази такого ж сигналу, який розповсюджується на якісній ділянці матеріалу.

Цей ефект і використовується як основна ознака дефекту. Додатковою ознакою дефекту є зниження амплітуди прийнятого сигналу. Це явище спостерігається в тому випадку, якщо дефект є підповерхневим або розташовується близько до поверхні контролюваного матеріалу.

Четвертий варіант велосиметричного методу є модифікацією третього і відрізняється використанням імпульсного випромінювання ультразвукового сигналу, а також виміром групової, а не фазової швидкості поширення пружної хвилі. У розглянутому варіанті велосиметричного методу контролю ознакою дефекту є збільшення часу проходження імпульсу пружної хвилі від випромінюючого до прийомного перетворювача.

Слід зазначити, що на відміну від часового тінювого методу контролю збільшення часу проходження інформаційного сигналу в цьому випадку обумовлено не тільки збільшенням шляху його поширення через обгинання дефектної ділянки матеріалу, але й зміною типу хвилі в зоні дефекту. Останнє явище також зумовлює зменшення швидкості поширення ультразвукових коливань у дефектній зоні.

Велосиметричний метод застосовують для виявлення дефектів, переважно типу розшарувань і непроклеїв, у неметалевих покриттях і шаруватих пластмасах, а також контролю якості з'єднань виробу з неметалевими і металевими шарами. При можливості двостороннього доступу до конструкції доцільно використовувати третій і четвертий варіанти цього методу.

При однобічному доступі до об'єкта контролю використовують перший і другий варіанти. Граничні глибини залягання дефектів, що можуть виявлятися велосиметричним методом контролю в багатошарових пластмасових матеріалах складають $H_{\text{деф}} = 20 \dots 25$ мм для всіх варіантів методу. Мінімальна площа дефектів, що виявляються, знаходиться в межах $S_{\text{деф}} = 2 \dots 15$ см². Причому, спостерігається пряма залежність між мінімальною площею дефекту, що виявляється, і його глибиною залягання.

Чутливість методу залежить від фізико-механічних параметрів об'єкта контролю і глибини залягання дефектів. Характерне зниження цього параметра зі збільшенням глибини залягання дефекту матеріалу.

Важливим моментом, який необхідно враховувати при постановці задачі вимірювального процесу велосиметричним методом, є наявність так званої мертвої зони у першому і другому його варіантах, тобто при однобічному введенні та прийомі ультразвукових коливань. Ця зона формується на поверхні виробу, на якій розташований блок перетворювачів, і складає 10...40 % товщини об'єкта контролю.

Наступним недоліком однобічного варіанта велосиметричного методу є перешкоди, що утрудняють контроль об'єктів в області країв і зон різкої зміни перетину виробу, а також контроль якості об'єктів з невеликими геометричними розмірами (менш як 500×500 мм).

Таке обмеження накладається через можливе перевідбиття пружних хвиль від країв виробу, що, у свою чергу, зумовлює появу явища інтерференції головної хвилі, із хвилями, відбитими від границь виробу чи ділянок різкої зміни перетину.

Слід зазначити, що інтерференційних перешкод найбільш зазнає перший варіант велосиметричного методу з використанням безупинних коливань.

У цьому випадку мертва зона, обумовлена розмірами виробу та геометричними параметрами сумісних п'єзоелектричних перетворювачів, складає $H_{\text{м.з.}} = 20 \dots 50$ мм.

Модифікації велосиметричного методу, в основі яких лежить використання двостороннього розташування перетворювачів, практично не зазнають впливу інтерференційних перешкод.

4.3. Вимір геометричних розмірів об'єкта контролю ультразвуковими методами

Ультразвукові методи використовуються для виміру товщини стінок труб, посудин, резервуарів та інших будівельних виробів і конструкцій, доступ до яких є тільки з одного боку. Ці методи застосовують також для контролю шорсткості поверхні об'єктів, для виміру їхньої довжини і діаметрів. При вимірі товщини виробів, в основному, використовується луна-метод і методи локальних резонансних коливань (розд. 3). У деяких випадках, при можливості двостороннього доступу для установки п'єзоелектричних перетворювачів, використовують методи наскрізного ультразвукового контролю. У випадку застосування методів відбиття чи наскрізного прийому інформаційного сигналу вимірюють час пробігу імпульсу пружної хвилі в матеріалі об'єкта контролю.

У деяких випадках вимірюють амплітуду наскрізного інформаційного сигналу або його фазу. При проведенні контролю методом коливань вимірюються резонансні частоти.

В основі виміру геометричних параметрів об'єкта контролю, при використанні ультразвукових методів, лежить залежність

$$\Phi = f(H, \psi),$$

де Φ – вимірюваний параметр ультразвукових коливань у матеріалі об'єкта контролю (час поширення, амплітуда, резонансна частота та ін.); H – вимірювані геометричні параметри об'єкта контролю (товщина, шорсткість поверхні, довжина, діаметр і т.п.); ψ – фізико-механічні характеристики матеріалу об'єкта контролю, що формують значення вимірюваного параметра ультразвукових коливань.

Тому що фізико-механічні характеристики матеріалу об'єкта контролю є відносно постійними, тобто $\psi = \text{const}$, то цю величину можна подати у вигляді деякого постійного коефіцієнта (K). Внаслідок цього утвориться наступний взаємозв'язок між вимірюваним параметром ультразвукових коливань і геометричних розмірів об'єкта контролю:

$$\Phi = K \cdot f(H).$$

При використанні ультразвукових методів для виміру товщини об'єктів контролю розрізняють два види задач, що повинні бути розв'язані на етапі постановки процесу виміру:

1 – вимір товщини виробів чи конструкцій, що характеризуються гладкими рівнобіжними поверхнями;

2 – вимір товщини виробів чи конструкцій із грубими непаралельними поверхнями, наприклад, виробів, внутрішня поверхня яких уражена корозією.

При розв'язанні першої та другої задачі основною вимогою до вимірювального процесу є забезпечення високої точності вимірів. При розв'язанні другої задачі висувається додаткова вимога – висока чутливість контрольно-вимірювальної апаратури для забезпечення фіксування розсіяного відбиття ультразвукового сигналу від нерівностей, що можуть спостерігатися на протилежній поверхні виробу. Ця вимога формується з тієї причини, що в цьому випадку, як правило, основною задачею контролю є визначення місць найбільшого локального зменшення товщини стінок. Причому, при розв'язанні другої задачі контролю пред'являються більш низькі вимоги до точності виміру параметрів ультразвукового сигналу.

У зв'язку з суттєвим розходженням описаних задач їхнє розв'язання здійснюється із застосуванням декількох методів виміру. Проаналізуємо істоту застосовуваних ультразвукових методів для розв'язання сформульованих вище задач виміру товщини об'єктів контролю.

Нині луна-метод є основним способом виміру товщини об'єктів контролю. Основні положення цього методу розглянуті в розд. 3, тому докладніше проаналізуємо його можливості й обмеження в плані розв'язання задач виміру розмірів.

Розглянемо формування точності виміру товщини об'єкта контролю для найбільш простого випадку, коли вимір виконують по першому інформаційному (донному) сигналу. В цьому випадку інформаційний сигнал утвориться при відбитті пружної хвилі від поверхні об'єкта контролю, протилежної поверхні, на якій розташовані ультразвукові пелетворювачі.

Якщо швидкість (V) поширення ультразвуку в об'єкті контролю відома, то, вимірюючи час (t) проходження ультразвуку в об'єкті в прямому і зворотному напрямках, стає можливим визначити його товщину за формулою

$$h = 0,5 \cdot V \cdot t. \quad (4.12)$$

Виконаємо оцінку похибки виміру для розглянутого випадку не тільки стосовно виміру товщини, але й щодо визначення координат дефектів. Відносна похибка виміру може бути обчислена за формулою

$$\Delta h / h = \Delta V / V + \Delta t / t. \quad (4.13)$$

Визначення швидкості поширення пружних хвиль виконують за зразком чи по ділянці матеріалу об'єкта контролю відомої товщини таким же способом, як вимірюють товщину. Оскільки похибки виміру швидкості (V) і часу (t) поширення ультразвукових коливань приблизно однакові, то в результаті цього впливає, що $\Delta h / h = 2 \cdot \Delta t / t$.

Похибка (Δt) виміру часу поширення пружних хвиль у матеріалі складається із суми похибок (Δt_s), що обумовлюються впливом ряду факторів вимірювального процесу, тобто $\Delta t = \sum \Delta t_s$. Для забезпечення необхідної точності виміру параметра (t), як у процесі контролю, так і при проектуванні контрольно-вимірювальної апаратури, потрібний аналіз можливих складових похибки і фізичні основи їхнього формування (розд. 8).

Мінімальну товщину виробів, що може бути обмірювана луна-методом, визначає так звана мертва зона (r_{\min}) такого спеціалізованого вимірювального пристрою. Цей параметр визначає мінімальну відстань від поверхні введення пружної хвилі до місця границі об'єкта контролю по його товщині. У спрощеному вигляді, при використанні сполучених п'єзоелектричних перетворювачів, мертва зона визначається тривалістю зондувального імпульсу (τ_z) і тривалістю ревербераційних шумів перетворювача (τ_p):

$$r_{\min} = 0,5 c (\tau_z + \tau_p). \quad (4.14)$$

З (4.14) випливає, що зменшення тривалості мертвої зони і, як наслідок, – зменшення мінімальної контрольованої товщини виробів забезпечується такими способами.

По-перше, використовується підвищення частоти модуляції зондувального сигналу. У цьому випадку з'являється можливість скорочення його тривалості (τ_z). Необхідно відзначити, що суттєве підвищення частоти модуляції зондувального сигналу неминуче викликає зниження чутливості приймально-передавального тракту контрольно-вимірювального пристрою через збільшення коефіцієнта загасання пружних коливань.

Другим напрямком розв'язання цієї задачі є зниження тривалості ревербераційних шумів перетворювачів (τ_p). На практиці кращі результати в цьому випадку формуються при використанні РС-перетворювачів, для яких цей параметр є мінімальним унаслідок їхніх

конструктивних особливостей. Так, у результаті використання такої схеми введення і прийому пружних хвиль можливе зменшення мертвої зони до $r_{\min} = 0,2...0,3$ мм.

Максимальна товщина об'єкта контролю, що може бути обміряна за допомогою луна-методу теоретично не обмежена. Цей параметр залежить від потужності зондувального сигналу і чутливості приймально-передавального тракту, що реалізовані у вимірниках такого типу. Вибір конкретних значень цих параметрів при проектуванні контрольних-вимірювальних засобів необхідно робити, виходячи з фізико-механічних характеристик передбачуваних матеріалів об'єктів контролю, зокрема, коефіцієнта загасання ультразвуку в матеріалах. На практиці максимальна товщина об'єкта контролю, що виміряється на основі луна-методу в матеріалах з невеликим загасанням ультразвуку, складає $h_{\max} \approx 1000$ мм.

Слід врахувати деякі практичні рекомендації. При проведенні вимірів товщини об'єктів контролю їх зовнішня поверхня повинна забезпечувати надійний акустичний контакт із перетворювачем. Бажана, при можливості, попередня оцінка стану внутрішньої поверхні об'єкта контролю. Це зумовлено тим, що для контролю виробів зі значними нерівностями внутрішньої поверхні необхідне застосування вимірників, які мають високу чутливість і використовують при вимірі товщини перший луна-сигнал.

Наступною характеристикою, що повинна враховуватися при постановці експерименту, є радіус кривизни виробу. Це пов'язано з тим, що зменшення радіуса кривизни об'єкта контролю призводить до зменшення площі акустичного контакту “п'єзоелектричний перетворювач – поверхня об'єкта контролю” і, як наслідок, до зменшення амплітуди вимірюваного луна-сигналу. На додаток до цього, при зменшенні радіуса кривизни виробу спостерігається збільшення мертвої зони вимірювальної апаратури і зростання похибки вимірів. У зв'язку з цим використання луна-імпульсного методу для виміру товщини з необхідною точністю обмежується діаметром $r_{o.k.} \geq 5...10$ мм.

Для контролю товщини виробів з меншим радіусом кривизни поверхні рекомендується застосовувати імерсійний метод збудження пружних хвиль в об'єкті контролю. У цьому випадку забезпечується можливість контролю товщини виробів з радіусом поверхні $r_{o.k.} \leq 3$ мм. У ряді випадків для розв'язання аналогічних задач використовується резонансний метод. Основи резонансних методів контролю розглянуті в розділі 3. Тому в даному розділі проаналізуємо тільки деякі особливості цього методу стосовно задачі виміру товщини. Опубліковані результати застосування цього методу дозволяють зробити висновок, що

мінімальна товщина матеріалу (h_{\min}), яку можливо вимірити з його допомогою, обчислюється за виразом:

$$h_{\min} = c / (2f_{\max}), \quad (4.15)$$

де c – швидкість звуку в матеріалі виробу; f_{\max} – максимальна частота пружних хвиль, реалізована при вимірах.

Наприклад, використання пружних хвиль з частотою $f \leq 30$ МГц дає можливість вимірювати товщину сталевих виробів від $h_{\min} \geq 0,06$ мм. Вимір таких величин при використанні інших ультразвукових методів контролю виконати не вдається. Похибка виміру товщини матеріалу в цьому випадку складає $\delta = 1...2$ %. Слід зазначити, що на практиці підвищення частоти випромінювань пружних хвиль обмежується фізико-механічними характеристиками матеріалу об'єкта контролю, що можуть спричинити значне загасання ультразвукових коливань.

Резонансний метод контролю забезпечує необхідні характеристики результатів контролю при вимірах на виробках з відносно гладкими поверхнями. Відносна зміна товщини матеріалу в зоні контролю не повинна перевищувати $\Delta h \leq 8$ %. Причому, характерним є те, що виміряється середня товщина матеріалу, а не найбільше її зменшення. Цей факт визначає придатність контактних резонансних товщиномірів для розв'язання задач першого і другого типу. Проте, оскільки застосування резонансних методів контролю обумовлює безпосередній контакт п'єзоелектричних перетворювачів з поверхнею виробу, то, внаслідок зсуву резонансів під впливом нестабільного акустичного контакту, виявляються такі недоліки цього методу: похибка виміру збільшується до $\delta = 2...5$ %, а мінімальний радіус кривизни поверхні контрольованих виробів збільшується до $r_{\min} = 10...12$ мм. Враховуючи наведені причини резонансний метод контролю найбільш придатний для розв'язання задач другого типу.

4.4. Контроль фізико-механічних властивостей матеріалів ультразвуковими методами

Контроль фізико-механічних властивостей матеріалів ультразвуковими методами є одним з найважливіших напрямків неруйнівного контролю якості матеріалів, виробів і конструкцій. Контроль заснований на установленні взаємозв'язку фізико-механічних, технологічних,

структурних характеристик матеріалів і виробів з характеристиками пружних хвиль (розд. 3).

До основних фізико-механічних характеристик матеріалів, що визначаються ультразвуковими методами, відносяться:

- пружні характеристики (модуль нормальної пружності, модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона);
- технологічні характеристики (щільність, пластичність, вологість, наявність і концентрація окремих компонентів, гранулометричний склад та ін.);
- характеристики структури (тріщинуватість, напружений стан, твердість пористість, розміри і зміст сторонніх включень, анізотропія матеріалу, ступінь кристалізації структури, розміри кристалів, тощо);
- характеристики міцності (міцність при стиску, розтяганні, вигині, крутінні, зрізі та ін.).

4.4.1. Контроль пружних характеристик матеріалів

Залежно від структурних особливостей і властивостей матеріали групуються на наступні три основних класи – ізотропні, ортотропні та трансверсально-ізотропні. Вони характеризуються різною кількістю незалежних пружних параметрів і, у зв'язку з цим, для забезпечення надійного визначення їхніх властивостей, необхідно враховувати специфіку проведення ультразвукового неруйнівного контролю фізико-механічних характеристик.

Ізотропні матеріали характеризуються двома пружними сталими, наприклад пружними сталими Ламе, модулями нормальної пружності і зсуву. Замість них може бути використана інша пара незалежних пружних констант, наприклад модуль нормальної пружності і коефіцієнт Пуассона, модулі всебічного стиску і зсуву.

Приведені математичні вирази (розд. 1, 1.14, 1.15) представляють зв'язок двох пружних констант зі швидкостями подовжніх і поперечних хвиль у безмежному середовищі. Для середовищ, об'єм яких обмежений геометричними розмірами стосовно довжини пружних хвиль (пластин, стрижнів), як основну характеристику використовують швидкість поширення симетричної нульової моди відповідних коливань замість швидкості поширення подовжніх хвиль.

Ортотропні матеріали характеризуються дев'ятьма незалежними пружними сталими (C), що входять у рівняння:

$$\sigma_{ik} = C_{iklm} \cdot \varepsilon_{lm}, \quad (4.16)$$

де σ_{ik} і ϵ_{lm} – складові тензорів напруги і деформації.

В ортотропному середовищі можуть поширюватися дев'ять пружних хвиль, що відрізняються величиною швидкості поширення ультразвукових коливань. Вимірюючи швидкість подовжньої і двох поперечних хвиль у кожному з трьох головних для середовища напрямків (x, y, z), стає можливим визначення її всіх пружних сталих.

Трансверсально-ізотропне середовище характеризується п'ятьма незалежними пружними постійними. У них можуть поширюватися п'ять хвиль, що відрізняються своїми швидкостями. Аналізуючи таке середовище у вигляді пластини, можна зробити наступні висновки. Якщо припустити орієнтування осі x перпендикулярно до пластини, а напрямки по осях y і z вважати рівноправними, то в число цих п'яти хвиль увійдуть такі їхні модифікації:

- подовжні по товщині (поперек її перерізу) і уздовж пластини зі швидкостями $c_{xx} = c_{yy} = c_{zz}$;
- поперечні поперек перерізу пластини зі швидкостями $c_{xy} = c_{xz}$;
- поперечні уздовж пластини з коливаннями поперек і уздовж перерізу пластини зі швидкостями $c_{yx} = c_{zx}$, $c_{yz} = c_{zy}$.

Отже, число незалежних пружних сталих такого середовища завжди дорівнює кількості типів хвиль.

Обмірювані акустичним методом пружні сталі чи модулі пружності середовища відповідають адіабатичним умовам деформації, оскільки процес “поширення – стиск” елементарного обсягу речовини відбувається дуже швидко, а виникаючі теплові потоки є інерційними і не встигають вирівнювати температуру елементарного об'єму з навколишнім середовищем.

При вимірі модулів пружності механічними методами (наприклад, при статичних іспитах зразків на розтягання) деформація відбувається повільно, температура зразка практично залишається постійною і відповідає температурі навколишнього середовища. Внаслідок цього даний процес відбувається ізотермічно.

Між модулями нормальної пружності, обумовленими при адіабатичних ($E_{ад}$) і ізотермічних ($E_{із}$) процесах, існує наступне співвідношення:

$$\frac{\Delta E}{E_{із}} = \frac{E_{ад} - E_{із}}{E_{із}} = 1 + \frac{E_{із} \cdot T \cdot \alpha}{2 \cdot C_p}, \quad (4.17)$$

де C_p – питома теплоємність при постійному тиску на середовище; T – абсолютна температура; α – об'ємний коефіцієнт теплового розшире-

ння середовища.

Експериментальна оцінка результатів визначення модулів нормальної пружності показує, що $\Delta E/E_{us} \leq 0,5\%$.

Вимір швидкості поширення пружних хвиль у середовищі, як правило, виконують імпульсними методами. Рідше використовуються для цих цілей резонансні методи. Постановка вимірювального процесу в цьому випадку багато в чому ідентична задачі виміру товщини об'єкта при однобічному доступі (розд. 4.3). Відмінність вимірів полягає в тому, що при визначенні товщини використовується відношення параметрів товщини виробу і швидкості поширення ультразвуку в матеріалі виробу (h/c). При цьому константою є відома швидкість поширення ультразвукових коливань (c). При вимірі швидкості поширення пружних хвиль (c) використовується відома величина бази виміру (l), що у даному випадку є відомою величиною.

Для підвищення точності вимірів швидкості поширення ультразвукових коливань у цьому випадку застосовують методи, які розглядаються в розділі 8. Високоточні методи виміру швидкості (c), що застосовуються з дослідницькими цілями у лабораторних умовах викладені в [1].

Оцінка точності вимірів показує, що основна похибка виміру швидкості поширення ультразвукових коливань (c) пов'язана зі зміною часу пробігу акустичного сигналу в контактному шарі між перетворювачем і зразком матеріалу (Δt_c), оскільки товщина цього шару варіюється випадково. Ця похибка зменшується в тому випадку, якщо виміри виконувати по імпульсах багаторазових відбиттів, наприклад другому і третьому відбитих сигналам. Застосування безконтактних способів акустичного контакту "п'єзоелектричний перетворювач – об'єкт дослідження" дає можливість усунути цю похибку (розд. 2.2).

Практика показує, що при вимірі швидкості поширення поперечних хвиль виникають певні труднощі, які пов'язані з необхідністю порушення хвиль з коливаннями часток, рівнобіжних поверхні введення пружних хвиль. Для порушення таких типів хвиль у металах застосовують ЕМС-перетворювачі (розд. 2.3). У неметалевих матеріалах хвилі такого типу збуджують п'єзоелектричними перетворювачами з відповідним видом деформації, наприклад п'єзоелектричними пластинами кварцу у-зрізу (розд. 2.1). Така пластина приклеюється до поверхні матеріалу в місці введення пружних хвиль чи притискається через шар в'язкого контактного середовища.

При визначенні пружних властивостей матеріалів у виробничих умовах звичайно не ставиться задача виміру абсолютного значення

модулів пружності. Актуальною задачею в більшості випадків є контроль анізотропії пружних властивостей. Так, наприклад, найчастіше необхідно досліджувати однорідність розподілу міцності бетону у виробках, що піддається зміні при технологічних операціях. В інших випадках у результаті прокатки структура металевих листів стає трансверсально-ізотропною. При визначених параметрах такої технологічної операції під час штампування деталей метал може розтріскуватися. Придатність листового металу до штампування визначають через вимір відносних значень швидкостей подовжньої і двох поперечних хвиль, що поширюються по товщині листа. Порушення всіх необхідних трьох типів хвиль у цьому випадку здійснюється ЕМС-перетворювачами [8].

4.4.2 Контроль технологічних характеристик матеріалу

Задача контролю таких технологічних характеристик матеріалу, як його склад і щільність з застосуванням ультразвукового методу є нагальною в наш час [84].

На практиці при виробництві композитних матеріалів виникає задача перевірки процентного вмісту речовин сполучного і наповнювача, оскільки від співвідношення цих складових матеріалу залежить його щільність. Так, відомо, що масова частка наповнювача визначається за формулою:

$$F = m_2 / (m_1 + m_2),$$

де m_1 і m_2 — відповідно маси сполучного і наповнювача. У такому випадку щільність матеріалу може бути обчислена за виразом:

$$\rho = \rho_1 * \rho_2 / [\rho_2 - F(\rho_2 - \rho_1)], \quad (4.18)$$

де ρ — щільність композитного матеріалу; ρ_1, ρ_2 — відповідно питома щільність сполучного і наповнювача.

Оцінку щільності, а отже і складу композитного матеріалу, виконують за зміною швидкості поширення подовжніх хвиль. Якщо хвильові опори в сполучному і наповнювачі відрізняються не більше ніж на $\Delta z \geq 30...40\%$, то швидкість пружних хвиль у такому композитному матеріалі визначається як середньоарифметичне зі швидкостей ультразвукових коливань у сполучному (c_1) і в наповнювачі (c_2):

$$c = q \cdot F \cdot c_2 + (1 - F) \cdot c_1, \quad (4.19)$$

де q – коефіцієнт структури, що враховує тип наповнювача і напрямок поширення ультразвуку стосовно напрямку основи матеріалу.

З останнього виразу випливає, що

$$F = (c - c_1)/(q \cdot c_2 - c_1). \quad (4.20)$$

У тому випадку, якщо хвильові опори сполучного і наповнювача мають значні розходження (наприклад, для пінопласту, в якому наповнювачем є повітря з $z_v = 0$), залежність швидкості ультразвукових коливань від складу матеріалу визначається емпірично.

Слід зазначити, що можливість контролю величини масової частки наповнювача (F) за швидкістю пружних хвиль зберігається, тобто зберігається правомочність співвідношення, що випливає з виразу (4.20).

Важливою задачею контролю якості багатшарових конструкцій є визначення щільності внутрішнього шару. Для цього обчислюють відносний коефіцієнт відбиття: $K_{\text{відб.вдн}}$. Ця величина визначається за наступною формулою:

$$K_{\text{відб.вдн}} = A_{\text{відб.с}}/A_{\text{відб.л.с}}, \quad (4.21)$$

де $A_{\text{відб.с}}$ – амплітуда відбитого інформаційного сигналу від границі шару матеріалу; $A_{\text{відб.л.с}}$ – амплітуда луна-сигналу, відбитого від нижньої поверхні матеріалу.

Аналогічно можна оцінити щільність одношарового матеріалу. Для цього виріб чи зразок з даного матеріалу занурюють в імерсійну рідину з відомим хвильовим опором (z) і розглядають її, як верхній шар такого уявного багатшарового клейового матеріалу. Надалі роблять описані вище виміри характеристик пружних хвиль.

В якості практичних рекомендацій слід зазначити, що при контролі щільності частота модулювання зондувального сигналу ($f_{3,c}$) повинна забезпечувати задовільне проходження ультразвуку через контрольовані матеріали. Так, наприклад, при контролі щільності склопластиків застосовують частоти $f_{3,c} \approx 0,5$ МГц. Тривалість зондувального сигналу в цьому випадку повинна бути менше подвоєної товщини контрольованого шару, щоб забезпечувалася мінімізація мертвої зони контролю.

4.4.3. Контроль характеристик структури матеріалів

Контроль характеристик структури матеріалів, в окремої при його напруженому стані, і деформацій у виробках ультразвуковими методами заснований на реєстрації зміни швидкості поширення пружних хвиль під впливом внутрішніх напружень у матеріалі. Закон Гука (розд. 1), відповідно до якого напруга (σ) і деформація (ϵ) матеріалу перебувають в пропорційній залежності, виконується приблизно. Більш точна залежність цих величин має вигляд [2,3]:

$$\sigma = C_1 \cdot \epsilon + C_2 \cdot \epsilon^2, \quad (4.22)$$

де C_1 – коефіцієнт пружної сталості (модуля пружності) матеріалу; C_2 – коефіцієнт Мурнагана.

При визначенні напруг в ізотропних середовищах необхідно мати на увазі, що для цього типу матеріалів існує три значення коефіцієнтів Мурнагана.

Наведений вираз є спрощеним, оскільки він не враховує наявність і взаємодію деформацій різного типу.

Проаналізуємо взаємозв'язок статичної механічної напруги, прикладеної до матеріалу, з величиною, що спричинює при цьому деформації. Так, при деякій прикладеній механічній нарузі (σ_0), в матеріалі виникає певна деформація (ϵ_0). Згідно з (4.22) ці величини знаходяться у такій залежності:

$$\sigma_0 = C_1 \cdot \epsilon_0 + C_2 \cdot \epsilon_0^2 \approx C_1 \cdot \epsilon_0.$$

Пружна хвиля додатково зумовлює в досліджуваному матеріалі малу динамічну деформацію (ξ). При наявності статичної деформації результуюча деформація (ϵ) матеріалу дорівнюватиме сумі вхідних величин:

$$\epsilon = \epsilon_0 + \xi.$$

Згідно з (4.22) зв'язок сумарної механічної напруги (σ) із загальною деформацією (ϵ) матеріалу описується формулою

$$\sigma = C_1 \cdot \epsilon_0 + C_1 \cdot \xi + C_2 \cdot \epsilon_0^2 + 2C_2 \cdot \epsilon_0 \cdot \xi + C_2 \cdot \xi^2 = \sigma_0 + C_1 \cdot \xi + 2C_2 \cdot \epsilon_0 \cdot \xi.$$

Як мала величина, член $C_2 \cdot \varepsilon^2$ виключається з рівняння.

Використовуючи вираз (4.22), стає можливим записати хвильове рівняння для плоскої пружної хвилі уздовж осі x у вигляді:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\sigma}{dx} = \frac{C_1 + 2\varepsilon_0 \cdot C_2}{\rho} \cdot \frac{d^2 u}{dx^2}, \quad (4.23)$$

де $\partial u / \partial x = \varepsilon$.

У рівнянні (4.23) множник перед другою похідною від зсуву по координаті дорівнює квадрату швидкості поширення ультразвуку (c') у матеріалі об'єкта контролю при його напруженому стані:

$$c' = \sqrt{(C_1 + 2C_2 \cdot \varepsilon_0) / \rho}.$$

З урахуванням співвідношення величин $C_2 \cdot \varepsilon_0 \ll C_1$, одержуємо вирази, що пов'язують швидкість поширення пружних хвиль і напружений стан матеріалу об'єкта контролю:

$$c' = \sqrt{C_1 / \rho} (1 + C_2 \cdot \varepsilon_0 / C_1); \quad (4.24)$$

$$\frac{\Delta c}{c} = \varepsilon \cdot C_2 / C_1 \approx \sigma \cdot C_2 / C_1^2; \quad (4.25)$$

де c – швидкість поширення ультразвукових коливань у ненапруженому матеріалі об'єкта контролю; $\Delta \rho = c' - c$.

Отже, зміна швидкості ультразвукових коливань пропорційна напрузі чи деформації в матеріалі контрольованого об'єкта.

Важливим моментом описуваного способу контролю напруженого стану об'єкта контролю є те, що величина зміни швидкості пружних хвиль має порядок $\Delta c / c \cong 10^{-4}$, тобто її зміна відбувається в межах 0,01 %. Вимір абсолютних значень швидкості ультразвукових коливань з такою точністю є досить складною задачею, що потребує спеціалізованої апаратури. Однак, у зв'язку з тим, що в даному випадку необхідно вимірити не абсолютну величину, а зміну швидкості під впливом прикладених напруг, то проведення вимірів не викликає ускладнень з використанням стандартної контрольовано-виміральної апаратури.

Ультразвукові методи контролю напруженого стану використовують для контролю натягу стрижневої чи дротової арматури будівельних конструкцій, нарізних сполучень, канатів. Причому, для виміру

напруженого стану нарізних сполучень у більшості випадків застосовують ультразвукові імпульсні методи контролю. Вони дають можливість виконати контроль напруженого стану в об'єктах контролю діаметром $d > 8$ мм, завдовжки $l = 20 \dots 4500$ мм. При зміні напруги в нарізному сполученні $\sigma \geq 7$ МПа, діапазон відносної зміни швидкості ультразвукових коливань складає $\Delta c \approx 0,1 \dots 10$ мкс, залежно від розмірів об'єкта контролю.

При контролі напруженого стану канатів, стрижневої чи дротової арматури будівельних конструкцій застосовуються резонансні методи ультразвукового контролю (розд. 3). Це зумовлено тим, що напруга в таких об'єктах контролю виявляється пропорційною квадрату частоти його вільних коливань.

Таким чином, у даному випадку натяг матеріалу у вигляді стрижня викликає не зміну швидкості поширення в ньому пружних коливань, а ускладнює вигинну деформацію його елементів, тобто змінює умови коливання стрижня, що і відбивається на величині вимірюваного параметра.

Практика показує, що для проведення таких вимірів необхідно використовувати п'єзоелектричні прийомні перетворювачі з $f_{\text{рез}} \cong n \cdot 1 \text{кГц}$. При вимірах такий перетворювач закріплюється на контрольному об'єкті і фіксує частоту коливань, збуджених в об'єкті контролю. Вимірювана частота, у більшості випадків, розташовується в діапазоні $f_{\text{рез.о.к.}} \cong 3 \dots 200$ Гц, тобто знаходиться нижче резонансної частоти перетворювача.

Такий метод дає можливість визначати напруги (σ) від 125 до 1400 МПа у матеріалі арматури, виготовленої зі стрижнів діаметром $d = 5 \dots 22$ мм, довжиною $l = 1,5 \dots 18$ м.

4.4.4. Вимір твердості матеріалів

Твердість матеріалу є властивістю поверхні твердого тіла чинити опір деформуванню при місцевому силовому діянні (вдавлюванні) стороннього тіла з більш високим значенням цього параметра. Відповідно до такого визначення цієї характеристики матеріалу, найбільш розповсюдженими методами виміру твердості є визначення її значення по висоті відскоку чи по глибині вдавлювання спеціального елемента (індентора). При вимірі твердості матеріалу за Брінеллем як такий елемент використовується наконечник у вигляді кульки, а при вимірі цієї характеристики за Вікерсом чи Роквеллом – у формі пірамідки. Як правило, індентор виготовляється з алмаза.

Основним недоліком таких методів контролю твердості є складність проведення вимірів на об'єктах контролю складної форми, а також місцеве погіршення чистоти поверхні виробу.

Ультразвуковий метод контролю твердості заснований на застосуванні імпедансного методу (розд. 3). Він дає можливість вимірювати твердість деталей різної форми у важкодоступних місцях. При цьому зміна чистоти поверхні об'єкта контролю є значно нижчою.

Як елемент, що забезпечує введення і прийом ультразвукових коливань у таких пристроях, використовують складений перетворювач. Такий перетворювач являє собою металевий стрижень 1 з алмазним індентором 2 (рис.4.17), у якому збуджуються подовжні коливання під дією випромінюючого п'єзоелемента 3. Цей п'єзоелемент збуджується генератором 4, частота якого керується синхронізатором 5. Стрижень притискають до поверхні об'єкта контролю 6 з постійною силою. Глибина вдавлювання індентора в матеріал об'єкта контролю під дією сили, що притискає, залежить від твердості останнього. З ростом глибини вдавлювання збільшується площа стикання індентора з матеріалом контрольованого виробу.

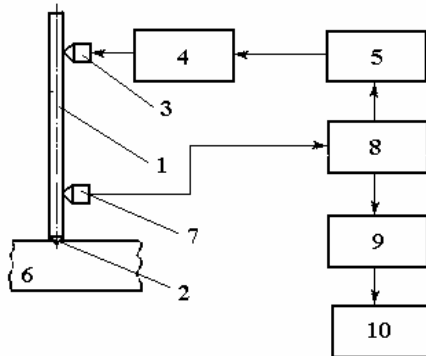


Рис. 4.17 – Функціональна схема ультразвукового вимірювача твердості матеріалів:

- 1 – металевий стрижень; 2 – індентор; 3 – випромінюючий перетворювач;
4 – генератор; 5 – синхронізатор; 6 – об'єкт контролю; 7 – прийомний перетворювач; 8 – підсилювач; 9 – частотомір; 10 – цифровий індикатор

Внаслідок цього змінюються і пружні характеристики контактної зони складеного перетворювача пристрою. При цьому модуль механічного імпедансу $|\xi_n|$ змінюється пропорційно величині:

$$|\xi_n| \sim 1/K \cdot \omega, \quad (4.26)$$

де $|\xi_n|$ – модуль механічного імпедансу; ω – кругова частота.

Прийомний п'єзоелектричний елемент 7 подає на вхід підсилювача 8 гармонійний сигнал з частотою, що відповідає коливанню стрижня. Підсилювач пристрою підсилює цей сигнал. Посилені до необхідної величини ці коливання синхронізують частоту генератора, надходять на стрижень через випромінюючий перетворювач і підтримують його власні коливання. У результаті цього в системі “підсилювач – генератор – стрижень” встановлюються автоколивання з частотою, обумовленою частотою коливань стрижня.

Пружне навантаження змінює власну частоту коливань стрижня на величину Δf , що і є інформативним параметром. Частотомір 9 вимірює цю частоту і подає її на цифровий індикатор 10, показання якого проградуйовані в одиницях шкали твердості. Після проведення вимірів на поверхні об'єкта контролю залишаються відбитки глибиною в кілька мікрометрів.

На практиці для збільшення модуля механічного імпедансу виробу, особливо при його невеликих розмірах, роблять кріплення об'єкта контролю до масивних предметів, а для зменшення механічного імпедансу складеного перетворювача застосовують більш високі частоти порушення складеного перетворювача (30...80 кГц).

Існуючі пристрої дають змогу вимірювати твердість матеріалів від 50 до 990 одиниць шкали Віккерса або від 20 до 68 одиниць шкали Роквелла з похибкою 3...6 %. Навантаження на складений прийомно-випромінюючий пристрій дорівнюють при іспитах – 7,7 Н, глибина впровадження індентора – 5...25 мкм.

4.4.5. Контроль характеристик міцності будівельних матеріалів

Міцність – це здатність матеріалу чинити опір руйнуванню. Испити на міцність виконують на зразках матеріалу, які піддаються впливу зовнішнього навантаження на спеціалізованому устаткуванні, що забезпечує деформації розтягання, стиску, вигину, скручування тощо.

Неруйнівний контроль міцності дає можливість виконувати експресні іспити цієї характеристики безпосередньо на виробках, конструкціях чи спорудах без вирізання зразків. Ультразвукові коливання, що використовуються при неруйнівних іспитах характеризуються малою



Рис. 4.18 – Діаграма “напруга – деформація” для бетону

амплітудою зондувального сигналу. У зв'язку з цим вони викликають пружні деформації матеріалу, що відповідають початковій ділянці кривої “напруга – деформація” (рис.4.18).

Таким чином, використовується область взаємозв'язків “параметри пружних коливань – міцність матеріалу”, характерна для лінійної акустики. У зв'язку з цим прогнозувати за вимірними параметрами ультразвукових коливань поведіння кривої “напруга – деформація” при великих напругах і деформаціях матеріалу аналітично неможливо.

Слід зауважити, що в доповнення до зазначених особливостей формування взаємозв'язку “параметр пружних хвиль – міцність матеріалу” відноситься і неоднозначність впливу, яка спостерігається найчастіше, на параметри цієї залежності особливостей технологічного процесу виготовлення матеріалу об'єкта контролю, умов його експлуатації тощо (розд. 4.4.5, 5.2.7). У зв'язку з цим процес контролю міцності матеріалу практично полягає в побудові кореляційних залежностей “параметр пружних хвиль – міцність матеріалу”.

Для підвищення точності прогнозування міцності в ряді випадків використовують кілька параметрів ультразвукових коливань або додатково вимірюють інші непрямі характеристики властивостей міцності матеріалу за допомогою відповідних методів неруйнівного контролю (розд. 5.5).

Одним із найбільш широко використовуваних інформативних параметрів пружних хвиль, застосовуваних для оцінки міцності матеріалу, є швидкість поширення ультразвукових коливань. Її величина аналітично пов'язана з пружними сталими, що описують початкову ділянку кривої “напруга – деформація”.

Розглянемо основні особливості контролю міцності деяких матеріалів на основі ультразвукових методів.

При контролі міцності полімерних композитних матеріалів, зокрема скловолокна, вуглепластика, оскільки вони відносяться до класу ортотропних матеріалів, установлюється кілька кореляційних залежностей “міцність матеріалу – параметр пружних хвиль”. Це пов'язано з тим, що таке середовище характеризується різними значеннями міцно-

сті залежно від напрямку прикладання зовнішнього навантаження. У зв'язку з цим кореляційна залежність для полімерних композитних матеріалів створюється в координатах “міцність матеріалу в заданому напрямку – параметр пружних хвиль”.

Вимір параметра пружних хвиль також здійснюється у заданому напрямку. Найчастіше для підвищення точності визначення характеристик міцності цих матеріалів використовуються комбіновані методи контролю. Варіація характеристик міцності полімерних композитних матеріалів дає змогу використовувати аналітичну форму попередньо розробленої кореляційної залежності.

Так, наприклад, при використанні комбінованого методу контролю “швидкість і коефіцієнт загасання ультразвукових коливань – міцність матеріалу” для склопластику застосовується такий вид аналітичного виразу кореляційної залежності:

$$\sigma_b = E \left[a + \frac{b}{(\alpha \cdot c)} \right], \quad 18)$$

де E – модуль нормальної пружності матеріалу; a і b – коефіцієнти кореляційної залежності, обумовлені при іспитах контрольних зразків матеріалу; α , c – відповідно коефіцієнт загасання і швидкість ультразвуку в матеріалі, обмірювані в заданому напрямку.

Методика виміру полягає в ось у чому. При вимірах здійснюють випромінювання ультразвукових головних хвиль на двох фіксованих базах виміру l – 100 і 200 мм. Вимірюють параметри швидкості пружних хвиль і коефіцієнта загасання. Отримані дані використовують для обчислення міцності матеріалу за формулою (4.18).

У деяких випадках застосовуються методики контролю, в яких, наприклад, використовуються кореляційні зв'язки міцності матеріалу з такими параметрами як швидкість (c) і частота ультразвукових коливань, на якій спостерігається максимум амплітуди відбитого сигналу (f_{\max}) або швидкість поширення пружних хвиль (c) і діелектрична проникність матеріалу (ϵ).

Слід зазначити, що кореляційна залежність “параметр контролю, що не руйнує – міцність матеріалу”, установлена для міцності матеріалу у визначеному напрямку структури ортотропного чи трансверсально-ізотропного матеріалу, є незастосовною для визначення його міцності в інших напрямках. З цього випливає, що для кожного з напрямків структури ортотропного чи трансверсально-ізотропного матеріалу, кореляційні залежності повинні бути встановлені окремо.

Одним з наступних напрямків використання пружних хвиль є технологічний контроль твердіння поліефірної смоли в полімерних композитних матеріалах за зміною швидкості ультразвуку (розд. 7). У процесі твердіння поліефірної смоли швидкість поширення пружних хвиль у склопластику асимптотично підвищується до максимуму, що спостерігається в полімеризованому матеріалі. По цьому параметрі і фіксується час закінчення процесу полімеризації матеріалу.

Другим з розглянутих способів технологічного контролю полімерних композитних матеріалах є вимір зміни частотного спектра наскрізного або відбитого сигналу (рис. 4.19). Для реалізації цього методу застосовують широкополосні зондувальні імпульси з максимумом амплітуди на частоті $f_{\max} \approx 150$ кГц. У процесі твердіння матеріалу частота інформаційного сигналу з максимальною амплітудою змінюється від величини $f_{\min} \approx 20 \dots 25$ кГц у початковий термін полімеризації до значення $f_{\max} \approx 144$ кГц (рис. 4.19).

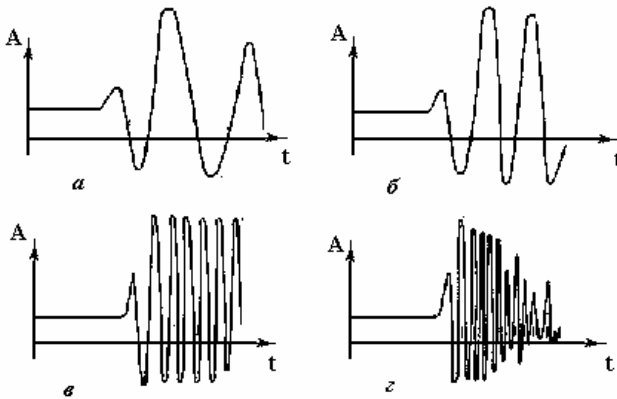


Рис. 4.19 – Зміна частоти інформаційного сигналу від часу полімеризації поліефірної смоли, год.:
a – 3; *б* – 6; *в* – 24; *г* – 48

Наступним напрямком використання ультразвукових методів є контроль клейових з'єднань на міцність і наявність дефектів. У цьому випадку застосовується ревербераційний метод і метод змушених коливань (розд. 3).

Метод змушених коливань застосовують при товщині верхнього шару клейової конструкції не більше половини довжини хвилі (λ). Так само як у локальному методі змушених коливань (розд. 3), визначають резонансні частоти, на яких досягається максимум амплітуди коливань

системи “п’єзоелемент – шар контактної рідини – об’єкт контролю”. Вимірюваним інформаційним параметром при цьому є зниження резонансної частоти в порівнянні з частотою неприклесного верхнього шару клейової конструкції. Чим більше зсуву резонансної частоти, тим вище міцність клейового з’єднання.

При другому способі контролю міцності клейового з’єднання фіксують зміну добротності коливач системи “п’єзоелектричний перетворювач – шар контактної рідини – об’єкт контролю”. З підвищенням міцності клейового з’єднання збільшується передача енергії коливач від верхнього шару до інших елементів клейової конструкції. У результаті цього добротність системи зменшується. Це приводить до зменшення амплітуди резонансу коливач і розширенню смуги резонансного піка.

Широке застосування знайшов контроль міцності бетону за швидкістю поширення ультразвукових коливач. Залежність величини швидкості подовжніх хвиль (c) від міцності бетону зображають у виді кореляційних залежностей (розд. 5.7.2) чи аналітичними виразами, наприклад:

$$R_{ct} = B \cdot V^i, \quad (4.19)$$

де B – коефіцієнт, що визначається шляхом іспиту на стиск бетонних зразків у вигляді кубів зі стороною 100...200 мм у кількості $N > 10$.

Зі збільшенням міцності бетону похибка її оцінки збільшується. При середній міцності бетону $R_{ct} \approx 10$ МПа похибка у вимірі швидкості ультразвуку в 1 % спричиняє помилку у вимірі міцності 3,5 %.

Для бетону міцністю $R_{ct} \approx 25$ МПа ця помилка зростає до 6 %. Для контролю бетону міцністю $R_{ct} > 50$ МПа ультразвуковий метод не застосовують у зв’язку зі значним зростанням похибки виміру.

Поширення пружних хвиль у бетоні характеризується значним загасанням високочастотних ультразвукових коливач. У зв’язку з цим при контролі міцності бетону застосовуються низькі частоти, які характеризуються величинами $f < 100$ кГц.

У більшості випадків контроль міцності виконують ультразвуковим імпульсним методом наскрізного чи поверхневого прозвучування бетону (розд. 3). В останньому випадку база виміру встановлюється в межах $l = 100...300$ мм. Метод розміщення перетворювачів на одній поверхні (метод поверхневого прозвучування) рекомендується застосовувати для виробів з однією доступною поверхнею і при визначенні поверхневих дефектів у бетоні.

Результати контролю, що одержують методом поверхневого прозвучування, визначають властивості шару бетону завтовшки 3-5 см від досліджуваної поверхні. Наскрізне прозвучування визначає властивості всієї товщини досліджуваного бетону.

Наведемо практичні рекомендації, які сформувалися як у наслідку досліджень авторів, так по наявних публікаціях.

При вимірах слід уникати розміщення перетворювачів контрольно-вимірювального пристрою з боку укладання бетону або поблизу кута виробу чи конструкції.

Точки установки перетворювачів при іспитах розміщають на відстані $l > 8...12$ см від грані елемента.

Як виняток дозволяється змінювати ці рекомендації в наступних випадках:

- при контролі плит з однією доступною поверхнею, коли вона є стороною, з якої укладається бетон;
- у випадку, коли необхідний шар бетону підвищеної якості з боку укладання..

Важливою умовою одержання достовірних результатів виміру є вибір місця установки перетворювачів.

Залежно від типу конструкції рекомендується наступне розміщення точок виміру [14, 23]:

- при контролі якості бетону в зразках, виготовлених у вигляді куба рекомендується вимірювати швидкість поширення ультразвукових коливань у трьох точках, якщо сторона куба дорівнює 20 см, і мінімум у двох точках, якщо сторона куба дорівнює 10 см;
- при контролі якості бетону колон з доступними сторонами установка перетворювачів виконується в найбільшому поперечному перерізі, але не менше, ніж у трьох місцях: 1 – у підставі, 2 – у середині, 3 – у верхній частині колони. У кожному перерізі вибирають точки у двох напрямках щодо перетину колони. Мінімальна кількість точок іспиту по одній стороні колони складає 2-3 залежно від поперечних розмірів колони;
- при контролі якості бетону в балках, установлених на двох опорах з невеликим прогоном, виміри виконують у 2- 3 розрізах, у зоні максимального моменту і мінімум у 2-3 точках у перерізах по всій стисненій зоні;
- при контролі якості бетону в балках, установлених на двох опорах з великим прогоном, як і в попередньому випадку, іспити проводять у зоні максимального моменту і додатково – у зоні максимальних сколюючих напруг, у двох поперечних перерізах на

кожній стороні балки. Точки контролю слід розташовувати по всій ширині балки;

- при контролі якості бетону в нерозрізних балках чи ригелях виміри необхідно виконувати в трьох зонах: на кожній опорі й у 2-3 розрізах на кожній прольоті;
- при контролі якості бетону в балках з наступною напругою арматури виміри виконують на їхніх торцях перед передачею натягу, а також у зоні максимального моменту після натягу арматури;
- при контролі якості бетону в попередньо напружених балках виміри необхідно робити в середині прогону в зоні максимального моменту. Якщо переріз балки в середині прольоту тонше, то в цьому місці також рекомендується перевірка міцності бетону;
- при контролі якості бетону в плитах, установлених на двох опорах, виміри роблять у прогоні, у двох взаємно перпендикулярних напрямках, розташованих під кутом 45° до покладеної арматури, а також у стисненій частині плити не менше, ніж у трьох точках у кожнім напрямку. Частина точок виміру потрібно розташувати у прогоні з верхньої сторони плити і поблизу опори з нижньої сторони;
- при контролі якості бетону в залізобетонних стінках визначення міцності бетону необхідно проводити в зоні однієї з арматурних сіток зі стороною 0,5...1 м, у точці, найбільш віддаленій від арматури.

Ультразвук застосовують також для контролю процесу тужавлення бетону в природних умовах або при його прискореному тужавленні (розд. 7.1).