

## ***Тема 6 Вихрострумівий контроль***

*Мета вивчення теми* – ознайомлення з сутністю вихрострумівого методу, технологію проведення контролю та галуззю його застосування.

План лекції:

- 6.1 Основні положення. Переваги та недоліки.
- 6.2 Вихроструміві перетворювачі: будова, різновиди та принцип роботи.
- 6.3 Технологія проведення контролю.
- 6.4 Обладнання для проведення контролю.

### **6.1 Основні положення. Переваги та недоліки**

Вихрострумівий метод неруйнівного контролю заснований на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться в об'єкті контролю цим полем.

Сутність методу полягає у наступному. На контрольовану деталь накладається мініатюрна котушка (датчик), що живиться струмом високої частоти. Під впливом електромагнітного поля котушки у певному обсязі металу збуджуються вихрові струми, які течуть у поверхневих шарах матеріалу по кільцевих концентричних колах. Середній діаметр траєкторії вихрових струмів (пляма вихрових струмів) можна порівняти з діаметром котушки (1,0-1,6 діаметра котушки). Величина збуджуваних струмів залежить від багатьох параметрів, таких як величина та частота змінного струму, властивостей матеріалу деталі, електропровідність, магнітна проникність, форма виробу, відносне розташування котушки та виробу, а також від наявності у виробі неоднорідностей чи несплошностей. Чим більша частота збудливого струму, електропровідність та магнітна проникність матеріалу деталі, тим менша глибина, на якій можуть бути наведені вихрові струми в металі. Вихрові струми створюють у певному обсязі матеріалу вторинне електромагнітне поле. Взаємодія цих двох магнітних полів породжує зміни повного опору котушки, що створює магнітне поле та ЕРС, що наводиться в додатковій котушці, яка називається вимірною. Саме поле цих змінних струмів аналізується при контролі, реєструється за допомогою приладів, які дозволяють оператору отримати важливу інформацію про властивості та стан об'єкта контролю.

Напрямок вихрових струмів визначається фізичними та електричними характеристиками об'єкта контролю: вихрові струми огинають тріщини, віддаючи перевагу зонам з більш високою провідністю.

Умовний контур вихрових струмів на бездефектному зразку (рис. 6.1, а) і зразку із дефектом (рис.6.1, б) представлені на рис.6.1.

У дефектоскопії метод вихрових струмів застосовують для індикації та оцінки поверхневих та підповерхневих дефектів, а також для вимірювання товщини покриттів або шарів, визначення електричної провідності та магнітної проникності матеріалу, оцінки металургійних, механічних та інших властивостей виробу.

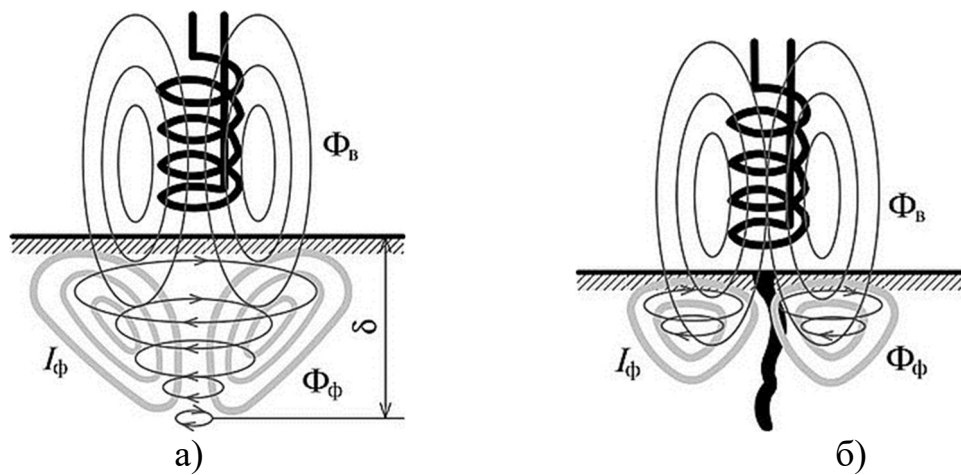


Рисунок 6.1 – Умовний контур вихрових струмів на бездефектному зразку (а) і зразку із дефектом (б)

Найбільшу щільність вихрові струми мають на поверхні металу, і в міру заглиблення в метал відбувається їхнє загасання. Цей процес називається магнітним поверхневим ефектом, для кількісної оцінки якого використовують показник глибини проникнення. Глибина проникнення – це відстань від поверхні об'єкту контролю до шару, у якому щільність вихрових струмів у  $e$  разів менше, ніж поверхні ( $e=2.7183$ ), або як відстань, у якому вихрові струми згасають на 37%, проти поверхнею.

Вихрові струми мають наступні властивості:

- траєкторія вихрових струмів спрямована паралельно до обмотки котушки;
- вихрові струми протікають шляхом найменшого опору;
- З поглибленням у провідний матеріал, амплітуда вихрових струмів зменшується, вихрові струми зсуваються по фазі щодо струмів на поверхні, сила вихрових струмів та магнітного потоку слабшає, виникає запізнення по фазі вихрових струмів.

Вихрострумий метод володіє наступними перевагами:

- висока точність та відтворюваність виявлення дефектів;
- можливість контролю об'єктів, що перебувають у русі;
- висока швидкість контролю;
- мінімальні вимоги до стану поверхні;
- можливість контролю через покриття;
- можливість контролю об'єктів із складною геометрією, місць важкого доступу;
- можливість контролю під водою;
- проведення контролю без безпосереднього контакту перетворювача з об'єктом;
- здатність розрізняти типи дефектів;
- відсутність необхідності створення контактної середовища, відсутність потреби у витратних матеріалах;
- метод не становить небезпеки для здоров'я оператора.

До недоліків методу слід віднести те, що перевірки підлягають провідники, обмеженість глибини проникнення у матеріал (до 7 мм). Дефекти, розташовані паралельно зонду, можуть залишитися непоміченими.

## **6.2 Вихрострумові перетворювачі: будова, різновиди та принципи роботи**

Вихрострумний перетворювач (ВСП) являє собою пристрій з однієї або декількох індуктивних котушок, які збуджують вихрові струми і перетворюють електромагнітне поле досліджуваного об'єкту в сигнал для передачі на електронний блок дефектоскопа. Перетворювач – важливий атрибут, без якого неможливе проведення вихрострумного контролю. Робоча поверхня перетворювача підлягає щоденному огляду з допомогою лупи з діапазоном збільшення від 2 до 6 крат. При найменших механічних пошкодженнях датчик відбраковується. При зміні датчику дефектоскоп піддають додатковій перевірці.

Конструкції ВСП визначаються їх призначенням, умовами застосування, діапазоном частот струму збудження та іншими факторами. Тому вони дуже різноманітні. Розміри котушок коливаються від кількох міліметрів до 500 мм.

Основні вимоги до котушок - міцність, зносостійкість, захищеність від зовнішніх впливів, можливість доступу до зони контролю, зручність експлуатації, ергономічність та відповідність вимогам технічної естетики, взаємозамінність, контроле- та ремонтпридатність, надійність.

Простота конструкції перетворювача – ще одна перевага вихрострумного методу. Найчастіше котушки поміщають запобіжний корпус і заливають компаундами. завдяки цьому вони стійкі до механічних та атмосферних впливів, можуть працювати в агресивних середовищах у широкому інтервалі температур та тисків. Конструкція перетворювача зазвичай містить такі складові: одну або кілька котушок; корпус для розміщення котушок; засоби стабілізації положення котушок щодо об'єкту контролю; засоби для розміщення ВСП у заданому положенні щодо об'єкту контролю; у процесі контролю; роз'єми, кабелі.

Вихрострумові перетворювачі за способом вимірювання електромагнітних полів класифікуються на параметричні та трансформаторні. У параметричних датчиках лише одна обмотка, яка виконує функції збудження та вимірювання одночасно. При цьому дані контролю одержують, вимірюючи комплексний опір ВСП (рис. 6.2). У трансформаторних перетворювачах не менше 2 обмоток, одна з яких генератор, інша використовується для вимірювання параметрів ("вимірювальна обмотка", рис. 6.3).

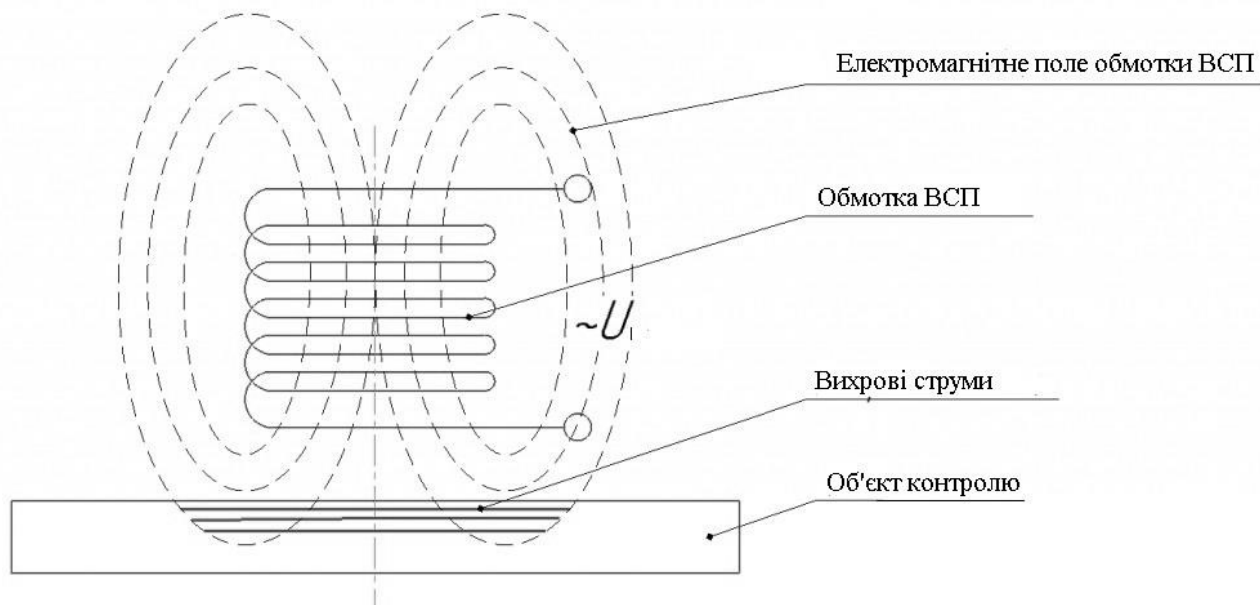


Рисунок 6.2 - Параметричні ВСП

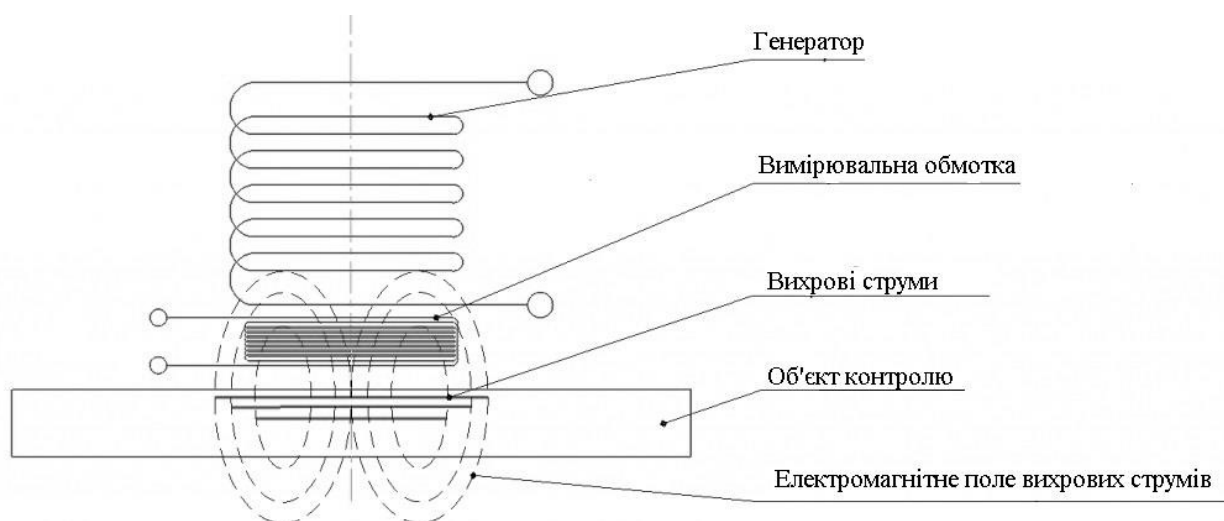
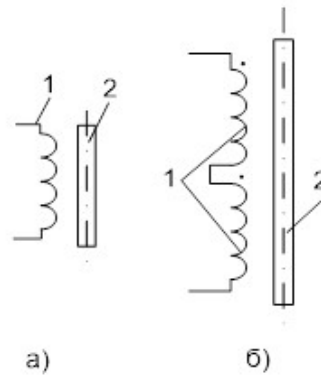


Рисунок 6.3 – Трансформаторні ВСП

Перевага параметричних ВСП полягає в їх простоті, а недолік – залежність від вихідного сигналу від температури перетворювача

Залежно від способу з'єднання обмоток, ВСП поділяються на абсолютні та диференціальні. В абсолютних ВСП вихідний сигнал – це абсолютне значення параметрів об'єкта контролю (рис.6.4,а). Диференціальними ВСП прийнято називати перетворювачі, які мають не менше 2-х вимірювальних обмоток, включених зустрічно (рис. 6.4, б). Це дозволяє вимірювати різницю показань вимірювальних обмоток.



1 – збуджувальна обмотка, 2 – об’єкт контролю

Рисунок 6.4 – Абсолютні (а) та диференційні (б) ВСП

По взаємному розташування об’єкта контролю та перетворювача розрізняють накладні, прохідні та комбіновані ВСП.

Накладні ВСП зазвичай складаються з однієї або декількох котушок, до торців яких підводиться поверхня об’єкта. Котушки таких перетворювачів можуть бути круглими коаксіальними, прямокутними, прямокутними хрестоподібними, із взаємно перпендикулярними осями та ін.

Накладні перетворювачі виконують з феромагнітними сердечниками або без них. Завдяки феромагнітному сердечнику (зазвичай феритовому) дещо підвищується абсолютна чутливість перетворювача та зменшується зона контролю за рахунок локалізації магнітного потоку (рис.6.5).

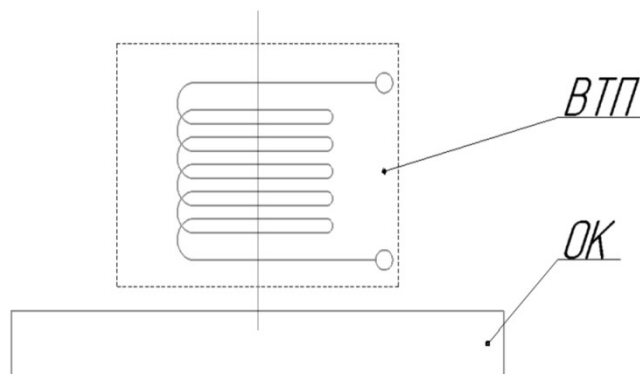
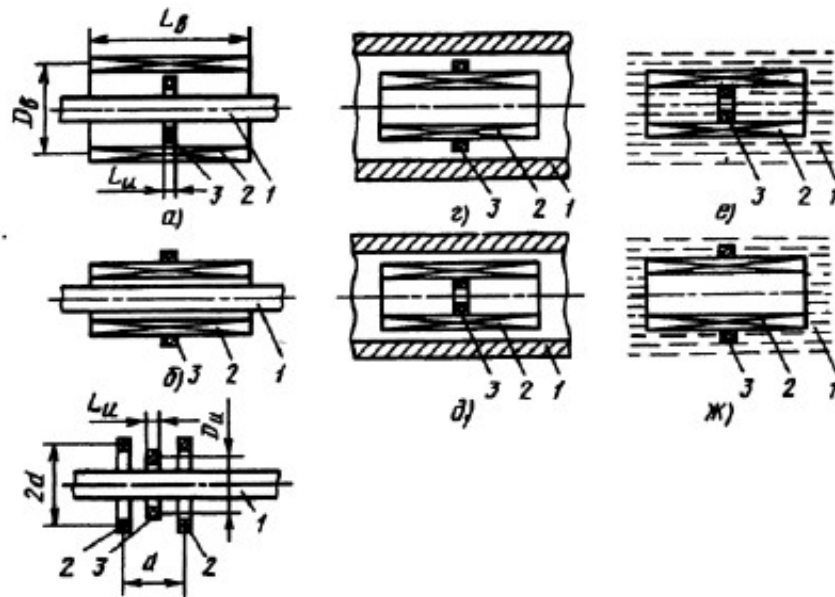


Рисунок 6.5 – Накладні ВСП

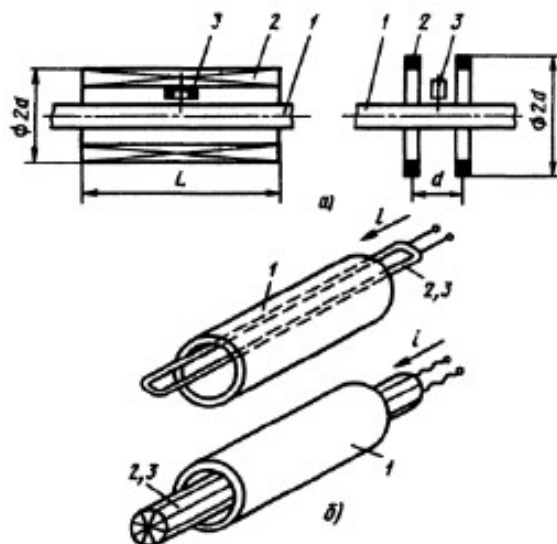
Прохідні ВСП поділяють на зовнішні, внутрішні, занурювальні. Відмінна риса прохідних ВСП в тому, що в процесі контролю вони проходять або зовні об’єкта, охоплюючи його (зовнішні, рис. 6.6 а-в), або всередині об’єкта (внутрішні, рис. 6.6 г, д), або занурюються в рідкий об’єкт ( занурювальні, рис.6.6, е, ж). Зазвичай прохідні ВТП мають однорідне магнітне поле у зоні контролю, у результаті радіальні зміщення однорідного об’єкта контролю впливають вихідний сигнал перетворювача. Для цього довжина  $L$  збуджувальної обмотки повинна не менше ніж у 3-4 рази перевищувати її діаметр  $D$ , а довжина  $L_u$  вимірювальної обмотки, розміщеної в середині збуджувальної обмотки, повинна бути значно меншою за довжину останньої. Однорідне поле отримують

також, застосовуючи збуджувальну обмотку, виконану у вигляді кільця Гельмгольца, а вимірювальну – у вигляді короткої котушки.



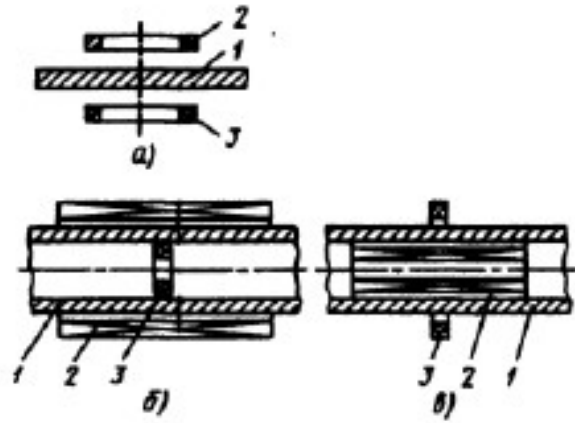
1 – об'єкт контролю, 2 – збуджувальна обмотка, 3 – вимірювальна обмотка  
Рисунок 6.6 – Прхідні ВСП

Комбіновані перетворювачі є комбінацією накладних і прохідних ВСП. На рис. 6.7 а показані деякі різновиди комбінованих ВТП. До них відносяться також ВТП у вигляді лінійно-протяжних витків або рамок, які можна умовно назвати лінійними (рис. 6.7, б).



1 – об'єкт контролю, 2 – збуджувальна обмотка, 3 – вимірювальна обмотка  
Рисунок 6.7 – Комбіновані ВСП

Особливим різновидом є екранні ВСП, що відрізняються тим, що їх збуджувальні та вимірювальні обмотки розділені контрольованим об'єктом. Розрізняють накладні екранні ВТП (рис. 6.8, а) та прохідні екранні ВТП – відповідно перетворювачі першого та другого типів (рис. 6.8, б, в).



1 – об'єкт контролю, 2– збуджувальна обмотка, 3 – вимірювальна обмотка  
Рисунок 6.8 – Екранні ВСП

Накладними ВСП контролюють здебільшого об'єкти з плоскими поверхнями та об'єкти складної форми. Ці перетворювачі застосовують також, коли потрібно забезпечити локальність та високу чутливість контролю. Зовнішніми прохідними ВСП контролюють лінійно протягнуті об'єкти (дрот, прутки, труби тощо); застосовують їх і за масового контролю дрібних виробів. Внутрішні прохідні ВСП контролюють внутрішні поверхні труб, а також стінки отворів у різних деталях. Прокідні ВСП вони мають меншу чутливість до локальних варіацій його властивостей.

Занурювальні ВСП застосовують для контролю рідких середовищ, екранні накладні – для контролю листів, фольги, тонких плівок, а екранні прохідні – для контролю труб.

### 6.3 Технологія проведення контролю

Перед початком контролю необхідно візуально переконатись у відсутності тріщин та інших механічних пошкоджень на контрольованій поверхні. Конструкції та деталі, що мають тріщини, виявлені візуально, бракують. Механічні задираки в зоні контролю видаляють.

При налаштуванні дефектоскопа та перевірці впливу на чутливість контролю нахилу перетворювача, не слід допускати притиску перетворювача до контрольного зразка та контрольованої поверхні з зусиллям, що значно перевищує вагу перетворювача.

Вісь перетворювача при налаштуванні та проведенні контролю, у тому числі при його переміщенні по контрольованій поверхні, має бути перпендикулярна поверхні.

Контроль здійснюють послідовним скануванням контрольованої поверхні перетворювачем.

Сканування здійснюють перпендикулярно до напрямку очікуваного розвитку дефекту. Тільки у разі неможливості такого сканування допускається проведення контролю скануванням під кутом до напрямку передбачуваного дефекту. Крок сканування вибирають з урахуванням необхідної чутливості та напрямку сканування. За невідомої орієнтації можливих дефектів для досягнення

максимальної чутливості зону контролю необхідно сканувати у двох взаємно перпендикулярних напрямках з кроком сканування не більше 2 мм. При впливі факторів, що заважають, крок сканування вибирають мінімально можливим.

Швидкість контролю визначається технічними характеристиками дефектоскопа. Швидкість контролю за допомогою стрілочної індикації обмежується значенням 5 мм/с. Швидкість контролю з використанням світлової безінерційної (світлодіодної) сигналізації за відсутності засвітки від зовнішнього освітлення та розташування індикатора в полі зору оператора може досягати 10-20 мм/с. Така сама швидкість може бути обрана і для дефектоскопів зі звуковою сигналізацією в умовах низького шуму. Для дефектоскопів із запам'ятовує сигналізацією швидкість контролю не обмежується і повністю визначається їх технічними характеристиками.

При контролі слід провести розмітку контрольованої поверхні на зони контролю з урахуванням конфігурації об'єкта контролю або окремої контрольованої ділянки. Для зручності роботи оператора площа зони контролю має перевищувати 1-2 дм<sup>2</sup>.

Контроль кожної зони слід починати з налаштування (компенсації) дефектоскопа під час встановлення перетворювача на бездефектному ділянці у цій зоні контролю. Перевірку правильності вибору бездефектної ділянки проводять таким чином:

- встановлюють перетворювач у зоні контролю та проводять налаштування дефектоскопа;
- переміщують перетворювач на кілька міліметрів у різних напрямках усередині зони контролю.

Відсутність сигналізації про дефект свідчить про відсутність дефектів у місці налаштування.

#### **6.4 Обладнання для проведення контролю**

Обладнання, призначене для проведення вихрострумового контролю в залежності від різновиду напряму контролю можна поділити на три групи:

- вихрострумові дефектоскопи (вихрострумова дефектоскопія);
- вихрострумові товщиноміри (вихрострумова товщинометрія);
- вихрострумові структуроскопи (вихрострумова структуроскопія, феритометрія).

**Вихрострумовий дефектоскоп** – прилад, заснований на методах вихрострумового неруйнівного контролю і призначений для виявлення дефектів об'єкта контролю типу порушеної суцільності.

Сучасний вихрострумовий дефектоскоп є компактним приладом з автономним живленням, оснащений екраном, клавіатурою і датчиками з можливістю виведення необхідних параметрів на різні пристрої, включаючи персональний комп'ютер, принтер, що запам'ятовує пристрій. Сучасні багатофункціональні вихрові дефектоскопи здатні як аналізувати контрольовані ділянки, а й обробляти інформацію з наданням розгорнутого технічного звіту, як і лабораторних, і у польових умовах.

Дефектоскопи можна класифікувати за такими ознаками:



– по вигляду об'єкту контролю розрізняють дефектоскопи контролю об'єктів з плоскими поверхнями і складної форми; лінійно-протяжні об'єкти, дрібні деталі масового виробництва;

– за режимом роботи: дефектоскопи для роботи у статичному та динамічному режимах та універсальні;

– за типом застосовуваних ВСП бувають: дефектоскопи з прохідними та накладними ВСП, а також універсальні дефектоскопи;

– за конструктивним виконанням: стаціонарні, переносні, портативні.

Головними параметрами дефектоскопа:

– поріг чутливості визначає мінімальні розміри дефекту заданої форми;

– роздільна здатність – мінімальна відстань між двома дефектами;

– максимально допустиме зменшення вихідного сигналу дефектоскопа зі збільшенням відстань між торцем ВСП і поверхнею деталі;

– мінімальна відстань (мм) між ВСП та краєм деталі, при якому зміна вихідного сигналу перетворювача не перевищує заданого значення;

– максимальна продуктивність контролю.

**Вихрострумний товщиномір** - прилад, заснований на методах вихрострумного неруйнівного контролю та призначений для вимірювання товщини об'єкта контролю.

В залежності від призначення та характеристик об'єкту контролю товщиноміри підрозділяються на товщиноміри для ізоляційних покриттів на електропровідних основах (лакофарбові покриття, емалеві, пластикові, гумові покриття та металах та сплавах), електропровідних покриттів на ізоляційних основах (стілки труб, фольги, листів) та електропровідні покриття на електропровідних основах (антикорозійні шари на алюмінієвих сплавах).

Зазвичай вихрострумні товщиноміри застосовуються для вимірювання товщини неметалічних покриттів на основі кольорових металів. Основи із чорних металів мають ненормований опір, в результаті на таких основах з'являється дуже велика похибка вимірювання та застосування вихрострумних товщиномірів стає неможливим.

Максимальні вимірювані товщини досягають немагнітні сплави 15 мм - магнітні сталі 5 мм.

**Вихрострумний структуроскоп** – прилад, заснований на методах вихрострумного неруйнівного контролю та призначений для контролю фізико-механічних властивостей об'єктів, пов'язаних зі структурою, хімічним складом та внутрішнім напруженням їх матеріалів.

Вихрострумний структуроскоп виробів заснована на вимірі та оцінці змін питомої електричної провідності. Структуроскопи ще називають вимірниками електричної провідності.

Питома електрична провідність визначається температурою та відносною концентрацією вихідних матеріалів. Вихрострумні структуроскопи дозволяють оцінити:

– хімічний склад електропровідних матеріалів;

– сортування матеріалів (виробів);

– виявляти неоднорідні зони в матеріалі, зони втоми;

– оцінювати глибину та якості обробок різного виду (механічна, термічна);

– контролювати якість поверхневих шарів.

Для сортування виробів за допомогою структуроскопів необхідно провести попереднє дослідження на об'єктах, контрольованих з подальшим порівнянням результатів іншими методами неруйнівного контролю.

### **Питання для самоперевірки**

1. На яких засадах базується вихрострумний контроль?
2. Які матеріали можуть підлягати контролю цим методом?
3. Галузь застосування методу.
4. Переваги та недоліки вихрострумного методу контролю.
5. З яких основних елементів складається вихрострумний перетворювач?
6. Які види перетворювачів розрізняють в залежності від орієнтації перетворювача до поверхні контролю?
7. Які види перетворювачів розрізняють в залежності за способом вимірювання електромагнітних полів?
8. Які види перетворювачів розрізняють в залежності за способом з'єднання обмоток?
9. Які основні етапи проведення контролю?
10. Що таке вихрострумний дефектоскоп?
11. Принцип дії вихрострумного товщиноміра.
12. Які параметри фіксує вихрострумний товщиномір.

## ***Тема 7 Акустичний контроль***

*Мета вивчення теми* – ознайомлення з загальною методологією та видами акустичного контролю.

План лекції:

- 7.1 Фізичні основи методу.
- 7.2 Способи збудження ультразвукових коливань.
- 7.3 Випромінювачі й приймачі ультразвукових коливань. Класифікація п'єзоелектричних перетворювачів.
- 7.4

### **6.1 Фізичні основи методу**

Початок використання акустичного (ультразвукового) контролю в промисловості ставиться приблизно до 50-м рокам минулого століття.

Ультразвуковий контроль знайшов широке застосування в практиці дефектоскопії виробів. На його частку доводиться 32% обсягу контролю всіх виробів.

Основним передумовами розвитку ультразвукових методів були:

1) відкриття 1880-1881 г. М. Жаком і Пьером Кюрі оборотного п'єзоелектричного ефекту, що дозволило використовувати кварц як перетворювач електричних коливань в ультразвукові.

2) розробка лордом Релеєм в 1885-1910 роках теорії поширення звуку у твердих речовинах.

3) розробка М.Ланжевенем луна-імпульсного способу виявлення відбивачів 1915-1917 роках.

Цей метод заснований на аналізі процесу поширення порушених в матеріалі пружних ультразвукових хвиль. Якщо на шляху поширення хвилі зустрічають дефекти у вигляді тріщин, непроварів, газових пор, шлаку, неметалевих включень, акустичні властивості, яких різко відрізняються від властивостей матеріалу, з якого виготовлена деталь, то вони відображаються.

**Звук**— це механічні коливання, які поширюються в пружному середовищі (повітрі, воді, твердих тілах).

**Коливання** — цей рух навколо деякого середнього положення, що характеризується повторюваністю (наприклад коливання маятника). Будь-яке коливне тіло прагне до положення рівноваги.

Процес поширення ультразвуку в просторі є хвильовим.

**Хвилі** — коливальні рухи, що поширюються в просторі: коливання однієї крапки передаються сусідньої і т.д.

Хвилі характеризуються наступними параметрами:

1) **Довжина хвилі  $\lambda$  (м)** — це відстань між двома частками середовища, що перебувають в одному коливальному стані.

2) **Амплітуда  $A$  (Дб)** — це максимальне відхилення коливної частки від стану спокою.

3) **Частота  $f$  (Гц)** — це кількість повних коливань часток середовища в одиницю часу.

4) **Період  $T$  (с)** — це час одного повного коливання.

5) Поширення хвилі відбувається з певною швидкістю, яку називають **швидкістю ультразвукової хвилі** (м/с). Швидкість звуку — це фізична константа середовища, яке залежить тільки від її властивостей. Швидкість звуку не можна змінити за рахунок частоти або довжини хвилі.

Інфразвук < 16 Гц                      Звук 16 – 20000 Гц                      Ультразвук  
20000 – 109 Гц

Гіперзвук >109 Гц                      Теплові коливання >10<sup>12</sup> Гц    1кГц = 10<sup>3</sup> Гц,  
1мГц = 10<sup>6</sup> Гц

В ультразвуковій дефектоскопії використовуються частоти від 0,6 до 10 МГц.

В акустичному контролі використовуються різні типи хвиль, що відрізняються напрямком коливань, розподілом амплітуд коливань і хвиль у середовищі, швидкістю поширення хвиль. В акустиці різні типи хвиль прийнято називати модами.

Якщо частки середовища коливаються в напрямку, що збігаються з напрямком поширення хвилі, то такі хвилі називаються **поздовжніми (хвилі стиску-розтягання),  $l$** .

Якщо частки середовища коливаються перпендикулярно напрямку поширення хвилі, то такі хвилі називаються **поперечними (хвилі зрушення)**. Швидкість поперечних хвиль практично у два рази менше, чим у поздовжніх.

**Поверхневі хвилі** (хвилі Релея) поширюються уздовж вільної поверхні твердого тіла.

Поверхнева хвиля є комбінацією поздовжніх і поперечних хвиль. Площина, у якій коливаються частки середовища перпендикулярна до поверхні. Поверхневі хвилі можуть поширюватися на більші відстані, як по плоскій так і по вигнутій поверхні виробу. Глибина їх поширення не більш однієї довжини хвилі.

$C_s$  – швидкість поширення поверхневих хвиль.  $C_s = 0,93 C_t = 0,51 C_l$

Застосування цих хвиль ефективно для виявлення дефектів на поверхні (ризика, задири, тріщини)

Для всіх перерахованих хвиль швидкість не залежить від частоти. Вона залежить від модуля об'ємної пружності (модуля Юнга) і щільності середовища. В обмежених твердих тілах (пластинах, стрижнях, поперечні розміри яких перевершують довжину хвилі не більш ніж в 2-3 рази, існують **хвилі в пластинах (нормальні хвилі або хвилі Лемба) і в стрижнях (Похгаммера)**. Швидкість їх поширення змінюється залежно від частоти (явище дисперсії), пружних властивостей матеріалу й поперечних розмірів пластини або стрижня. Нормальні хвилі (хвилі Лемба) можуть поширюватися в тонких пластинах або виробках з товщиною, порівнянної з довжиною хвилі. Вони заповнюють усю товщину пластини. Нормальні хвилі застосовують для УЗК тонких аркушів, оболонок, а хвилі в стрижнях — для контролю дроту.

**Питомий акустичний опір середовища або акустичний імпеданс ( $z$ )** – це добуток щільності середовища на швидкість поширення ультразвуку в данім середовищі.

$$z = \rho \cdot C,$$

В ультразвуковій дефектоскопії використовується відбиття ультразвукових хвиль від поверхонь дефектів у металі, які можна розглядати як границю роздільності метал-повітря. Чим більше різняться акустичні опори дефектів від загальної маси метала, тем простіше їх виявити, тому що в цьому випадку більша частина ультразвукової енергії буде відбиватися від дефектів.

Ультразвукова хвиля в напрямку свого руху несе певну енергію, яку випроменило джерело. Кількість енергії, стерпне хвилею за 1 секунду через  $1 \text{ див}^2$  майданчики, перпендикулярної до напрямку поширення ультразвукової хвилі називається **інтенсивністю ультразвуку**.

У міру поширення ультразвукової хвилі інтенсивність її падає. Це обумовлене розбіжністю й загасанням.

**Загасанням ультразвукових коливань** називається зменшення амплітуди коливань часток у звуковій хвилі, викликане процесами розсіювання й поглинання.

При розсіюванні енергія залишається механічної, але йде зі спрямованого поширення хвилі в результаті відбиттів на границях зерен і неоднородностей. Розсіювання пов'язане з тим, що середовище не є строго гомогенним. Вона містить кристали, на границях яких акустичний опір змінюється, тому що кристали або окремі складові речовини мають різну щільність. Для деяких

матеріалів це пов'язане з тим, що вони являють собою сплав зерен різних компонентів (феррита й графіту). Для інших матеріалів – з наявністю пор і сторонніх включень.

При поглинанні механічна енергія коливань переходить у теплову. Поглинання буде тим більше, чим менше довжина хвилі й відповідно чим більше частота.

Обидві складові загасання створюють певні труднощі при ультразвуковому контролі. Поглинання зменшує амплітуду минаючих сигналів. А розсіювання не тільки зменшує рівень сигналів, відбитих від дефектів, але й створює численні шумові імпульси на екрані дефектоскопа, пов'язані з відбиттями від граней кристалів.

## **5.2 Способи збудження ультразвукових коливань.**

Для випромінювання й приймання пружних коливань і хвиль застосовують різні способи. Усі вони засновані на перетворенні енергії. У найпростішому випадку таке перетворення може відбуватися без зміни виду енергії ( удар молотка) Однак частіше порушення й приймання пружних коливань супроводжується зміною виду енергії ( з електричної в механічну й навпаки).

Існує кілька способів одержання ультразвукових коливань. Розглянемо деякі з них:

- 1) механічний
- 2) магнитоотражательный
- 3) п'єзоелектричний

Якщо необхідно збуджувати ультразвукові коливання в повітрі або газах, то звичайно застосовують механічний спосіб. До механічних способів відносять свистки, сирени і т.д.

Частота коливань у механічних випромінювачах від 10 д 500 кгц.

**Магнітоотражательный** означає зміну форми й розмірів тіла при намагнічуванні. Якщо до намагніченого стрижня підвести змінний електричний струм, то стрижень почне вібрувати.

Змінюючи подводимое напруга, змінюється й частота коливань стрижня. Так одержують коливання ультразвукової частоти. У якості стрижня використовують залізо, нікель, кобальт і їх сплави.

Крім стрижня можна застосовувати трубу, а також пакет, з тонких пластин, склеєних між собою. Цей спосіб одержання ультразвукових коливань в основному використовується для механічної обробки деталі. А також цей спосіб використовується для контролю гуми й бетону.

В 1880 році брати Кюрі, досліджуючи властивості кристалів кварцу помітили, що якщо пластину стиснути із двох сторін, то на її гранях перпендикулярних напрямку стиску виникають електричні заряди, на одній стороні позитивні, на протилежній -негативні.

Такими ж властивостями мають сигнетовая сіль і турмалін.

При розтяганні на поверхнях кварцу виникають заряди, але знаків протилежних тем які виникають при стиску.

Явище виникнення електричних зарядів при стиску або розтяганні пластинки одержало назву **прямого п'єзоелектричного ефекту**.

П'єзоелектричний ефект оборотний, тобто пластина кварцу, поміщена в електричне поле буде стискуватися й розтягуватися із частотою, відповідній до частоти зміни знаків електричних зарядів. Таким чином, п'єзоелектричні пластини стають випромінювачами ультразвуку. **Це зворотний п'єзоелектричний ефект.**

Для створення електричного контакту на поверхні п'єзопластини наносять тонкий шар срібла, службовець електродом. При подачі на них електричної напруги пластина змінює свою товщину внаслідок зворотного п'єзоелектричного ефекту.

Якщо напруга знакоперемінно, то пластина коливається в такт цим змінам, створюючи в навколишньому середовищі пружні коливання. При цьому пластина працює як випромінювач, і навпаки, якщо п'єзопластина сприймає імпульс тиску, то на її обкладках у наслідок прямого п'єзоелектричного ефекту з'являються заряди, величина яких може бути заміряна. У цьому випадку пластина працює як приймач. Потужність коливання пластини залежить від напруги на електродах і співвідношення частоти змінного струму й власної частоти коливань пластини.

Таким чином, пластина випромінює ультразвукові хвилі завдяки зворотному п'єзоелектричному ефекту, а ухвалює – завдяки прямому.

Найбільшу випромінюючу потужність можна одержати при резонансі, коли власна частота коливань п'єзопластини буде відповідати частоті змінного струму генератора, що збуджує його.

П'єзоелектричну пластину вибирають такою, щоб її товщина була дорівнює половині довжини ультразвукової хвилі в матеріалі пластини.

### **П'єзоелектричні матеріали і їх характеристики**

В ультразвуковій дефектоскопії застосовуються наступні п'єзоелектричні матеріали:

- 1) природні – кварц, турмалін, сигнетова сіль
- 2) штучні – титанат барію, ЦТС ( цирконат титанат свинцю )

**Кварц** має високу стабільність у роботі (постійний п'єзоелектричний ефект), і вологостійкістю. Крапка Кюрі (температура, при якій матеріал втрачає п'єзоелектричні властивості) 5700С. Він стійкий до високих температур і плавиться при температурі  $t = 14700\text{С}$ . Кварц широко не використовується, тому що п'єзоелектричні властивості виникають при високій напрузі, приблизно 1000 У и висока вартість його виготовлення. Кварц тендітний і не витримує більших механічних навантажень.

**Титанат барію** має п'єзоелектричні властивості приблизно в сто раз вище, чим у кварцу. До пластин прикладається напруга приблизно 100В. У титанату барію висока механічна міцність і висока крихкість. Пластину з титанату барію виготовляють шляхом пресування з наступним спіканням при температурі 15000С, потім поляризують у маслі, нагріваючи до температури 120-1500С, поміщають в електричне поле й витримують у плинні 1-2 годин. Крапка Кюрі 1000С

**ЦТС** – це синтетична, спеченная з маси певного хімічного складу п'єзокераміка. На поверхні виготовлених у такий спосіб пластин наносять (фарбою, вжиганием або напилюванням) металеві (срібні, нікелеві) електроди. Далі пластини витримують тривалий час під більшою постійною напругою

(поляризують), щоб матеріал придбав пьезосвойства. Останнім часом є найбільше часто застосовним для виготовлення пьезопластин. Пластини мають високу чутливість і працюють більш стабільно. Механічно міцні, але тендітні. Крапка Кюрі 3000С

### **5.3 Випромінювачі й приймачі ультразвукових коливань. Класифікація п'єзоелектричних перетворювачів.**

Випромінювання ультразвукових хвиль і приймання відбитих сигналів в ультразвуковій дефектоскопії проводиться за допомогою спеціальних пристроїв, названих п'єзоелектричними перетворювачами.(ПЭП)

ПЭП для приладів неруйнуючого контролю класифікуються по ряду ознак:

1) по способу акустичного контакту з контрольованим об'єктом( контактні, иммерсионные, контактно-иммерсионные, щілинні, із сухим крапковим контактом, безконтактні)

2) по способу з'єднання перетворювачів з електричною схемою приладу :

- сполучені перетворювачі, які з'єднуються одночасно з генератором і підсилювачем приладу й служать як для випромінювання так і приймання ультразвуку.

- роздільні перетворювачі, що полягають із випромінювача, соединненого з генератором приладу, і приймача, з'єданого з підсилювачем.

- роздільно-сполучені перетворювачі, що полягають із излучающегои прийомного елементів, що перебувають в одному корпусі, але розділених екранами.

3) по напрямкові ультразвукової хвилі:

- прямі (нормальні), що випромінюють хвилі нормально до поверхні виробу.

- похил, що випромінюють хвилі під кутом до поверхні виробу

ПЭП являє собою металевий корпус, у яким розташовуються:

1) Протектор перетворювача – це шар звукопровідного матеріалу, розташований між п'єзоелементом перетворювача й контрольованим виробом, і служить для захисту пьезопластины від ушкодження. Виготовляється з поліуретану, фторопласта, кераміки, сталі.

2) Пьезопластина служить для перетворення електричних сигналів в ультразвукові й навпаки.  $\delta = \lambda/2$  на протилежній поверхні пьезопластины кріпляться срібні електроди.

3) Демпфер кріпиться до пьезопластине з боку, протилежної протектору. Виготовляється з матеріалу з більшим поглинанням ультразвуку, звичайно зі штучних смол з додаванням порошку високої щільності. Для зменшення багаторазових відбиттів на демпфер, з боку протилежної пьезопластине наносять канавки або роблять скоси.

4) Токопідводящие проведення необхідні для з'єднання перетворювача з дефектоскопом.

5) Корпус служить для кріплення всіх елементів ПЭП.

Похилі ПЭП призначені для контролю зварених з'єднань, виробів і матеріалів, коли немає можливості контролювати нормальними ПЭП, тобто форма шва не дозволяє контролювати нормальними ПЭП.

Похила призма виготовляється з оргскла, полікарбонату, капролона, які мають підвищену зносостійкість.

При похилих ПЭП ультразвукова хвиля вводиться під якимось кутом залежно від комбінації матеріалів. Призма виготовляється під різними кутами, передбаченими стандартом для комбінації оргскло – сталь.

Розміри й форма призми вибираються такими, щоб відбиті сигнали від границі роздгнула не верталися на пьезопластину, а гасилися в призмі пастці.

Для гасіння багаторазових відбиттів у призмі передбачені зони невеликих отворів або ребра на гранях.

Зі зниженням частоти габарити похилих ПЭП суттєво збільшуються. Це необхідно для збереження високої спрямованості випромінювання й гасіння в пастці призми відбитої від границі роздгнула ультразвукової енергії.

У роздільно-сполученому перетворювачі п'єзоелементи включені за роздільно-сполученою схемою, але об'єднені в одному корпусі. Роздільно-сполучені ПЭП можуть бути прямими й похилими. Прямі ПЭП застосовують при контролі прокату, таврових з'єднань і стиків зі знятим посиленням шва.

ПЭП складається із двох п'єзоелементів приклеєних до похилих призм і розділених між собою екраном. Екрани можуть бути з міді, фольги або шкіри. Із протилежної сторони пьезопластины розташований демпфер, токопідводящие проведення й корпус.

Роздільно-сполучені ПЭП забезпечують уведення в метал поздовжньої хвилі під кутом 50-100 до площини, перпендикулярної поверхні введення променя.

Для введення ультразвукових коливань у контрольований виріб необхідно виключити можливий повітряний зазор між ПЭП і об'єктом контролю. У протилежному випадку більша частина ультразвукової енергії не ввійде в контрольований виріб, відбившись від повітряного зазору, при цьому падає чутливість контролю.

Тому передача енергії ультразвукових коливань звичайно здійснюється через рідину. Залежно від товщини шару контактної рідини між перетворювачем і виробом розрізняють:

**1) контактний спосіб - контактні** ПЭП устанавлюються на поверхню виробу, попередньо змазану контактною рідиною (маслом, гліцерином).

**2) имерсионный - між** поверхнею ПЭП і виробом є товстий шар рідини. Товщина цього шару в багато разів перевищує довжину хвилі. При цьому виріб цілком або частково занурюють в иммерсионную ванну або використовують струмінь води.

**3) контактно-иммерсионный спосіб - контактно** – иммерсионные ПЭП постачені локальною ванною з еластичною мембраною, що контактує з виробом. У якості иммерсионной рідини в більшості випадків використовують воду, у яку додають інгібітори корозії, а також речовини, що поліпшують змочування. Иммерсионная рідина не повинна містити повітряних пухирців.

**4) щілинний метод** - передбачає створення між перетворювачем і поверхнею виробу зазору товщиною близько однієї довжини ультразвукової хвилі. Рідина втримується в зазорі силами поверхневого натягу.

**5) спосіб сухого контакту** - реалізується через сферичну або гостру поверхню наконечника перетворювача. Площа зіткнення 0,01...0,5 мм<sup>2</sup>. Цей тип



контакту застосовують в основному в низькочастотних акустичних дефектоскопах, ультразвукових твердомерах і приладах для контролю бетону.

**б) безконтактний спосіб** - Безконтактні перетворювачі збуджують акустичні коливання в об'єкті контролю через шар повітря або за допомогою електромагнітних, оптико-теплових і ін. явищ.

Безконтактні способи звичайно мають чутливість значно меншу, чому контактні. Іммерсионний спосіб також забезпечує чутливість в 10-100 раз менше контактного.

## 5.4 Класифікація акустичних методів

**Акустичні методи НК** підрозділяють на дві більші групи:

1) **Пасивні методи** засновані тільки на прийманні хвиль, джерелом яких служить сам об'єкт контролю. Наприклад – утворі тріщин супроводжується виникненням акустичних коливань.

2) **Активні методи** засновані на випромінювання й прийманні пружних хвиль.

Активні методи ділять на методи відбиття, проходження, комбіновані (тобто методи, що використовують, відбиття й проходження), власних коливань і імпедансные.

**Методи відбиття** засновані на аналізі відбиття імпульсів і пружних хвиль від неоднородностей або границь об'єкта контролю.

**Методи проходження** засновані на впливі параметрів об'єктів контролю на характеристики минулих через нього хвиль.

**Комбіновані методи** використовують вплив параметрів об'єкта контролю як на відбиття, так і на проходження пружних хвиль.

У **методах власних коливань** про властивості об'єкта контролю судять по параметрах його вільних або змушених коливань (їх частотам і величині втрат)

В **імпедансних методах** інформативним параметром служить механічний імпеданс об'єкта контролю в зоні його контакту з перетворювачем.

### **Активні методи УЗК**

*Тіньовий амплітудний* – заснований на ослабленні минаючих ультразвукових хвиль при наявності усередині деталі дефектів, що створюють ультразвукову тінь.

Імпульсні або безперервні ультразвукові хвилі пропускають крізь плоский ОК від випромінювача до приймача. Якщо між И и П дефектів ні, то хвилі проходять безперешкодно, і на прийманні – сигнал великої амплітуди. Малий дефект (Д) оттеняет частина потоку, і амплітуда на прийманні падає (варіант II). Великий дефект повністю перебиває потік, обнуляя сигнал на прийманні (варіант III). Глибина залягання й розміри дефекту апаратурно не оцінюються.

Необхідний двосторонній доступ до ОК. Метод не дає можливості визначити глибину залягання дефекта. Малочутливий.

*Часовий тіньовий метод* заснований на вимірі тимчасового запізнювання ультразвукового імпульсу при огибании дефекту

Імпульси ультразвукових хвиль пропускають крізь плоский ОК від випромінювача И до приймача П. Якщо між И и П є дефект Д середньої величини, він оттеняет частина потоку, а бічні промені, що відхиляються,

падають на його край, де перетерплюють дифракцію. Потрапляючи в приймач трохи пізніше прямого потоку 1, дифрагированні промені 2 утворюють окремий слабкий сигнал. По різниці часу приходу сигналів судять про розміри дефекту. Глибина залягання не визначається. Необхідний двосторонній доступ до ОК.

*Велосимметрический метод* заснований на зміні швидкості пружних хвиль при наявності дефекту.

Крапковий випромінювач і приймач жорстко скріплені. Випромінювач збуджує в плоскому ОК изгибні хвилі Лэмба. Дистанція між осями I і II приблизно дорівнює довжині хвилі. Оскільки фазова швидкість хвиль Лэмба залежить від товщини цілого шару, а дефект ділить цю товщину, то в дефектній зоні фазова швидкість знижується й фаза сигналу на прийманні зрушується щодо фази на випромінюванні. Зрушення фаз указує на дефект.

*Луна-Метод.*

Імпульс ультразвукових хвиль посилає в ОК. Якщо на його шляху зустрічається дефект, то імпульс частково відбивається від нього й повертається в перетворювач, утворюючи сигнал на прийманні (эхосигнал). Чутливість цього методу набагато вище, чим у тіньового методу. Для виявлення дефекту досить мати односторонній доступ до контрольованого об'єкта.

Головний недолік методу – наявність мертвої зони під датчиком, що не дає можливість проводити діагностику тонких виробів.

*Луна-Дзеркальний метод* є різновидом луна-методу й застосовується для виявлення дефектів, орієнтованих вертикально до поверхні виробів.

Призначений для оцінки форми й розмірів свідомо виявленого внутрішнього дефекту в плоскому об'єкті. У роздільно-сполученому режимі апаратури дефект опромінюється імпульсами ультразвукових хвиль. Якщо луна в ИП лише небагато перевищує луна в II, і обоє сигналу середньої амплітуди (варіант I), припускають круглу форму дефекту. Якщо сигнал в ИП потужний, а в II отсутствует (варіант II), припускають плоску форму й похилу орієнтацію. Якщо не вдається одержати луну обома перетворювачами (варіант III), припускають горизонтальну плоску форму. Якщо луна в II вище, чим в ИП (варіант IV), то дефект плоский вертикальний. Розлучаючи й зближуючи ИП і II, по дистанції між ними в позиціях провалля сигналів можна оцінити висоту дефекту.

*Дельта метод* використовує розсіювання УЗК над дефектом.

Даний метод використовує явище дифракції хвиль на дефекті. Випромінюючий пьезопреобразователь озвучує дефект поперечною ультразвуковою хвилею. Частина падаючого на площину дефекту ультразвукового пучка дзеркально відбивається від дефекту ввиді поперечної хвилі  $s_r$ . Інша частина дифрагує (розсіюється) у вигляді поперечної хвилі або трансформується (перетворюється) у вигляді поздовжньої хвилі  $s_l$ .

Найбільше інтенсивно дифракція виникає на гострих краях дефектів, наприклад, на краях усталостних тріщин.

Дифрагированная поздовжня хвиля може бути прийнята прямим ПЭП, розміщеним над тріщиною.

Ознакою наявності дефекту є поява луна-імпульсу на ПЭП II с амплітудою  $U_{fl}$ .

*Дифракційно-Тіньовий метод* Застосовується аналогічно дельта- методу, але приймання дифрагированих сигналів від країв дефекту здійснюється прямим датчиком, установленим над дефектом, у тому числі з використанням відбиття від протилежної поверхні ОК.

#### *Луна-Тіньовий метод*

Імпульси ультразвукових хвиль посиляють в ОК. Якщо на тракті є дефект, то імпульс частково відбивається від нього в сполучений пре образователь (ИП) як эхосигнал. Окремим приймачем (П) оцінюють падіння амплітуди наскрізного сигналу, викликане дефектом. Має якості эхометода + підтвердження дефекту тіньовим принципом, але вимагає двостороннього доступу до ОК.

#### *Дзеркально-тіньовий метод*

У сполученому (прямій ИП) або роздільному (похилі И и П) режимі апаратури імпульси ультразвукових хвиль посиляють в ОК. Якщо на тракті є дефект, то він перепиняє шлях, викликаючи падіння донного сигналу. По падінню донного сигналу судять про наявність і величині дефекту. Необхідний однобічний доступ до ОК, при похилому – виявлення дефектів будь-якої форми й орієнтації. Не дає глибину залягання дефекту.

#### *Луна-Наскрізний метод*

Застосовується тільки в металургійній промисловості на виході ліній прокату аркушів. В иммерсионной ванні (контактна рідина – веретенне масло) аркуш на вальцах прокочується між рядами (матрицями) зі сполучених (ИП) і додаткових приймачів (П) перетворювачів. При нормальному стані аркуша (варіант I) спостерігається строго впорядковане розташування луни від границі верхнього шару рідини й ОК (1), від границі ОК і нижнього шару рідини (2) і наскрізного сигналу (3). Варіанти II-IV показують зсув сигналів при влученні в область контролю локаль- ных утонений. Якщо в області контролю виявляється розшарування або захід (варіант V), то між 1-м і 2-м сигналами з'являється потужна луна від нього (4), а сигнали 2 і 3 слабшають аж до обнуління. Ряди ИП і П вибудовуються по всій ширині аркуша. Метод вимагає спеціальної багатоканальної апаратури й застосовується тільки в автоматичному режимі

#### *Реверберационный метод* призначений для контролю шаруватий виробів.

У сполученому режимі роботи апаратури імпульс ультразвукових хвиль посиляє в шаруватий (клееный) ОК. Якщо склейка якісна (I), то основна частина імпульсу йде через клей, а мала частка відбивається назад. На поверхні ОК частина цієї частки йде в ИП, утворюючи перший пік, а частина знову глибшається в ОК, і з нею відбувається те ж саме. Тому що основна частка завжди добре проходить углиб ОК, те реверберації у верхньому шарі швидко слабшають і на екрані амплітуда піків убутна. Дефект (Д) типу « не проклей» перешкоджає відходу сигналу (II), і в цьому випадку реверберації в першому шарі могутніше.

#### *Локальний метод*

Використовують для контролю багат шарових неметалічних і композитних матеріалів. Вібратором 2 до крапки об'єкта контролю додають коливання, вироблювані генератором 1. Відповідні коливання ухвалюють мікрофоном 3. Індикатор 4 покаже різка зміна коливань при розташуванні вібратора над дефектом 5.

#### *Інтегральний метод*

Об'єкт контролю (наприклад, залізничне колесо) піддають удару спеціальним молотком 1. Відповідний звук ухвалюють мікрофоном 2 і за допомогою спеціальної апаратури 3 аналізують його частотний спектр. По характеру спектра судять про наявність або відсутність дефектів в ОК.

#### *Інтегральний резонансний метод*

Велика ділянка поверхні ОК піддають безперервним коливанням за допомогою вібраторів 1 і покривають алюмінієвою пудрою 2. У зоні дефекту 3 внаслідок резонансу коливання більш активні, і тому осідання пудри менше.

#### *Товщинометрія.*

Товщиномер вимірює час  $t$  пробігу сигналу до протилежної поверхні ОК і назад і визначає товщину ОК як  $h = 0,5С t$ , де  $С$  – відома швидкість звуку в даному матеріалі.

#### *Імпедансний метод*

Прилад збуджує безперервні акустичні коливання у випромінюючої пьезопластині, поміщеної вгорі датчика. Що ухвалює пьезопластина розташована внизу датчика й розділена з випромінюючої сталевим стрижнем. Якщо шаруватий ОК якісно склеєний, то в контактні наконечника з поверхнею ОК він добре демпфірує (загальмовує) приймальню пьезопластину, і більша частка звукової енергії в ній змушено переходити в електричну. Якщо під датчиком дефект (не проклеї), то в цій зоні імпеданс ОК (опір коливанням) менше, демпфірування слабкіше й амплітуда електричного сигналу на прийомній пластині нижче

### **Пасивні методи УЗК**

#### *Акустико-емісійний*

Об'єкт контролю піддають механічній нарузі (наприклад, у посудині створюють внутрішній тиск). При цьому тріщини, що розвиваються, підрастають стрибками. При кожному акті підростання (скачці) від віття тріщини в матеріал випромінюється імпульс акустичної енергії («кляцання», емісія). Такі імпульси вловлюються й аналізуються спеціальною апаратурою.

#### *Шумодіагностичний*

На працюючих однотипних агрегатах вимірюють амплітудно-частотні характеристики шумів, які порівнюють із такими для еталонного (свідомо бездефектного) агрегату. У випадку кардинальної відмінності від характеристик еталона агрегат виводять із експлуатації.

Шумодіагностичний метод застосовується не тільки на динамічно працюючих агрегатах, але й з метою течейскання на трубопроводах, посудинах і резервуарах. Течі виявляються по шуму, створюваному тертям стікаючої через дефект середовища про його краї.

#### *Відродіагностичний*

На працюючих однотипних агрегатах вимірюють характеристики активності вібрації, які порівнюють із такими для еталонного (свідомо бездефектного) агрегату. У випадку кардинальної відмінності від характеристик еталона агрегат виводять із експлуатації.

Вібродіагностичний метод використовується як обов'язковий при діагностиці компресорів газопровідних систем у металургійному виробництві.