



Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут

інформаційних технологій

Кафедра

інформаційно-вимірювальних технологій

Освітній рівень

магістр

Спеціальність

175 Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТ

О. Є. Середюк

«\_\_\_» 12. 2024 року

**З А В Д А Н Н Я**  
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

\_ Чвак Владислав Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи      Контроль технічного станутеплоагрегатів\_

Керівник роботи      Лютак Зиновій Петрович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом закладу вищої освіти      від "02" 12. 2024 року № 787/7

2. Термін подання студентом роботи      "20" 12. 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: матеріал для чутливого елемента ЦТС-5А; вихідна потужність підсилювача 20 Вт \_

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналіз об'єкту контролю, існуючих методів і приладів контролю      необхідних параметрів. Теоретичне обґрунтування методу контролю. Розробка методики контролю. Розробка конструкції установки. Метрологічний аналіз розробки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Теорія методу (А1) ; Функціональна структурна схема установки (А1); ). Загальна конструкція. Складальне креслення установки (А1); Метрологічне забезпечення установки. (А1)

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 02.11.2024т р. \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд методів і засобів контролю	02.11.24- 12.11.24	
2.	Теоретичне обґрунтування методу контролю	12.11.24- 20.11.24	
3.	Розробка конструкції установки	20.11.24-30.11.24	
4	Розробка методики контролю	30.11.24-04.12.24	
5	Метрологічний аналіз	04.12.24-12.12.24	
6.	Оформлення роботи.	12.12.24-20.12.24	

Студент \_\_\_\_\_ Чвак В.М.

( підпис )

( прізвище та ініціали )

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Лютак З.П..

( підпис )

( прізвище та ініціали )

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 72 с., 6 додатки, 18 джерел, 7 аркушів креслення.

Об'єкт дослідження - котел великої потужності.

Мета роботи - дослідження цистерни котла на наявність дефектів.

У дані магістерській роботі проведено аналіз основних методів та методик для проведення перевірки технічного стану котла.

Проведено експериментальні та теоретичні дослідження процесу перевірки котла, які дозволяють проводити визначення метрологічних характеристик котлів великої потужності в умовах експлуатації .

Особливістю даної установки є її мобільність та використання в умовах експлуатації.

Наведені розрахунки підсилювача, обґрунтована доцільність розроблення даної установки і розглянуті питання безпеки для обслуговуючого персоналу в експлуатації та оточуючого середовища.

УЛЬТРАЗВУК, П'ЄЗОПЕРЕТВОРЮВАЧ, КОТЕЛ, МЕТРОЛОГІЧНІ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ, ХВИЛЯ, КОНТРОЛЬ, ДЕФЕКТ, ЗАТУХАННЯ.

## THE ABSTRACT

The diploma project includes 72 pages, formulas, tables, 18 sources of information, 1 additions, 7 drawing sheets.

The object of investigation is caldron of high-powered.

The objective of master level work is research of cistern of caldron is in the presence of defects. In information diploma work the analysis of basic methods and methods is conducted for the leadthrough of check of the technical state of caldron.

Experimental and theoretical researches of process are conducted verifications of caldron, which allow to conduct determination of metrology descriptions of caldrons of high-powered in the conditions of exploitation .

The specific feature of this device is it's mobility.

Exploitation and environment has the resulted calculations of strengthener, grounded expedience of development of this setting and considered questions of safety, for an auxiliary personnel.

ULTRASOUND, P'EZOPERETVORYUVACH, CALDRON, METROLOGY DESCRIPTIONS, WAVE, CONTROL, DEFECT, FADING.

# ЗМІСТ

## Вступ

1. Аналіз методів і засобів контролю	.....
1.1 Магнітний метод	.....
1.2 Тензометричний метод	.....
1.3 Капілярний метод	.....
1.4 Ультразвуковий метод	.....
2. Теоретичні основи вибраного методу контролю	.....
2.1 Властивості ультразвукових коливань	.....
2.2 Затухання ультразвуку	.....
2.3 Відбивання ультразвуку	.....
2.4 Поляризація ультразвукових хвиль	.....
2.5 Дифракція ультразвуку	.....
2.6 Рефракція ультразвуку	.....
2.7 Акустичні первинні перетворювачі	.....
2.8 Аналіз матеріалів чутливого елемента	.....
2.9 Дослідження імпульсного режиму роботи перетворювача	.....
2.10 Порядок розрахунку підсилювача	.....
3. Оцінка похибки розробленого пристрою і результатів контролю	..
3.1 Аналіз інструментальних похибок розробленого пристрою	.....

3.2 Аналіз методичних помилок контролю .....

Висновки .....

Перелік літературних джерел.....

Додатки

## ВСТУП

Згідно ДСТУ акустичні методи ділять на дві великі групи: використовуюче випромінювання і прийом акустичних хвиль (активні методи) і засновані лише на прийомі (пасивні методи). У кожній з груп можна виділити методи, засновані на виникненні в об'єкті контролю хвиль, що біжать і стоячих, або коливань.

Ультразвуком є коливальний рух частинок середовища, що хвилеподібно поширюється. Ультразвук має деякі особливості в порівнянні із звуками чутного діапазону. У ультразвуковому діапазоні порівняно легко отримати направлене випромінювання; він добре піддається фокусуванню, внаслідок чого підвищується інтенсивність ультразвукових коливань. При поширенні в газах, рідинах і твердих тілах ультразвук породжує цікаві явища, багато хто з яких знайшов практичне вживання в різних галузях науки і техніки.

Так, ультразвукові коливання застосовують в неруйнівному контролі. Професор С. Я. Соколов використовував властивість поширення ультразвука у ряді матеріалів і запропонував в 1928 році новий метод виявлення дефектів, що залягають в товщі металу. Ультразвуковий метод скоро отримав визнання в нашій країні і за кордоном. Це пояснюється вищою чутливістю по розкриттю на 5 порядків, достовірністю в 2 - 2,5 разу виявлення дефектів, вищою оперативністю в 15-20 разів і продуктивністю в 2 - 4 рази, меншою вартістю в 2-6 разів і безпекою в роботі в порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю.

Активні акустичні методи, в яких застосовують хвилі, що біжать, ділять на дві підгрупи, використовуюче проходження і віддзеркалення хвиль. Застосовують як безперервне, так і імпульсне випромінювання.

Продуктивність контролю визначається кроком і швидкістю сканування (переміщення) перетворювача. При оцінці часу контролю враховується і час на дослідження дефекту.

Об'єктом дослідження є процес поширення ультразвукових хвиль в матеріалах, аспекти аналізу відбитого сигналу та визначення координат дефектів.

Предметом дослідження є способи контролю якості досліджуваних теплоагрегатів.

Наукова новизна магістерської робота полягає у теоретичному обґрунтуванні та використанні ультразвукових хвиль з метою оцінки якості досліджуваних теплоагрегатів.

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ

Програма забезпечення надійності при виробництві головних і серійних котлів має три етапи: конструювання, розробка технології виготовлення, процес виготовлення. Реалізація етапів приводиться до створення вихідних властивостей, які можна охарактеризувати як потенційно можливі. У різні періоди експлуатації фактичні властивості порівнюють з потенційно можливими і по мірі зміни оцінюють надійність.

Основними показниками надійності є безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність. Надійність забезпечується на етапах проектування, виготовлення, експлуатації і ремонтів. Помилки, допущені на будь-якому з них, зводять нанівець матеріальні засоби, трудовитрати і час, витрачений на всіх інших етапах. Прекрасна конструкція казана з високими техніко-економічними показниками, широкомасштабною автоматизацією і комфортними умовами праці не може бути реалізована, якщо для виготовлення використовувалися труби, трійники, арматура, прокат чорних металів і інші матеріали і устаткування некондиційні, поганої якості, а процеси технологічного виробництва виконувалися неакуратно, з порушеннями вимог НТД. Проте казани з високою потенційною надійністю можуть бути швидко приведені в повну непридатність, якщо не дотримуватимуться задані проектом режими роботи, і експлуатація здійснюватиметься малокваліфікованим персоналом.

Перехід з працездатного стану котла в непрацездатне прийнято називати подією.

Існують наступні стани котла: повністю працездатний, повністю непрацездатний, частково працездатний або (його альтернатива) частково непрацездатний. Число події, що змінюють стан, надзвичайно велике. Проте немає необхідності завжди розглядати кожне з них. Можливі узагальнення і угруповання подій по характеру наслідків. З використанням цього принципу для вирішення

фундаментальних і прикладних завдань введено поняття «відмова», яке є одним з головних критеріїв при оцінці надійності будь-якого об'єкту, технологічного процесу, функціонуючої системи і інших засобів, що знаходяться у сфері матеріального виробництва, у тому числі і в теплоенергетиці [1].

У узагальненому вигляді відмова трактується як подія, що полягає в порушенні працездатного стану об'єкту.

Для об'єкту в цілому, окремого елемента або ідентичних груп елементів характерні специфічні ознаки відмов. В котла це припинення роботи топки, вимушене скидання навантаження і переведення живлення на аварійний режим, в зварних з'єднань трубопроводів, колекторів, барабанів - поява тріщин, течі, свищів, в інших елементів ознаки інші. Деяким відмовам передують пошкодження. При появі пошкоджень, в результаті яких хоч би один з техніко- економічних параметрів відхиляється від значення, вказаного в НТД або конструкторській документації, казан вважається несправним. Наслідки несправностей неоднозначні. В більшості випадків вони приводять до відмов. У одних випадках після появи пошкоджень відмова настає миттєво, в інших на працювання часу між обома подіями вимірюється тисячами годинників.

При експлуатації стан устаткування в межах характеристик, встановлених проектом, забезпечується технічним обслуговуванням і ремонтом. До деяких деталей доступ для огляду або ремонту не викликає ускладнень. До інших добратися скрутно. Тому час, що витрачається на діагностику і відновлення працездатного стану, безпосередньо залежить від пристосованості котла до проведення діагностичних і ремонтних операцій, тобто його ремонтнопригідності. Очевидно, що для кожної конструкції ремонтпридатність індивідуальна. Її можна охарактеризувати як властивість пристосованості деталей, вузлів і котла в цілому до виявлення причин виникнення відмов, пошкоджень і до підтримки і відновлення працездатного стану за допомогою технічного обслуговування і ремонтів [2].

Найбільшу складність для оцінки технічного стану і визначення надійності при огляді в даний час представляють газотрубні котли імпортного виробництва, а після вичерпання розрахункового ресурсу їх експлуатації неминуче виникає питання про необхідність конкретизації в керівних документах вимог по технічному

діагностуванню вказаних котлів або розробки спеціальних методичних вказівок і типової програми для цих цілей.

Котли однієї марки в основному мають однакову конструкційну надійність, але різну технологічну і, отже, різну потенційно можливу. Це явище знаходить віддзеркалення в різних значеннях показників надійності при експлуатації. По характеру безвідмовності і довговічності процес експлуатації від початку до настання граничного стану можна розділити на три характерні періоди: прироблення, нормальна експлуатація, старіння [3].

В період прироблення параметр потоку відмов в більшості випадків найбільший. Це пояснюється тим, що деякі приховані дефекти і пошкодження (ризики, заходи, стоншування стінок труб, пороки литва і тому подібне), не виявлені при виготовленні, після включення казана в роботу швидко розвиваються. В результаті міцність деталі або вузла різко зменшується і відбувається руйнування. Найбільшу пошкоджуваність в сталевих котлах можуть мати труби поверхонь нагріву і зварні з'єднання.

Період прироблення котлів може складати  $(2-2,5) \times 10^4$  Г ,

В період нормальної експлуатації відмови відбуваються в основному з вини експлуатаційного персоналу, унаслідок низької якості ремонту або із-за недоліків конструкції. Заводські пошкодження і дефекти зустрічаються рідко. Конструктивні недоліки найбільш характерні для сталевих водо нагрівних котлів, що спалюють мазут, з розвиненими конвективними поверхнями нагріву. У інтервал часу, тривалість якого залежить від багатьох чинників, відбувається накопичення пошкоджень під дією фізико-хімічних процесів. При великих напрацюваннях часу накопичення пошкоджень приймає зростаючий нелінійний характер.

З цієї миті закінчується період нормальної експлуатації і починається період старіння.

Створити умови для безпечної експлуатації в період старіння значно складніше, ніж в попередніх. По суті, лише діагностика стану деталей і вузлів, найбільш небезпечних в разі руйнування, може запобігти катастрофічним наслідкам для персоналу, устаткування і будівельної частини котельних. Взагалі період старіння характеризується прискореним необоротним зносом окремих елементів і

котла в цілому. При цьому знос має неоднакову швидкість для барабанів, колекторів, поверхонь нагріву, арматури, трубопроводів. Це дає можливість, своєчасно виявляючи деталі з недопустимим зносом, вчасно їх замінювати, подовжуючи загальний ресурс котла.

Економічними критеріями надійності є збиток, викликаний відмовами устаткування котельній, і збиток від недоотпуску пари і гарячої води, а також зростання вартості ремонтного обслуговування для забезпечення проектного і надпроектного ресурсу.

Стан котлів оцінюється в основному в двох напрямках. У одному випадку характеризується реалізація заданих проектом технологічних функцій, тобто контролюється робота; у іншому - знос, викликаний процесами, відповідними технології вироблення пари і гарячої води, тобто стан устаткування. Без оцінки технологічних функцій і стану котлів забезпечити безпеку експлуатації неможливо. Контроль роботи котла здійснюється вимірами робочих параметрів штатними контрольно-вимірними приладами.

Оцінка зносу у всіх його проявах виконується, як правило, по нештатних приладах. Їх набір, методи вживання і об'єми вимірів визначаються поставленими завданнями. Сукупність реалізації методик використання засобів вимірів, обробки отриманих результатів зв'язується в єдиний комплекс, який по прийнятій термінології іменується діагностикою. Діагностика не є строго фіксованим критерієм для оцінки стану [4].

Залежно від конструкції котла, вигляду палива, параметрів робочого середовища, напрацювання часу, марки сталі, режимів роботи об'єми діагностики, номенклатура засобів вимірів і методика оцінки стану міняються. Це пояснюється тим, що неоднозначність умов роботи приводить до зносу, різному по характеру і по тягарю поразок деталей і вузлів, причому і те і інше змінюється із збільшенням напрацювання і числа пусків.

Оцінка стану виконується двома методами. У першому, простішому, проводиться візуальний огляд, який повинен вироблятися фахівцем, що знає пристрій казана, що діагностується, характерні найбільш пошкоджені його вузли і

деталі (елементи), а також правила технічної експлуатації вказаного устаткування [5].

При другому методі застосовуються прилади, інструменти і пристосування. До недоліків методу візуального контролю слід віднести ряд істотних чинників. Не можна отримати відомості про дефекти, розташовані в недоступних місцях (на внутрішній поверхні труб, на ряду інших деталей), неможливо оцінити пошкодженість металу і зварних з'єднань по перетину, взяти його засміченість неметалічними включеннями, отримати відомості про структуру, хімічний склад і фізичні властивості і тому подібне. Візуальним оглядом виявляються лише крупні дефекти, при цьому у ряді випадків відразу можна прийняти рішення.

Одним з них є визнання непридатності до подальшої експлуатації або необхідності ремонту оглянутої деталі або вузла (крупна зовнішня тріщина на зварному або заклепувальному шві, помітні тріщини і тому подібне); іншим - необхідність залучення інструментальної діагностики для здобуття точніших даних про знос; третім - визнання можливості подальшої роботи. Останнє рішення вимагає пояснення про умови роботи - чи допускається робота з проектними параметрами або повинні дотримуватися певні обмеження.

Інструментальна діагностика використовується для здобуття якісних і кількісних оцінок стану металу устаткування. Розрізняють руйнівний і неруйнівний методи. При першому цілісність контрольованої деталі або вузла порушується. Вирізується ділянка, з якої виготовляються зразки. На них вимірюються характеристики стану і рівні дефектності, зокрема механічні властивості, хімічний склад і пошкодженість. Другий метод дозволяє проводити дефектоскопію безпосередньо на устаткуванні. За допомогою вимірювальних приладів фізичних і хімічних засобів по спеціальних методиках виявляються тріщини, залишкова деформація, корозійний і ерозійний знос.

Поверхні нагріву, трубопроводи і інші частини казанів під тиском робочого середовища і під дією теплових потоків деформуються. Опір цьому процесу характеризує міцність. При значній деформації настає руйнування. Опір руйнуванню визначає надійність. Якщо руйнування відбувається не миттєво, а при неодноразово прикладеному навантаженні, готується поступово, нагромаджуючи

якись мікроруйнування за кожен цикл, опір металу такому руйнуванню оцінюється як довговічність. Очевидно, що котельні сталі мають бути надійними і довговічними, забезпечуючи в заданому інтервалі часу міцність, достатню для безпечної експлуатації. При різних напрацюваннях рівень опору металу деталей казана визначається порівнянням поточних значень поточних значень механічних властивостей з початковими. Початкові вказуються в заводських паспортах казанів, поточні визначаються інструментальною діагностикою.

Опір руйнуванню - надійність при температурі робочого середовища до 450°C, згідно НТД, характеризується короткочасними механічними властивостями. Показники цих властивостей визначаються випробуванням металу на розтягування і удар, а також виміром твердості.

Володіючи високою точністю і дозволяючи вирішувати багато завдань в забезпеченні безпеки і надійності устаткування, інструментальна діагностика, що проводиться на зразках, має істотний недолік. При її проведенні потрібне руйнування деталі або вузла. Рішення задачі діагностики деталей, при порушенні цілісності яких втрачається сенс оцінки їх стану, виконується засобами і методами неруйнівного контролю.

Вуглецеві сталі промислового виробництва відрізняються від чистих залізовуглецевих сплавів тим, що потрапляють або спеціально вводяться в сплав у зв'язку з умовами виробництва і називаються домішками.

Зазвичай визначають зміст так званих нормальних домішок, до яких відносяться кремній, марганець, фосфор, сірка, кисень. Щоб ці елементи не відігравали роль компонентів, вміст їх не повинен перевищувати (орієнтовно):

Si 0,3 - 0,4% ;

Mn 0,5- 0,8%;

P 0,05% ;

S 0,07%.

В цьому випадку їх вплив на властивості сталей є невеликим, а властивості таких вуглецевих сталей близькі до властивостей чистих подвійних залізовуглецевих сплавів.

Сталь вуглецева звичайної якості випускається ДСТУ [19]. Якщо сталь йде на вироби, які не піддаються гарячій обробці (зварюванню, куванню тощо), структура і властивості її, отримані після виходу з прокатного цеху металургійного заводу, зберігаються і у споживача. В цьому випадку сталі поставляються споживачеві тільки за механічними властивостями (межа плинності, відносне подовження і ін.). Хімічний склад не гарантується.

Якщо сталь піддається гарячій обробці тиском, початкові структура і механічні властивості не зберігаються. Тоді для споживача вирішального значення набуває склад сталі, оскільки ним визначається режим гарячої обробки і кінцеві механічні властивості сталевих виробів. В цьому випадку сталь поставляється споживачеві за хімічним складом.

Якщо у споживача сталь піддається зварюванню, в зоні теплового впливу зварного шва властивості металу змінюються. Важливо знати хімічний склад сталі, оскільки саме він визначає властивості сталі в зоні зварювання. В той же час споживач повинен знати і початкові механічні властивості металу, тому що частина виробів, що не підпала під тепловий вплив зварного шва, зберігає свої властивості. Метал в цьому випадку поставляється і за хімічним складом, і за механічними властивостями. Відповідно до цього передбачається постачання сталі трьох груп [19]:

- група А - з гарантією механічних властивостей ( сталь не піддається гарячій обробці);
- група Б - з гарантією хімічного складу ( сталь піддається гарячій обробці);
- група В - з гарантією механічних властивостей і хімічного складу (для зварних конструкцій).

Сталь групи А виготовляється з наступних марок: Ст.О, Ст.1, Ст.2, Ст.3, Ст.4, Ст.5, Ст.6, Ст.7. Спосіб виготовлення сталі (мартенівська, бесемерівська, кипляча, спокійна, напівспокійна) вибирається заводом-виготівником, але вказується в сертифікаті. У позначенні марок киплячої сталі додається індекс «кп», напівспокійної - індекс «пс» (Ст.3кп, Ст.4пс і т.д.).

Сталь групи Б виготовляється з наступних марок: мартенівська - Мст.О, Мст.кп, Мст.2кп, Мст.3кп, Мст.3, Мст.4кп, Мст.4, Мст.5, Мст.6, Мст.7; бесемерівська - Бст.О, Бст.3кп, Бст.3, Бст.4кп, Бст.4, Бст.5, Бст.6.

Сталь групи В виготовляється тільки мартенівським способом з наступних марок: Вст.2кп, Вст.3кп, Вст.3, Вст.4кп, Вст.4, Вст.5.

Відповідно до ГОСТ 380 в відпаленій заготовці в спокійній і напівспокійній сталі повинні бути повністю видалені усадкова раковина і усадкова рихлість, що супроводжуються розшаруванням, видимим без застосування збільшувальних приладів.

Сталь звичайної якості широко використовується в нафтовій промисловості.

Сталь Ст.1, Ст.2, Ст.3кп, Ст.4кп, Ст.5, Ст.6, Ст.7 використовується для виготовлення апаратури нафтопереробних заводів. Зокрема Ст.5 застосовується для виготовлення посудин, що працюють при тиску не більше 5 МПа і температурі від -30 до +400°C.

Широко поширена сталь марки Ст.3, з якої виготовляють зварні і штамповані деталі бурових і експлуатаційних веж і щогл, машинні ключі, підстави веж тощо. Із сталі марки Ст.4 виготовляють гаки, серезки, шатуни і ін..

Сталь групи міцності Д випускається згідно ДСТУ [20]. Тимчасовий опір розриву цієї сталі 65 кгс/мм<sup>2</sup>, межа плинності 38 кгс/мм<sup>2</sup>.

Сталь групи міцності Д застосовується для виготовлення елементів бурильних колон: провідних труб, що обважнюють, трубних муфт до них, трубних заготовок стикозварних бурильних труб. Звичайна термообробка для цієї марки сталі - нормалізація.

Сталь вуглецева якісна конструкція. До сталі, що піддається термообробці на машинобудівних заводах, пред'являються деякі підвищені вимоги, наприклад, менший вміст вуглецю. Найповніше цим вимогам відповідають вуглецеві сталі згідно ДСТУ [21].

Конструкційна якісна вуглецева сталь випускається з нормальним або підвищеним вмістом марганцю. В залежності від вмісту вуглецю ця сталь умовно маркується цифрами 10, 15, 20, 25, 30 і так далі. Двозначні цифри вказують на середній вміст вуглецю в сотих долях відсотка.

Таблиця 1.1 - Хімічний склад сталей

Вміст елементів							
%							
Марка сталі	Вуглець	Кремній	Марганець	Фосфор	Сірка	Хром	Нікель
20	0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	0,040	0,040	0,25	0,25
30	0,27-0,35	0,17-0,37	0,50-0,80	0,040	0,040	0,25	0,25
35	0,32-0,40	0,17-0,37	0,50-0,80	0,040	0,040	0,25	0,25
40	0,37-0,45	0,17-0,37	0,50-0,80	0,040	0,040	0,25	0,25
45	0,42-0,50	0,17-0,37	0,50-0,80	0,040	0,040	0,25	0,25

Відповідно до макроструктури сталі при перевірці на зламах або на макрошліфах не повинна мати усадкової раковини і рихлості, пухирців, розшарування, тріщин, неметалічних включень і флокенів, видимих без застосування оптичних приладів.

Компонентний склад сплавів і їх кристалічна будова відіграють важливу роль при ультразвуковій дефектоскопії цих сплавів.

Відповідно до [21] розмір дійсного зерна в сталях оцінюється в балах. Зерна балу № 1 мають середню площу 40000 - 80000 мкм<sup>2</sup>, а зерна балу № 8 - 300 - 600 мкм<sup>2</sup>.

Якщо порівнювати структури сталей з точки зору величини зерна, то, наприклад, в евтектоїдних сталях (C=0,8%) найкрупніше зерно має перлит, потім в структурах сорбіт, троститу, бейніту зерно поступово зменшується і найдрібніше зерно у мартенситу.

Сталь 35ХНЗМ лита нормалізована має коефіцієнт загасання подовжніх ультразвукових коливань на частоті 2,5 МГц рівний 0,005 неп/см (4,34 дБ/м), а та ж сталь в загартованому стані має коефіцієнт загасання 0,002 неп/см (1,74 дБ/м). Вплив акустичних властивостей сплавів на проходження ультразвуку повинен враховуватися при визначенні чутливості ультразвукового методу стосовно конкретних сплавів.

Встановлено, що ультразвукові хвилі до частоти приблизно 1 МГц поширюються в дрібнозернистих металах на товщину більше 10 м. Проте при використанні вищих частот поглинання ультразвукових хвиль стає помітним і на частотах 10 МГц досліджувати метал завтовшки 1 м стає складно.

Вплив акустичних властивостей на проходження ультразвуку повинно враховуватися також при виготовленні і використанні зразків для ультразвукової дефектоскопії.

Дефектом називається кожна окрема невідповідність продукції встановленим вимогам [22].

Дефекти по їх розташуванню поділяються на зовнішні і внутрішні. Одні поверхневі дефекти (вибоїни, вм'ятини і ін..) виявляються візуально при зовнішньому огляді, інші - можна виявити тільки за допомогою інструменту або приладу ( раковини в литих заготовках, не провари, тріщини в зварних швах і т.д.).

Дефект, усунення якого технічно можливо, називають усувним; якщо ж усунення дефекту технічно неможливе або пов'язане з великими трудовими витратами, такий дефект називають неусувним.

Залежно від впливу на ефективність і безпеку використання продукції всі дефекти поділяють на критичні, значні і малозначні:

- критичний - це дефект, за наявності якого використання продукції за призначенням практично неможливе або неприпустиме, оскільки вона не відповідає вимогам безпеки або надійності;
- значним вважається дефект, який істотно впливає на використання продукції за призначенням і на її довговічність, але не є критичним;
- малозначним є дефект, який не впливає істотно на використання продукції за призначенням і її довговічність.

За походженням дефекти виробів поділяють на: конструктивну недосконалість конструкції, що є наслідком помилок конструктора; виробничо-технічну недосконалість або порушення технології виготовлення виробу при виливанні і пресуванні металів, зварюванні, механічній, термічній і інших видах обробки; експлуатаційні, що з'являються після деякого напрацювання в результаті

втоми металу деталей, корозії, зношування, а також неправильного технічного обслуговування і експлуатації.

Розглянемо стисло основні дефекти, що зустрічаються в металевих заготовках, напівфабрикатах, зварних швах і виробих в процесі їх виготовлення.

Невідповідність заданому хімічному складу виходить в наслідок помилок, допущених при розрахунку шихти, через неправильне проведення плавлення або вигорання окремих компонентів сплаву. В результаті відхилень від заданого хімічного складу відбувається зміна робочих характеристик сплаву. Таке литво не може бути використане для виготовлення виробів відповідального призначення.

Неметалічні включення з'являються через порушення технології плавлення. Вони можуть утворюватися, наприклад, в сталі внаслідок забруднення шлаками, продуктами окислювання і продуктами реакції між ними. Неметалічні включення мають неправильну форму і розташовуються в різних місцях відливання. У злитку шлакові включення в основному розташовані у верхній його частині.

Незлитини утворюються в металі внаслідок зниження швидкості і температури литва. Вони є несучільними і починаються від поверхні злитка.

Усадкові раковини виникають через недостатнє наповнення злитка або відливки металом в процесі кристалізації. В результаті у верхній частині злитка утворюються великі порожнини неправильної форми.

Газова пористість і газові пухирці з'являються при кристалізації через виділення газів, що розчинилися в металі в процесі плавлення. Ці дефекти розсіяні по всьому об'ємі злитка або зосереджені в корковому шарі. На відміну від шлакових включень газові пухирці мають округлу або довгасту форму.

Ліквация є неоднорідністю окремих ділянок металу по хімічному складу, структурі і неметалічних включеннях. Цей дефект не порушує цілісності металу. Проте міцність металу в зоні неоднорідності знижена. У цій зоні іноді спостерігається руйнування металу.

Гарячі тріщини виникають в процесі твердіння багатоскладових сплавів. Під впливом термічних або усадкових механічних напружень при високих температурах відбувається руйнування кристалізованих сплавів; при цьому утворюються

міжкристалічні гарячі тріщини з сильно окисленими поверхнями. Характерними ознаками гарячих тріщин є нерівні краї і значна їх ширина.

Холодні тріщини з'являються в злитку після закінчення процесу твердіння при відносно низьких температурах. Холодні тріщини мають світлі не окислені поверхні.

Тріщини поверхневі і внутрішні, розриви з'являються в поковці (штамповці, прокаті) через значні механічні напруження у металі при деформації. При обробці тиском метал неодноразово піддається нагріву і охолодженню, що приводить до виникнення термічних напружень, що сприяють розвитку внутрішніх розривів і тріщин.

Розшарування - внутрішні порушення щільності, орієнтовані по напрямку волокна; виникають при обробці тиском злитка, що мав усадков раковини або рихлість, а також при прокаті листа в результаті порівняно великих неметалічних включень і газових пухирців.

Шлакові включення в початкових заготовках (металургійний брак) при подальшому гарячому об'ємному штампуванні приводить до порушень щільності в поковці.

Флокени з'являються найчастіше в середньо вуглецевих сталях при підвищеному вмісті в них водню. Вони звичайно виникають в центральній зоні кованих або катаних заготовок великих перерізів і рідше в злитках. Флокени мають вид тонких звивистих тріщин, що є в зламі плями з поверхнею характерного сріблястого кольору округлої форми.

Волосини є результатом деформації дрібних неметалічних включень і газових пухирців. Ці дефекти мають вид тонких ліній завдовжки від доль міліметра до декількох сантиметрів, розташованих на поверхні і в під поверхневому шарі металу. Закачування виникають при надлишку металу у валках (калібрах) у вигляді задирок завглибшки більше 1 мм, розкатаних в діаметрально протилежних напрямках.

Плени - бризки рідкої сталі, застигли на поверхні злитка і розкатані при прокаті у вигляді плівок, що відшаровуються з поверхні, завтовшки до 1,5 мм.

Перегрівання або перепалення виникає при термічній обробці при недотриманні заданої температури, часу витримки, швидкості нагрівання і охолодження деталі. Перепалення викликає утворення великого зерна і оплавлення меж зерен, що сприяє надалі руйнуванню металу.

Тріщини термічні (зокрема гартівні) - результат різкого нагріву або охолодження металу (наприклад, при загартовуванні). Вони можуть починатися на поверхні деталі і розповсюджуватися вглиб або, навпаки, виникати всередині деталі в її серцевинній частині і розповсюджуватися у напрямі поперечного перетину.

Перепалення спостерігається при нагріві сталевих виробів в середовищі, що містить надлишок пари води, вуглекислого газу або водню. В цьому випадку відбувається вигорання вуглецю в поверхневих шарах, що значно знижує міцність сталі. У виробках з інструментальної сталі, що прожарюються повністю або на велику глибину і що не мають вуглеводневого шару, виникають поверхневі тріщини до 1-2 мм (і навіть більше).

Вуглецювання спостерігається при нагріві сталевих виробів в середовищі з надлишковою кількістю оксиду вуглецю. Це приводить до насичення поверхневих шарів вуглецем, що збільшує крихкість виробу і його схильність до виникнення тріщин.

Тріщини водневі з'являються при насиченні поверхневого шару сталі воднем під дією лугів, кислот і спеціальних розчинів та при електрохімічній обробці. Насичення поверхневого шару воднем приводить до різкого падіння пластичності і крихкого руйнування, джерелом яких звичайно стають мікротріщини деталі, що є на поверхні. Тріщини виникають в поверхневому шарі металу при операціях оброблення. Поверхневі мікротріщини надалі, при роботі деталі під навантаженням, можуть значно збільшуватися.

Пропали, шліфувальні тріщини з'являються в результаті різкого нагріву поверхневого шару сталевих виробів при порушенні режиму шліфування або полірування. Ці дефекти є або загартованими ділянками невеликої площі, або ділянками з сіткою тонких тріщин на поверхні деталі.

При зварюванні метал піддається розплавленню і твердінню, тому в зварних з'єднаннях можуть бути дефекти, властиві литому металу (раковини, пори, шлакові

включення і ін..). Крім того, під впливом високої температури в зоні термічного впливу також змінюються розміри зерна, виникають перегрів, гартування і відпуск, гарячі і холодні тріщини. Причинами утворення дефектів в зварному шві є недоброякісність, а також низька кваліфікація і культура праці працівників.

Залежно від місця знаходження і вигляду дефекти умовно діляться на зовнішні і внутрішні.

Зовнішні дефекти - це дефекти форми шва. А також про палення, кратери, напливи, підрізи і ін.. В більшості випадків зовнішні дефекти можна визначити візуально.

До внутрішніх дефектів відносяться пори, шлакові і неметалічні включення, не провари, тріщини і несплави. Ці дефекти виявляються ультразвуком.

Виявлення дефектів при ультразвуковому контролі значною мірою залежить від їх форми і орієнтації. З цієї точки зору внутрішні дефекти можна розділити на об'ємні і плоскі.

До дефектів об'ємної форми відносять пори, шлакові включення і їх різновиди.

Пори газові утворюються внаслідок забрудненості крайок зварюваного металу, використання вологого флюсу або електродів, що відволожились, недостатнього захисту шва при зварюванні в середовищі вуглекислого газу, збільшеної швидкості зварювання і завищеної довжини дуги. При зварюванні в середовищі вуглекислого газу, а в деяких випадках і під флюсом на великих струмах утворюються наскрізні пори - так звані дуплини. Розмір внутрішніх порів коливається від 0,4 до 2-3 мм в діаметрі, а іноді і більше. Пори можуть бути розподілені в шві окремими групами (скупчення порів) у вигляді ланцюжка по поздовжній осі шва або у вигляді окремих включень (одиначні пори).

Пори, залежно від їх кількості, розміру, місця розташування і характеру навантаження несучої конструкції, впливають по різному на статичну і вібраційну міцність. Для конструкцій, що працюють в умовах статичного напруження, допускається площа пор не більше 7% розрахункового перетину шва, а для конструкцій, що працюють при вібраційному навантаженні - не більше 4-5%. При

ультразвуковій дефектоскопії округлі пори виявляються слабо. Це пояснюється тим, що їх відбивна здатність мала через несприятливу форму.

Шлакові включення в металі зварного шва - це невеликі об'єми, забруднені неметалічними речовинами (шлаками, оксидами). Розміри їх досягають декількох міліметрів. Ці включення утворюються в шві через погане очищення крайок від окалин і інших забруднень, а найчастіше від шлаку на поверхні перших шарів багат шарових швів перед заваркою подальших шарів.

Шлакові включення можуть бути різної форми: круглі, плоскі, у вигляді плівки або довгасті, у вигляді витягнутих «хвостів». Вплив одиночних шлакових включень на працездатність конструкцій приблизно такий же, як і газових порів.

Звичайно шлакові включення мають більш витягнуту форму і більший розмір в порівнянні з порами. Тому на відміну від порів вони краще виявляються ультразвуком.

До плоских дефектів відносяться не провари, тріщини і не сплавлення.

Непровари - це несутільності на межах між основним і розплавленим металами або незаповнені металом порожнини в перетині шва. Причинами утворення не проварів є погана підготовка крайок зварюваних листів, мала відстань між крайками листів, неправильний або нестійкий режим зварювання тощо. Непровари знижують працездатність з'єднання за рахунок ослаблення робочого перетину шва. Крім того, гострі не провари можуть створити концентрацію напруження у шві. У конструкціях, що працюють на статичне навантаження, не провари величиною 10-15% від товщини зварюваного металу не робить істотного впливу на експлуатаційну міцність. Проте він є надзвичайно небезпечним дефектом, якщо конструкції працюють при вібраційних навантаженнях.

Тріщини - часткове місцеве руйнування зварного з'єднання. Вони можуть виникати в результаті надриву нагрітого металу в пластичному стані або в результаті крихкого руйнування після охолодження металу до низьких температур. Найчастіше тріщини утворюються в жорстко закріплених конструкціях.

Причинами утворення тріщин можуть бути неправильно вибрана технологія або погана техніка зварювання.

Тріщини є найбільш небезпечним і за існуючими правилами контролю недопустимим дефектом.

Несплавленн - це такий дефект, коли метал зварного шва, що наплавляється, не сплавляється з основним металом або з раніше наплавленим металом попереднього шару того ж шва.

Несплавлення утворюється внаслідок поганого зачищення крайок зварюваних деталей від окалини, іржі, фарби, при надмірній довжині дуги, недостатньому струмі, великій швидкості зварювання і ін..

Найімовірніше утворення даного дефекту при аргоно-дуговому зварюванні алюмінієво-магнієвих сплавів, а також при зварюванні тиском.

Несплавлення - дуже небезпечний дефект, що погано виявляється сучасними методами дефектоскопії, і, як правило, є недоступним.

Виявлення ультразвуком плоских дефектів багато в чому залежить від їх орієнтації і розташування в зварному шві. Всі вищезгадані дефекти зустрічаються головним чином при зварюванні плавленням. При зварюванні з тиском і паянні найбільш небезпечні це не сплавлення і не пропаювання. Неропаювання виникає в паяних з'єднаннях внаслідок недостатньої частоти з'єднуваних поверхонь або порушення температурного режиму паяння і є повним або частковим не заповненням паяного зазору припоєм.

Характерним дефектом у виробках, що виготовляються з двошарових матеріалів, є відшарування. Воно з'являється в процесі отримання двошарових листів або труб, а також при їх зварюванні і обробці тиском[6].

## 1.1 Магнітний метод

Магнітний вигляд неруйнівного контролю заснований на аналізі взаємодії магнітного поля з контрольованим об'єктом. Як правило, його застосовують для контролю об'єктів з феромагнітних матеріалів. По характеру взаємодії фізичного поля з об'єктом цей вигляд контролю не диференціюють: у всіх випадках використовують намагнічення об'єкту і вимірюють параметри, використовувані при контролі магнітними методами. Процес намагнічення і перемагнічування

ферромагнітного матеріалу проводиться гістерезисними явищами. Властивості, які потрібно контролювати (хімічний склад, структура, наявність несуцільностей і ін.), зазвичай пов'язані з параметрами процесу намагнічення і, петлею гістерезису.

Магнітні методи застосовують для виміру товщину ферромагнітного покриття на ферромагнітній підставі. Як первинний інформативний параметр в цьому випадку використовують потік магнітного поля. П-образній магніт поміщають на поверхню об'єкту контролю з покриттям. Чим менше товщина покриття, тим більше магнітний потік через ферромагнітну підставу і менше розсіяний потік над об'єктом контролю. Цей потік вимірюють по напруженості поля під виробом. Інший спосіб оцінки потоків заснований на вимірі сили, необхідної для того, щоб відірвати деякий пробний магніт від об'єкту контролю. Високоточний вимір кривою намагнічення показує, що вона має стрибкоподібний характер в області крутого підйому. Це так званий ефект

Баркгаузена. Скачки виникають в результаті перемагнічування областей спонтанного намагнічення (доменів), що містяться у ферромагнітному матеріалі. Параметри стрибків кривої намагнічення (їх число, величина, тривалість, спектральний склад) використовують як первинний, інформативний параметр для контролю таких властивостей матеріалу, як хімсостав, структура, міра пластичної деформації. Скачки зливаються в суцільний шум, якщо маса намагнічуваного матеріалу велика, тому цей спосіб застосовують до тонких проволокам, стрічкам.

При намагніченні об'єкту контролю, поблизу поверхні якого є несуцільностей(дефект), в області дефекту відбувається різка просторова зміна напруженості магнітного поля, виникає поле розсіяння. Зміну напруженості магнітного поля, точніше за градієнт напруженості, використовують як первинний інформативний параметр для виявлення дефектів.

Залишкове намагнічення, коерцитивну силу і магнітний потік часто оцінюють по пондеромоторному ефекту — взаємодії (тяжінню) пробного магніта і ОК. Інформацію про магнітну проникність і її зміну залежно від напруженості магнітного поля отримують за допомогою котушки індуктивності (індуктивний метод).

Диференціацію магнітного вигляду неруйнівного контролю на різні методи за способом здобуття первинної інформації розглянемо на прикладі вживання різних типів датчиків і речовин для виявлення градієнта магнітного поля поблизу несучільності. Градієнт часто виявляють за допомогою магнітного порошку або магнітної суспензії. Їх частки розташовуються уздовж ліній магнітної індукції поля розсіяння. Це магнітопорошковий метод, широко вживаний для дефектоскопії поверхневих і підповерхневих шарів феромагнітних матеріалів. Для надійного виявлення дефект повинен пересікати лінії магнітної індукції. Виходячи з цього, для виявлення різно орієнтованих дефектів застосовують різні напрями намагнічення. Виріб (стрижень) поміщають між двох полюсів магніта (полюсне намагнічення), що дає можливість виявити поперечні дефекти типу В. Через циліндровий об'єкт пропускають електричний струм. Лінії магнітної індукції утворюють кола в площині, перпендикулярній напрямку струму (циркулярне намагнічення). Це дає можливість виявити подовжні дефекти типу С.

Магнітопорошковим методом можна виявляти дефекти завдовжки близько 0,5 мм, шириною 2,5 мм і більш. При намагніченні постійним магнітним Тюлем виявляють дефекти, розташовані на глибині не більше 2...3 мм від поверхні. При намагніченні змінним полем максимальна глибина дефектів, що виявляються, зменшується.

Окрім магнітного порошку для реєстрації розсіяного магнітного поля використовують магнітну плівку, подібну вживаною в магнітофонах, але ширшу (магнітографічний метод). Прочитування сигналів про дефекти з плівки виконують за допомогою приладу, датчиком якого служить магнітофонна голівка. Цим методом виявляють дефекти в товщому поверхневому шарі, але втрачають наочність їх зображення, властиву магнітопорошковому методу.

Для відображення полей розсіяння на дефектах і виміри магнітних характеристик матеріалів також використовують датчики типу ферозондів (ферозондовий метод), перетворювачів Холу, магніторезисторів (що міняють електроопір при внесенні до магнітного поля). Розвиток магнітного вигляду контролю йде по шляху дослідження способів настроєння від чинників, що заважають, вивчення особливостей магнітних полів виробів складної форми, що

містять дефекти; розробки нових високочутливих перетворювачів; використання потенційних можливостей ефекту Баркгаузена, а так само інших магнітних ефектів, таких, як ядерний магнітний резонанс (ЯМР), розглянутий в кн. 3 даних серії.

Більшість котельних сталей володіють феромагнітними властивостями. Це дозволяє використовувати в інструментальній діагностиці магнітні і електромагнітні методи. Одним з широко поширених є метод виявлення магнітного поля розсіяння, що виникає над дефектом, за допомогою феромагнітних часток, що грають роль індикаторів.

У намагніченій деталі магнітні силові лінії, зустрічаючи дефект, огинають його як перешкоду з малою магнітною проникністю і утворюють над ним магнітне поле розсіяння. Поле розсіяння неоднорідний. Його можна виявити феромагнітними частками, оскільки в неоднорідному полі діють зтягуючі сили, прагнучі зтягнути частки в місця найбільшої концентрації силових ліній розсіяного поля і зібрати на дефекті у вигляді накопичення. Метод отримав назву магнітної порошкової дефектоскопії (МПД).

За допомогою МПД виявляються поверхневі і тонкі підповерхневі порушення суцільності - волосовина, тріщини (гартівні, втомні, шліфувальні, зварювальні, і ін.), розшарування, непровари зварних стиків, флокени, заходи, надриви і тому подібне Чутливість МПД визначається магнітними характеристиками металу, чистотою обробки поверхні, напруженістю поля, що намагнічує, способом контролю, взаємним напрямом поля, що намагнічує, і дефекту, властивостями вживаного магнітного або магнітно-люмінесцентного порошка, способом нанесення суспензії (сухого порошка).

До недоліків МПД слід віднести невеликий поріг чутливості при виявленні глибинних дефектів [7].

## 1.2 Тензометричний метод

Тензометричний метод ґрунтується на використанні тензорезисторів, які змінюють свій опір під дією деформацій механічних чутливих елементів (наприклад, мембран). Сучасні тензорезистори, які використовуються у резистори, які використовуються у засобах вимірювання тиску типу "Сапфір- 22 м,

виготовляються методом плазмового напилювання і забезпечують одержання результатів вимірювань тиску з досить високою точністю. Тензорезистори розміщуються на спеціальних сапфірній та металевій мембранах і під'єднуються до мостової схеми струмового перетворювача з уніфікованими сигналами 0-5; 0-20; 4-20тА.

Вимірювальні перетворювачі "Сапфір-22" забезпечують вимірювання тисків до 100 МПа, розрідження — до 10<sup>-5</sup> МПа, різниці тисків — від 2,5 Па до 16 МПа при класах точності ОД; 0,25; 0,5.

Основними перевагами перетворювачів "Сапфір-22" є використання незначних деформацій чутливих елементів, що підвищує їх надійність, стабільність лінійних характеристик, а також забезпечує вібростійкість.

Кварцеві пластини вирізаються перпендикулярно до електричної осі монокристалу кварцу. Під дією тиску рна електричних гранях пластини виникають електричні заряди:

$$Q = KSp, \quad (1.1)$$

де  $K$  — п'єзоелектрична стала (для кварцу  $K = 2 \cdot 10^{-2}$  Кл/Н);  $S$  — ефективна площа грані, м<sup>2</sup>.

П'єзоелектричний перетворювач під'єднується до електронного підсилювача постійного струму. Величина сигналу:

$$U_c = Q/C, \quad (1.2)$$

де  $C$  — загальна ємність вимірювальної ланки.

Завдяки "стіканню" заряду п'єзоелектричні перетворювачі використовуються для вимірювання динамічних навантажень, тисків, вібрацій. Вони надзвичайно жорсткі, мають високу частоту власних коливань та незначні деформації. Крім того, вони дуже малі за розмірами.

Недоліком п'єзоелектричних перетворювачів є їх високий електричний опір і неможливість використання для статичних вимірювань через

"стікання" електричного заряду пластин. Верхня межа вимірювання тиску таких приладів сягає 100 МПа, а за рахунок збільшення площі пластин (при паралельному їх включенні) чутливість перетворювачів можна значно підвищити і заміряти тиски, нижчі за 1 Па [8].

### 1.3 Капілярний метод

Капілярність (від лат. *capilaris*- Волосяний), *капілярний ефект* - фізичне явище, яке полягає в здатності рідин змінювати рівень в трубках, вузьких каналах довільної форми, пористих тілах. Підняття рідини відбувається у випадках змочування каналів рідинами, наприклад води в скляних трубках, піску, ґрунті і т. п. Зниження рідини відбувається в трубках і каналах, не змочуваних рідиною, наприклад ртуть у скляній трубці.

Завдяки капілярності можливі життєдіяльність тварин і рослин, різні хімічні процеси, побутові явища (наприклад, підйом гасу по гноті в гасовій лампі, витирання рук рушником). Капілярність ґрунту визначається швидкістю, з якою вода піднімається в ґрунті і залежить від розміру проміжків між ґрунтовими частинками.

Капілярами називаються тонкі трубки, а також найтонші судини в організмі людини та інших тварин .

Капілярний ефект використовується в неруйнівному контролі (капілярний контроль або контроль проникаючими речовинами) для виявлення дефектів, що мають вихід на поверхню контрольованого виробу. Дозволяє виявляти тріщини з розкриттям від 1 мкм, які не видно неозброєним оком.

За допомогою люмінесцентного, кольорового і люмінесцентно- кольорового методів, які за принципом дії є капілярними методами неруйнівного контролю, виявляються несучільності металу, що виходять на поверхню (тріщини, пори, раковини, дефекти зварних швів, дефекти, пов'язані з міжкристалічною корозією корозією, і ін.). Використання капілярної дефектоскопії рівне ефективно для магнітних і немагнітних металів. Роздільна здатність дефектоскопії дозволяє виявляти дефекти деталі, що виходять на поверхню, ширина яких менше 1 мкм.

Капілярна дефектоскопія дозволяє упевнено виявляти дефекти і отримувати точну картину їх розташування на поверхні. Проте капілярний слід не несе інформації про характер дефектів [9].

## 1.4 Ультразвуковий метод

Ультразвукова дефектоскопія (УЗД) - один з найбільш ефективних методів неруйнівного контролю. Дефектоскопія заснована на принципі передачі і прийому ультразвукових імпульсів, відбиваних від дефекту, розташованого в металі. Високочастотні звукові хвилі поширюються по перетину контрольованої деталі або вузла напрямлено і без помітного загасання, а від протилежної поверхні, що контактує з повітрям, повністю відбиваються.

Якщо перешкод, що заважають проходженню коливань, не виявилось, амплітуди прямого і відбитого імпульсів однакові. За наявності дефекту імпульсних піків буде три, причому відбитий від дефекту - менший. Ультразвукова дефектоскопія дозволяє виявляти всі внутрішні і деякі зовнішні дефекти в деталях, зварних з'єднаннях, поковках, відливаннях і інших місцях з точністю, залежною від чутливості дефектоскопа і конструкції контрольованого виробу.

За допомогою ультразвукових товщиномірів виробляється вимір товщини стінок труб, барабанів, колекторів.

При будь-якому з перерахованих методів контролю можна, а інколи і необхідно застосовувати два ПЕП, один з яких виконує функції випромінювача, інший - приймача. Така схема включення називається роздільною. Коли використовується один ПЕП, то в цьому випадку він виконує функції випромінювання зондуючих імпульсів і прийому ехо-камери-сигналів і така схема називається поєднаною. При дзеркальному для ехо-камери методі ПЕП включені за поєднаною схемою, а також приймають сигнали за роздільною схемою.

Луно-метод заснований на реєстрації луно-сигналу, відбитого від дефекту. Окрім переваги однобічного доступу він також має найбільшу чутливість до виявлення внутрішніх дефектів, високу точність визначення координат дефектів. До недоліків методу слід віднести перш за все низьку перешкодостійкість до зовнішніх відбивачів, різку залежність амплітуди сигналу від орієнтації дефекту. Цим методом контролюють близько 90 % всіх зварних з'єднань завтовшки 4 мм і більш.

При тіньовому методі контролю про наявність дефекту судять по зменшенню амплітуди уз-коливань, пройшовших від випромінювача до приймача. Чим більше розмір дефекту, тим менше амплітуда минулого сигналу. Випромінювач і приймач

ультразвуку розташовують при цьому співісний на протилежних поверхнях виробу. Тіньовий метод можна застосовувати лише при двосторонньому доступі до виробу. При ручному контролі цим методом можна контролювати зварні шви обмеженого перетину невеликої товщини. Недоліками методу є складність орієнтації ПЕП відносно центральних променів діаграми спрямованості, неможливість точної оцінки координат дефектів і нижча чутливість (у 10...20 раз) в порівнянні з ехо-методом. До переваг слід віднести низьку залежність амплітуди сигналу від орієнтації дефекту, високу перешкодостійкість і відсутність мертвої зони. Завдяки першій перевазі цим методом упевнено виявляються похилі дефекти, що не дають прямого віддзеркалення при ехо-методі.

При дзеркально-тіньовому методі ознакою виявлення дефекту служить ослаблення амплітуди сигналу, відбитого від протилежної поверхні (її зазвичай називають донною поверхнею) виробу. Додатковою перевагою цього методу в порівнянні з тіньовим є одnobічний доступ і упевненіше виявлення дефектів, розташованих в корені шва [10].

Луно-дзеркальний метод - найбільш достовірний при виявленні площинних вертикально орієнтованих дефектів. Він реалізується при прозвучуванні шва двома ПЕП, які переміщуються по поверхні біляшовної зони з одного боку шва так, щоб фіксувати одним ПЕП сигнал, що випромінює іншим ПЕП і що двічі відбився від дефекту і протилежної поверхні виробу. Цим методом контролюють вироби з еквідистантними поверхнями, а якщо їх товщина менше 40 мм, то необхідні спеціальні ПЕП. Одна з основних переваг методу - можливість оцінки форми дефектів розміром 3 мм і більш, які відхилені у вертикальній площині не більше ніж на  $10^\circ$ . При оцінці форми дефектів необхідною умовою є використання ПЕП однакової чутливості. Метод знайшов широке вживання при контролі товстостінних виробів, коли потрібна висока надійність виявлення вертикально-орієнтованих площинних дефектів, а також при арбітражних оцінках.

Дельта-метод використовується ультразвукова енергія, випромінювання дзеркально, частково трансформується в подовжню, а частково перевипромінює дифраговану хвилю. Трансформована подовжня хвиля поширюється нормально до нижньої поверхні, відбивається від неї і уловлюється прямим ПЕП. Цим же ПЕП

уловлюватиметься компонента подовжньої дифрагованої хвилі, що зривається з верхнього кінчика тріщини і поширюється вертикально вгору. До недоліків методу слід віднести необхідність зачистки шва, складність розшифровки прийнятих сигналів при контролі з'єднань товщиною 15 мм і менш, труднощі при налаштуванні чутливості і оцінці величини дефектів [11].

На основі зробленого аналізу різних методів неруйнівного контролю вибрано акустичний метод як оптимальний.

У магістерській роботі потрібно розробити такі задачі.

Обґрунтувати теоретичні основи вибраного методу контролю.

Розробити акустичний первинний перетворювач.

Здійснити дослідження імпульсного режиму роботи перетворювача.

Розробити дефектоскоп для контролю технічного стану теплоагрегатів, який в порівнянні із відомими приладами є зручнішим у користуванні та економічно ефективніший.

Здійснити оцінку похибки розробленого пристрою і результатів контролю

## 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИБРАНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ

### 2.1 Властивості ультразвукових коливань

При ультразвуковому контролі використовують перетворювачі, у яких розмір випромінювання набагато більший ніж довжина хвилі ультразвуку. Завдяки цьому ультразвук поширюється направленим пучком. Біля випромінювання на ділянці, яка називається ближня зона або зона Френеля, ультразвуковий пучок майже не розходиться. Довжина цієї зони для призмоподібного перетворювача:

$$r_0 = \frac{(a \cos\alpha / \cos\beta)^2}{\lambda} \quad (2.1)$$

де  $a$  - радіус п'єзоелемента;  $\lambda$ , - довжина хвилі в об'єкті;  $\beta$  - кут призми;  $\alpha$  - кут входу в метал.;

Попередня формула справедлива в області  $\beta_{кр1} < \beta < \beta_{кр2}$  - При  $r > r_0$  починається поступове розходження ультразвукової хвилі, плоска хвиля переходить в сферичну. Ця зона називається зоною Фраунгофера.

Кут розходження визначається за формулою:

$$\theta = \arcsin 0.61 \frac{\lambda}{a} = \arcsin 0.61 \frac{c}{af} \quad (2.2)$$

Видно що направленість ультразвукового пучка тим більша, чим більший радіус на частоту випромінюючих коливань. При розходженні ультразвукових хвиль від датчика їх інтенсивність падає [12].

### 2.2 Затухання ультразвуку

У виразі для плоских ультразвукових хвиль, так як і в основному рівнянні руху пружного середовища, не враховується послаблення хвиль, яке пов'язане із затуханням ультразвуку. В реальних умовах завдяки внутрішньому тертю,

неідеальним пружним властивостям і другим ефектам затухання ультразвуку має вагоме значення. Затухання рахується введенням уявної частини в хвильове число.

Плоску хвилю можна записати у вигляді:

$$u = Ue^{-i(\omega t - kr) - \delta r} \quad (2.3)$$

де  $\delta$  - коефіцієнт затухання.

Коефіцієнт затухання складається із коефіцієнтів послаблення і відстані.

$$\delta = \delta_n + \delta_p. \quad (2.4)$$

При поглинанні звукова енергія переходить в теплову, а при розсіянні залишається звуковою, але йде із направлено-розповсюджуючої хвилі в результаті відбивання на границях зерен і неоднорідностей.

Поглинання звуку в твердих тілах обумовлюється в основному внутрішнім тертям і теплопровідністю. Поглинання поперечних хвиль менше, ніж поздовжніх, так як вони не зв'язані з адіабатичними змінами об'єма, при яких появляються втрати на теплопровідність. Коефіцієнт поглинання в твердих тілах пропорційний частоті [13].

В монокристалах затухання визначається поглинанням ультразвуку. Метали, які застосовуються на практиці, мають полікристалічну структуру, і в них зазвичай затухання визначається розсіянням. В кристалах швидкість звуку має різне значення в залежності від направлення його поширення відносно осей симетрії кристала. Це явище називають пружною анізотропією.

В куску метала кристали орієнтовані різним образом, тому при переході ультразвуку із одного кристала в другий швидкість звуку може змінюватися в більшій або меншій степені. В результаті виникають часткові відбивання, заломлення і трансформація ультразвуку, що обумовлює механізм розсіяння.

Великий вплив на коефіцієнт розсіяння в металах виявляє відношення середньої величини зерна  $D$  і довжини хвилі ультразвуку  $\lambda$ . При  $\lambda \ll D$  звук

поглинається в кожному зерні, як в одному великому кристалі, затухання визначається в основному поглинанням. При  $\lambda \approx D$  розсіяння ультразвуку дуже велике. Ультразвук ніби проникає, дифундує між різними кристалами. Це область дифузного розсіяння.

Особливо велике затухання при  $\lambda \approx (2...4)D$ . Тут до дифузного розсіяння додається поглинання.

При  $\lambda > (8... 10)D$  виникає розсіяння маленькими зернами. При  $4 D < \lambda < 10 D$  коефіцієнт затухання пропорційний  $D\lambda^2$ . Найменше затухання буде при  $\lambda > (20...100)D$ . Якщо ця умова виконується, то можна контролювати вироби товщиною 8... 10м.

Значення затухання в більшій мірі визначає частоту ультразвукових коливань. З одної сторони, із збільшенням частоти збільшується амплітуда сигналу, як наслідок покращення направленості випромінювання, а з другого боку, зменшується амплітуда сигналу через збільшення затухання [14].

Коефіцієнт затухання частіше за все виражають числом від'ємних децибел на ділянці шляху в 1 м.

$$20 \lg(A/A_0) = -20 \delta r \text{ дБ} = -8.68 \delta r \quad (2.5)$$

де  $A_1$  - амплітуда опорного сигналу на відстані  $r_1$ ;  $A_2$  - амплітуда опорного сигналу на відстані  $r_2$ .

### 2.3 Відбивання ультразвуку

Одна із основних властивостей ультразвуку - здатність відбиватися від границь розподілу середовищ з різними акустичними опорами. Ця властивість характеризується коефіцієнтом відбивання, що представляє собою відношення амплітуд тиску у відбитій і падаючій хвилях.

$$R = P_{\text{від}} / P_{\text{пад}} \quad (2.7)$$

де  $P_{\text{від}}$  - тиск відбитої хвилі;  $P_{\text{пад}}$  - тиск падаючої хвилі.

Саме на цій властивості оснований виявлення дефектів при ультразвуковій контролі. При рішенні задачі відбивання ультразвуку ефективно скористуватися поняттям нормального імпеданса, який представляє собою відношення акустичного тиску до нормальної складової коливальної швидкості, внаслідок якої енергія переноситься із одного середовища в друге:

$$Z=P/V_{\Pi} \quad (2.8)$$

В свою чергу:

$$V=ik\phi \quad (2.9)$$

$$P=i\omega r\phi \quad (2.10)$$

$$P/V=\rho C \quad (2.11)$$

Нормальна складова коливальної швидкості падаючої хвилі:

$$V_{\Pi}=V\cos\Theta_{\text{ПАД}} \quad (2.12)$$

Підставивши вирази, получимо:

$$Z=P/V_{\Pi}=\rho C/\cos\Theta_{\text{ПАД}} \quad (2.13)$$

Звідси

$$V_{\Pi}=(P \cos\Theta_{\text{ПАД}} / \rho C) \quad (2.14)$$

Для розрахунку коефіцієнтів прозорості і відбивання є дві граничні умови - рівність тиску і нормальних складових коливальної швидкості зверху і знизу від границі, ні тиск, ні коливальна швидкість не повинні мати скачків при переході границь.

Тиск у відбитій хвилі:

$$P_{\text{від}}=P_0R \quad (2.15)$$

Коефіцієнт відбивання рівний:

$$Z_H = \frac{P_O + P_R}{\frac{\rho_1 C_1 \cos \theta_{\text{пад}}}{\rho_1 C_1} + \frac{\rho_1 C_1 \cos \theta_{\text{від}}}{\rho_1 C_1}} = \frac{1+R}{\frac{\cos \theta_{\text{пад}}}{\rho_1 C_1} + \frac{R \cos \theta_{\text{від}}}{\rho_1 C_1}} \quad (2.16)$$

Для відбитої хвилі  $\theta_{\text{від}} = 180^\circ - \beta$ . З врахуванням попереднє співвідношення можна записати так:

$$Z_H = \frac{1+R}{\frac{\cos \beta}{\rho_1 C_1} + \frac{R \cos \beta}{\rho_1 C_1}} = \frac{1+R}{\frac{1+R}{Z_1}} \quad (2.17)$$

Розв'язуючи відносно R, отримаємо:

$$R = (Z_H - Z_1) / (Z_H + Z_1) \quad (2.18)$$

Знизу від границі у випадку який ми розглядаємо  $Z_H = Z = \rho C \cos \alpha$ , тому:

$$R = \frac{Z - Z_1}{Z + Z_1} = \frac{\frac{\rho C \cos \alpha}{\rho_1 C_1} - \frac{\rho_1 C_1 \cos \beta}{\rho_1 C_1}}{\frac{\rho C \cos \alpha}{\rho_1 C_1} + \frac{\rho_1 C_1 \cos \beta}{\rho_1 C_1}} \quad (2.19)$$

Використовуючи рівність імпедансів зверху і знизу від границі, можна отримати  $1+R=D$ . Звідси:

$$D = 2Z / (Z + Z_1) \quad (2.20)$$

Коефіцієнт відбивання і прозорості, розраховують по попередніх виразах, представляють коефіцієнт відбивання по амплітуді. На практиці, коефіцієнт відбивання і проходження характеризується не амплітудою, а енергією[15]. Коефіцієнти відбивання  $\check{R}$  і прозорості  $\check{D}$  по енергії визначаються як відношення густини потоків відбитої енергії  $W_{\text{від}}$  і пройшовшої  $W_{\text{пр}}$  хвиль до падаючої  $W_{\text{пад}}$

$$\check{R} = W_{\text{від}} / W_{\text{пад}} \quad (2.21)$$

$$\check{D} = W_{\text{пр}} / W_{\text{пад}} \quad (2.22)$$

Ця форма запису справедлива і для інтенсивності звуку I, так як  $W_{\text{пад}} = I_0 / 2$  і  $W = P^2 / \rho C$ , то отримаємо:

$$\check{R} = \frac{R P O^2}{P O} = R^2 \quad (2.23)$$

Із законом збереження енергії  $\check{R} + \check{D} = 1$ . Відповідно:

$$\check{D} = 1 - R^2 \quad (2.23)$$

Підставляючи попередні рівняння, отримаємо:

$$\check{R} = \left( \frac{z - z_1}{z + z_1} \right)^2 \quad (2.24)$$

$$\check{D} = \frac{4zz_1}{(z + z_1)^2} \quad (2.25)$$

Це означає, що коефіцієнт прозорості по енергії рівний коефіцієнтам прозорості по амплітуді в прямому і зворотному напрямку.

Формули коефіцієнтів відбиття і прозорості для двох випадкових твердих тіл, або рідини і твердого тіла отримані розв'язанням задачі на границі розподілу двох середовищ при наступних граничних умовах - це рівність нормальних напружень і відсутність дотинаючих напружень. При нахиленому падінні поздовжніх хвиль формули для розрахунку мають вигляд:

$$\check{R} = \left( \frac{Zl \cos^2 2\alpha t + Zt \sin^2 2\alpha t - Z_1}{Zl \cos^2 2\alpha t + Zt \sin^2 2\alpha t + Z_1} \right)^2 \quad (2.26)$$

$$\check{D}_1 = \frac{4ZlZ_1 \cos^2 2\alpha t}{(Zl \cos^2 2\alpha t + Zt \sin^2 2\alpha t + Z_1)^2} \quad (2.27)$$

$$\check{D}_1 = \frac{4ZtZ_1 \sin^2 2\alpha t}{(Zl \cos^2 2\alpha t + Zt \sin^2 2\alpha t + Z_1)^2} \quad (2.28)$$

Розрахунок коефіцієнтів проходження поздовжньої і поперечної хвиль по енергії для границі плексиглас-сталь. В області малих кутів падіння (0-10°) в сталі є тільки практично поздовжня хвиля. Цю область використовують для збудження поздовжніх хвиль роздільно-суміщеним перетворювачем. Цю область кутів використовують в дефектоскопії рідко. При першому критичному куті найбільш інтенсивно збуджується головна хвиля. Цю область найбільш часто використовують в дефектоскопії для збудження в контрольованому матеріалі поперечних хвиль. За другим критичним кутом при деякому куті падіння збуджується поверхнева хвиля [16].

Необхідно відмітити, що в деякому діапазоні кутів теоретичні значення коефіцієнтів проходження відрізняються від експериментальних.

Це пояснюється тим, що закон Снелліуса і отримані вирази для розрахунку коефіцієнтів відбивання і поглинання справедливі для випадкової плоскої хвилі. В реальних перетворювачах, як правило, пучок що розходиться і кожний із променів пучка має свій коефіцієнт проходження. Установлено також, що центральний промінь відхиляється від напрямлення акустичної осі, розрахованого по закону Снелліуса в залежності від відношення радіуса п'єзоелемента на частоту. Відхилення тим менше, чим більше це відношення.

Раніше розглядали властивості ультразвукових коливань, як в рідині, так і в пружних тілах. Розглянемо властивості хвиль, які мають особливості, зв'язані з пружними характеристиками. [17].

## 2.4 Поляризація ультразвукових хвиль

При падінні поздовжньої хвилі на границю розподілу двох середовищ виникають зміщення і напруження, орієнтовані тільки в площині падіння. Відповідно, вектори зміщення частин у відбитих і заломлених хвилях лежать в тій же площині. В поздовжніх хвилях вектори направлені вздовж напрямлення поширення хвиль, а в поперечних - перпендикулярні їм. Таким чином, в даному випадку поперечна хвиля лінійно поляризована в площині падіння.

В реальних умовах, коли випромінювач поздовжньої хвилі має обмежені розміри, на лінійно поляризовану поперечну хвилю, вхідну в предмет, накладається так звана неполяризована поперечна хвиля.

Вона виникає в зв'язку з випадковими змінами яких небудь властивостей випромінювача ультразвуку, наприклад нерівномірністю розподілення п'єзомодулів по поверхності п'єзопластини, або випадковими локальними порушеннями площини контактної поверхні. Коливання частинок в таких хвилях лежать в площині, перпендикулярній направленості поширення хвилі, але з рівною ймовірністю можуть бути орієнтовані в будь-якому напрямку цієї площини.

Для оцінки степені поляризації по аналогії з оптикою є введений коефіцієнт:

$$g=(A_{\max}-A_{\min})/(A_{\max}+A_{\min}), \quad (2.29)$$

де  $A_{\max}$  і  $A_{\min}$ - сигнали, вимірювання при повороті приймача-аналізатора в площині фронту реєстрації хвилі на  $90^\circ$ .

Коефіцієнт поляризації лінійно поляризованої хвилі  $P=1$ , хвилі з кутовою поляризацією  $P=0$ , а еліптично поляризовані хвилі - проміжне значення. Експериментами показано, що відношення амплітуд лінійно поляризованої і звичайних частинок складають не менше 30 дБ.

Таким чином, у всіх випадках, які представляють інтерес, можна рахувати, що поперечна хвиля, яка вводиться у виріб за допомогою нахилених п'єзоперетворювачів, лінійно поляризована в площині, перпендикулярній причому кожна відбивається незалежно із своїм коефіцієнтом. Можна показати, що в такому випадку ефективне значення коефіцієнта відбивання визначається за формулою:

$$R_{\text{ef}}=|-\cos\xi_0\cos\beta R\vec{i} + \cos\xi_0\sin\beta R\vec{j} + \sin\xi_0\vec{k}|, \quad (2.32)$$

Де  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$ - одиничні вектори.

При  $\beta < \beta_{\text{кр}}$  формула матиме вигляд:

$$R_{\text{ef}} = \sqrt{\sin^2\xi_0 + R^2\cos^2\xi_0} \quad (2.33)$$

При цьому відбита хвиля лінійно поляризована, причому вектор зміщення в цій хвилі відхилений від площини падіння хвилі.

Для за критичних кутів падіння  $\beta > \beta_{\text{крз}}$  відбита поперечна хвиля може мати еліптичну поляризацію. Такий вид поляризації не зустрічався. Еліптично поляризованою називається поперечна хвиля, в якій кінець вектора зміщення кожної частини, яка коливається описує еліпс, який лежить в площині, перпендикулярнонаправленій поширенню хвилі. Така поляризація хвилі виникає, коли коливання частинок в двох взаємно перпендикулярних напрямках зсунуті по фазі, у випадку відбивання поперечної хвилі від вільної границі при умові  $\beta > \beta_{\text{крз}}$ . Дійсно, вище говорилося, що при цьому SV-і SH- хвилі зсунуті по фазі: якщо фаза

відбитої SH- хвилі рівна нулю, то фаза  $\varphi$  відбитої SV- хвилі, визначається із співвідношення:

$$\cos\varphi = (a^2 - b^2) / (a^2 + b^2) \quad (2.34)$$

$$a = 2\sin\beta\sin 2\beta \sqrt{\sin^2\beta - \left(\frac{c_2}{c_1}\right)^2} \quad (2.35)$$

$$b = \cos^2 2\beta \quad (2.36)$$

Для за критичних кутів падіння виражається для  $R_{ef}$ , має доволі об'ємний вид і ми не будемо його наводити. Для практики набагато більший інтерес представляє не сам коефіцієнт відбивання  $R_{ef}$ , а та частина відбитої хвилі, яка може бути прийнята поляризованим приймачем. Оскільки саме напрямлення поляризації приймача перпендикулярно напрямленню поляризації відбитої хвилі, то такий приймач взагалі не зареєструє відбиту хвилю. Тому очевидно, що, змінюючи напрямлення поляризації приймача, можна вибрати таку ситуацію, коли сигнал який ми приймаємо - максимальний із можливого. Якщо напрямлення поляризації приймача відхилено від площини падіння, то можна показати, що амплітуда прийнятого сигналу визначається за формулою:

При  $\beta > \beta_{кр3}$ :

$$A = \sqrt{\cos^2(\xi_2 + \xi_0) + \frac{1}{2}\sin 2\xi_0 \sin 2\xi_2 (1 - \cos\varphi)} \quad (2.37)$$

При  $\beta \leq \beta_{кр3}$ :

$$A = |\sin\xi_0 \sin\xi_2 - R \cos\xi_0 \cos\xi_2| \quad (2.38)$$

Розраховані по формулах залежності показані для випадків, які найбільш часто зустрічаються. Видно, що максимальне значення амплітуди при любых кутах падіння кутів  $\xi_0$ ,  $\xi_2$  до  $90^\circ$ , при прозвучуванні відбиваючих границь горизонтально поляризованими хвилями, коефіцієнт відбивання яких рівний одиниці.

Крім того, максимальний сигнал досягається при куті падіння  $\beta = 45^\circ$  і будь-якій орієнтації поляризації падаючої хвилі, коли  $\xi_2 = -\xi_0$ . Це пов'язано з тим, що іменно

при такому куті падіння фаза відбивання вертикально поляризованої хвилі рівна нулю, співпадає з фазою відбитої горизонтальної поляризованої хвилі. Тому при такому куті падіння еліптично поляризована поперечна хвиля вироджується в лінійно поляризовану і ефективний коефіцієнт її відбивання рівний одиниці. Ця обставина свідчить про користі застосування роздільно суміщених перетворювачів типу «дует», у яких при деяких кутах повороту горизонтально поляризована компонента достатньо велика [18].

## 2.5 Дифракція ультразвуку

Під дифракцією розуміють явище, яке виникає при зустрічі хвиль з перешкодами. Хвиля, зустрічаючи при поширенні в однорідному середовищі перешкоду, змінюється по амплітуді і фазі, і проникає в область тіні, відхиляючись від прямолінійного шляху. В такому випадку хвильові поля не може бути описано законами геометричної оптики. Розглянемо дифракційну картину для площини і об'ємних дефектів.

Кожна хвиля, падаючи на тріщину і торкаючись її країв, породжує два типи краєвих дифракційних хвиль - поле поздовжніх і поле поперечних хвиль. Якщо промінь падає під третім критичним кутом до поверхні тріщини, то, як було розглянуто раніше, створюється додаткове поле внаслідок неоднорідних головних хвиль. Амплітуда дифрагованих променів значно менша амплітуди променя, який їх породжує, і в процесі розповсюдження спадає, в той час як амплітуда падаючої хвилі постійна.

Якщо ширина тріщини менше ширини пучка, то поле на приймачі представляє суму дзеркально відбитого і дифрагованих сигналів від країв тріщини. Варто відзначити, що починаючи з деякого кута між віссю дефекта і віссю перетворювача вклад в прийнятий сигнал визначається головним чином дифракційними сигналами від країв тріщини.

Про падінні хвилі на гладку випуклу поверхню формується розсіяне поле, яке представляє собою суперпозицію відбитих і дифрагованих хвиль. В зонах, поверхності яких промені торкаються, формуються хвилі, огинаючи ці поверхні і в свою чергу породжуючи дифракційні хвилі ковзання. Для прикладу розглянемо дифракцію на циліндрі при падінні поперечної хвилі  $\delta Y$  - типу. Поперечна хвиля, дзеркально відбита від вільної поверхні проходить поза зоною геометричної тіні. При  $r \gg b$  потенціал такої хвилі описується виразом:

$$\psi_3 = \sqrt{\frac{b}{2r} \cos \frac{\theta}{2}} R t \left( \frac{\theta}{2} \right) \exp \left[ i k t \left( r - 2 b \cos \frac{\theta}{2} \right) \right] \quad (2.38)$$

Якщо падаючий промінь попадає на поверхню під кутом  $\alpha$ , меншим третього критичного, то в області  $\theta < \alpha_{кр} + 90^\circ$  розсіюється поздовжня хвиля. Огинаюча хвиля може бути поверхневою релеєвського типу R, поперечною T або поздовжньою h. Ці хвилі, як правило, збуджуються одночасно. Розглянемо механізм їх утворення. Промені падаючої поперечної хвилі, торкаючись поверхні циліндра, збуджують ковзаючи вздовж його поверхні хвилю поперечного типу, потенціал якої:

$$\psi_t = \sqrt{\frac{\lambda t}{r}} D_t \exp[-(\pi - \theta) I_m k] \quad (2.39)$$

де  $D_t$  - коефіцієнт дифракції;  $k$  - кутове хвильове число;  $I_m$  - коефіцієнт затухання.

Оцінка отриманих залежностей показує, що потенціал поверхні хвилі поздовжнього типу. Видно, що при малих  $\theta$  дифрагований сигнал вносять вклад лиш ковзаючи хвилі релеєвського типу. Із збільшенням  $\theta$  збільшується амплітуда ковзаючої поперечної хвилі. Це можна пояснити тим, що поперечні хвилі збуджуються ефективніше релеєвських, але затухають значно швидше. Тому вони визначають дифрагований сигнал лиш при невеликих кутах повороту акустичних осей, коли шлях який вони проходять зменшується. Необхідно відмітити, що при падінні SV - хвилі перевипромінювана хвиля ковзання завжди поперечного типу.

Аналогічну дифракційну картину можна описати при падінні поздовжньої хвилі. На даний час ця властивість використовується при оцінці не тільки розмірів дефектів і їх форми, но і для оцінки радіуса непроварів і тріщин, що не вдається ні

одному із відомих методів неруйнівного контролю. Знання законів розсіювання дифрагованих сигналів дозволяє оптимізувати розміри циліндричних відбивачів для настройки чутливості ультразвукового контролю, кути повороту між випромінювачами і приймачами перетворювачів. Необхідно відмітити, що ця властивість ультразвукових хвиль ще недостатньо досліджена і в найближчий час получити великий розвиток [19].

## 2.6 Рефракція ультразвуку

Рефракція - неперервне зміна напрямлення променя в сторону меншої швидкості. Це явище спостерігається в неоднорідних середовищах, в яких групова швидкість змінюється, наприклад по лінійному закону. В таких середовищах, згідно закону Снелліуса. В результаті постійної швидкості по січенню променя відхиляються від прямолінійного розповсюдження і утворюються зони, в яких концентруються промені. Такі зони називають каустиками, які, рухаються по різних напрямкам, збираються в одній точці, яка визначає певний максимум сигналу.

Якщо  $\alpha < 90^\circ$ , то після проходження зони із постійною швидкістю ультразвуку і по мірі розповсюдження в зоні, де швидкість змінюється від зони до зони з постійним градієнтом, внаслідок збереження закону промінь буде міняти свою траєкторію по дузі колом радіусом:

$$r=C/\cos\alpha G, \quad (2.40)$$

Другий максимум відповідає сигналу рефрагованого центрального променя, поширюючого під максимальним кутом:

$$\alpha=\arccos C_0/C_{\max}. \quad (2.41)$$

На практиці це явище використовують при контролі величини шару холодної прокатки [20].

## 2.7 Акустичні первинні перетворювачі

Акустичні первинні перетворювачі в неруйнівному контролі є «серцем» вимірювальних приладів. Основною задачею первинних перетворювачів є трансформація механічної енергії коливань акустичної хвилі в електричну і навпаки. За процес трансформації механічної та електричної енергії у первинних перетворювачах відповідає чутливий елемент, матеріал якого має п'єзоелектричні властивості. Нагадаємо, що явище п'єзоефекту було відкрито у 1880-му році братами Кюрі. Суть явища полягає в генеруванні матеріалом електричного заряду при прикладанні до нього механічного зусилля, так званий прямий п'єзоефект. Зворотнім п'єзоефектом є деформація матеріалу при прикладенні до нього електричної напруги, явище було відкрито в 1881-му році Ліпманом.

Першим найбільш поширеним матеріалом, з якого виготовляли чутливі елементи, є кварц. Цей матеріал має природні властивості п'єзоефекту. Іншими матеріалами, що мають природні властивості п'єзоефекту, є турмалін, сегнетова сіль, цукор з тростини тощо.

На даний час в якості матеріалу чутливих елементів первинних п'єзоперетворювачів широко використовують полікристалічні керамічні матеріали. Ці матеріали не мають п'єзопластивостей у природному стані. Їх виготовляють шляхом змішування твердих частинок кераміки із рідкою речовиною, заливають у форму і висушують під тиском. Потім отриману форму матеріалу розрізають на пластини однакової товщини. Робоча частота пластини залежить від товщини чутливого елемента. Наступним кроком є полірування поверхні чутливого елемента до необхідного рівня та покриття тонким шаром провідника, зазвичай із срібла. На цьому етапі чутливий елемент ще не активний, оскільки він складається із великої кількості мікроскопічних п'єзоелементів, що мають довільну орієнтацію. Ці мікроскопічні п'єзоелементи необхідно поляризувати. Процес поляризації проводиться при поєднаному статичному електричному полі значної величини до електродів чутливого елемента і його зануренні в мастило. Мастило нагрівають до температури, що є близькою до температури Кюрі. Після нагрівання чутливого

елементу охолоджують при включеному статичному електричному полі. Після охолодження електричне поле від'єднують і отримують поляризований чутливий елемент. Процес поляризації відрізняється для різних типів коливань. В загальному чутливий елемент буде мати набір резонансних частот, проте вибір форми та місця кріплення електродів та форми чутливого елемента дозволяє отримати чистий багато частотний спектр коливань в заданому діапазоні.

Найбільш відомим серед цих матеріалів є цирконат титану свинцю та полівінілденфторид, перевагами яких є більш яскрава вираженість п'єзоефекту. Недоліками таких матеріалів є зміна ступеня п'єзоефекту з часом.

Інтенсивність дослідження в таких наукових напрямках як акустика, неруйнівний контроль, матеріалознавство на протязі останніх десятиліть дало можливість відкрити інші матеріали, що мають п'єзоелектричні властивості.

Серед мод коливань пезопластики будемо розуміти тільки ті, що генеруються електричним полем. Для опису таких мод визначимо:

$$S = sT + dE, \quad (2.42)$$

$$D = dT + \epsilon E, \quad (2.43)$$

де  $S$  - деформація,  $s$  - пружна податливість,  $T$  - механічне напруження,  $d$  - п'єзоелектричні константи,  $E$  - напруженість електричного поля,  $D$  - електрична поляризація,  $\epsilon$  - діелектричні константи.

Необхідно відмітити, що всі змінні є матрицями. При відсутності механічних напружень деформація буде дорівнювати  $dE$ .

Матриця діелектричних констант для кварцу (1 матиме таку форму:

$$d = \begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.44)$$

Нульовий третій рядок означає, що електричне поле не може створювати механічних деформацій, а також що поздовжній компонент деформації не може бути викликаний полем в будь-якому напрямку його прокладання.

Альтернативним рівнянням є таке:

$$T=CS - eE, \quad (2.45)$$

$$D=eS+\varepsilon E, \quad (2.46)$$

де  $C$  - матриця пружних констант.

Необхідно відмітити, що всі змінні є матрицями. При відсутності механічних напружень деформація буде дорівнювати  $DE$ .

Так, для ненульових компонентів поля  $E_1$  та  $E_2$ , ненульові компоненти деформацій пластин кварцу будуть такими:

$$S_1=d_{11}E_1, S_2=-d_{11}E_1, S_4=d_{14}E_1 \quad (2.47)$$

$$S_5=-d_{14}E_2, S_6=-2d_{11}E_2. \quad (2.48)$$

Ці рівняння демонструють основні моди вібрацій, що використовуються для кварцових чутливих елементів.

Вираз  $S_1=d_{11}E_1$  визначає деформацію пьезопластики в напрямку електричної осі внаслідок прикладеного електричного поля. Отже, якщо пьезопластика вирізана в площині, нормальній до осі і електроди закріплені в головних гранях, то електричне поле викличе деформацію пластини по її товщині.

Зміна напруги заставить пьезопластину коливатись у поздовжньому напрямку вдовж осі. В першій апроксимації механічний резонанс пьезопластики матиме місце, коли її товщина дорівнюватиме цілій кількості пів довжин хвиль. В цьому випадку в пьезопластині буде стояча хвиля, а дві її поверхні коливатимуться в протилежних напрямках. При подальшому аналізі очевидно, що коливання пьезопластики матиме місце тільки тоді, коли її товщина дорівнюватиме цілій непарній кількості пів довжин хвиль  $n$ . Число  $n$  є кількістю обертів, тому прийнято говорити, що пластину можна збудити тільки непарною кількістю обертів.

Коли  $n=1$ , то пьезопластика коливатиметься на основній моді. В першій апроксимації швидкість деформації пьезопластики  $U_{пв}$  напрямку розширення -

звуження залежить виключно від констант матеріалу і є незалежною від частоти коливань  $f$ . Умова резонансу п'єзопластини буде такою:

$$f = \frac{nV}{2t} \quad (2.49)$$

де  $t$  - товщина пезопластини,  $n$  - повинно бути непарним цілим числом. Пезопластини прийнято характеризувати частотно-товщинною константою  $k_n$ :

$$k_n = ft \quad (2.50)$$

Константа  $k_n$  залежить від параметрів матеріалу та кількості обертонів. Для фундаментальної моди Х-зрізу кварцу константа  $k$  дорівнює 2870 кГц-мм. Отже, пезопластина товщиною 1 мм коливатиметься згідно із частотою 2,87 МГц.

При збудженні електричним полем пезопластини Х-зрізу наявні поздовжні деформації вздовж осі та деформації зсуву в площині пезопластини. Наявність додаткових деформацій Х-зрізу не дозволяє ефективно використовувати його в якості чутливого елемента в задачах неруйнівного контролю.

При прикладенні механічних зусиль до пезопластини створюються механічні напруження  $T$  і на її гранях появиться електричний заряд, що вимірюється поляризацією  $D$ . Це є прямим п'єзоелектричним ефектом, що математично описується так:

$$D = dT \quad (2.51)$$

де  $d$  - п'єзоелектрична константа деформації.

Звичайно кількісні значення змінних залежать від напрямку прикладеного зусилля. Для оцінки ефективності чутливого елемента для вибраного напрямку прикладених зусиль до пезопластини вводиться коефіцієнт електромеханічного зв'язку  $\beta$ :

$$\beta = d \sqrt{\frac{c}{\varepsilon}} \quad (2.52)$$

де  $c$  - пружні константи,  $\varepsilon$  - діелектрична проникність.

На практиці використовують значення квадрату електромеханічного зв'язку  $\beta^2$ , фізичний зміст якого означає відношення кількості випромінюваної механічної енергії, що продукує пезопластина, до кількості електричної енергії, що прикладена до неї.

Константи  $\beta$ ,  $\alpha$  залежать від температури. В загальному, при підвищенні температури величини цих констант зменшуються і при досягненні точки Кюрі дорівнюють нулю. Значення п'єзоелектричних констант та електромеханічного зв'язку представлена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Апроксимовані значення коефіцієнтів чутливого елемента, що характеризують ефективність його роботи

Матеріал	$d, \text{Кл/Н} \cdot 10^{12}$	$\beta$	Температура, °C
Титанат барію	60-190	0,2 - 0,5	120-140
Мета-ніобат свинцю	85	0,42	550
Цирконат-титанату свинцю	80 -320	0,23 - 0,76	250 - 490
Літій ніобіт	6	0,18	1210
Кварц, X-зріз	2,3	0,11	350
Натрій мета-ніобіт	86-160	0,51-0,53	290 - 420

Заставити коливатись пезопластину з прикріпленими до її граней електродами можна двома шляхами:

- подати змінну напругу;
- прикласти до електродів піковий імпульс постійного струму.

При прикладеній напрузі на гранях п'єзопластини появиться електричний заряд і вона почне коливатись. Характер коливань п'єзопластини можна описати струмом, що проходить через п'єзоелемент  $I$  або напругою на електродах  $U$ . Напруга числово дорівнює механічним зусиллям, що діють в п'єзопластині  $F$ :

$$F=PA=\alpha_T U, \quad (2.53)$$

де  $P$  - акустичний тиск;  $A$  - площа, на яку діє ультразвукове поле;  $\alpha_T$  - константа трансформації.

Константа трансформації обчислюється так:

$$C = \frac{A \cdot d \cdot E}{t} \quad (2.54)$$

де  $t$  - товщина п'єзопластини;  $E$  - модуль Юнга.

Струм  $I$  числово дорівнює швидкості переміщення грані п'єзопластини:

$$I = \alpha_T U \quad (2.55)$$

Таким чином, вібрації п'єзопластини аналогічні коливанням в електричному колі із індуктивністю  $L$ , ємністю  $C$  та електричним опором  $R$ , що аналогічний механічному опору  $R_M$ . Повний механічний імпеданс п'єзопластини буде таким:

$$Z_M = R_M + j \left( \omega M + \frac{1}{\omega C} \right) = \frac{F}{u} \quad (2.56)$$

де  $\omega$  - частота;  $M$  - маса.

Повний електричний опір  $Z$ , що аналогічний повному механічному імпедансу, є таким:

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{Z_M}{\alpha_T} \quad (2.57)$$

Значення частоти фундаментальної моди є таким  $f_0$ :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{MC}} \quad (2.58)$$

Для основної моди товщина п'єзопластини  $t$  має дорівнювати половині довжини хвилі  $\lambda/2$ . В цьому випадку частота основної моди буде такою:

$$f_0 = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{c}{2t} \quad (2.59)$$

де  $c$  - швидкість поширення акустичної хвилі в напрямку полярної осі;  $\rho$  - густина.

## 2.8 Аналіз матеріалів чутливого елемента

В різних технологічних процесах основне технологічне обладнання експлуатується при своїх режимах та особливостях роботи, які впливають на зміну фізико-механічних властивостей металу, а значить і на отримані результати при проведенні ультразвукового контролю. При обґрунтуванні вибору та використанні ультразвукових пристроїв приділяється велика увага аналізу умов роботи та об'єкта контролю, а саме фізичні, хімічні властивості матеріалу, рівень вібрації, якості та чистоті поверхні об'єкта контролю та інші.

Такі основні технічні характеристики первинного перетворювача, як час старіння його матеріалу, частота, просторовий розподіл випромінювання, форма імпульсу і інші залежать від вибраного матеріалу п'єзоелемента. Правильний вибір матеріалу п'єзоелемента допомагає зробити кращу оцінку характерну його роботи в конкретних умовах проведення неруйнівного контролю, зокрема оцінити коефіцієнт поглинання ультразвукової хвилі матеріалом об'єкта контролю та відбиття його від поверхні. На сьогоднішній день відомо велику кількість видів п'єзоелектричних матеріалів, які досить широко використовуються для виготовлення первинних перетворювачів.

П'єзоелектричні матеріали можна класифікувати на полярні та неполярні п'єзоелектрики. До основних акустичних характеристик полярних матеріалів відносять наявність власної електричної поляризації, що існує при відсутності зовнішнього механічного зусилля чи електричного поля. Дана властивість визначає їх високі п'єзоелектричні властивості. Поряд з їх перевагою відносно неполярних п'єзоелектриків, полярні мають деякі недоліки, що обмежують їх використання при проведенні контролю технічного стану котлів, зокрема нерівномірна залежність їх п'єзоелектричних властивостей від температури, нестабільність п'єзоелектричних параметрів, великі діелектричні та механічні втрати, що обмежує їх використання для високоточних вимірювань швидкості ультразвуку. Дані недоліки відсутні у полярних п'єзоелектриків. Недоліком п'єзонапівпровідникових матеріалів, які відносяться до групи неполярних, є їх фоточутливість, тобто властивість при зміні

освітлення змінюються п'єзоелектричні характеристики, наявність вільних носіїв заряду стає причиною виникнення додаткового електричного поля, що є причиною додаткової деформації.

Особливості експлуатації та умови роботи котлів, такі як шум та вібрація обмежують застосування вище згаданих матеріалів. Використання кварцу, в залежності від напрямку зрізу кристалу, дозволяє випромінювати відповідно

При подаванні на електроди напруги у вигляді пікового імпульсу, внаслідок п'єзоефекту пластина починає коливатись. В залежності від того, як виготовлено п'єзопластину коливання можуть бути поздовжніми, поперечними або згинними. У нашому випадку розглянемо поздовжні коливання, при яких п'єзопластина починає витягуватись у напрямки вісі Z. В цьому випадку чутливий елемент можна представити як електричну схему-аналог у вигляді шестиполіусника у якому одному входу відповідає електрична складова, а двом іншим - дві поверхні п'єзопластини.

Розкриття електричної схеми-аналог роботи чутливого елемента здійснено Мезоном. У якій процес утворення коливання чутливого елемента внаслідок подавання електричного імпульсу на електроди представляється коливальним контуром паралельно з'єднаних конденсатора та котушки індуктивності.

Недоліком представленої електричної схеми - аналогу є те, що в ній коливання чутливого елемента є ідеалізованими і продовжуються в часі без зменшення амплітуди. У реальному чутливому елементі коливання, що утворюються піковим електричним імпульсом, загасають в часі.

Для удосконалення схеми-аналогу пропонуємо ввести в резонансний контур додатково резистор, що буде моделювати загасання коливань чутливого елемента, для зменшення добротності коливального контура і відповідно зменшення тривалості його коливального процесу.

Ємність чутливого елемента обчислюється так:

$$C_0 = \frac{\epsilon A}{L} \quad (2.60)$$

де  $A$  - площа поверхні чутливого елемента;  $L$  - товщина чутливого елемента;

$\varepsilon$  - діелектрична проникність чутливого елемента.

Електричні параметри паралельного резонансного контура визначаються :

$$C_1 = \frac{C_0}{K^2 T} \quad (2.61)$$

$$L_1 = \frac{K^2 T}{\omega^2 C_0} \quad (2.62)$$

де  $K_T$  - коефіцієнт п'єзоелектричного зв'язку;  $\omega$  - частота чутливого елемента.

Величина опору  $R_i$  вибирається із умови кількості коливань паралельного контура із амплітудою не менше заданої. Коефіцієнт трансформації ідеального трансформатора знаходимо із такого співвідношення:

$$N = \frac{\varepsilon A}{L} \quad (2.63)$$

де  $e$  - п'єзоелектрична константа механічних напружень при відсутності прикладеного електричного поля.

Опори  $Z_3$  та  $Z_4$  відповідають акустичним імпедансам матеріалам відповідно демпфера та об'єкта введення ультразвукової хвилі.

Опори поверхні чутливого елемента обчислюються так:

$$Z_{12} = Z_{13} = jZ_c \tan\left(\frac{\beta_a L}{2}\right) \quad (2.64)$$

$$Z_{11} = jZ_c \operatorname{cosec}(\beta_a L) \quad (2.65)$$

$$\beta_a = \omega \sqrt{\frac{\rho}{c}} \quad (2.66)$$

$$Z_c = A \sqrt{\rho c} \quad (2.67)$$

де  $Z_c$  - акустичний імпеданс п'єзопластини;  $\beta_a$  - константа поширення акустичної хвилі в п'єзоматеріалі;  $\rho$  - густина п'єзоматеріалу;  $C$  - пружна константа п'єзоматеріалу при відсутності прикладеного електричного поля.

Опори, що відповідають за поширення ультразвукових коливань в проміжному шарі обчислюються так:

$$Z_{22} = Z_{23} = jZ_{csh} \tan\left(\frac{\beta_{ash} L_{sh}}{2}\right) \quad (2.68)$$

$$Z_{21} = jZ_{csh} \operatorname{cosec}(\beta_{ash} L_{sh}) \quad (2.69)$$

$$\beta_{ash} = \frac{\omega}{C_{lsh}} \quad (2.70)$$

$$Z_{csh} = A \rho_{sh} C_{lsh} \quad (2.71)$$

де  $Z_{csh}$  - акустичний імпеданс проміжного шару;  $\beta_{ash}$  - константа поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в проміжному шарі  $\rho_{sh}$  - густина проміжного шару;  $C_{lsh}$  - швидкість поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в проміжному шарі;  $L_{sh}$  - товщина проміжного шару.

В реальному чутливому елементі, як правило, поряд із основною частотою коливання є присутні і додаткові частоти.

З метою проведення аналізу роботи чутливого елемента із присутніми бічними додатковими частотами удосконалимо електричну схему-аналог роботи чутливого елемента.

Як матеріал для проведення розрахунків було використано чутливий елемент ЦТС-5А. Вхідні дані для проведення розрахунку приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2– Вхідні параметри проведення розрахунку чутливого елемента

Назва параметра	Значення
L, м	$7,6 \cdot 10^{-4}$
Радіус п'єзопластини, м	$2,5 \cdot 10^{-3}$

Частота, МГц	2,5
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7,75
$\epsilon$ , Кл/м <sup>2</sup>	15,8
$c$ , Н/м <sup>2</sup>	$14,7 \cdot 10^{10}$
Кт	0,49
$\rho_{sh}$ , кг/м <sup>3</sup>	1190
$C_{lsh}$ , м/с	2700
$L_{sh}$ , м	$6,802 \cdot 10^{-3}$
Густина сталі, кг/м <sup>3</sup>	7,85
Швидкість позовжньої ультразвукової хвилі в сталі, м/с	5900

Схема-аналог розраховувались виходячи з того, що струм, який протікає через конденсатор та котушку індуктивності рівний:

$$I = C \frac{dU}{dt} \quad (2.72)$$

$$I = L \frac{dU}{dt} \quad (2.73)$$

де U-напруга; t- час.

Як можна побачити опір  $R_1$  вносить зміни у роботу частоту коливань чутливого елемента. При малому значенні опору  $R_1$  коливання мають різкий загасаючий характер. Це вказує на значні механічні втрати чутливого елемента. Протилежний випадок роботи чутливого елемента механічні втрати при перетворенні електричного імпульсу є незначними, що відповідає роботі в ненавантаженому режимі. У режимі проведення неруйнівного контролю чутливий

елемент збуджується електричним імпульсом, при якому проходить декілька коливань п'єзоелемента, що відповідає експериментальним даним.

В реальному чутливому елементі, як правило, поряд із основною частотою коливання є присутні і додаткові частоти.

Ці додаткові частоти можуть вносити завади як в зондуєчий сигнал акустичної частини чутливого елемента в режимі вимірювання, так і в режимі приймання акустичного сигналу. З метою проведення аналізу роботи чутливого елемента із присутніми бічними додатковими частотами удосконалимо електричну схему-аналог роботи чутливого елемента.

Вплив бічних гармонік змінює амплітуду вихідного сигналу, перерозподіляючи його енергію між періодами коливань [23].

Вхідний опір обчислюємо за формулою:

$$Z_3 = \frac{1-K^2t}{j\omega C_0} + \frac{8j\omega K^2t/C_0}{\pi^2\omega^2 - \omega_0^2} \quad (2.74)$$

Відношення частот для їх порівняння є таким:

$$\frac{\omega_1}{\omega_0} = \left(1 - \frac{8K^2t}{\pi^2}\right) \quad (2.75)$$

## 2.10 Порядок розрахунку підсилювача

1. Вибираємо схему і режим роботи каскаду. В каскадах транзистори можуть бути включені одним із трьох відомих способів. Схема з спільною базою дозволяє отримати найменше нелінійне спотворення, але відносно мале підсилення по потужності. Схема з спільним емітером забезпечує найбільше підсилення, але зато вносить відносно велике нелінійне спотворення. Схема з спільним колектором використовується рідко. Вона забезпечує приблизно таке ж саме підсилення, як і схема зі спільною базою, і дещо менше нелінійне спотворення, як схема із загальним емітером.

Однотактна схема вихідного каскаду дозволяє зекономити один транзистор і отримати малий коефіцієнт гармоніки, але вона працює тільки в режимі А і теоретично не може дати ККД більше 50%. При цьому в режимі спокою підсилювач використовує велику потужність.

2. Знаходимо потужність, яку повинен віддати каскад в навантаження. Прийmemo ККД вихідного трансформатора  $\eta_{\text{тр}} = 0,7$ , дістанемо:

$$P_{\text{вих.каскад}} = \frac{P_{\text{вих}}}{\eta_{\text{тр}}} = \frac{20}{0,7} = 28,6 \text{ (Вт)}, \quad (2.76)$$

3. Знаходимо ККД каскаду. Для однотактного каскаду, працюючого в режимі А, ККД може бути знайдено за формулою:

$$\eta_{\alpha} = 0,95 \frac{\pi}{4} \eta_{\text{тр}} = 0,95 \frac{3,14}{4} 0,7 = 0,49 \text{ (49\%)} \quad (2.77)$$

4. Підбираємо тип транзистора. Для цього спочатку визначаємо максимальну потужність, по формулі

$$P_{\text{макс}} = \frac{P_{\text{вих.каскад}}}{2} \frac{1 - \eta_{\alpha}}{\eta_{\alpha}}, \quad P_{\text{макс}} = \frac{28,6}{2} \frac{1 - 0,49}{0,49} = 14,88 \text{ (Вт)}, \quad (2.78)$$

По таблиці вибираємо для роботи в однотактному каскаді транзистор П4Б, який має при використанні радіатор  $P_{\text{макс}} = 20 \text{ Вт} > 14,88 \text{ Вт}$

Таким чином транзистор буде працювати в достатньо легкому режимі.

5. Визначаємо напругу джерела живлення

$$E_k = (0,4 \div 0,5) U_{\text{к.е.макс}}, \quad E_k = 0,4 \cdot 60 = 24 \text{ (В)}, \quad (2.79)$$

6. Знаходимо опір загрузки

$$R_H = \frac{0,9 \cdot E_k^2}{2 \cdot P_{\text{вих.макс}}} = \frac{0,9 \cdot 24^2}{2 \cdot 28,6} = 9,06 \text{ (Ом)} \quad (2.80)$$

7. Максимальне значення колекторного струму визначається за формулою:

$$I_{\text{к.макс}} = \frac{0,95 \cdot E_k}{R_H} = \frac{0,95 \cdot 24}{9,06} = 2,51 \text{ (А)} \quad (2.81)$$

8. Вихідні статистичні характеристики транзистора П4Б, включеного по

схемі із спільним емітером будуюмо лінію навантаження , яка проходить через точки А і Б, відповідні  $I_{к.макс}=2,51$  А і  $E_k=24$ В.

Відмічаємо точки перетину лінії навантаження із статистичними вихідними характеристиками транзистора.

9. Відповідним переносом точок із вихідних статистичних характеристик на вхідні статистичні характеристики будуюмо динамічну характеристику вхідного кола.

На цій характеристиці знаходимо  $I_{б.макс}=145$  мА і  $U_{б.е.макс}=0,6$  В.

10. Визначаємо вхідний опір

$$R_{вх} = \frac{U_{б.е.макс}}{I_{б.макс}} = \frac{0,6}{0,145} = 4,14 \text{ (Ом)}, \quad (2.82)$$

11. Знаходимо потужність сигналу, яку необхідно подати на вхід каскаду

$$P_{вх} = \frac{U_{б.е.макс} \cdot I_{б.макс}}{2} = \frac{0,6 \cdot 0,145}{2} = 0,0435 \text{ (мВт)} \quad (2.83)$$

12. Визначаємо коефіцієнт підсилення каскаду по потужності

$$K_p = \frac{P_{вих.каскад}}{P_{вх}} = \frac{28,6}{0,0435} = 658 \quad (2.84)$$

Ультразвуковий дефектоскоп призначений для генерування імпульсів ультразвукових коливань, приймання відбитих сигналів, перетворення цих сигналів до виду, зручного для спостереження їх на дисплеї і управління додатковими індикаторами, а також для вимірювання координат дефектів і порівняння амплітуди сигналів.

Дефектоскопи діляться на аналогові і процесорні. До складу останніх входить процесор для управління системами самого дефектоскопа та цифрової обробки інформації, що міститься в сигналі.

Принцип роботи аналогового дефектоскопа пояснюється структурною схемою, наведеною на кресленні. Розглянемо структурну схему приладу неруйнівного контролю для реалізації луно-методу (МР.МТТм- 64.00.00.000 С2).

Прилад функціонує наступним чином. Генератор зондуєчи імпульсів виробляє імпульси електричних коливань, що збуджують ультразвукові коливання в пьезоперетворювачі, які поширюються в об'єкті контролю. Відбиті від дефектів ультразвукові коливання приймає той же пьезоперетворювач і трансформує їх в електричні імпульси, які надходять на вхід підсилювача. Коефіцієнт підсилення його регулюється в часі за допомогою системи часового регулювання чутливості. Підсилений сигнал поступає на вхід електронно - променевого індикатора і автоматичного сигналізатора дефектів. Генератор синхроімпульсів забезпечує необхідну часову послідовність роботи всіх структурних елементів.

Одночасно із запуском генератора зондуєчи імпульсів він приводить у дію генератор розгортки. Розгортка дає можливість розрізняти за часом приходу сигнал від дефектів і меж розділу. Генератор синхроімпульсів також управляє роботою вузлів часового регулювання чутливості і автоматичного сигналізатора дефектів.

В деяких дефектоскопах є вимірювальний пристрій для вимірювання амплітуди і часу приходу відбитого сигналу з відображенням цих параметрів у цифровій формі.

### 3. ОЦІНКА ПОХИБКИ РОЗРОБЛЕНОГО ПРИСТРОЮ І РЕЗУЛЬТАТІВ КОНТРОЛЮ

Реальні результати вимірювання завжди містять сукупність похибок, таких, як варіація вимірювальної величини. Тому потрібно здійснити методичний та системний підхід для ідентифікації всіх джерел похибок, що можуть мати місце у розробленому пристрої. Наступним кроком потрібно визначити величину цих похибок та їх вплив на отримані результати.

Звичайно, похибки результатів розробленого пристрою можуть бути визначеними для конкретної його конфігурації та для визначеної методики проведення контролю.

Розрахунку похибки засобу вимірювання передуює процес розробки схеми розрахунку, в основі якого закладена структурна схема перетворення вимірної інформації чи послідовності підключення функціональних перетворювачів.

Розрахунок похибки будемо проводити згідно структурної схеми пристрою.

Сумарна похибка складається з методичної, що виникає внаслідок спрощень в методиці розрахунку фізичних величин, що визначають експлуатаційні параметри та інструментальної, яка викликана нелінійними характеристиками та відхиленням реальних значень від номінальних електричних елементів, пристрою.

#### 3.1 Аналіз інструментальних похибок розробленого пристрою

Визначення сумарної інструментальної похибки проведемо за правилами розрахунку похибок згідно структурної схеми. З цією метою спершу розрахуємо сумарні похибки послідовно з'єднаних блоків. Перша група послідовно з'єднаних блоків така: підсилювач, генератор, первинний перетворювач, похибка від товщини

контактного шару та шорсткості поверхні об'єкту контролю. До другої групи послідовно з'єднаних блоків входять: блок обробки аналогового сигналу, температурна похибка, блок дискретного перетворення інформації.

Сумарна інструментальна похибка обчислюється згідно схеми паралельного з'єднання двох груп:

$$\delta_{\text{інс}} = \frac{\delta_1 \cdot \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \quad (3.1)$$

де  $\delta_1$  - сумарна похибка першої групи;  $\delta_2$  - сумарна похибка другої групи.

Загальна похибка блоку підсилювача визначається на основі теорії ймовірності, яка враховує долю випадковості в розподілі похибок вхідних параметрів в межах допуску, та ймовірність взаємного впливу елементів на монтажній платі.

В загальному випадку інструментальну похибку  $\Delta_{\text{інс}}$  можна визначити за допомогою залежностей:

$$\Delta_{\text{інс}} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial y(x)}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (3.2)$$

де  $\partial x_i$  - і-тий аргумент залежностей вимірювальної величинці  $\Delta x_i$  - абсолютне значення похибки вимірювального параметра;  $y(x)$  - аналітична залежність вихідного сигналу пристрою від всіх параметрів, які впливають на інструментальну похибку.

Отже, похибку підсилювача визначаємо за допомогою рівняння:

$$K_n = \frac{K_0}{1 + \beta \cdot K_0} \quad (3.3)$$

де  $K_0$  - коефіцієнт підсилення;  $\beta$  - коефіцієнт зворотного зв'язку.

Значення результуючої похибки блоку підсилення, при довірчій ймовірності 0,95 рівна 0,2%.

$$\Delta K_n = \frac{\partial K_n}{\partial \beta} \Delta \beta + \frac{\partial K_n}{\partial K_0} \Delta K_0 = \frac{-K^2_0}{(1 + \beta \cdot K_0)^2} \Delta \beta + \frac{1}{(1 + \beta \cdot K_0)^2} \Delta K_0 \quad (3.4)$$

Розглянемо похибку генератора та активного фільтра. Базується даний блок на тій же мікросхемі, що і блок підсилення. Відмінність між ними полягає у електричній схемі із пасивних елементів, що задає режим роботи операційного підсилювача. Похибки входних характеристик операційного підсилювача, які вказані при обчисленні результуючої похибки блоку підсилювача не змінюються, лише додаються додаткові параметри, специфічні до заданого типу роботи.

Похибка генератора буде:

$$K_{\Gamma} = \frac{K_{\Gamma 0}}{1 - \beta_{\Gamma} K_{\Gamma 0}} \quad (3.5)$$

де  $K_{\Gamma 0}$  - коефіцієнт підсилення;  $\beta_{\Gamma}$  - коефіцієнт зворотного зв'язку.

$$\Delta K_{\Gamma} = \frac{\partial K_{\Gamma}}{\partial \beta_{\Gamma}} \Delta \beta_{\Gamma} + \frac{\partial K_{\Gamma}}{\partial K_{\Gamma 0}} \Delta K_{\Gamma 0} = \frac{-K_{\Gamma}^2 \Delta \beta_{\Gamma}}{(1 + \beta_{\Gamma} K_{\Gamma 0})^2} + \frac{1}{(1 + \beta_{\Gamma} K_{\Gamma 0})^2} \Delta K_{\Gamma 0} \quad (3.6)$$

Значення результуючої похибки блоку генератора та активного фільтра при довірчій ймовірності 0,95 рівні 0,2%.

Розглянемо похибку дискретного перетворення інформації. Вимірювана величина визначається кількістю рівнів дискретизації Розрядністю її представлення. Похибка при перетворенні інформації  $\Delta Y_{\text{д}}(t)$  визначається різницею аналогових функцій до дискретизації  $Y(t)$  і після дедискретизації  $Y^*(t)$ :

$$\Delta Y_{\text{д}}(t) = Y(t) - Y^*(t) \quad (3.7)$$

де  $t$  - час.

На інтервалі дискретизації ДТ похибка оцінюється за такими параметрами:

- найбільшим відхиленням;
- середнім квадратичним відхиленням  $\sigma_{\text{sam}}$ :

$$\sigma_{\text{sam}} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} (\Delta Y_{\text{д}}(t))^2 dt} \quad (3.8)$$

- інтегральною похибкою  $\varepsilon_{\Sigma}$ :

$$\varepsilon_{\Sigma} = \int_0^{\Delta T} (\Delta Y_{\text{д}}(t)) dt \quad (3.9)$$

Після дискретизації вимірюваного сигналу, отриману інформацію представляють у вигляді деякої неперервної функції, аналогічно функції сигналу, що вимірюється. Для наближення функціонального представлення вихідного сигналу проводимо інтерполяцію та екстраполяцію набору отриманих дискретних точок за допомогою базисних функцій  $fn_{base}$  ряду Фур'є:

$$Y^*(t) \equiv [Y_1 \dots Y_m] \equiv \sum_{i=1}^{m/2} M_i \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{Y_i}{m} + \theta_i\right) = \sum_{i=1}^{m/2} fn_{base}, \quad (3.10)$$

де  $Y_1 \dots Y_m$  - множина точок дискретного перетворення;  $M_i$  - амплітуда гармонік;  $\theta_i$  - фаза гармонік.

Відносна похибка дискретизації вимірюваного сигналу буде рівною:

$$\Delta t_d = \sqrt{\frac{3 \sum_{i=1}^{m/2} |fn_{base}|^2}{\Delta T(2-1)^2}} \quad (3.11)$$

де  $k$  - розрядність квантування.

Сумарна відносна похибка дискретного перетворення інформації буде визначатись:

$$\delta_{\Sigma_d} = \sqrt{\frac{\sigma_{sam}^2}{\varepsilon_{\Sigma}} + \delta_{t_d}^2} \quad (3.12)$$

Сумарна похибка  $\delta_{\Sigma_d}$  дискретного перетворення сигналу із частотою, що дорівнює частоті основної ультразвукової хвилі 100 кГц, здійсненого аналого-цифровим перетворювачем із частотою дискретизації 3 МГц та розрядністю квантування 14 складає 0,15%.

Для визначення похибок контролю від мікронерівностей на поверхні об'єкту контролю розглянемо та проаналізуємо їх вплив на границі розділу поверхні п'єзоперетворювача та об'єкта контролю. При проведенні контролю матеріалів акустичним методом нерівності на їх поверхні впливають на точність контролю та його чутливість. Ультразвукові хвилі, які генеруються п'єзоелектричним перетворювачем, починають поширюватися з вершини мікронерівностей поверхні об'єкта контролю в області впадин мікронерівностей з більшою швидкістю, ніж

через контактний шар. Ця умова визначається різницею в швидкостях поширення ультразвукових коливань у контактному шарі та в об'єкті контролю. Швидкість поширення ультразвукових коливань у металі завжди більша, ніж в контактному шарі, так як основу його становить рідина. Якщо між даними ультразвуковими хвилями утворюється зсув фаз рівний  $180^\circ$  або кратний  $180^\circ$ , то після поширення хвиль у тілі об'єкта контролю проходить процес максимального загасання коливань. Рефракція, дифракція, яка проводить до різниці фаз сигналу на поверхні об'єкта контролю змінюють його форму та діють на його модель у межах поширення через об'єкт контролю.

Ультразвукова хвиля, яка поширюється через середовище металу, буде втрачати свою енергію внаслідок різних факторів. Найбільший вплив на загасання сигналу дає поширення ультразвуку через границю розділу поверхні п'єзоперетворювача та досліджуваної поверхні. Така поверхня може впливати на зменшення амплітуди коливання, що в свою чергу приведе до змін параметрів ультразвукової хвилі. Внаслідок різних методів виробництва або виплавки сталі, змінюється їх хімічні та фізико-механічні характеристики, які впливають на втрату енергії ультразвукової хвилі при поширенні через їх середовище. Ці втрати відображаються на трьох основних етапах, а саме при поширенні ультразвукової хвилі через дане середовище, адсорбуючий вплив середовища поширення та розсіювання коливної енергії.

Зосередимо увагу на загасанні ультразвукових хвиль, при їх поширенні в металах з різними степенями мікронерівностей. У загальному випадку загасання можна показати в наступній формі:

$$F = F_0 e^{-\alpha L}, \quad (3.13)$$

де  $F$  - тиск ультразвукової хвилі в місці вимірювання;  $L$  - відстань, яку проходить ультразвукова хвиля;  $F_0$  - тиск ультразвукової хвилі, яка пройшла відстань  $L$  без врахування загасання;  $\alpha$  - коефіцієнт загасання.

Рівень відносного звукового тиску ультразвукової хвилі, яка поширюється становить:

$$P = 20 \lg \left( \frac{F_0}{F} \right) \quad (3.14)$$

Розглянемо поширення ультразвукової хвилі між двома точками в об'єкті контролю.

Втрата рівня звукового тиску для хвилі, яка поширюється між даними точками становить:

$$P_1 - P_2 = 20 \lg \left( \frac{F_1}{F_2} \right) \quad (3.15)$$

де  $P_1$  - рівень відносного звукового тиску ультразвукової хвилі, яка поширюється в першій точці;  $P_2$ - рівень відносного звукового тиску ультразвукової хвилі, яка поширюється в другій точці ;  $F_1$  - тиск ультразвукової хвилі в першій точці;  $F_2$  - тиск ультразвукової хвилі в другій точці.

Виходячи з рівнянь враховуючи, що загасання вимірюється в дБ, можна записати:

$$\alpha L = 20 \lg \left( \frac{F_1}{F_2} \right) \quad (3.16)$$

При використанні луно-імпульсного методу хвиля проходить подвійну відстань, тобто  $2L$ . Відповідно коефіцієнт загасання  $\alpha$  буде рівний:

$$\alpha = \frac{20 \lg \left( \frac{F_1}{F_2} \right)}{2L} = \frac{10 \lg \left( \frac{F_1}{F_2} \right)}{L} \quad (3.17)$$

Дану форму рівняння використовуємо при експериментальних дослідженнях коефіцієнта загасання по відношенню до величини мікронерівностей поверхні об'єкта контролю, вважаючи всі інші фактори впливу на коефіцієнт загасання незмінними.

В якості контактної рідини використовувався тонкий шар епоксидної смоли, яка не значно впливає на втрати коливної енергії. Для всіх експериментів була збережена величина тиску давана на досліджувану поверхню в розмірі 5 Н.

Числові значення параметрів поверхневих нерівностей об'єкта контролю використовуються, як незалежні змінні, від яких буде залежати акустичний ультразвуковий коефіцієнт загасання.

Швидкість загасання амплітуди сигналу є більшою при більшій величині нерівностей досліджуваної поверхні.

$$\alpha = \frac{10 \left[ \lg\left(\frac{F_1}{F_2}\right) - \lg(N) \right]}{L} \quad (3.18)$$

де N - номер луно-сигналу.

Збільшення величини поверхневих мікронерівностей приводить до помітного збільшення коефіцієнта загасання ультразвукових хвиль. Таке явище може привести до великої втрати коливної енергії ультразвукової хвилі при передачі її через границю розділу поверхні п'єзоперетворювача та досліджуваної поверхні об'єкта контролю. Крім того, товщина контактної шару, який заповнює проміжок між поверхнею давана та поверхнею об'єкта контролю, збільшується при більшій величині нерівностей поверхні об'єкта контролю і навпаки. Внаслідок цього такий проміжок, як границя розділу поверхонь двох середовищ, є причиною додаткової втрати енергії звукової хвилі, яка передана до об'єкту контролю. Що в свою чергу також збільшує коефіцієнт загасання.

Висота поверхневих мікронерівностей приводить до трансформації нормально-падаючої хвилі на відбиту і заломлену хвилі відносно поверхні контролю. Показано, що вони знаходяться в прямо пропорційній залежності одна відносно одної.

Розглянемо похибку ультразвукового первинного перетворювача. Похибка первинного перетворювача обумовлюється різними причинами, основними із яких є:

- неточність схемно-конструктивної реалізації перетворення електричного сигналу у механічний та навпаки  $\Delta Y_{\text{скр}}$ ;
- відхилення коефіцієнта перетворення від заданого значення за рахунок

похибок параметрів використаних конструктивних елементів  $\Delta Y_{\text{кп}}$ ;

- похибка операційного перетворення інформаційного сигналу  $\Delta Y_{\text{оп}}$ ;
- дія зовнішніх факторів безпосередньо на інформаційний сигнал чи на

параметри конструктивних елементів  $\Delta Y_{\text{зф}}$ .

Похибка від неточності схемо-конструктивної реалізації визначається технічною документацією на функціональний перетворювач та схемою вторинного пристрою, яка враховує вихідні параметри перетворювача, та забезпечує можливість налаштування від відмінності окремих перетворювачів зменшує значення похибки зазначеної в документації. Для ультразвукового первинного перетворювача із номінальною частотою 100 кГц похибка  $\Delta Y_{\text{скр}}$  дорівнює 0,05%, Похибка  $\Delta Y_{\text{кп}}$  визначається, як математичне очікування від суми первинних похибок параметрів використаних конструктивних елементів:

$$\Delta Y_{\text{кп}} = M[\sum_{i=1}^n \Delta X_i] \quad (3.19)$$

де  $\Delta X_i$  - первинні похибки використаних конструктивних елементів;  $n$  - кількість похибок конструктивних елементів;  $M$  - математичне очікування.

Значення похибки використаних конструктивних елементів первинного перетворювача  $\Delta Y_{\text{кп}}$ , враховуючи специфікацію на первинний перетворювач дорівнює 0,7%.

Складова похибки операційного перетворення інформаційного сигналу  $\Delta Y_{\text{оп}}$  визначається операціями, які здійснюються над інформаційним сигналом первинним перетворювачем, а саме підсилення, інтегрування та інші. Так, як для вибраного методу контролю бажано збудження ультразвукової хвилі на вузькому частотному діапазоні, значення цієї похибки залежить від способу обробки сигналу, тому будемо її враховувати при визначенні похибки блоку обробки аналогового сигналу.

Складова похибки  $\Delta Y_{\text{зф}}$  визначається температурною залежністю швидкості ультразвуку в металі. Дія інших чинників таких, як величина електромагнітного вібрації, вологість і т.п. не вносить відчутний вплив на значення  $\Delta Y_{\text{зф}}$ .

Залежність швидкості ультразвуку в металах можна обчислити із такої рівності:

$$\Delta c = \alpha T + \frac{\omega^2}{2 \cdot \rho \cdot v^3} \left[ \frac{3}{4} \eta + \xi + k + \Delta f_p \right] \quad (3.20)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт теплового розширення;  $T$  - температура;  $\omega$  - частота акустичної хвилі;  $\rho$  - густина;  $v$  - коефіцієнт зміни швидкості акустичної хвилі, спричинений процесами релаксації термодинамічної системи;  $\eta$  - коефіцієнт зсувної в'язкості;  $\xi$  - коефіцієнт об'ємної в'язкості;  $k$  - коефіцієнт теплопровідності;  $\Delta f_p$  - зміна частоти релаксації термодинамічної системи.

Похибка АУЗф, із врахуванням формули дорівнює 0,9%.

Сумарна похибка первинного перетворювача дорівнює 1,65%.

Похибка від товщини контактного шару дорівнює 0,004%.

Похибку блоку обробки аналогового сигналу визначимо відношенням малого приросту визначеного вхідного сигналу до вихідного сигналу. Вимірювання проводилось по десять разів для кожного із трьох різних значень приросту. Визначена похибка дорівнює 0,1%.

Розглянемо похибку від зміни температури. Зміна температури впливає практично на характеристику всіх конструктивних вузлів. Найбільший вплив зміна температури вносить на швидкість ультразвукових коливань та роботу первинного перетворювача. Похибка зміни швидкості ультразвуку в об'єкті контролю від зміни температури визначена в формулі.

Із блоків вторинного пристрою, температурна залежність не врахована тільки для блоків обробки аналогового сигналу та дискретного перетворення інформації. Температурна похибка для цих блоків визначалась шляхом вимірювання зміни вхідного сигналу на виході із кроком зміни температури 10°C в діапазоні 0...50°C.

Сумарна температурна похибка дорівнює 0,9%.

Отже, сумарна похибка першої групи блоків 8і рівна 2,054%. Сумарна похибка другої групи блоків 82 рівна 1,15%. Сумарна інструментальна похибка рівна 0,74%.

### 3.2 Аналіз методичних похибок контролю

Згідно розробленої методики визначення напружено-деформованого стану приймаємо відомою величину густини матеріалу котла. Проте її значення буде відрізнятися в залежності від марки сталі та заводу виробника, навіть, для однієї марки сталі, на величину що не перевищує 0,5% від номінального значення.

При визначенні величини напружень акустопружності визначаються експериментальним методом з допомогою розривної машини за допомогою ультразвукових вимірювань. При такому методі вносяться похибки від ультразвукового пристрою, що становлять 0,12%.

Похибка вимірювання температури складає 0,5%. Методична похибка від варіації температури дорівнює 1,1%.

Для визначення навантажень розробленою методикою проводиться користування даними про розміри дефекту. Розміри дефекту визначаємо приладом з похибкою 0,4%. Похибка від розмірів дефекту складає  $\delta_t=0,4\%$ .

Похибка відстані між первинним перетворювачами є складовою похибки визначення швидкості проходження ультразвукової хвилі. Похибка визначення відстані міжпервинними перетворювачами дорівнює 0,5мм. Методична похибка відстані між первинними перетворювачами складає 2,5%.

Сумарна методична похибка  $\delta_{мет}$  дорівнює сумі всіх складових похибок і рівна 4,62%. Отже сумарна похибка дорівнює  $\delta_{\Sigma}=\delta_{ін}+\delta_{мет}=5,36\%$  [25].

## ВИСНОВКИ

У даній магістерській роботі проаналізовано методи ультразвукового контролю теплоагрегатів та вибрано оптимальний.

Обґрунтовано теоретичні основи вибраного методу контролю.

Розроблено акустичний первинний перетворювач. Здійснено дослідження імпульсного режиму роботи перетворювача. Також розроблено дефектоскоп для контролю технічного стану теплоагрегатів, який в порівнянні із відомими приладами є зручнішим у користуванні та економічно ефективніший.

Здійснено оцінку похибки розробленого пристрою і результатів контролю

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабак В. П. Основи побудови системи аналізу сигналів в НК: навчальний посібник / В.П. Бабак, С.М. Маєвський, Л.М. Щербак. - К. : Либідь, 1993.-272с.
2. Білокур І.П. Дефектоскопія матеріалів і виробів / І.П. Білокур, В.А. Коваленко. - К.: Техніка, 1989. - 196с.
3. Лютак З.П. Визначення впливу температури на зміну частотних характеристик ультразвукового первинного перетворювача [Текст] / З.П. Лютак, А.А. Мандра. - Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2005. - С. 78-85.
4. Лютак З.П. Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану технологічних трубопроводів [Текст] / З.П. Лютак, А.А. Мандра. - Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2006. -С. 48-55.
5. Лютак З.П. Визначення напружено-деформованого стану газопроводів за допомогою ультразвукових хвиль Лемба [Текст] / З.П. Лютак, А.А. Мандра. - Львів, 2004. - №12. - С.24-29.
6. Лютак З.П. Розробка моделі стабілізації частотних характеристик ультразвукових первинних перетворювачів [Текст] / З.П. Лютак, А.А. Мандра. - Івано-Франківськ, 2005. - №14. - С. 37-42.
7. Лютак З.П. Модель поширення ультразвукових хвиль у металах [Текст] / З.П. Лютак, І.С. Кісіль, А.А. Мандра // Методи та прилади контролю якості. - 2003 .-№11.- С.27-31.
8. Неруйнівний контроль і техніка діагностики [Текст] / Під ред. Назарчука З.Т. - Львів: ФМІ ім Г.В. Карпенка, 2001. - Т.5 - 1134с.
9. Кісіль І. С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / І.С. Кісіль — Івано-Франківськ: видавництво «Факел», 2002. — 400 с.

10. Глоба, Венгерцев. Технічна діагностика і ремонт сталевих резервуарів. – К.: Либідь, 1999. – 254 с.
11. Андрейків О. Є., Скальський В. Р., Сулим Г.Т. Теоретичні основи методу акустичної емісії в механіці руйнування: монографія. — Львів: СПОЛОМ, 2007. — 480 с.
12. Метод акустичної емісії в діагностуванні корпусів реакторів атомних електростанцій / З. Т. Назарчук, І. М. Неклюдов, В. Р. Скальський. — К.: Наукова думка, 2016. — 307 с.
13. Білокур І.П. Акустичний контроль. – К.: Либідь, 1999. – 244 с.
14. Марасанов В.В., Шарко О.В., Шарко А.О. Статистична обробка сигналів акустичної емісії та їх параметрів. Вісник Національного університету "Львівська Політехніка", с. 98-107. 2016.
15. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань: Навч. пос. для студентів вищ. навч. закл. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400 с.
16. Кісіль І.С. Конструювання вимірювальних приладів: Навч. пос. для студентів вищ. навч закл. – Івано-Франківськ: Факел, 2004. – 328 с.
17. Недосека А.Я., Недосека С.А., Волошкевич І.Г. Хвилі деформацій, що виникають при локальній перебудові структури матеріалів// Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 2004. – №3. - С.8-15.
18. СТП 50.01-2000 Технічна діагностика. Котли, посудини під тиском і трубопроводи. Акустико-емісійний метод контролю.
19. ДСТУ 2651:2005 Сталь вуглецева звичайної якості.
20. ДСТУ 8932:2019 Труби обсадні та муфти до них. Технічні умови.
21. ДСТУ 7809:2015 Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним оздобленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні.
22. ДСТУ 3021-95 Випробування та контроль якості продукції. Основні поняття. Терміни та визначення.

## **ДОДАТКИ**

## Додаток А

### Технічні характеристики котлів

Таблиця А.1– Технічні характеристики котлів Еі/9

Назва показників	Котел Е-1/9 Г	Котел Е-1/9 М	Котел Е-1/9 Р
Вихід пари, т/год	1,0	1,0	1,0
Тиск пари, МПа	до 0,8	До 0,8	До 0,8
Паливо	газ	мазут	вугілля
Розхід палива	83,5 м <sup>3</sup> /ч	74 кг/ч	147 кг/ч
КПД, %	91	87,5	75
Температура води, °С	50	50	50
Потужність, кВт/год	6	6	6
Габаритні розміри котла, мм			
- довжина	4 200	4 200	4 350
- ширина	2 350	2 350	2 350
- висота	2 900	2 900	2 900
Маса котла Е-1/9, кг	4 300	4 300	3 800

## Додаток В

### Характеристики кристалу кварцу

Таблиця В.1 - Незалежність константи правостороннього кристалу кварцу

Назва константи	Значення константи
Густина, кг/м <sup>3</sup>	2648,6
Пружні константи, 10 <sup>9</sup> Н/м <sup>2</sup>	
C <sub>11</sub>	86,74
C <sub>33</sub>	107,20
C <sub>12</sub>	6,97
C <sub>13</sub>	11,90
C <sub>44</sub>	57,93
C <sub>66</sub>	39,89
C <sub>14</sub>	17,91
П'єзоелектричні константи, Кл/м <sup>2</sup>	
e <sub>11</sub>	0,171
e <sub>14</sub>	0,0406
Діелектричні константи, 10 <sup>-12</sup> Ф/м	
ε <sub>11</sub>	39,97
ε <sub>33</sub>	41,03



Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
R5	СПЗ-38δ-0,25-4,7 кОм ОЖО.468.351 ТУ	1	
R6	МЛТ-0,25-220 Ом±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R7	МЛТ-0,25-2,2 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R8	МЛТ-0,25-22 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R9	МЛТ-0,25-220 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R10	МЛТ-0,25-2,2 МОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R11	МЛТ-0,5-1 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R12	МЛТ-0,125-4,7 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R13	МЛТ-0,125-430 Ом±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R14	МЛТ-0,125-4,3 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R15	МЛТ-0,125-2,2 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R16	МЛТ-0,125-4,7 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R17	МЛТ-0,125-82 Ом±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R18-R20	СПЗ-38δ-0,25-470 Ом ОЖО.468.351 ТУ	3	
R21	СПЗ-38δ-0,25-2,2 кОм ОЖО.468.351 ТУ	1	
R22	МЛТ-0,5-1 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R23	МЛТ-0,5-5 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R24	МЛТ-0,25-7,5 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R25	МЛТ-0,25-680 Ом±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R26	МЛТ-0,25-4,7 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R27	МЛТ-0,5-20 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R28	МЛТ-0,5-100 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R29	МЛТ-0,5-500 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R30	МЛТ-0,5-2 МОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R31	С1-4-0,5-10 МОм±5% ОЖО.467.116 ТУ	1	
R32	МЛТ-0,25-3,3 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R33	МЛТ-0,25-9,5 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R34	МЛТ-0,25-500 Ом±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R35	КИМ-Е-1-97 МОм±5% ОЖО.467.027 ТУ	1	
R36	МЛТ-0,5-3 МОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R37	МЛТ-0,25-7,5 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R38	КИМ-Е-1-1 МОм±5% ОЖО.467.027 ТУ	1	

Инд. № подл. / Подп. и дата / Взам. инв. № / Инв. № дубл. / Подп. и дата / Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

MP.MTTM-64.01.00.000 ПЕ

Лист

Копировал

Формат А4

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
R39	MЛT-0,25-22 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R40-R42	MЛT-0,25-22 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
R43	MЛT-0,25-22 кОм±5% ОЖО.467.180 ТУ	1	
SA1	ТумблерМТЗ 0Ю0.360.016 ТУ	1	
SA2	Перемикач П2Г-3 5ПЗН ЦЕ0.360.016 ТУ	1	
SA3,SA4	ТумблерМТЗ 0Ю0.360.016 ТУ	2	
TV1	Трансформатор Т35-220-50 АЮ0.467.120 ТУ	1	
TV2	Трансформатор ТАН-55-127/220-50 0Ю0.470.001 ТУ	1	
Діоди			
VD1	Д220 СМВ-362.010 ТУ	1	
VD2-VD5	Д311А СКМ-358.001 ТУ	4	
VD6	Д220 СМВ-362.010 ТУ	1	
VD7-VD9	Д311А СКМ-358.001 ТУ	3	
VD10-VD16	Д814 ААО.336.207 ТУ	7	
VD17	Д220 СМВ-362.010 ТУ	1	
VD18	Д168А ХЫ3.369.001 ТУ	1	
Транзистори			
VT1,VT2	МП42Б ААО.336.635 ТУ	1	
VT3	КП103 ТФ3.365.000 ТУ	1	
VT4	КТ327А ААО.336.032 ТУ	1	
VT5	ГТ404 ЮФ3.365.013 ТУ	1	
VT6-VT9	КТ805Б ААО.336.341 ТУ	4	
VT10	МП38 ААО.336.651 ТУ	1	
VT11	П217 ААО.336.342 ТУ	1	
X1	Роз'єм ОНп-КГ-26-2-Р51-3 НЩ0.364.051 ТУ	1	
X2	Роз'єм ОНп-КГ-26-10-Р51-3 НЩ0.364.051 ТУ	1	
XL1	Світловий індикатор Л-0,5-12В ЛН.332.102 ТУ	1	
MP.MTTM-64.01.00.000 PE			Лист
Изм. лист	№ докум.	Подп.	Дата

Копировал

Формат А4