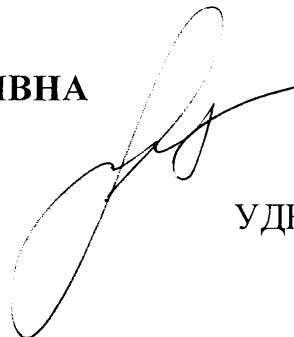


Міністерство освіти і науки України

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

На правах рукопису

ПОПОВИЧ ОЛЬГА ВАСИЛІВНА



УДК 620.192

**УДОСКОНАЛЕННЯ АКУСТИЧНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТИПІВ
ТА РОЗМІРІВ ДЕФЕКТІВ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ**

**Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу
речовин**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник:

Карпаш Максим Олегович

доктор технічних наук, професор

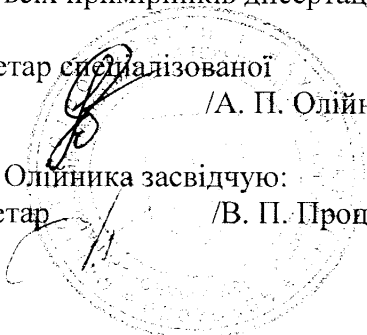
Ідентичність всіх примірників дисертації

Засвідчую

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради /А. П. Олійник/

Підпис А. П. Олійника засвідчую:

Вчений секретар /В. П. Процюк/



Івано-Франківськ – 2016

d592

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ І ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ТИПУ ТА РОЗМІРІВ.....	11
1.1. Характеристика об'єкту контролю.....	11
1.2 Аналіз методів контролю металоконструкцій.....	22
1.2.1 Ультразвуковий метод контролю.....	23
1.2.2 Когерентні методи контролю	28
1.3 Вибір і обґрунтування напрямку досліджень.....	36
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ФАЗОВАНИХ РЕШІТОК ДЛЯ КОНТРОЛЮ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ.....	38
2.1 Фізична модель взаємодії дефектів з ультразвуковим полем	38
2.2. Обґрунтування доцільності застосування ультразвукових фазованих решіток для контролю металоконструкцій.....	43
2.3 Розроблення способу вибору параметрів ультразвукових фазованих решіток залежно від параметрів об'єкту контролю.....	49
2.4 Побудова акустичних зображень, отриманих в процесі контролю з використанням ультразвукових фазованих решіток	62
Висновки до розділу 2	65
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ФАЗОВАНИХ РЕШІТОК ДЛЯ КОНТРОЛЮ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ.....	66
3.1 Визначення чутливості та роздільної здатності ультразвукових фазованих решіток	66
3.2 Розроблення методу виявлення дефектів порушення цілісності і визначення їх типу та розмірів.....	71
3.3. Опрацювання результатів контролю з використанням УЗФР.....	75
3.4. Проведення експериментальних досліджень	83

3.4.1	Експериментальні дослідження зразку зварного з'єднання зі штучними дефектами	83
3.4.2	Експериментальні дослідження зварних з'єднань металоконструкцій тривалої експлуатації.....	88
	Висновки до розділу 3	94
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЮ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ НА НАЯВНІСТЬ ДЕФЕКТІВ ТИПУ ПОРУШЕННЯ СУЦІЛЬНОСТІ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....		95
4.1.	Методика оцінювання реальних розмірів дефектів та визначення їх типу	95
4.1.1	Засоби вимірювань	96
4.1.2	Підготовка до виконання контролю	98
4.1.3	Проведення вимірювань.....	98
4.1.4.	Оцінка і оформлення результатів контролю.....	99
4.1.5.	Вимоги безпеки.....	Помилка! Закладку не визначено.
4.2.	Метрологічна оцінка удосконаленої методики контролю металоконструкцій	101
4.3	Промислова апробація розробленої методики.....	108
ВИСНОВКИ.....		116
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		118
ДОДАТКИ		129

ВСТУП

Актуальність теми. Рівень спрацювання металоконструкцій у базових галузях промисловості України складає понад 60%. Повна чи часткова заміна такого устаткування є складною в реалізації у зв'язку з технічними та економічними чинниками. Забезпечення подальшої експлуатації в безвідмовному режимі можливе за умови регулярного технічного діагностування, що регламентується чинними нормативними документами у цій сфері.

Серед основних нормативних параметрів, що характеризують технічний стан металоконструкцій, є наявність чи відсутність дефектів типу «порушення суцільності». Ступінь небезпеки виявлених дефектів характеризується їх типом – плаский (експлуатаційного походження) та об'ємний (виробничого походження), або реальними розмірами дефекту. Пласкі дефекти, як правило, представлені корозійно-втомними тріщинами, тоді як об'ємні – порами, включеннями та непроварами.

На сучасному етапі розвитку науки більша частина методів неруйнівного контролю дозволяє вирішити задачу виявлення дефектів. Актуальним і необхідним залишається підвищення інформативності та точності визначення типу і розмірів виявлених дефектів металоконструкцій, особливо, тривалої експлуатації.

Відповідно до існуючої практики та досвіду контролю важливих металоконструкцій, найбільш поширеним методом виявлення внутрішніх дефектів є ультразвуковий контроль, основним джерелом інформації якого є завадочутливий А-скан. Результати такого ультразвукового контролю є складними для розшифрування та вимагають значного практичного досвіду оператора для подальшого висновку типу та розмірів дефекту, оскільки дають лиш інформацію про місце і глибину залягання дефекту та його еквівалентну площу, чого часто недостатньо для точного визначення можливості подальшої експлуатації устаткування.

У зв'язку зі значним зносом металоконструкцій обсяги робіт з неруйнівного контролю зростають. Слід зауважити, що відповідно до постанови КМУ №687 від 26.05.2004 року, позачерговий технічний огляд устаткування, в якого закінчився граничний термін експлуатації, повинен проводитись із застосуванням видів робіт, що не використовувалися під час експертного обстеження.

Тому розроблення нових методів контролю для виявлення дефектів типу «порушення суцільності» та отримання вичерпної інформації про них є, на даний час, актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась за особистою участю автора на кафедрі енергетичного менеджменту і технічної діагностики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу відповідно до плану таких науково-дослідних робіт:

- держбюджетна Д-1-13-Ф «Розроблення наукових основ багатопараметрового контролю технічного стану металоконструкцій довготривалої експлуатації за фактичними значеннями фізико-механічних характеристик їх матеріалу та типом і розмірами дефектів» Міносвіти та науки України №0113U001099.

- грант Ф61/72-2015 «Розроблення технології ультразвукових фазованих решіток для ідентифікації та визначення типів і розмірів дефектів металоконструкцій» Міносвіти та науки України 0115U004844.

- госпдоговір на тему 78/2014 «Переглядання СОУ 60.3-31570412-027:2007 "Магістральні нафтопроводи. Нафтоперекачувальні станції, морські термінали. Технічний огляд, експертне обстеження технологічного обладнання і трубопроводів. Методи і методики» ПАТ «Укртранснафта» 0114U006345.

Метою дисертаційної роботи є вирішення актуальної науково-практичної задачі в галузі акустичних методів неруйнівного контролю – підвищення чутливості та інформативності ультразвукового контролю для визначення типу та розмірів виявлених дефектів металоконструкцій довготривалої експлуатації.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити такі **задачі**:

- проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку методів та засобів ультразвукового контролю металоконструкцій для визначення їх фактичного технічного стану;

- провести теоретичні дослідження з метою розроблення методу вибору параметрів п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП) ультразвукових фазованих решіток (УЗФР) та оброблення дефектоскопічної інформації для ідентифікації типу та розмірів дефектів порушення суцільності металоконструкцій;

- виконати експериментальні дослідження удосконаленого методу визначення типу та розмірів дефектів металоконструкцій;

- провести порівняльні випробування розробленого та діючого стандартизованого методів ультразвукової дефектоскопії та виконати апробацію запропонованої технології.

Об'єктом досліджень є процес контролю технічного стану металоконструкцій тривалого експлуатування.

Предметом дослідження є методи і засоби ультразвукового контролю металоконструкцій за допомогою технології УЗФР.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач в дисертаційній роботі використано методи неруйнівного контролю, математичного аналізу та моделювання, теорії розповсюдження звукового поля та розпізнавання образів. Для підготовки та проведення досліджень використовувались методи моделювання експерименту, методи теорії вимірювань. Для обробки результатів контролю застосовувались сучасні методи обробки інформації, автоматизації та алгоритми програмування.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач в дисертаційній роботі використано методи неруйнівного контролю, математичного аналізу та моделювання, теорії розповсюдження звукового поля та розпізнавання образів. Для підготовки та проведення досліджень використовувались методи моделювання експерименту, методи теорії вимірювань. Для обробки

результатів контролю застосовувались сучасні методи обробки інформації, автоматизації та алгоритми програмування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Вперше було виконано графоаналітичне дослідження поля перетворювачів УЗФР шляхом досліджень зміни форми та розкриття основної вітки діаграми направленості при зміні параметрів УЗФР, що дало змогу встановити параметри УЗФР, які забезпечують надійне виявлення типу та вимірювання розмірів дефектів зварних з'єднань.

2. Вперше була отримана математична залежність для визначення часових затримок елементів перетворювача УЗФР для фокусування ультразвукової енергії під певним кутом в процесі акустичного контролю, що дає можливість забезпечити максимальну направленість ультразвукового поля на місце очікуваного дефекту.

3. Удосконалено спосіб підбору оптимальних параметрів перетворювачів УЗФР залежно від типу очікуваних дефектів, геометричних параметрів об'єктів контролю та чутливості контролю, що дозволяє підвищити достовірність результатів контролю та мінімізувати витрати на його проведення.

4. Знайшло подальший розвиток застосування програмного пакету *Image J* для оброблення графічної дефектоскопічної інформації, що дозволяє достовірно розрізняти найбільш поширені типи дефектів зварних з'єднань та визначати їх геометричні розміри з відносною похибкою не вище 5%.

Положення, які захищаються:

1. Метод розрахунку параметрів перетворювача УЗФР для надійного виявлення типу та розмірів дефектів зварних з'єднань трубних виробів.

2. Метод ідентифікації типу та розмірів дефектів порушення суцільності металоконструкцій, виявлених за допомогою УЗФР з використанням профільного програмного забезпечення.

3. Спосіб вибору перетворювачів УЗФР в залежності від параметрів об'єкту контролю та типів виявлюваних дефектів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в підвищенні достовірності та інформативності результатів ультразвукового методу контролю металоконструкцій тривалої експлуатації, а також можливості ідентифікації типу (виробничого чи експлуатаційного походження) виявленого дефекту при односторонньому доступі до поверхні контролю. Реалізація розробленої методики здійснюється за допомогою серійних дефектоскопів з УЗФР згідно з чинними нормативними документами.

Розроблено складову діючого нормативного документу (СОУ) для технічного огляду, експертного обстеження технологічного устаткування і трубопроводів запропонованим методом.

Результати досліджень, викладені у дисертаційній роботі, можуть бути використані при контролі складних промислових об'єктів (акти впровадження) та впроваджені у навчальному процесі під час вивчення дисциплін «Методи і засоби неруйнівного контролю», «Контроль якості зварювання», «Технічна діагностика бурового та нафтопромислового обладнання».

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Зокрема, в опублікованих у співавторстві та особисто здобувачем роботах:

- запропоновано новий підхід до удосконалення ультразвукових методів контролю металоконструкцій, який передбачає використання когерентної обробки інформації та сучасних технічних засобів контролю;

- запропоновано застосування УЗФР для визначення розташування, типу та розмірів дефектів типу «порушення суцільності» зварних з'єднань металоконструкцій тривалої експлуатації;

- розроблено спосіб вибору параметрів УЗФР відповідно до об'єкту контролю (розміри, кривизна поверхні, доступ);

- розроблено методику та проведено комплекс експериментальних досліджень з виявлення та визначення критичності дефектів зварних з'єднань елементів конструкцій важливих промислових об'єктів, що працюють понад нормативний ресурс;

- запропоновано шляхи практичної реалізації та включено до чинного нормативного документу методику контролю металоконструкцій на наявність дефектів типу «порушення суцільності» в процесі експлуатації.

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на вітчизняних і міжнародних конференціях, зокрема: 4-тій науково-практичній конференції студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (Івано-Франківськ, листопад 2013р.); 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), жовтень 2014, Прага, Чехія; 7-ій Міжнародній науково-технічній конференції і виставці «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання», листопад 2014, м. Івано-Франківськ; VIII міжнародній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології», травень 2015, смт. Ворзель, Київська обл.; 4-ій міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика», квітень 2015, м.Івано-Франківськ; 14-ій міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи», квітень 2015, м.Київ; «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування», вересень 2015, м. Тернопіль; 15-ій міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи», травень 2016, м.Київ.

Публікації результатів досліджень. За темою дисертаційної роботи опубліковано 19 друкованих праць, з них 5 – статті у фахових наукових виданнях, затверджених МОН України, в тому числі 1 входить до міжнародних наукометричних баз, 3 – зарубіжні публікації, 11 – тези доповідей на конференціях, у тому числі 2 – міжнародні.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 128 сторінках, робота проілюстрована 52 рисунками,

містить 11 таблиць, список використаних джерел із 101 найменування та 5 додатків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ І ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ТИПУ ТА РОЗМІРІВ

1.1. Характеристика об'єкту контролю

Нафтогазова система України володіє значною кількістю металоконструкцій тривалої експлуатації, значна частина яких відпрацювала нормативний термін експлуатування. Одним із основних пріоритетів розвитку країни є Стратегія сталого розвитку до 2030 року [1], яка містить 4 вектори дії. Згідно з вектором розвитку передбачається реформа енергетики, а відповідно до вектору безпеки – програма енергонезалежності і збереження навколишнього середовища. Головними завданнями реформ і програм є забезпечення енергетичної безпеки, перехід до енергоощадного використання та споживання енергоресурсів із впровадженням інноваційних технологій, а також модернізації Єдиної газотранспортної системи України та інфраструктури паливно-енергетичного комплексу.

На сьогоднішній день більша частина металоконструкцій працює понад нормативний ресурс і за останні роки практично не оновлювалась. Забезпечення якості та безпеки функціонування такого обладнання є можливим при умові:

- реконструкції (модернізації) металоконструкцій;
- регулярної технічної діагностики з метою визначення фактичного технічного стану та прогнозування терміну та умов безпечної експлуатації.

Загальна довжина трубопроводів на території України станом на 2010 рік складала 45725 км (газ 37000 км, нафта 4514 км, нафтопродукти 4211 км). [2, 3]. В експлуатації ПАТ «Укртранснафта» знаходяться 79 резервуарів вертикальних сталевих (РВС) різних конструкцій. Експлуатація таких об'єктів відповідального призначення повинна здійснюватися в безпечних умовах та виключенні їх відмов, що можуть спричинити значну загрозу навколишньому середовищу.

Враховуючи постійно зростаючу вартість та обсяги робіт щодо реконструкції і ремонту, будівництва та введення в експлуатацію нового обладнання (для прикладу вартість побудови 1 км трубопроводу діаметром 50 мм становить близько 5 млн. гривень, а вартість технічного діагностування – близько 50 тис. гривень), повна заміна чи капітальний ремонт є достатньо затратним і не завжди технічно можливим, тому завдяки своєчасному виявленню і частковому ремонту можна заощадити кошти і не допустити неочікуваного виходу з ладу робочих елементів, виникнення аварій та надзвичайних ситуацій техногенного характеру [4,5]. Повільні темпи оновлення зазначених об'єктів вимагають прийняття рішень щодо питань визначення їх надійного та безпечного терміну експлуатації, визначивши фактичний технічний стан і враховуючи умови експлуатації.

Визначення фактичного технічного стану металоконструкцій [6-9] можливе при умові застосування сучасних методів діагностування та технічних засобів, які дають можливість визначити усі необхідні параметри, необхідні для розрахунку терміну безпечної експлуатації обладнання. Фактичний технічний стан будь-якого об'єкта визначається відповідністю його фізико-механічних і геометричних характеристик їх встановленим нормативним значенням та відсутністю дефектів типу порушення суцільності матеріалу [10].

Правильна оцінка залишкового ресурсу конструкцій дасть змогу [11]:

- заощадити ресурси (фінансові, матеріальні, людські) на спорудження нових об'єктів;
- забезпечити усталений розвиток базових галузей промисловості;
- знизити ризик виникнення аварій техногенного характеру для життя та здоров'я населення, навколишнього середовища, держави.

Ключовими параметрами, що визначають технічний стан металоконструкцій є виявлення дефектів матеріалу, контроль фізико-механічних та фізико-хімічних характеристик і контроль геометричних характеристик (рисунок 1.1) [10].

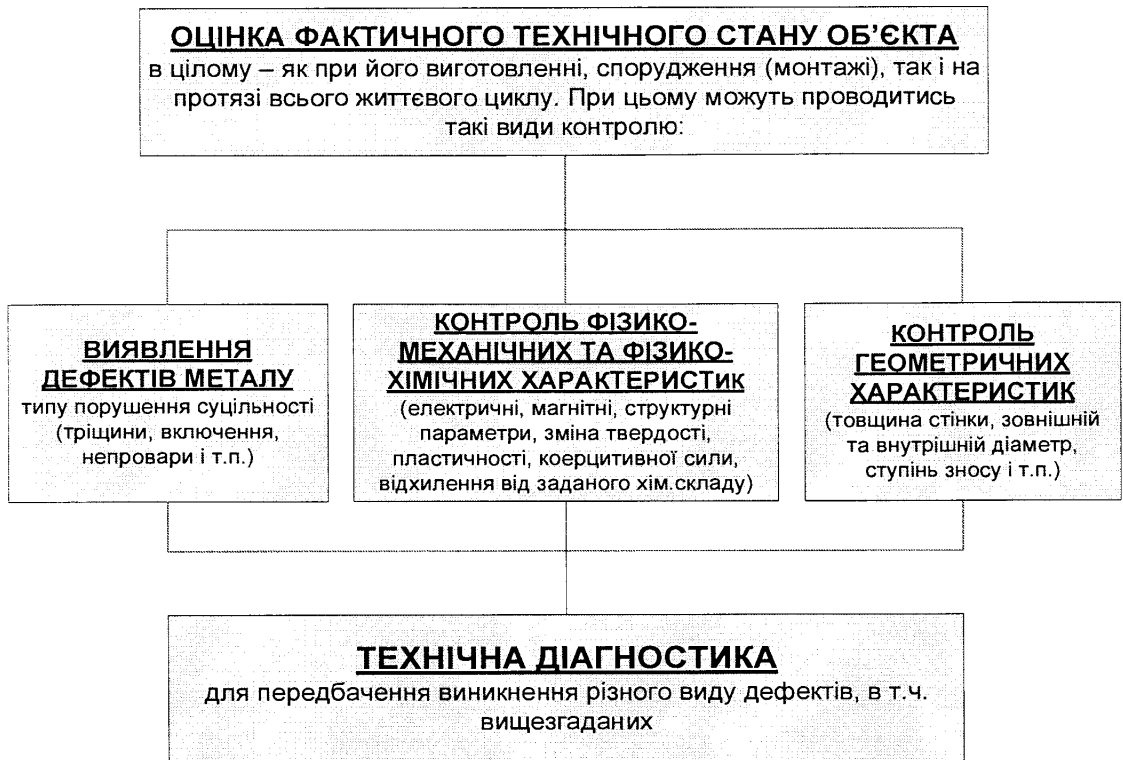


Рисунок 1.1 – Схема оцінювання технічного стану об'єктів нафтогазового комплексу

Аналіз причин виникнення аварій [12-14] і надзвичайних ситуацій техногенного характеру за останні роки показав, що майже у половинні випадків вони мають технічний характер – незадовільний технічний стан споруд, конструкцій, обладнання та інженерних мереж. Для прикладу, основною причиною виходу з ладу резервуарів (рисунок 1.2), домінуюча частина яких працює понад нормативний ресурс, є відмова обладнання, яка складає 37 %. У той же час, через заводські та експлуатаційні дефекти (дефекти зварного шва (22%), дефекти основного металу (10%), втрати геометричної форми (6%)) відбувається 38 % відмов [15].

Причинами аварій магістральних трубопроводів є зовнішня корозія, механічне пошкодження, дефекти будівельно-монтажних робіт і труб, а також зовнішній вплив (рисунок 1.3) [16,17].

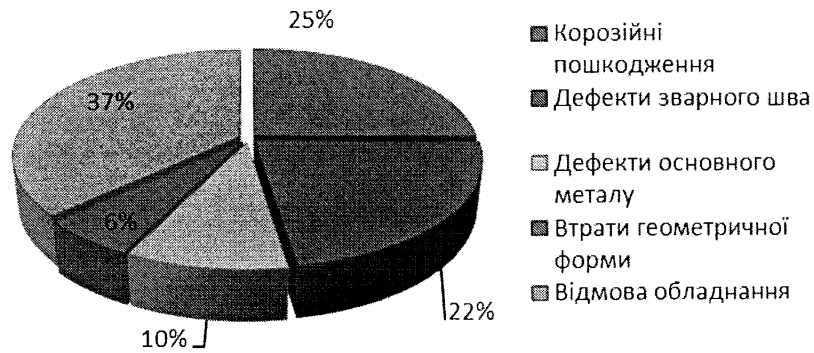


Рисунок 1.2 – Причини відмов резервуарів для зберігання нафтопродуктів

Причинами аварій магістральних трубопроводів є зовнішня корозія, механічне пошкодження, дефекти будівельно-монтажних робіт і труб, а також зовнішній вплив (рисунок 1.3) [16,17].

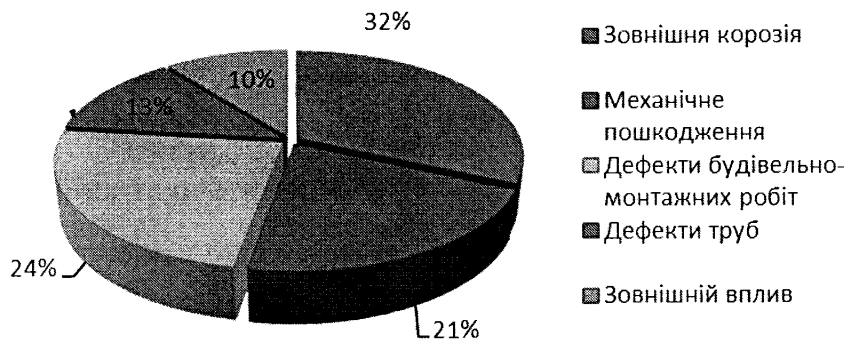


Рисунок 1.3 - Причини відмов магістральних трубопроводів

Узагальнюючи причини відмов нафтогазопромислового обладнання, доходимо висновку, що причини відмов зумовлені наступним:

- неправильною експлуатацією обладнання;
- порушеннями при виготовленні;
- відсутністю ефективних методів і засобів для об'єктивної оцінки їх якості;
- неефективним технічним менеджментом.

Тому для визначення фактичного технічного стану та попередження виникнення аварій чи виходу з ладу деяких елементів конструкції тривалої

експлуатації першочергово необхідно виявити дефекти будівельно-монтажних робіт.

Для одержання достовірних результатів розрахунку залишкового ресурсу металоконструкцій тривалої експлуатації, що є основною задачею при визначенні технічного стану, необхідно знати не тільки про наявність дефекту, а й інформацію про вид дефекту і його дійсні розміри.

Слід зазначити, що в процесі будівельно-монтажних робіт обладнання нафтогазового обладнання невід'ємним технологічним процесом є зварювання. Причинами утворення дефектів зварювання є порушення технології зварювання, вибір неправильних параметрів зварювання, погана підготовка елементів, що зварюються, тощо.

Відповідно до ДСТУ EN ISO 6520-1:2015 дефекти зварювання металів плавленням поділяються на шість груп [18]:

- 1) тріщини;
- 2) порожнини, пори;
- 3) тверді включення;
- 4) несплавлення та непровари;
- 5) порушення форми шва;
- 6) інші дефекти, не включені до вищезгаданих груп.

За розташуванням дефекти бувають зовнішні, внутрішні і наскрізні [19].

До зовнішніх дефектів відносять зміни форми шва (неоднакова ширина і висота, напливи, свищі, подрізи, різкі або круті переходи шва до основного металу, надмірна або недостатня висота посилення шва і ін.). Внутрішні дефекти - це газові, шлакові і сторонні включення, тріщини, непровари і несплавлення, дефекти структури. Наскрізні - трубчасті пори, пропали, тріщини, непровари, несплавлення, шлакові пробки і ін.

Дефекти також поділяються за формою: плоскі, округлі або об'ємні; за величиною: малі, середні, великі; за масовістю: поодинокі, групові. Прикладом перших є тріщини і непровари, до округлих і об'ємних відносять пори і тверді включення [20].

Тріщини - це розриви зварного з'єднання або основного металу, що створюють різку концентрацію внутрішніх напружень (рисунок 1.4.). Вони можуть викликати катастрофічне руйнування звареної конструкції і тому зазвичай недопустимі. Тріщини поділяються за розмірами (макро- і мікроскопічні), за розташуванням (поздовжні, поперечні в шві, в зоні термічного впливу і в основному металі), за походженням (гарячі, холодні, втомні).

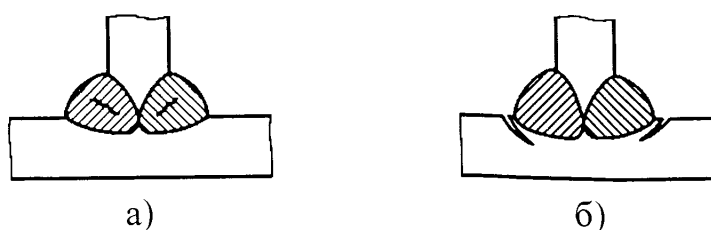


Рисунок 1.4. – Тріщини в зварних з'єднаннях і основному металі:

а) тріщини зварного зєднання; б) тріщини основного металу

Непровари – незаповнення наплавленим металом січення шва (рисунок 1.5). У напусткових і стикових з'єднаннях непровари часто супроводжуються напливами. Місце непровару в зламі покрито шорстким шаром окислів, неметалевих включень, а в окремих випадках - шлаком. Це небезпечний дефект, що значно знижує статистичну і динамічну міцність зварних з'єднань. Відсутність сплаву між основним металом і металом зварювальної ванни по периметру оброблення шва називають несплавлення. Цей дефект характеризується глибокими подрізами на границі шва і збільшеним посиленням. Подрізи в більшості випадків заповнені шлаком.

Напливи (натікання) виникають в результаті стікання розплавленого металу електрода на нерозплавлений метал (рисунок 1.6). Найчастіше напливи приховують непровари між основним металом і кромкою.

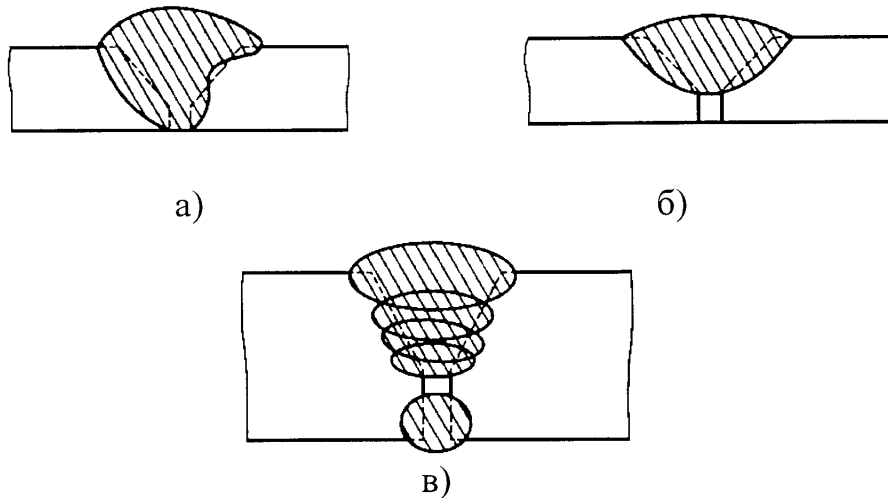


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення непровару: а) кромки, б) в корені шва, в) непровар між шарами

Напливи (натікання) виникають в результаті стікання розплавленого металу електрода на нерозплавлений метал (рисунок 1.6). Найчастіше напливи приховують непровари між основним металом і кромкою.

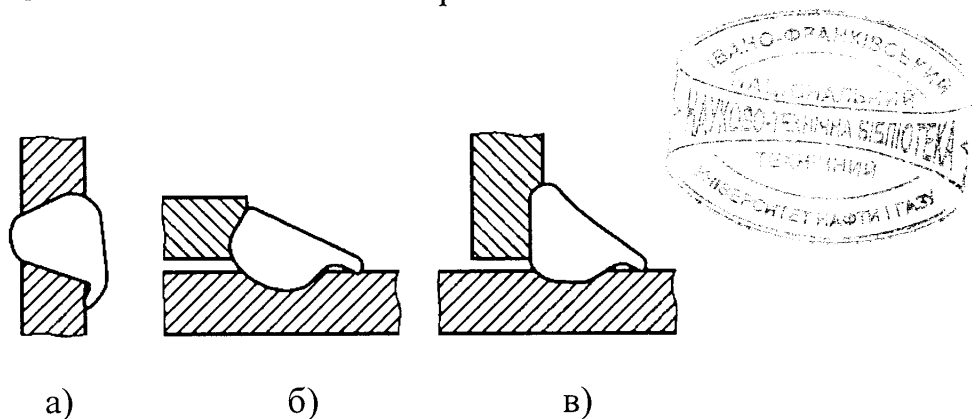


Рисунок 1.6. – Схематичні зображення напливів: а) стикового зварного з'єднання; б) зеднання в нахлест; в) таврового зварного з'єднання

Поглиблення по поверхні шва, що утворюються завдяки витісненню металу, називають кратерами. Кратер на найбільшій своїй ширині і глибині часто має тріщини.

У металі шва виникають пори - порожнини через наявність в

зварювальній ванні газів, в основному водню і азоту (рисунок 1.7). При багатопаровому зварюванні пори з одного шару часто переходять в наступні шари, пронизуючи всю товщину шва. Це пояснюється тим, що зародження нової пори відбувається найлегше там, де вони вже є.

Шлакові включення (рисунок 1.8) утворюються при поганому очищенні зварювальних кромки від окалини та інших забруднень, або попереднього шва від шлаку перед накладенням подальшого шва. Макроскопічні шлакові включення викликають концентрацію напружень, знижуючи міцність зварного з'єднання. Макроскопічні - знижують пластичність металу шва. Вплив розміру шлакових включень на ударну в'язкість зварного шва аналогічний впливу пор.

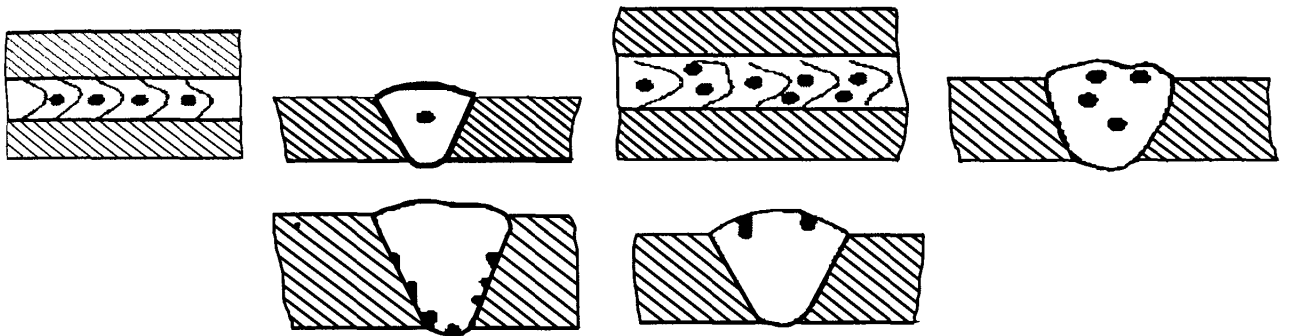


Рисунок 1.7 – Графічне зображення пор в зварному з'єднанні: а) ланцюжок пор; б) одинична, в), г), д) скупчення пор; е) свищі

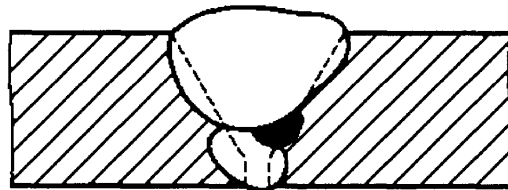


Рисунок 1.8 – Схематичне зображення шлакового включення

Пропали – це наскрізні отвори в зварному шві, що утворюються в результаті витікання зварної ванни. Такий дефект відноситься до недопустимих

дефектів і у всіх випадках підлягає заварюванню.

При дуговому зварюванні виникають підрізи - виїмки в основному металі вздовж країв шва (рисунок 1.9). Вони зменшують переріз зварного з'єднання, викликають концентрацію напружень, прискорюють корозію і можуть стати причиною руйнування звареної конструкції.

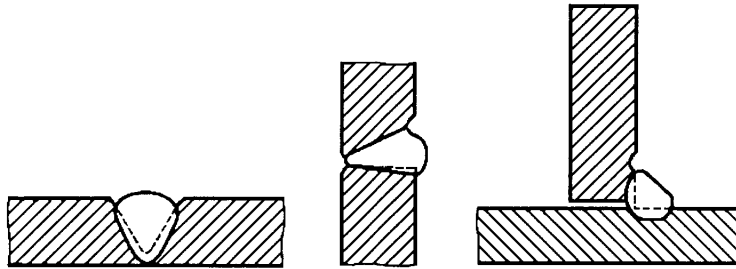


Рисунок 1.9. - Схематичне зображення дефекту типу «підріз»: а), б) стикового зварного з'єднання, в) таврового з'єднання

Наскрізні дефекти зварних з'єднань залежно від часу виникнення можна поділити на первинні і вторинні. Первинні наскрізні дефекти виникають в процесі формування зварного з'єднання. До них відносяться наскрізні пори, утворені газами, що виходять з металу шва в процесі його затвердіння; гарячі тріщини, непровари, несплавлення, шлакові канали, пропали, дефекти структури.

Вторинні наскрізні дефекти виникають в сформованих зварних з'єднаннях. Ними є холодні, деформаційні і втомні тріщини, пори і свищі, що утворюються в результаті впливу агресивних середовищ. Такими дефектами можуть стати (за певних умов) також зовнішні і внутрішні дефекти (непровари, пори, шлакові включення, тріщини, підрізи, кратери, дефекти структури).

Ступінь впливу дефектів на працездатність зварних з'єднань і конструкцій залежить від властивостей з'єднань, присадних матеріалів, способу зварювання, виду зварних з'єднань, кількості, типу і розташування дефектів,

умов експлуатації, характеру діючих навантажень та інших факторів [20].

В процесі спорудження та експлуатації нафто-газове обладнання постійно знаходиться в напружено-деформованому стані [21], що і спричинює нерівномірний розподіл навантажень, виникнення деформацій, що приводять до виникнення дефектів.

Вид дефекту відіграє важливу роль в процесі їх розвитку. Технологічні дефекти розділяють на групи в залежності від виду порушення цілісності на компактні (сферичні, дискові) і протяжні (об'ємні чи пласкі), що дозволяє в процесі аналізу концентрації напружень в зоні дефекту визначити ріст і напрям розповсюдження дефекту [19]. Розташування дефекту по відношенні до поля діючих напружень може бути довільним. У перетині дефектного зразка розподіл напружень нерівномірний. Концентрація напружень і деформацій в зоні дефекту визначається його конфігурацією. Найбільша концентрація напружень виникає на кінцях дефектів.

Дефекти округлої форми в порівнянні з дефектами тріщиноподібного типу відрізняються* більш помірною концентрацією напружень (таблиця 1.1)[19].

Таблиця 1.1 - Значення коефіцієнтів концентрації для технологічних дефектів металоконструкцій

Вид дефекту	Пружний коефіцієнт концентрації напружень	Коефіцієнт концентрації деформацій
Пори	2,0-2,5	2-3
Витягнуті пори і округлі шлакові включення	2,5-3,5	3-5
Гострі шлакові включення	3,5-6,0	5-7
Непровари	3,5-6,0	9-15

Збільшення значення коефіцієнтів деформації підвищує можливість подальшого росту дефектів. З таблиці 1 слідує, що найбільш небезпечними для конструкцій є непровари, що відносять до пласких дефектів. Пласкі дефекти є більш небезпечні, оскільки концентрація напружень відбувається на їх кінцях, коли в об'ємних дефектах напруження рівномірно розподіляється по всьому об'єму дефекту.

Зародженню тріщини передують пластична деформація металу в зоні концентрації напружень. Ефект впливу порушення цілісності залежить також від глибини залягання дефекту. Найбільш небезпечним являється випадок, коли дефект знаходиться близько до поверхні металу і спричиняє порушення цілісності в проміжку між дефектом і поверхнею металу, або ж розташований паралельно напрямку діючих напружень.

Однією з найбільших проблем при виникненні дефектів є концентрація напружень на їх кінцях, в порожнині тощо. Для дефектів округлої форми він дорівнює 2-5, для дефектів з гострими краями коливається від 10 до 100. З цього слідує, що визначення форми дефектів в процесі контролю є важливою задачею [19].

У ході виявлення дефектів типу порушення цілісності критично важливо визначити тип дефекту (об'ємний чи плаский) та його фактичні (еквівалентні) розміри. Це пояснюється тим, що пласкі дефекти, як правило, є тріщинами і здатні розвиватись, а отже несуть загрозу подальшій безпечній експлуатації. Об'ємні ж дефекти, розміри яких у трьох координатах є співрозмірними, як правило, не є концентраторами напружень.

Дефекти спотворюють внутрішню і зовнішню геометрію шва. Тому їх необхідно враховувати при оцінці механічних властивостей зварного з'єднання, мікроструктури металу шва і навколошовної зони, внутрішніх напружень, характеру зовнішніх умов.

Заводські дефекти: пори, непровари, включення, як свідчить практика, до експлуатаційних дефектів не приводять [22]. А в процесі експлуатації розвиваються корозійно-втомні тріщини, які здатні розвиватись під впливом

напружень і приводити до аварійних ситуацій. Процес зародження дефектів складається з двох етапів [23]. На першому етапі відбувається зародження тріщини від початкового технологічного чи конструкційного дефекту. Тривалість такого етапу може бути різною від кількох годин до десятків тисяч годин, та залежить від характеристик початкового дефекту (розміру, орієнтації, місця розташування, типу). В даному процесі тип дефекту відіграє важливу роль. Зародження тріщини буде довшим від дефекту сферичної форми, внаслідок незначного коефіцієнту концентрації напружень. А у випадку плаского дефекту (непровар, несплавлення, ланцюжок пор) процес розвитку тріщин може бути короткочасним. На другому етапі проходить процес розвитку тріщини, який залежить від силових факторів, конструкції зварного з'єднання, коефіцієнтів запасу матеріалу.

Тому, важливим завданням є виявлення дефекту на етапі зародження і визначення його типу (плаский чи об'ємний) чи це заводський дефект, чи дефект експлуатаційний, що дасть змогу проаналізувати і запобігти неконтрольованому поширенню дефекту та виходу з ладу металоконструкції тривалої експлуатації.

1.2 Аналіз методів контролю металоконструкцій

У промисловості найбільш поширеними є методи неруйнівного контролю (НК) [24 -26]. Метод НК повинен забезпечувати виявлення порушень цілісності, які мають розмір більше допустимого і вважаються недопустимими дефектами. Поняття недопустимість певного типу порушення цілісності є складним питанням. Практично всі існуючі методи неруйнівного контролю [26, 30] придатні до вирішення задачі виявлення та визначення умовних розмірів дефектів. Неруйнівні випробування дозволяють визначити в зварних з'єднаннях внутрішні або наскрізні дефекти, виявити які за зовнішнім оглядом неможливо.

Найбільш доступними і поширеними методами НК є радіаційний, ультразвуковий, магнітний, електричний, вихрострумний, капілярний. Кожен з них має свої переваги і недоліки, застосовується відповідно до конкретного типу об'єкту контролю і повинен задовольняти встановленим вимогам [28].

1.2.1 Ультразвукові методи контролю

Ультразвукові методи контролю, що базуються на поширенні акустичних коливань і хвиль ультразвукового діапазону частот, займають домінуюче положення серед існуючих методів контролю та ідентифікації дефектів. До головних переваг даних методів можна віднести високу ймовірність виявлення найбільш небезпечних плоских дефектів: тріщини, непровари і несплавлення.

Ультразвукові методи контролю поділяються на дві великі групи: активні та пасивні (рисунок 1.10), які в свою чергу поділяються таким чином [24, 29]:

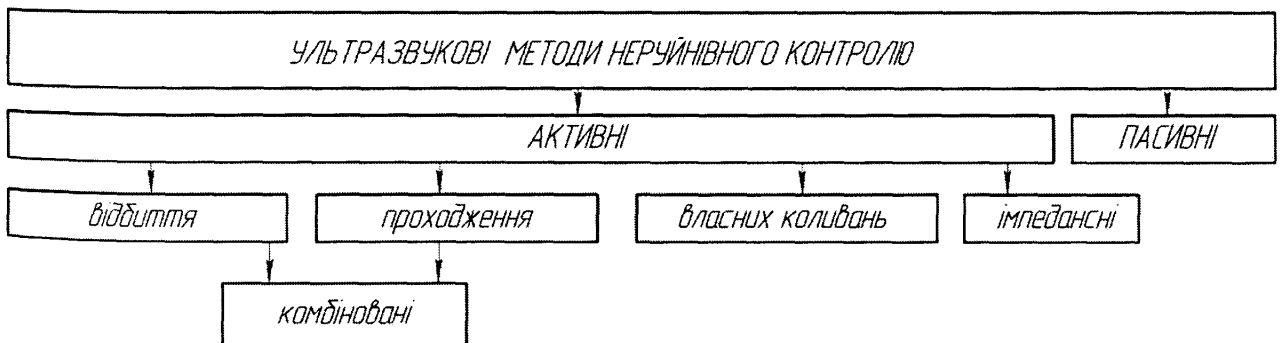


Рисунок 1.10 – Класифікація ультразвукових методів контролю

В подальшому розглядатимемо активні методи контролю, які дають змогу оскільки з їх допомогою можна виявити дефекти і ідентифікувати їх місце розташування та відносні розміри без довготривалих спостережень.

Найбільш інформативним методом ультразвукового (УЗ) контролю є метод відбиття (луно- метод). Його широко застосовують для контролю

металоконструкцій різного призначення. Він дозволяє отримати детальні кількісні характеристики дефектів конструкції при односторонньому доступі до неї. Існуюча дефектоскопічна УЗ апаратура володіє досить високими технічними характеристиками і сервісними можливостями. Чутливість її цілком дозволяє виявляти в дрібнозернистих сталях порушення цілісності порядку десятих міліметра, а роздільна здатність становить 0,5-1 мкм. Методи відбиття базуються на аналізі відбиття імпульсів пружних хвиль від нерівностей чи границь об'єкта контролю (ОК), методи проходження – на впливі параметрів ОК на характеристики пружних хвиль, що пройшли через ОК [32].

Методи відбиття поділяються на луно-метод, луно-дзеркальний, дельта, ревербераційний, дифракційно-часовий методи. Схеми контролю методів відбиття подані на рисунку 1.11.

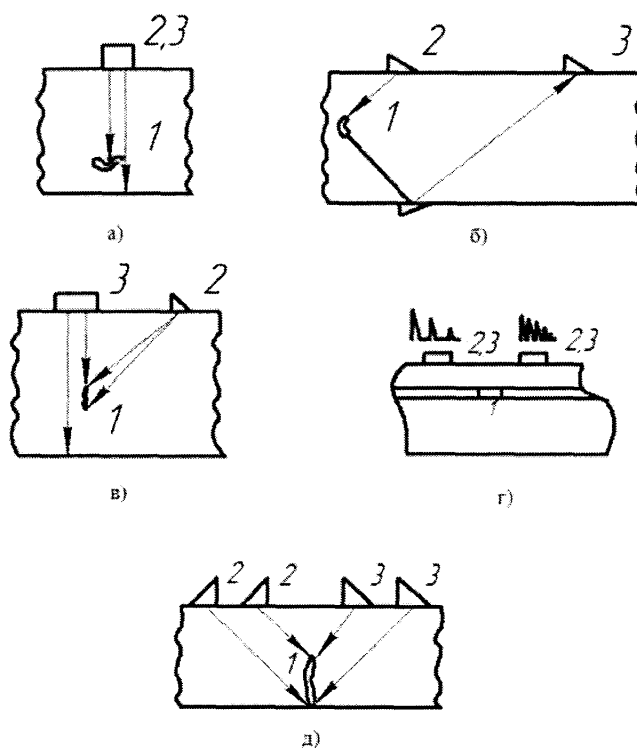


Рисунок 1.11 - Методи відбиття – а) луно-метод; б) луно-дзеркальний; в) дельта; г) ревербераційний; д) дифракційно-часовий, де 1 – об'єкт контролю; 2 – випромінювач; 3 – приймач

Методи проходження базуються на контролі зміни параметрів акустичного сигналу, що пройшов через ОК. Схеми контролю методами проходження подані на рисунку 1.12.

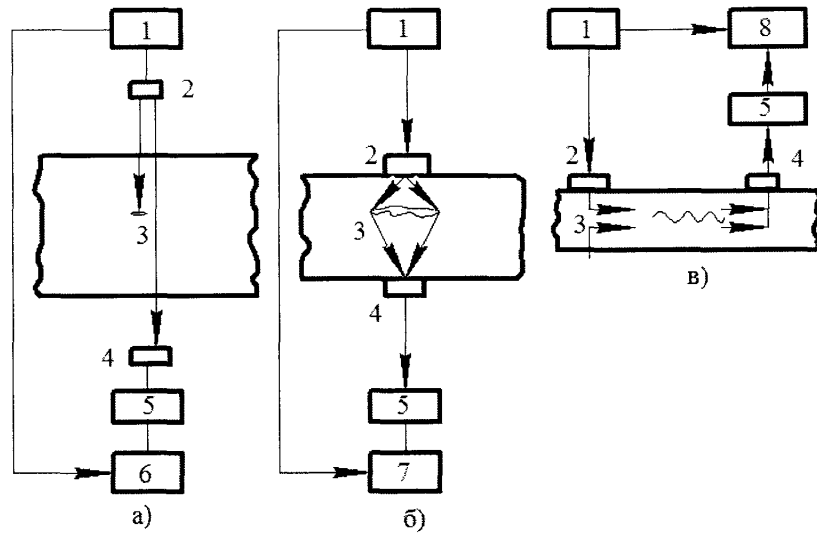


Рисунок 1.12 – Методи проходження: а) амплітудно-тіньовий; б) часовий тіньовий; в) вело симетричний; де 1 – генератор, 2 – випромінювач; 3 – об’єкт контролю; 4 – приймач; 5 – підсилювач; 6 – вимірювач амплітуди; 7 – вимірювач часу приходу імпульсу; 8 – вимірювач зміни фази

Методи власних коливань базуються на збудженні в ОК вимушених або вільних коливань і вимірювання їх параметрів: власних частот і величини втрат. З допомогою даного методу найчастіше контролюють зміни товщини труб, або контролю багат шарових конструкцій. Схеми контролю методів власних коливань подані на рисунку 1.13.

Імпедансні методи полягають в аналізі зміни механічного імпедансу чи вхідного акустичного імпедансу частини поверхні ОК, з яким взаємодіє перетворювач. Дані методи застосовують для контролю дефектів з’єднань в багат шарових конструкціях. Його також застосовують для вимірювання фізико-механічних властивостей.

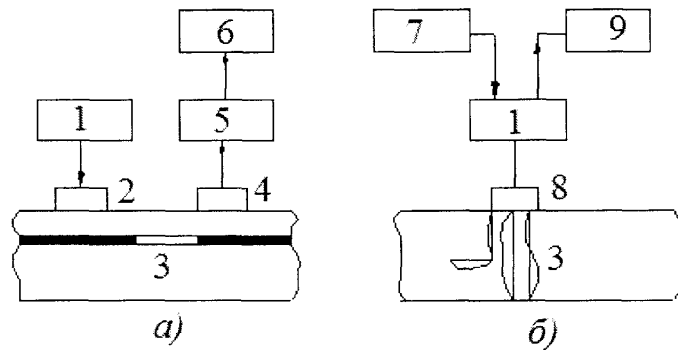


Рисунок 1.13 – Методи власних коливань: а) локальний низькочастотний; б) локальний резонансний; 1 – генератор; 2 - вібратор; 3 – об’єкт контролю; 4 – приймач; 5 – підсилювач; 6- спектроаналізатор; 7 – модулятор частоти; 8 – приймач; 9 –реєстратор резонансів

Імпедансні методи полягають в аналізі зміни механічного імпедансу чи вхідного акустичного імпедансу частини поверхні ОК, з яким взаємодіє перетворювач. Дані методи застосовують для контролю дефектів з’єднань в багатошарових конструкціях. Їх також застосовують для вимірювання фізико-механічних властивостей.

Когерентні методи відрізняються від інших методів тим, що в якості інформативного параметру окрім амплітуди і часу приходу імпульсів використовується також фаза сигналу. Завдяки цьому підвищується роздільна здатність і виникає можливість спостерігати зображення дефектів, схожі до реальних.

Можливості методу відбиття використовуються в даний час не повністю. Координати відбивачів прийнято вимірювати за критерієм максимуму амплітуди луно-сигналу, що призводить до помилок, іноді значних. Розміри відбивачів оцінюють також за амплітудою сигналу. Замість реальних розмірів дефектів вдається в більшості випадків визначати тільки умовні розміри. Тип і характер дефекту оцінюються тільки приблизно. Для уточнення цих параметрів доводиться вдаватися до вельми трудомістких методик. Продуктивність контролю при цьому низька. А головне - кваліфікація оператора-дефектоскопіста повинна бути дуже високою.

В таблиці 1.2 подані основні критерії контролю, врахування яких дає змогу вибрати метод контролю, який би задовольняв вимогам при проведенні ультразвукового контролю.

Згідно з таблиці 1.2 когерентні методи контролю є найбільш інформативними і не потребують високої кваліфікації оператора, що проводить контроль, а також піддаються автоматизації, що є важливим аргументом в час активного наукового розвитку.

Недоліком УЗК, крім необхідності розробки спеціальних методик і технологічних карт при дефектоскопії виробів різних типів, є складна інтерпретація результатів контролю. Результатом контролю ультразвуковими дефектоскопами з п'єзоелектричними перетворювачами (ПЕП) є луно-сигнал від відбивача, який характеризується амплітудою. Даний сигнал не є достатнім для визначення реальних розмірів чи місцезнаходження дефекту. Після виявлення дефекту матеріалу і його місцезнаходження важливою задачею неруйнівного контролю є визначення його типу та розмірів.

Таблиця 1.2 - Порівняльна характеристика ультразвукових методів контролю

Метод контролю	Контроль при односторонньому доступі до ОК	Кваліфікація оператора, що здійснює контроль (1-5)*	Передача і збереження інформації в цифровому вигляді	Складність інтерпретації результатів (1-5)*	Можливість визначення розмірів дефекту	Визначення типу дефекту	Можливість автоматизації процесу контролю
Відбиття	+	5	+	4	+	+	+
Проходження	-	4	+	3	+	+	+
Власних коливань	+	4	-	4	-	-	-
Імпедансні	+	4	-	4	-	-	-
Когерентні	+	2	+	1	+	+	+

*-складність по мірі зростання від 1 до 5

1.2.2 Когерентні методи контролю

В останні роки у зв'язку з розвитком обчислювальної техніки перспективними до застосування в УЗК стали когерентні методи візуалізації порушення суцільності [33]. Когерентні методи використовують більше інформації про порушення суцільності, що дозволяє отримувати зображення з дуже високою роздільною здатністю - порядку довжини хвилі, з хорошим співвідношенням сигнал/шум. Аналіз вимірювань поля дозволяє зробити висновок про розміри, форму і орієнтацію виявленого дефекту. Більш досконалим і інформативним, ніж одновимірний А - розгортка є, очевидно, двовимірне зображення в прямокутних координатних віддальх всередині об'єкта контролю. Апаратура з таким відображенням інформації про внутрішню будову об'єкта давно використовується в медичній діагностиці, надаючи оператору наочну картину зрізів внутрішнього об'єму.

У когерентних методах отримання зображень порушень цілісності використовується когерентна обробка вимірних значень акустичного поля, розсіяного порушенням цілісності, і виміряного в деякій області. Такі зображення називаються акустичними. Для їх побудови використовуються аналогові і цифрові методи обробки даних.

Когерентні методи можна розділити на методи, в яких основна обробка даних виконується в частотній або в часовій області. Методи обробки в частотній області традиційно називаються голографічними методами, так як історично вони були наслідком розвитку методів цифрової акустичної голографії. У Європі та Америці ці методи називаються методами синтезованої сфокусованої апертури в частотній області (FT- SAFT, F-SAFT) [34]. Когерентні методи з обробкою в часовій області прийнято називати SAFT. Було показано, що в рамках дифракційної теорії алгоритм SAFT можна реалізувати як в тимчасовій області, так і в області просторових частот.

Одним з методів з цифровою когерентною обробкою даних є акустична дифракційна томографія, яка передбачає відновлення форми дефектів за

даними по розсіяному ними акустичному полі. При цьому відновлення форми зводиться до побудови характеристичної функції, що, всередині дефекту, дорівнює одиниці. Завдання, які вирішуються в акустичній дифракційній томографії дуже складні - по суті представляють собою повноцінне рішення зворотної задачі розсіювання. Методи, що використовуються в акустичній дифракційній томографії, припускають по чергове рішення прямої задачі розсіювання (обчислення поля) всередині об'єкта за даними попереднього наближення для розсіювача і потім уточнення його з використанням дослідних даних про поле, зареєстроване поза межами розсіювача, тобто дефекту. Ці методи пред'являють колосальні вимоги до обчислювальної апаратури, що бере участь в експерименті. В даний час роботи з цього напрямку перейшли від стадії чисто теоретичної до експериментальних розробок. Найбільшого поширення у практичній дефектоскопії знайшли когерентні методи, що реалізують різні алгоритми методу синтезованої апертури [35, 36]. В основі методу синтезованої апертури, спочатку розробленого для радіолокації, лежить можливість, за допомогою переміщуваного акустичного перетворювача невеликих розмірів, виміряти розподіл значень акустичного поля, розсіяного дефектом, в ряді точок на поверхні цього виробу [37].

При TOFD методі [38 - 41] фіксуються і записуються сигнали, розсіяні на кінцях дефектів. Зібрані дані відображаються на екрані як чорно-білий B-scan. При TOFD методі використовуються хвилі чотирьох типів (рисунок 1.14):

- 1) підповерхнева хвиля - хвиля, що розповсюджується вздовж поверхні по найкоротшому шляху від випромінюючого ПЕП до приймального;
- 2) поздовжня хвиля, що відбилася дзеркально від донної поверхні;
- 3) поздовжня хвиля, дзеркально відбита від площинного дефекту;
- 4) хвиля, розсіяна на краю дефекту.

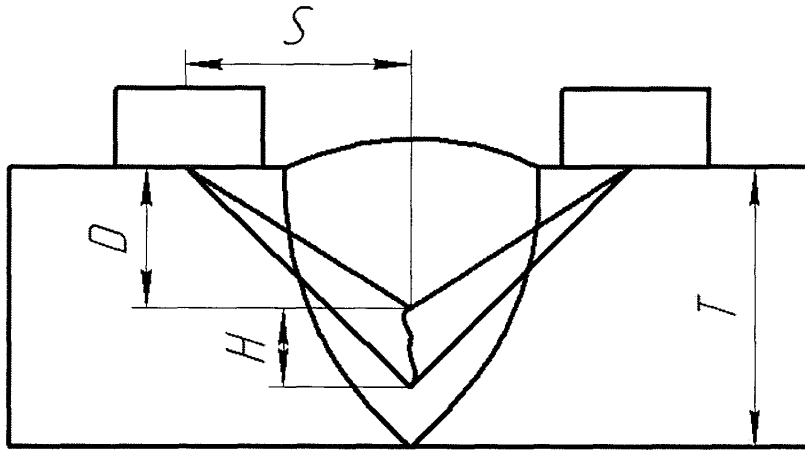


Рисунок 1.14 - Схема контролю методом TOFD

Зазвичай два перетворювачі включені за розділеною схемою, розташовуються симетрично щодо центральної осі зварного з'єднання. Затримки (часи пробігу) в призмах, швидкості ультразвуку, час пробігу підповерхневої хвилі і донного сигналу, а також товщина зварного шва повинні бути відомі.

Припускаючи, що дефект розташований посередині між перетворювачами, його висоту H і глибину залягання верхнього краю D можна розрахувати за формулами [41].

$$t_1 = \frac{2S}{C}, t_2 = \frac{2\sqrt{S^2 + D^2}}{C}, t_3 = \frac{2\sqrt{S^2 + (D+H)^2}}{C}, t_4 = \frac{2\sqrt{S^2 + T^2}}{C} \quad (1)$$

де t_1 – час приходу підповерхневої хвилі, с; t_2 – час приходу хвилі, розсіяної на верхньому краю дефекту, с; t_3 – час приходу хвилі, розсіяної на нижньому краю дефекту, с; t_4 – час приходу хвилі, дзеркально-відображеної від донної поверхні, с; S – відстань від перетворювача до середини зварного з'єднання, мм; T – товщина зварних елементів, мм; C – швидкість поширення ультразвукової хвилі, м/с.

До основних недоліків методу можна віднести:

- 1) наявність мертвих зон поблизу зовнішньої і донної поверхонь;

- 2) положення дефекту щодо перетворювачів сильно впливає на точність вимірювання розмірів;
- 3) складність інтерпретації образів дефектів;
- 4) особливості геометрії і акустичного контакту можуть перешкоджати проходженню підповерхневої хвилі;
- 5) амплітуда сигналу не є інформативним ознакою розміру дефекту;

Незважаючи на перераховані обмеження, TOFD метод є нормативним методом контролю для визначення розмірів вертикальних тріщин [42].

RATT (або SPOT - Satellite Pulse Observation Time Technique) - метод визначення розмірів дефектів, який базується на даних часу приходу сигналів [39]. Дані про амплітуду не використовуються (рис. 1.15).

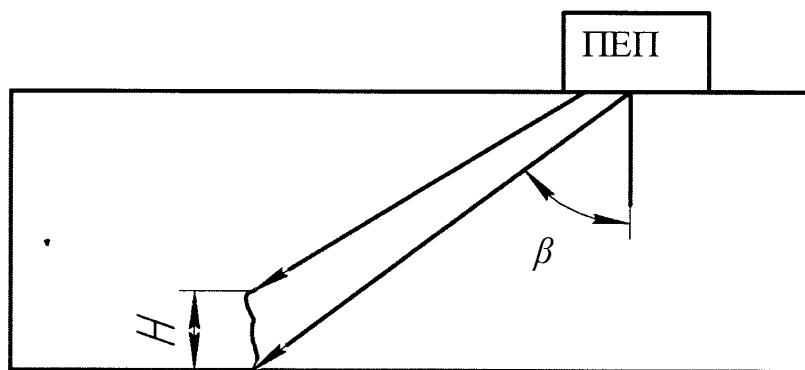


Рисунок 1.15 – Схема контролю RATT методом

Особливості методу:

1. Виявлення дефектів розміри яких менші за поперечний переріз ультразвукового пучка.
2. Використання двох сигналів – від вершини тріщини і від її кореню.
3. Сигнали отримують при одному положенні перетворювача і під одним кутом.
4. Висота тріщини визначається за різницею часу приходу сигналів:

$$H = \frac{C(t_2 - t_1)}{\cos \beta}, \quad (2)$$

де t_1 – час приходу хвилі, розсіяної на вершині тріщини, с; t_2 – час приходу хвилі, відбитої від кореню, с; β – кут вводу перетворювача; C – швидкість поширення ультразвукової хвилі, м/с.

Найкращий поділ інформативних сигналів досягається при використанні малих кутів введення (30° або 35°) [41].

Суть метода ААТТ (Absolute Arrival Time Technique) [39] полягає в тому, що використовується інформація про час приходу сигналу від кореня тріщини і від її вершини (рисунок 1.16). Переміщаючи ПЕП по поверхні, послідовно виявляються сигнали від кореня і вершини, за координатами отриманих сигналів визначається висота тріщини.

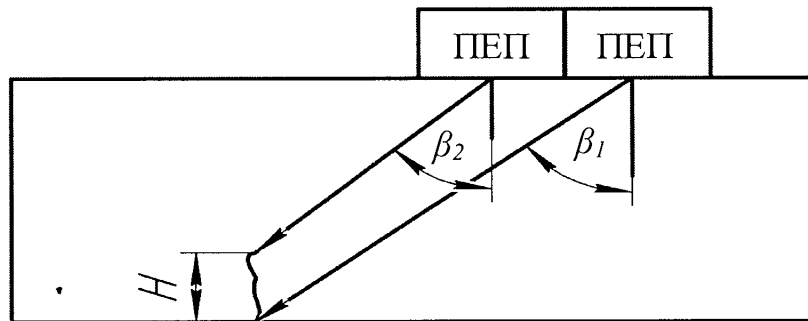


Рисунок 1.16 – Схема контролю методом ААТТ з одним кутом вводу

Для оптимального визначення часу приходу можна використовувати перетворювачі з різними кутами введення і встановлювати їх в різних положеннях (рисунок 1.17).

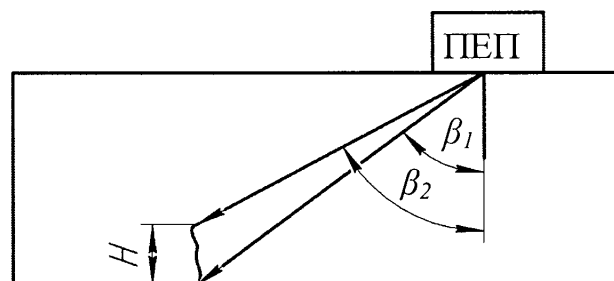


Рисунок 1.17 - Схема контролю методом ААТТ з двома кутами вводу

Висота тріщини H визначається за формулою [39] :

$$H = C \cdot t_2 \cdot \cos \beta_2 - C \cdot t_1 \cdot \cos \beta_1, \quad (3)$$

де t_1 – час приходу хвилі, розсіяної на вершині тріщини, с; t_2 – час приходу хвилі, відбитої від кореню, с; β_1 – кут, під яким отриманий сигнал від кореню тріщини; β_2 – кут, під яким отриманий сигнал від вершини тріщини; C – швидкість поширення ультразвукової хвилі, м/с.

Метод має такі особливості:

1. Висота тріщини може бути більшою за ширину ультразвукового пучка і через це не завжди може бути отриманий сигнал від кінця тріщини.
2. Для оптимального визначення часу приходу можна використовувати перетворювачі з різними кутами введення і встановлювати їх в різних положеннях.
3. При переміщенні перетворювача, послідовно виявляються сигнали від кореня тріщини і її вершини, що створює певні незручності при визначенні кількох тріщин.

Найбільш простим і придатним для контролю об'єктів різних типорозмірів є контроль з допомогою ультразвукових фазованих решіток (УЗФР). Основу системи УЗФР становить спеціальний ультразвуковий перетворювач з певною кількістю окремих елементів (зазвичай від 16 до 256). Кожен з них активується окремо по запрограмованій схемі. Ці перетворювачі можуть використовуватися з різними типами призми, як при контактному, так і при імерсійному контролі. Форма призми може бути квадратною, трикутною або круглою, а частота вимірювання лежить в діапазоні від 1 до 10 МГц [39].

УЗФР представляють собою набір однакових п'єзоелементів, які конструктивно об'єднані в один корпус. П'єзоелементи можуть бути [39] прямокутні, круглі, квадратні, кільцеві, комбінування їх дає змогу виготовляти п'єзоелектричні перетворювачі різного виду (рисунок 1.20) Конфігурацію

елементів (форму, розміри, послідовність розташування) вибирають відповідно до об'єкту контролю [37].

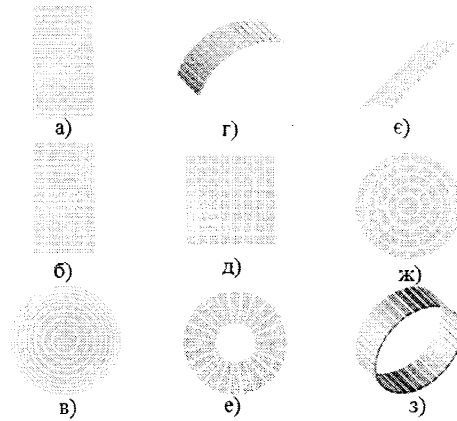


Рисунок 1.20 – Основні типи комбінацій п'єзоелементів, де а), б) лінійний, в) циліндричний, г) зігнутий лінійний, д) лінійний двовимірний, е) секторний, е) лінійний фокуруючий, ж) циліндричний-секторний, з) радіальний

На практиці, найчастіше використовуються лінійні перетворювачі з різною кількістю п'єзоелементів в комбінації з прямими чи похилими призмами.

Когерентні методи реалізуються в дефектоскопах, що працюють з УЗФР. Це пов'язано з тим, що зовсім недавно, з'явилися доступні серійні УЗ ФР високої якості і широкої номенклатури, які випускаються фірмами Imasonic (Франція), R/D Tech (Канада), Siemens (Німеччина), SIUI (Китай) та ін, а також, розвиток промисловості та електронних компонентів дозволяє створити недорогі, компактні електронні блоки управління ФР. Можливості та основні характеристики систем УЗФР подано в таблиці 1.3.

На практиці найчастіше використовуються лінійні перетворювачі з різною кількістю п'єзоелементів в комбінації з прямими чи похилими призмами.

Таблиця 1.3. – Технічні засоби для контролю з використанням УЗФР

Назва	OmniScan MX2	Epoch 1000	Phasor XS	Harfang Veo	ISONIC20 10	CTS-602
Виробник	R/D Tech, Канада	Olympus	GE Inspection Technologies	Sonatest	Sonotron, Ізраїль	SIUI, Китай
Режими сканування	TOFD A, B, C, S	A, B, L, S	A, B, L, S	TOFD S/L/C	TOFD S/L/C	A, B, C, D
Максимальна кількість елементів	128	64	64	64	32	128
Максимальна кількість каналів одночасно працюючих	16	16	16	16	32	32
Кількість варіантів фокусування (законів фокусування)	256	61	128	1024	128	256
Можливість збереження/передачі даних	SDHC, USB, Ethernet	немає	USB	USB WIFI	немає	USB
Програмне забезпечення для опрацювання даних	OmniPC™, NDT SetupBuilder	ні	ні	ні	ні	ні
Нанесення контуру зварного з'єднання	так	так	ні	так	так	так

Когерентні методи реалізуються в дефектоскопах, що працюють з УЗФР. Це пов'язано з тим, що зовсім недавно, з'явилися доступні серійні УЗФР високої якості і широкої номенклатури, які випускаються фірмами Imasonic (Франція), R/D Tech (Канада), Siemens (Німеччина), SIUI (Китай) та ін, а також, розвиток промисловості та електронних компонентів дозволяє створити недорогі, компактні електронні блоки управління ФР. Можливості та основні характеристики систем УЗФР подано в таблиці 1.3.

Оскільки на даний час, питання застосування та впровадження інноваційних засобів контролю є досить актуальним, все більша увага виробників спрямована на розширення додаткових функцій обладнання. Наприклад дефектоскоп Epoch 1000, Harfang Veo, ISONIC 2010 дають

можливість оператору одночасно працювати в кількох режимах. Прилади серії OmniScan MX2 та ISONIC 2010 дозволяють проводити налаштування параметрів контролю за допомогою модулів налаштування 3D. Усі ці функції дозволяють спростити процес налаштування, проведення контролю та допомагають оператору документувати результати контролю.

Проаналізувавши технічні характеристики існуючих моделей дефектоскопів можна зробити висновок, що вибір необхідних технічних засобів для контролю повинен здійснюватися відповідно до об'єкту контролю, умов контролю, досвіду оператора та вимог щодо документування результатів контролю.

1.3 Вибір і обґрунтування напрямку досліджень

Проведений аналіз об'єкта досліджень показав, що для подальшого використання металоконструкцій тривалої експлуатації понад нормативний ресурс та забезпечення безпечної та надійної експлуатації, необхідно проводити контроль наявності дефектів порушення цілісності і визначення типу та реальних розмірів дефектів.

Аналіз відомих методів контролю показав, що:

1) визначити усі необхідні параметри, необхідні для розрахунку терміну безпечної експлуатації металоконструкцій можливе при умові удосконалення методів діагностування та застосування сучасних технічних засобів;

2) відповідно до проведеного огляду неруйнівних методів та засобів контролю, ультразвукові методи є найбільш інформативними та придатними для виявлення поверхневих, під поверхневих та внутрішніх дефектів. Значним недоліком УЗК є: складна інтерпретація результатів контролю; визначення умовних, а не дійсних розмірів дефектів; складність точного визначення типу і критичності дефектів.

3) когерентні методи, які в якості інформативного параметру окрім амплітуди і часу приходу імпульсів використовують також фазу сигналу дозволяють візуалізувати результати контролю, отримати акустичне зображення внутрішнього об'єму досліджуваного об'єкту і спростити процес прийняття рішень оператором, який проводить контроль.

4) підвищення інформативності акустичного контролю можливе шляхом застосування існуючих серійних технічних засобів контролю з використанням когерентної обробки інформації та розроблення нових методик опрацювання результатів контролю з метою визначення типу, розташування та реальних розмірів дефектів порушення цілісності.

Тому метою роботи є підвищення інформативності та чутливості ультразвукового контролю, шляхом удосконалення акустичних методів контролю для виявлення дефектів та розроблення нових методів опрацювання результатів контролю для визначення типу та розмірів дефектів металоконструкцій.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ФАЗОВАНИХ РЕШІТОК ДЛЯ КОНТРОЛЮ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

2.1 Фізична модель взаємодії дефектів з ультразвуковим полем

Дефекти характеризуються різноманітною формою, орієнтацією та акустичними властивостями. В разі використання луно-методу ультразвукового контролю, інформація про наявність дефекту визначається за появою на екрані дефектоскопа сигналу певної амплітуди. Але слід зазначити, що визначити форму дефекту в такому випадку складно, тому що дефекти різного розміру і конфігурації можуть давати однаковий за амплітудою відгук на екрані дефектоскопа (рисунок 2.1). Реальні дефекти відрізняються від моделей штучних дефектів (що використовуються для налаштування параметрів УЗК) неправильністю форми, шорсткістю поверхні, вони можуть бути заповнені оксидами і іншими речовинами, в результаті чого відображення буде неповним.

Об'ємні дефекти (пори, шлаки) дають рівномірне розсіювання падаючої хвилі в усіх напрямках. Від площинних дефектів (розшарування, тріщини, непровари в зварних швах) розсіювання має певну спрямованість. Орієнтація в площині цих дефектів залежить від технологічного процесу і умов експлуатації. Бувають проміжні типи дефектів, наприклад павутинні тріщини, деякі види непроварів. Від площинних дефектів луно-сигнали високої амплітуди спостерігають тільки при сприятливих (дзеркальних) умовах відображення.

При недзеркальному відображенні від площинних дефектів луно-сигнали виникають в результаті дії двох механізмів. По-перше, є дифракційні хвилі від крайових точок дефекту. Їх амплітуда значно менше амплітуди дзеркального відображення і визначається напрямками випромінювання і прийому відносно площини дефекту, а також типом випромінюваних і прийнятих хвиль [43]. По -друге, один і той же дефект при «прозвучуванні» під

різними кутами буде мати абсолютно різне відбите поле. Найбільш небезпечними дефектами є тріщини, нахил, форма та розмір яких різноманітні. На моделях тріщин – пропилювання і зарубка, амплітуда сигналу досить строго залежить від параметру h – відносної висоти дефекту (рисунок 2.2) [43] і звичайно, довжини відбивача. В загальному випадку для реальних дефектів такої залежності нема, тому точно визначити всі параметри непросто, а інколи неможливо.

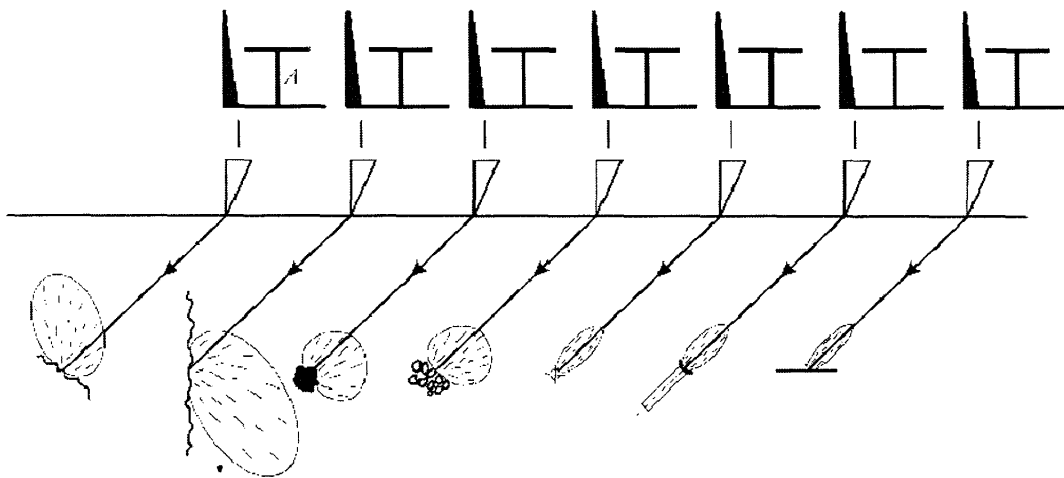


Рисунок 2.1 - Рівносигнальні відбивачі - дефекти різного розміру та форми з однаковою еквівалентною площею

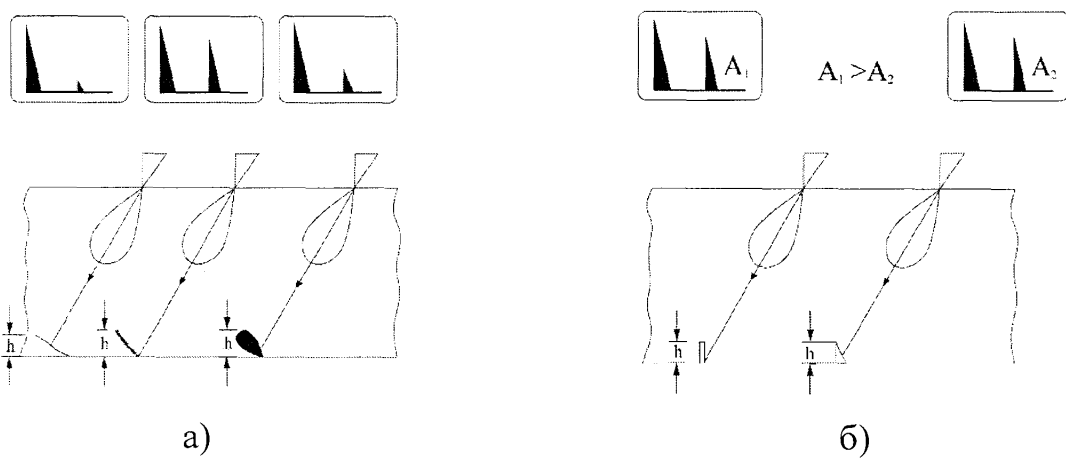


Рисунок 2.2. Відбиття поверхневих дефектів – а) реальних; б) пропилювання і зарубка

Відповідно до принципу Гюйгенса [43, 44] кожна точка перешкоди на шляху ультразвукової хвилі (дефект) стає вторинним джерелом хвиль, що інтерферують. Тому, індикатриса розсіювання (ІР) від дефекту - результат складних хвильових процесів. Структуру та форму ІР визначають такі чинники як розміри, конфігурація, шорсткість поверхні дефекту, орієнтація дефекту, кут падіння променя, параметри перетворювача та методика контролю.

Дефекти виявляються тільки за тих положень ПЕП, коли максимум відбитого сигналу від відбивача співпадає з напрямом поширення зондувального імпульсу. Тому при скануванні одного і того ж дефекту з різних боків може виникати хибна думка щодо наявності кількох дефектів – доволі типова помилка операторів контролю у промисловості [43].

Величина амплітуди зворотного сигналу залежить від величини шорсткості поверхні відбивача і кута падіння променю θ [43]. В загальному випадку дана величина визначається параметром Релея P_R :

$$P_R = \frac{2\pi}{\lambda} \sigma_n \cos \theta, \quad (1)$$

де λ – довжина хвилі, м; σ_n - середня висота нерівностей профілю відбивача, м. Часто наближено приймають, що відбивання дзеркальне, якщо $\sigma_n / \lambda \leq 3$. Чим воно більше, тим більш широкою стає ІР. В той же час параметр Релея у випадку контролю тріщин зазвичай менше 1 і практично не виявляється при контролі одним ПЕП.

Іншим важливим чинником, що негативно впливає на результати контролю можна вважати наявність завад структури (крупнозернистості) досліджуваного матеріалу. Уникнути структурних завад можна наступними способами [43].

Локалізація обсягу контролю. Аналітичний зв'язок між структурними завадами P_n (з урахуванням однократного розсіювання) і сигналами від моделей дефектів деяких типів P' представлений в табл. 2.1 [44]

Таблиця 2.1 – Формули для розрахунку зменшення амплітуди сигналу через структурні втрати

Модель дефекту	Відношення амплітуди сигналу для відбивачів різного типу до середньоквадратичного рівня структурних завад	
	ближня зона	дальня зона
Диск площею S_b	$\frac{P'}{P_{\Pi}} = (1 \dots 2,8) \frac{2S_b}{\lambda} \times \times \sqrt{\frac{\pi}{\delta_p c \tau S_a}}$	$\frac{P'}{P_{\Pi}} = \frac{2S_b}{\lambda^2 r} \sqrt{\frac{2\pi S_a}{\delta_p c \tau}}$
Сфера діаметром d_c	$\frac{P'}{P_{\Pi}} = (1 \dots 2,8) \frac{d_c}{2} \times \times \sqrt{\frac{\pi}{\delta_p c \tau S_a}}$	$\frac{P'}{P_{\Pi}} = \frac{d_c}{2\lambda r} \sqrt{\frac{2\pi S_a}{\delta_p c \tau}}$
Нескінченний циліндр d_{Π}	$\frac{P'}{P_{\Pi}} = 0,8\pi \sqrt{\frac{d_{\Pi}}{\lambda \delta_p c \tau}}$	$\frac{P'}{P_{\Pi}} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{2\pi S_a d_{\Pi}}{r \delta_p c \tau}}$
Нескінченна площа	$\frac{P'}{P_{\Pi}} = \frac{0,8 \dots 1,6}{\lambda} \sqrt{\frac{\pi S_a}{\delta_p c \tau}}$	$\frac{P'}{P_{\Pi}} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{2\pi S_a}{\delta_p c \tau}}$

де S_b - площа дискового відбивача, m^2 ; λ - довжина ультразвукової хвилі в досліджуваному середовищі, m ; δ_p - коефіцієнт розсіювання; τ - тривалість імпульсу, s ; S_a - площа перетворювача, m^2 ; r - відстань до дефекту, m ; d_c - діаметр відбивача (сфери), m .

З таблиці (1.2) видно, що якщо модель дефекту знаходиться в дальній зоні, то для підвищення відношення сигнал - завада доцільно збільшити площу перетворювача S_a , покращуючи тим самим його спрямованість. Фізичний сенс даного ефекту в тому, що виявлення дефекту на тлі структурних перешкод зростає зі збільшенням відношення площі поверхні відбивача до площі зерен металу, що прозвучуються.

Коли відбивач потрапляє в ближню зону, збільшення S_a призводить до зменшення концентрації ультразвукової енергії, а відношення сигнал - завада

для точкових відбивачів зменшується. У ближній зоні відношення сигнал - завада можна збільшити, застосовуючи фокусування ультразвукового поля.

Зменшення тривалості імпульсу τ підвищує відношення сигнал - завада. При цьому також відбувається концентрація енергії. Звідси впливає загальне правило: для поліпшення виявлення дефектів на тлі перешкод необхідно зменшити простір, займаний ультразвуковим імпульсом в місці розташування дефекту, тобто локалізувати ділянку ОК.

Вибір напрямку прозвучування має істотне значення, якщо структура матеріалу володіє довільною орієнтацією кристалів. Оптимальним є напрямок, уздовж якого спостерігаються мінімальні зміни пружних властивостей матеріалів і який відповідає мінімальним розмірам структурних неоднорідностей. Наприклад, при дендритній структурі в аустенітному зварному з'єднанні загасання в напрямку поперек зерен менше, ніж уздовж, а мінімальне загасання - під кутом 45° [44].

Тип хвилі слід вибирати виходячи з вимог мінімального значення коефіцієнта розсіювання δ_p [44]. Дане твердження залишається справедливим і з точки зору ефекту вторинного розсіювання. При постійній частоті коефіцієнт розсіювання поздовжніх хвиль в 4-6 разів менший, ніж поперечних. Однак в формулах табл. 2.1 зустрічається добуток $\delta_p c$, а швидкість поздовжніх хвиль в 2 рази більша, ніж поперечних. Результат використання поздовжніх хвиль замість поперечних виявляється не таким значним. Проте, за багаторазового розсіяння на границі зерен площина поляризації змінюється сильніше, ніж при одноразовому відображенні від дефекту. Якщо приймач реагує на пружні хвилі з тією ж поляризацією, що і на зондувальні хвилі, можна очікувати збільшення співвідношення сигнал - завада.

Забезпечення усіх необхідних параметрів контролю є досить складним завданням на практиці. Постає питання вибору технології, що дозволить оцінити дійсні параметри виявленого дефекту, його розміри та тип, при цьому не застосовуючи складні обрахунки та аналіз отриманих результатів. При

цьому також варто зауважити, що в промисловій практиці часто виникають обмеження доступу до об'єкту контролю (односторонній доступ), часу перевірки та контролю об'єктів складної геометричної форми. Тому необхідно використовувати технологію, яка навіть у випадку обмежених умов контролю дасть змогу оцінити тип і розміри дефектів різної форми.

2.2. Обґрунтування доцільності застосування ультразвукових фазованих решіток для контролю металоконструкцій

Відповідно до проведеного аналізу в розділі 1, для визначення типу та розмірів дефектів металоконструкцій необхідним є застосування когерентних методів контролю, що дозволяють візуалізувати внутрішній об'єм ОК.

Суть промислової візуалізації дефектів, що використовується у дефектоскопії металоконструкцій, полягає у зборі інформації про відносну відбиваючу здатність точок внутрішнього об'єму досліджуваного об'єкта і подання на плоскому екрані зображення зрізу цього об'єму. Кожна точка зображення своєю яскравістю, або кольором символізує відбиваючу здатність відповідної їй за координатами точки матеріалу досліджуваного об'єкта [45]. Якщо площина візуалізованого зрізу матеріалу об'єкта проходить через порушення цілісності матеріалу, наприклад тріщину, то межа розриву матеріалу, будучи сукупністю точок, що відображають УЗ хвилі, відобразиться на екрані у вигляді точок, більш яскравих або іншого кольору в порівнянні з сусідніми точками зображення.

Реалізація когерентних методів контролю можлива за наявності спеціалізованих дефектоскопів, що працюють з УЗФР [46].

Головною особливістю УЗФР є почергове збурення окремих п'єзоелементів в складеному ПЕП, контрольоване з допомогою електронного блоку керування [39]. Одночасне (або почергове) збудження кількох п'єзоелементів генерує ультразвуковий промінь, в якому можна змінювати такі параметри як кут падіння, фокусна відстань і розмір фокусної плями з

допомогою програмного забезпечення. П'єзоелементи збуджуються в певному порядку таким чином, що компоненти променя формують єдиний фронт хвилі, що розповсюджується в заданому напрямку (рисунок 2.3). Комбінування часової затримки збудження п'єзоелементів дозволяє визначати напрям поширення ультразвукових хвиль. При поступовому збільшенні затримки сигналів (рисунок 2.3, а) фронт хвилі розповсюджується в одному напрямі рівномірно [46]. При необхідності фокусування сумарного фронту хвиль в одну точку, необхідно комбінувати часові затримки певним чином (рисунок 2.3,б)

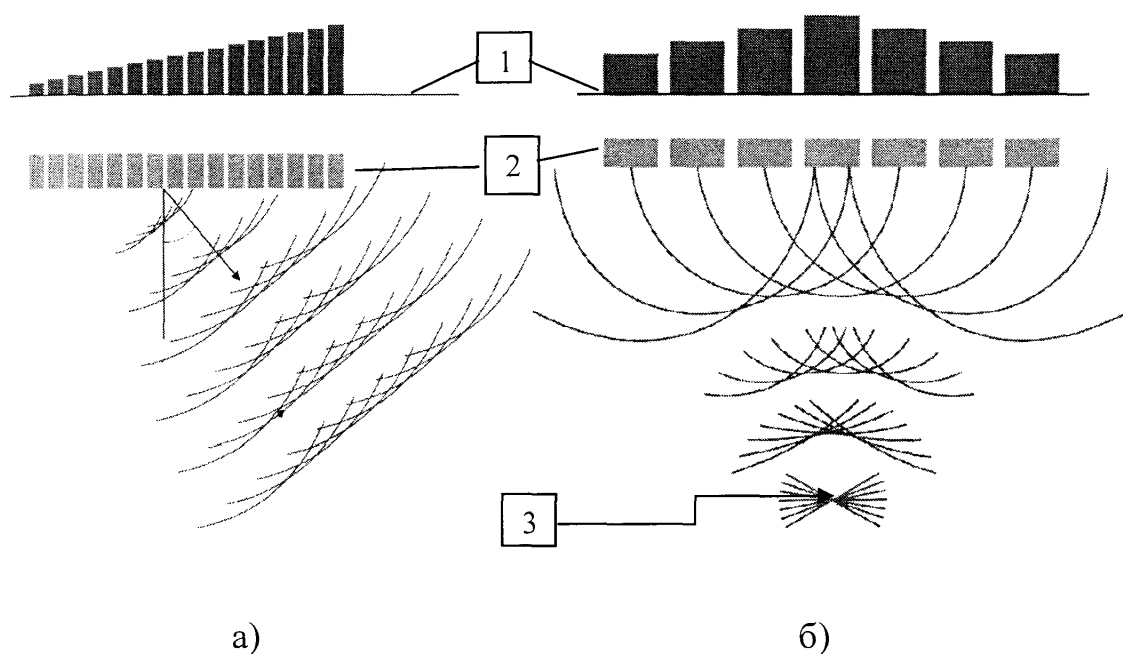


Рисунок 2.3 – Фокусування ультразвукового поля за допомогою часових затримок: 1 – значення часових затримок, 2 – ПЕП, 3 – точка фокусування

Коли акустичні хвилі кількох джерел взаємодіють між собою, виникають фазові ефекти, які призводять до підсилення чи послаблення енергії хвиль у точці їх сходження. Якщо при сходженні акустичних хвиль з однаковою частотою їх коливання точно синхронізовані по фазі, то енергії хвиль підсилюють одна одну і створюють сумарну хвилю з більшою амплітудою. Якщо ж при сходженні хвиль їх коливання будуть мати різний фазовий зсув, то енергії хвиль будуть зменшувати одна одну. Керуючи часом

запуску генератора збудження акустичних хвиль, ці ефекти можна використати для керування акустичним променем і для фокусування фронту сумарної хвилі. Це один з основних УЗФР.

Промені УЗФР генеруються шляхом збудження окремих елементів чи групи елементів за певною схемою [39]. Такі схеми створюються на основі введеної користувачем інформації. Програмне забезпечення (калькулятор законів фокусування) у контролері програмних затримок встановлює певний час затримки для збудження кожної групи елементів, щоб створити акустичний промінь потрібної форми через взаємодію хвиль, з врахуванням характеристик перетворювачів та досліджуваного матеріалу.

Розглянемо принцип електронного керування променем в режимі генерування та прийому (рисунок 2.4.-2.5).

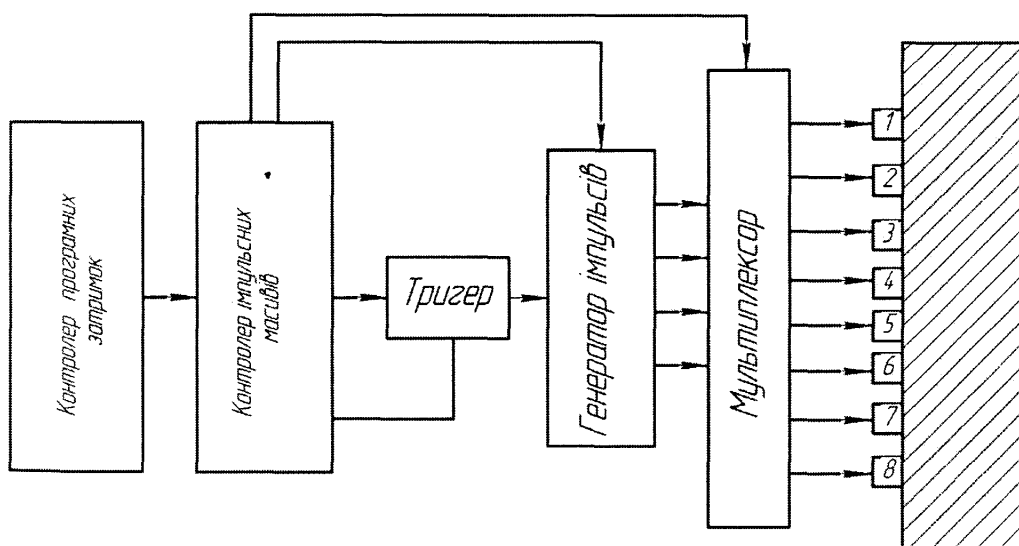


Рисунок 2.4 - Схема роботи УЗФР в режимі генерування ультразвукових хвиль

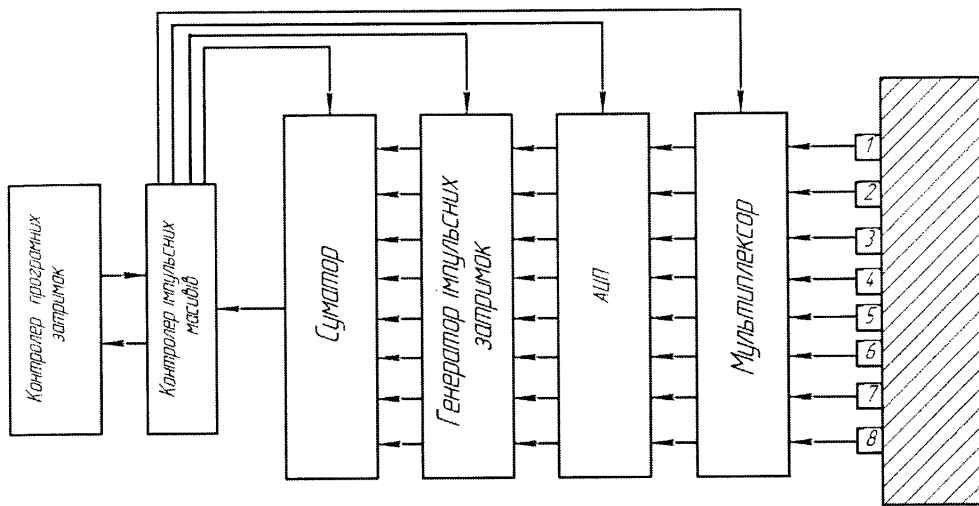


Рисунок 2.5 - Схема роботи УЗФР в режимі прийому ультразвукових хвиль

Система УЗФР призначена для посилення і отримання імпульсів до ПЕП. ПЕП збуджуються у певному порядку таким чином, що компоненти УЗ-променя формують єдиний фронт хвилі, який розповсюджується в заданому напрямку в об'єкті контролю. Аналогічно приймач об'єднує отримані від ПЕП сигнали для єдиного представлення. Кожен ПЕП збуджується за своїм окремим алгоритмом, запрограмованим у контролері імпульсних масивів. Контролер імпульсних масивів контролює усі елементи схеми, які приймають участь у формуванні УЗ-променів. Тригер одиничним фіксованим імпульсом запускає роботу генератора імпульсів. Генератор імпульсів створює імпульси однакової амплітуди і тривалості з часовими затримками, встановленими контролером імпульсних масивів. Виходом генератора імпульсів є звичайний амплітудний сигнал в реальному часі, еквівалентний стандартному А-скану. Застосування мультиплексора дає змогу здійснювати високошвидкісне сканування об'єкта контролю під різними кутами, не пересуваючи перетворювач, а також одночасно застосовувати вибрану кількість ПЕП (апертуру). Роботою мультиплексора керує генератор імпульсних масивів.

Схема, що зображена на рисунку 2.4 працює наступним чином. Користувачем встановлюється закон фокусування (запрограмована послідовність генерації імпульсів) у контролері програмних та часових

затримок для генератора імпульсів та кількість необхідних ПЕП для мультиплектора. Після цього контролер імпульсних масивів запускає тригер, який, у свою чергу, запускає генератор імпульсів. Генератор створює необхідні електричні імпульси і через мультиплексор подає їх на ПЕП УЗФР. Сформований єдиний фронт хвилі подається у об'єкт контролю, де відбивається від дефектів або від донної поверхні досліджуваного матеріалу.

Прийняті сигнали від ОК через підсилювач і мультиплексор подаються на АЦП, де вони оцифровуються (рисунок 2.5). Затримка сигналів згідно заданого закону фокусування здійснюється у генераторі імпульсних затримок по команді контролера імпульсних масивів. Звідти сигнали поступають на суматор для формування одного сигналу відгуку. Ця форма сигналу надходить на контролер імпульсних масивів, де фільтрується, обробляється та зберігається.

Під час проведення звичного ультразвукового контролю на екрані дефектоскопа виникає сигнал, що символізує про наявність порушення цілісності. Такий вид представлення інформації називають А-скан [48].

Для отримання зображення зрізу візуалізованої області об'єкту весь набір прийнятих луно-імпульсів сигналів від кожного п'єзоелементу подають на когерентну просторово-часову обробку. Вона є сумуванням відгуків (А-сканів при різних ракурсах) від деякої точки простору всередині візуалізованої області і присвоєння результату сумування певного кольору точки зображення, відповідної точки простору [49-51]. Цю операцію виконують для всіх точок простору, що знаходяться в площині візуалізованого зрізу.

В залежності від способу подачі часових затримок на п'єзоелементи на екрані дефектоскопа можна отримувати два види зображень: L-скан (результат лінійного сканування) і S-скан (результат секторного сканування).

Лінійне сканування полягає у почерговому активуванні одного або певних груп перетворювачів, що дає змогу прозвучити весь об'єм досліджуваного об'єкту, що розташований безпосередньо під ПЕП з УЗФР без

його переміщення або задати напрям поширення для кожного п'єзоелементу (рисунок 2.6)[39].

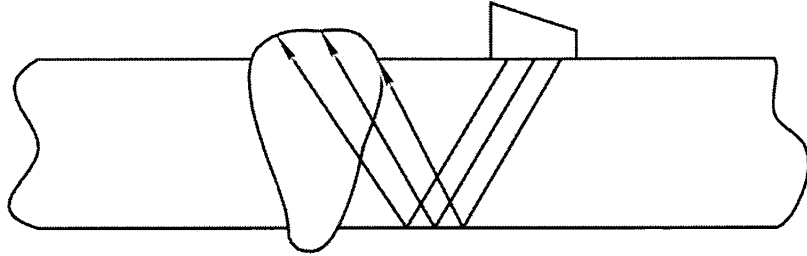


Рисунок 2.6 – Лінійне сканування ПЕП з УЗФР

Секторне сканування здійснюється одним і тим же п'єзоелементом або групою п'єзоелементів на однакову відстань але під різними кутами. Діапазон кутів і крок зміни кута можуть бути різноманітними (рисунок 2.7) [39].

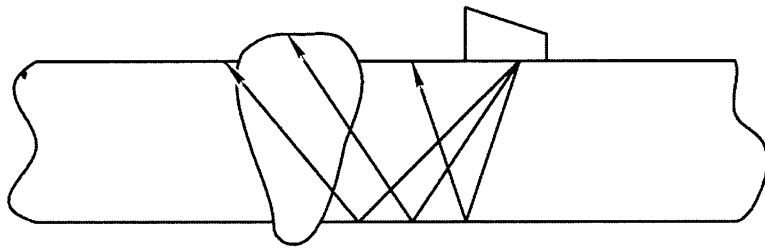


Рисунок 2.7 - Секторне сканування досліджуваного об'єкту

Акустичні зображення на екрані дефектоскопу відображаються відповідно до типу сканування. Вибір типу сканування слід здійснювати відповідно до типу об'єкту контролю. У розділі 3 буде представлено акустичні сканування в залежності від вибраного типу об'єкту контролю (об'єкти контролю складної форми, великої товщини – лінійним скануванням, тонкостінні - секторним).

2.3 Розроблення способу вибору параметрів ультразвукових фазованих решіток залежно від параметрів об'єкту контролю

Оскільки технологія фазованих решіток дозволяє електронно формувати промінь і забезпечити управління ним, достатньо всього одного перетворювача для створення великої кількості різних профілів променю.

Основні характеристики технічних засобів ультразвукового методу контролю визначають область його застосування, здатність виявляти і оцінювати дефекти. Для досягнення найкращих експлуатаційних характеристик необхідно вибирати такі дефектоскопи і перетворювачі, які відповідатимуть вимогам контролю. Технічні характеристики сучасних дефектоскопів з УЗФР базуються на одному і тому ж принципі та відрізняються геометричними розмірами, наявністю додаткових функцій. На даний час існує широкий вибір перетворювачів з УЗФР. Більшість виробників пропонують перетворювачі різної форми, конфігурації, розмірів. Вартість перетворювачів з УЗФР є досить високою, тому при їх виборі необхідно врахувати параметри об'єкту контролю. Постає питання у визначенні оптимальних параметрів УЗФР, які забезпечують необхідну чутливість УЗ контролю об'єктів певного виду.

Основними параметрами ПЕП УЗФР є кількість елементів, відстань між ними [39]. Комбінація цих параметрів визначає вигляд, напрям діаграми направленості, що дозволяє задати чутливість і продуктивність контролю, за рахунок можливості оперативної зміни форми діаграми направленості, фокусування ультразвукової енергії і застосування методів та засобів обробки луно-сигналів [51, 52].

З метою вибору параметрів УЗФР виконано математичне моделювання фізичних явищ, що дозволяють забезпечити високу інформативність при контролі різноманітних об'єктів.

Для того, щоб краще використовувати можливості УЗФР для потреб НК, важливим є вибір такого ПЕП, параметри якого забезпечать необхідне фокусування. Слід розуміти особливості поширення хвиль при зміні різних

параметрів перетворювача, таких як кількість елементів, відстань між елементами, розмір елемента, частота, значення апертури, властивості матеріалу основи, і ін. Моделювання механізму і послідовності процесу контролю за допомогою УЗФР (сканування) дозволить оцінити напрям поширення ультразвукових коливань в досліджувану поверхню та визначити глибину фокусування.

Базовими параметрами перетворювачів з ФР є частота (f), ширина елемента (a), відстань між елементами (d), кількість елементів (N), апертура (D) [53].

Розглянемо процес поширення ультразвукових коливань на певну глибину та кут.

Основними просторово-часовими величинами, що характеризують звукове поле акустичного променя є акустичний тиск, коливальна швидкість частинок, коливальне зміщення частинок [51, 54, 55]. Оскільки інформативним параметром чутливого елемента технічного засобу для реєстрації ультразвукових коливань є акустичний тиск, розглянемо модель розподілу акустичного тиску.

Акустичний тиск. Відстань r від n -го елемента перетворювача з ФР до точки фокусування F_n (рисунок 2.8) виражається у формі простого тригонометричного рівняння [56]:

$$F_n = \sqrt{r_1^2 + [(n-1)d]^2 - 2r_n(n-1)d \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}, \quad (2)$$

де r_1 - відстань від першого елемента до точки фокусування, r_n - відстань від n -го елемента до точки фокусування, θ - кут фокусування.

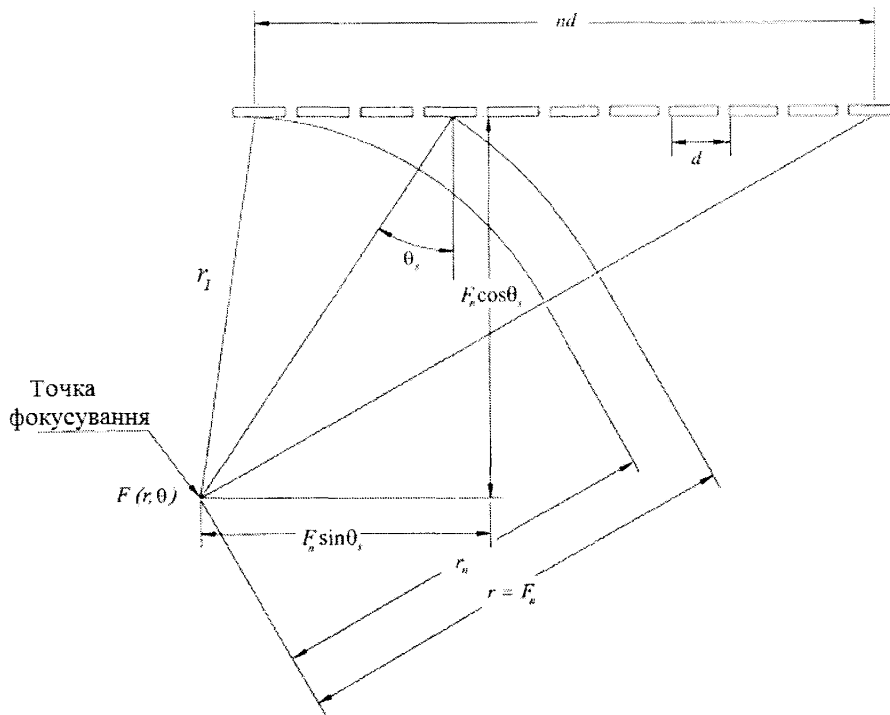


Рисунок 2.8 - Модель фокусування ультразвукових коливань перетворювачем з ФР

Акустичний тиск в кожній точці середовища визначається за формулою (3)[57].

$$p(r, \theta, t) = \frac{p_0}{r} \frac{\sin\left(\frac{ka \sin \theta}{2}\right) \sin\left[\left(\frac{\omega \Delta \tau - kd \sin \theta}{2}\right) N\right]}{\frac{ka \sin \theta}{2} \sin\left(\frac{\omega \Delta \tau - kd \sin \theta}{2}\right)} \exp\left[-j\left(\frac{ka \sin \theta}{2}\right)\right] \times \exp\left[-j\left(\frac{\omega \Delta \tau - kd \sin \theta}{2}\right)(N-1)\right] \exp[j(\omega t - kr)] \quad (3)$$

де p_0 - тиск на поверхні випромінювача, k - хвильове число, ω - кутова частота, $\Delta \tau$ - часова затримка між сусідніми елементами (для гомогенного ізотропного середовища), $\Delta \tau = \frac{d \sin \theta}{c}$, c - швидкість поширення звуку в заданому середовищі.

Направленість звукового поля. Для визначення оптимальних умов та кращого управління променем, потрібно проаналізувати направленість променя.

Для досягнення вищої роздільної здатності в процесі НК при використанні УЗФР необхідно вибрати такі параметри перетворювача, щоб акустичний тиск в точці фокусування був максимальний, а в інших напрямках поширення – мінімальним. Такий стан визначається як розв’язок виразу (4) при якому акустичний тиск (3) у напрямку поширення променя (або в напрямку кута фокусування) [55] є максимальним.

Спрямований промінь або функція направленості визначається як тиск $p(r,t,\theta)$ під будь-яким довільним кутом θ , нормований по тиску $p(r,t,\theta_s)$ під кутом фокусування θ_s [57].

$$H(\theta) = \left| \frac{p(r,t,\theta)}{p(r,t,\theta_s)} \right| \quad (4)$$

Зауважимо, що розв’язок виразу (4) повинен задовільняти умові $0 < H(\theta) < 1$, і значення функції на куті фокусування відповідає умові $H(\theta_s) = 1$. Підставивши значення акустичного тиску, отриманого в попередніх дослідженнях [46], спростивши їх, отримаємо загальний розв’язок виразу (4):

$$H(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}\right) \sin\left[\frac{\pi d(\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda} N\right]}{\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} N \sin\left[\frac{\pi d(\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda}\right]} \right|. \quad (5)$$

Рисунок 2.9 ілюструє зміну направленості звукового поля УЗФР при зміні кількості п’єзоелементів, представлену в полярних координатах. На куті рівному 0° , що був вибраний як кут фокусування, зафіксована поява основної вітки діаграми направленості і кількох бокових віток в напрямі відмінному від кута фокусування.

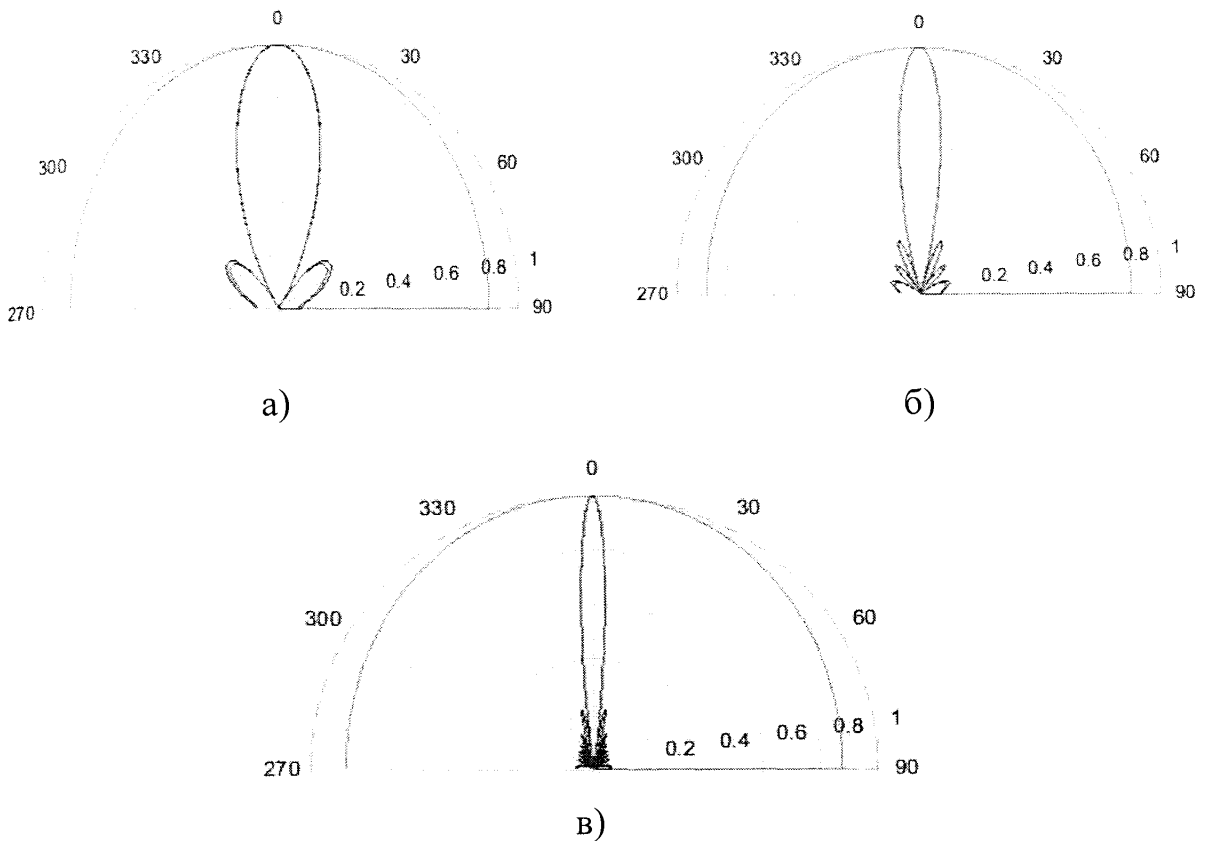


Рисунок 2.9 - Схематичне зображення направленості звукового поля при зміні кількості елементів: а) $N=4$, б) $N=8$, в) $N=16$

Спостерігається, що при збільшенні кількості п'єзоелементів кут розкриття основної вітки зменшується. Для визначення оптимального значення кількості п'єзоелементів, які забезпечують мінімальний кут розкриття та зменшення значення направленості бокових віток необхідно дослідити діаграми направленості УЗФР при збільшенні кількості їх елементів. На рисунку 2.10 подані діаграми спрямованості УЗФР при однакових параметрах ($\theta = 20^\circ$, $d = 0.5\lambda$) і $f = 5$ МГц, але з різною кількістю елементів $N = 8$, $N=16$, $N=32$, та $N=64$.

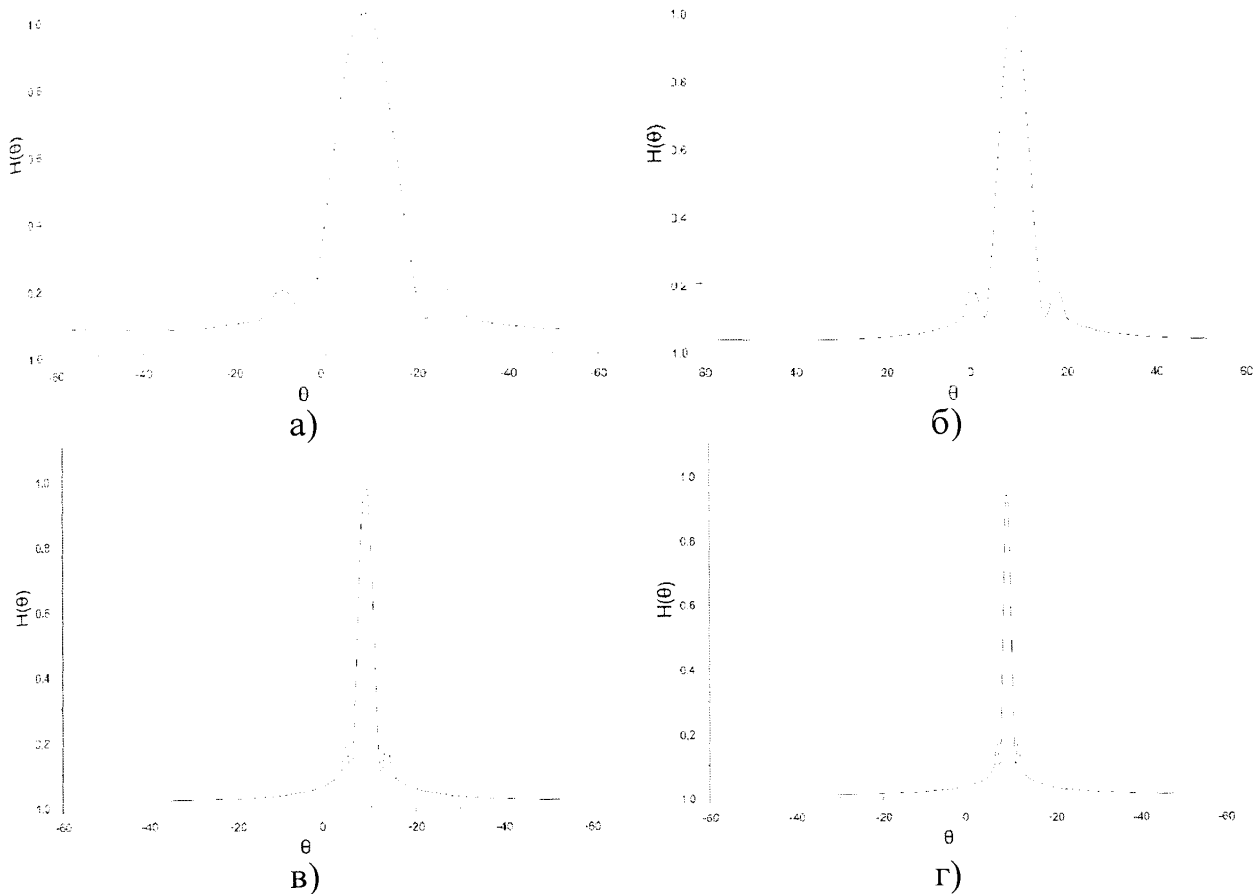


Рисунок 2.10 - Направленість ультразвукового променя $H(\theta)$ при зміні кількості елементів N : а) $N=8$; б) $N=16$; в) $N=32$; г) $N=64$

Як видно, профіль основної вітки стає вужчим при збільшенні кількості елементів, що в результаті і є чинником підвищення точності фокусування ультразвукової енергії на кут поширення 20° . Спостерігається поява основної вітки направленості на куті фокусування і дві малих бічних. Бокові пелюстки виникають внаслідок взаємодії між елементами УЗФР. При $N=8$ ширина основної пелюстки (суцільна лінія) рівна 18.5° , що еквівалентно рівню при якому значення амплітуди вище 0.5 (-6 dB). Кут розкриття основної вітки зменшується до 9.3° при $N=16$, до 4.6° при $N=32$, та до 2.1° при $N=64$. Отже, кут розкриття основної вітки зменшується при збільшенні кількості елементів, але спостерігається наявність бокових віток, які свідчать про те, що значна частина акустичної енергії втрачається.

Встановлено, що при збільшенні кількості п'єзоелементів ширина основної вітки діаграми спрямованості зменшується (рисунок 2.11). Для отримання математичної залежності зміни ширини вітки діаграми спрямованості (D) від зміни кількості елементів N за допомогою програмного пакету Microsoft Excel проведено побудову лінії тренду отриманої залежності і визначено її параметри.

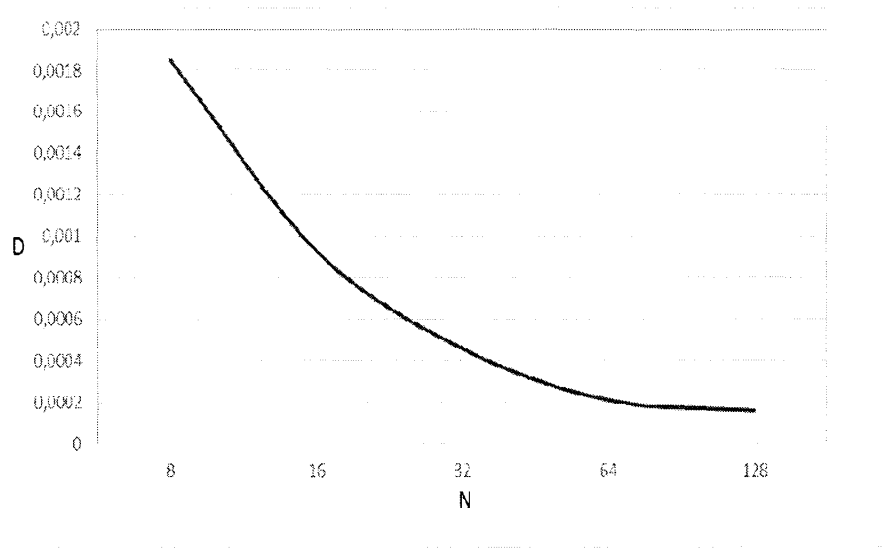


Рисунок 2.11 - Графіки залежності ширини основної вітки діаграми спрямованості D від кількості елементів N

Отримана залежність ширини основної вітки діаграми спрямованості, що є базовим критерієм вибору кількості п'єзоелементів:

$$D(N) = 0,0033e^{-0,638N} \quad (6)$$

Для зменшення кута розкриття бокових віток необхідно зменшити взаємодію між елементами УЗФР шляхом зміни відстані між ними. Для цього необхідно провести дослідження діаграми спрямованості при зміні відстані між елементами. Рисунок 2.12 демонструє вплив зміни міжелементної відстані на направленість акустичного поля.

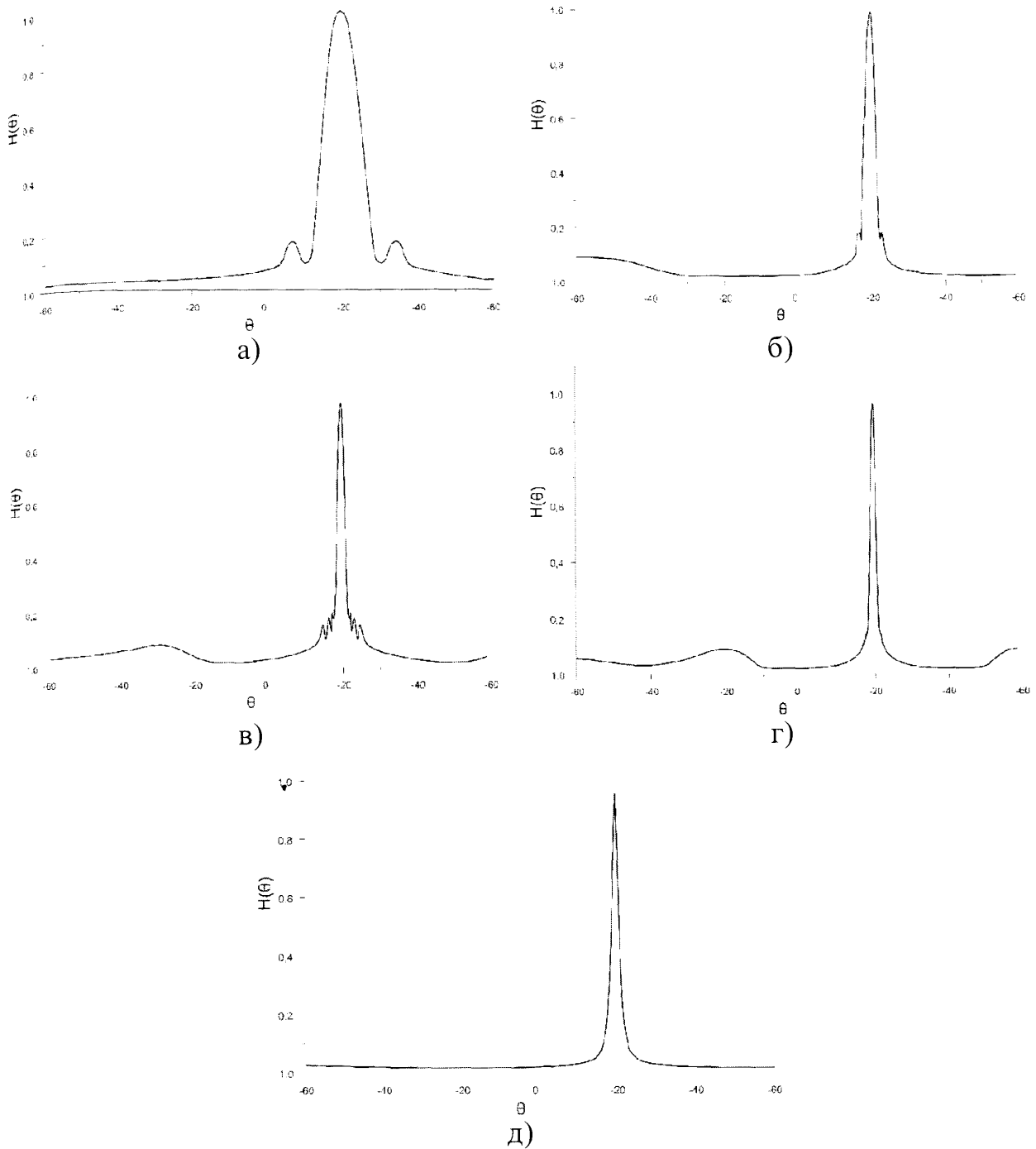


Рисунок 2.12 - Вплив зміни відстані між елементами перетворювача з ФР на направленість ультразвукового променя: а) $d=0,2\lambda$; б) $d=0,5\lambda$; в) $d=0,8\lambda$ г) $d=1,2\lambda$; д) $d=1,5\lambda$

Значення міжелементної відстані d , вибирається в межах $0,2-1,2 \lambda$ за сталих параметрів $N = 32$, $r = 25$ мм, $\theta_s = 20^\circ$, $f=5$ МГц. При збільшенні відстані між елементами кут розкриття основної вітки зменшується, але при збільшенні відстані до $0,8\lambda$ і $1,2\lambda$ спостерігається поява пелюсток на кутах -20° , -30° , що

свідчить про появу небажаних дифракційних максимумів. Зменшення кута розкриття основної вітки, зменшення рівня бокових віток та віддалення від основної вітки бокових віток – умова забезпечення максимальної направленості ультразвукового поля, досягається при $d=0,5\lambda$. Тому, підвищення точності контролю з допомогою УЗФР досягається при збільшенні кількості елементів розташованих на відстані $0,5\lambda$.

Бокові пелюстки стають ширшими і віддаляються від головної пелюстки, при збільшенні міжелементної відстані. Як зазначено в роботі [53], виникнення бокових пелюсток спостерігалось, коли відстань між елементами d була більшою, ніж на половину довжини ультразвукової хвилі, що поширюється у випробуваному матеріалі.

Збільшення кількості перетворювачів і відстані між ними призводить до збільшення геометричних розмірів перетворювачів в цілому (рисунок 2.13) та їх вартості, яка в першу чергу залежить від кількості п'єзоелементів. При виборі кількості п'єзоелементів УЗФР потрібно врахувати їх геометричні розміри так, щоб забезпечити ідеальне прилягання УЗФР до поверхні об'єкту контролю.

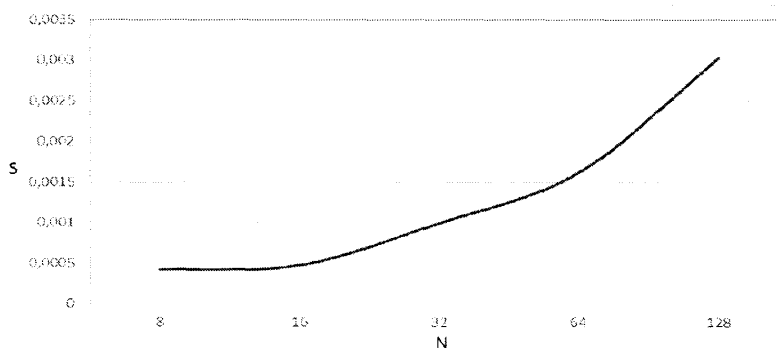


Рисунок 2.13 – Залежність площі ПЕП з УЗФР від зміни кількості п'єзоелементів

Оскільки збільшення кількості п'єзоелементів призводить до збільшення їх площі, а відповідно площі контактної поверхні між ПЕП і об'єктом контролю необхідно обирати максимально можливу кількість п'єзоелементів які забезпечують акустичний контакт. У випадку контролю плоских ділянок

збільшення кількості п'єзоелементів не впливає на втрату акустичного контакту. Для контролю трубних об'єктів збільшення кількості елементів обмежуються кривизною поверхні контролю. Тому були проведенні дослідження максимально допустимої довжини ПЕП, яка забезпечить акустичний контакт відповідно до ДСТУ EN 583-1-2001 [57]. Для досліджень вибрані типові типорозміри труб для магістральних трубопроводів [58], які підлягають ультразвуковому контролю зварних з'єднань відповідно до нормативних документів [59,60] в процесі експертних та чергових обстежень. На рис.2.14. подана залежність, яка визначає максимально допустимий розмір контактної ділянки (довжини перетворювача) для певно діаметру трубних металоконструкцій, який забезпечить якісний акустичний контакт.

Наприклад, для контролю трубопроводу діаметром 80 мм максимальна кількість п'єзоелементів УЗФР не повинна перевищувати 32, оскільки при кількості елементів 64 не забезпечується акустичний контакт між ПЕП і трубою, через те, що кривизна поверхні перевищує довжину перетворювача.

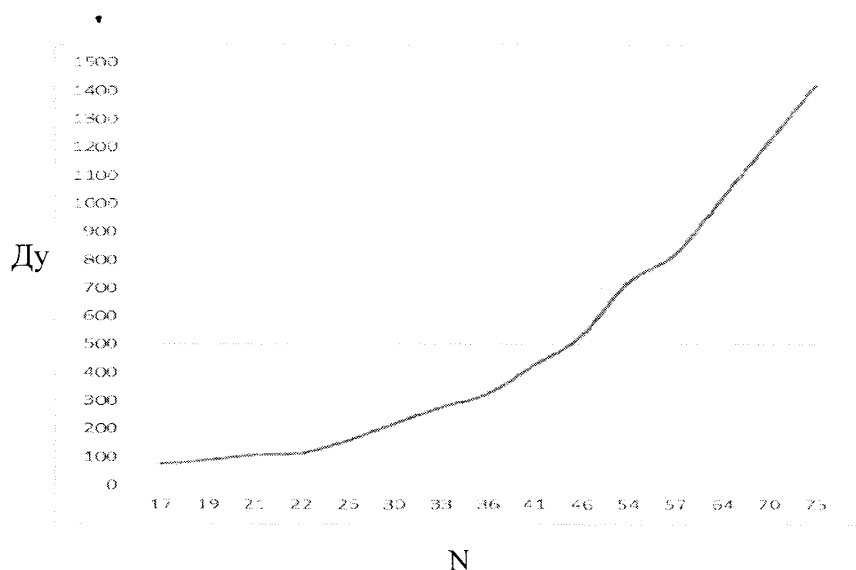


Рисунок 2.14 – Критерій вибору максимального значення довжини ПЕП з УЗФР для трубних об'єктів контролю

Напрямок поширення акустичного пучка може бути переорієнтований на будь який кут лише шляхом зміни послідовності синхронізації імпульсів

збудження. Всі окремі хвильові фронти сумуються, щоб отримати максимальне значення акустичної енергії вздовж потрібного напрямку.

Фокусування променя на заданий кут та глибину. Зміна фази досягається завдяки послідовній пульсації решітки з часовою затримкою t . Напрямок поширення акустичного пучка може бути переорієнтований на будь який кут лише шляхом зміни послідовності синхронізації імпульсів збудження. Всі окремі хвильові фронти сумуються, щоб отримати максимальну акустичну потужність вздовж потрібного напрямку.

Фокусування ультразвукового променя досягається шляхом об'єднання сферичного та лінійного часового співвідношення [55]. В результаті чого генерується промінь, який поширюється під заданим кутом. Часові затримки можуть бути розраховані за наступною формулою:

$$t_n = \frac{F}{c} \left[1 - \left(1 + \left(\frac{nd}{F} \right)^2 - 2 \frac{nd}{F} \sin \theta_s \right)^{1/2} \right] + t_0 \quad (7)$$

де t_n необхідна затримка для n -го елемента ($n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$), F – фокусна відстань, t_0 – стала, щоб задавати позитивне значення затримки. Дана формула в такому вигляді має два обмеження. По-перше, вона справедлива тільки для непарної кількості елементів. Зазвичай перетворювачі з УЗФР мають парне число елементів. По-друге, потрібна стала t_0 є досить грубою для використання.

Формула (7) була змінена таким чином, щоб можна було усунути недоліки і уможливити її застосування для непарної кількості елементів. Геометричне співвідношення, що показано на рисунку 2.12, може бути досягнуто:

$$(F \cos \theta_s)^2 + \left[F \sin \theta_s - \left(nd - \frac{N-1}{2} d \right) \right]^2 = [F - (t_n - t_0)c]^2 \quad (8)$$

Для елемента $n=0,1, \dots, N-1$. Слід зазначити, що на рисунку 2.12, перший елемент($n=0$) відраховується з правої сторони. Значення t_n , розраховуємо:

$$t_n = \frac{F}{c} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{d}{F} \left(n - \frac{N-1}{2} \right) \right)^2 - 2 \sin \theta_s \frac{d}{F} \left(n - \frac{N-1}{2} \right) \right]^{1/2} \right\} + t_0 \quad (9)$$

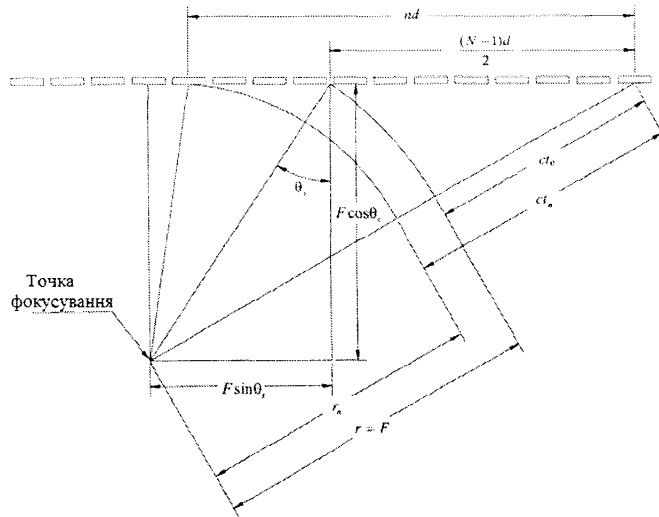


Рисунок 2.12 – Геометрія лінійної ФР, що використовується для розрахунку часових затримок

Стала t_0 може бути визначена шляхом підстановки граничних умов($t_n=0$ при $n=0$) в рівняння(9), в результаті чого отримуємо:

$$t_0 = \frac{F}{c} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{d}{F} \left(-\frac{N-1}{2} \right) \right)^2 - 2 \sin \theta_s \frac{d}{F} \left(-\frac{N-1}{2} \right) \right]^{1/2} \right\}. \quad (10)$$

Підставляючи(10) в рівняння(9) та спростивши його отримуємо

$$t_n = \frac{F_n}{c} \left[\left(1 + \frac{k^2 d^2 + 2kdF_n \cdot \sin \theta}{F_n^2} \right)^{1/2} - \left(1 + \frac{(n-k)^2 d^2 - 2F_n(n-k)d \cdot \sin \theta}{F_n} \right)^{1/2} \right] \quad (11)$$

Для будь-якого числа елементів N , де t_n необхідний час затримки для елемента $n=0, N-1$, $\bar{N}=(N-1)/2$, θ_s - кут фокусування. Ця узагальнена формула для розрахунку необхідної часової затримки з метою фокусування променю під певним кутом справедлива для будь-якого числа елементів масиву(парні чи

непарні) для $0^\circ < \theta_s < 90^\circ$. Крім того, за рахунок усунення сталої t_0 , формула гарантує начення часових затримок вище нуля.

Ця узагальнена формула для розрахунку необхідної часової затримки з метою фокусування променя під певним кутом справедлива для будь-якого числа елементів перетворювача (парні чи непарні) для $0^\circ < \theta_s < 90^\circ$. Розв'язком рівняння (11) для 32-елементної решітки та фокусування на глибині 15 мм є графічна залежність (рисунок 2.12.)

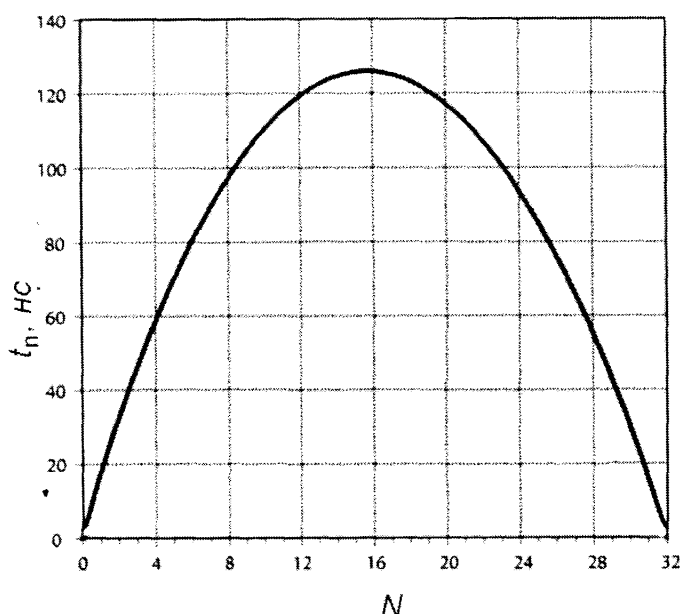


Рисунок 2.12 - Графічне зображення часових затримок елементів УЗФР

Результати проведених досліджень можна підсумувати наступним чином.

1) Збільшення кількості п'єзоелементів сприяє підвищенню амплітуди акустичного тиску в напрямку фокусування і зменшенню тиску бічних пелюсток, що дозволяє спрямувати ультразвуковий промінь на необхідну глибину та кут поширення. Але при виборі УЗФР слід врахувати той факт, що збільшення кількості елементів призводить до збільшення його геометричних розмірів.

2) Направленість променя може бути підвищена за рахунок збільшення відстані між елементами. Однак існує, верхня межа (або оптимальне значення),

що забезпечує спрямованість променю без введення шкідливих дифракційних максимумів - значення відстані між елементами не повинне перевищувати $\lambda/2$.

2.4 Побудова акустичних зображень, отриманих в процесі контролю з використанням ультразвукових фазованих решіток

Для того, щоб зрозуміти як формуються акустичні зображення на екрані дефектоскопу розглянемо модель зварного з'єднання (рисунок 2.13), що містить дефект, позначений на рисунку червоним кольором [39, 61-64].

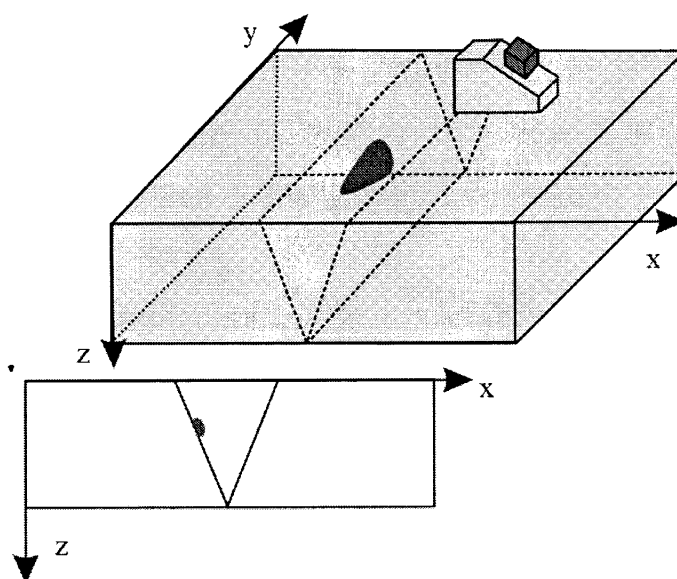


Рисунок 2.13. – Схематичне зображення досліджуваного зварного з'єднання

Для отримання зображення зрізу візуалізованої області об'єкту весь набір прийнятих УЗ сигналів, відбитих від кожної точки дефекту, піддають когерентній просторово-часовій обробці. Вона являє собою сумування відгуків (луно-сигналів при різних ракурсах) від деякої точки простору всередині візуалізованої області і присвоєння результату сумування певного кольору. Цю операцію виконують для всіх точок простору, що знаходяться в площині візуалізованого зрізу.

Перетворювач з УЗФР розміщують на поверхні зварного з'єднання і переміщують паралельно до осі y . В результаті переміщення на екрані

дефектоскопу з'являються зображення поперечного перерізу з'єднання xOz. На рисунку 2.13 показано схему поперечного перерізу в точці, де розмір дефекту є максимальним.

У результаті контролю з використанням ПЕП з УЗФР з електронним скануванням формується секторна розгортка області сканування [66], на якій амплітуда луно-сигналу від відбивача кодується кольором. Градація кольору від більш світлих до більш темних відтінків свідчить про зменшення амплітуди відбитого сигналу. Інколи візуалізація може проводитись в кількох кольорових режимах, які представлені як додаткові функції технічних засобів певних виробників. В даному випадку контроль проводився в кольоровому режимі. Зміна кольору від темно-синього до червоного відповідає збільшенню амплітуди луно-імпульсу відбитого сигналу [67, 68]. У місцях, де значення луно-імпульсів є максимальним утворюються плями червоного кольору, які символізують наявність дефекту.

На рисунку 2.14 представлений приклад візуалізації внутрішнього об'єму досліджуваного зварного з'єднання – акустичне зображення.

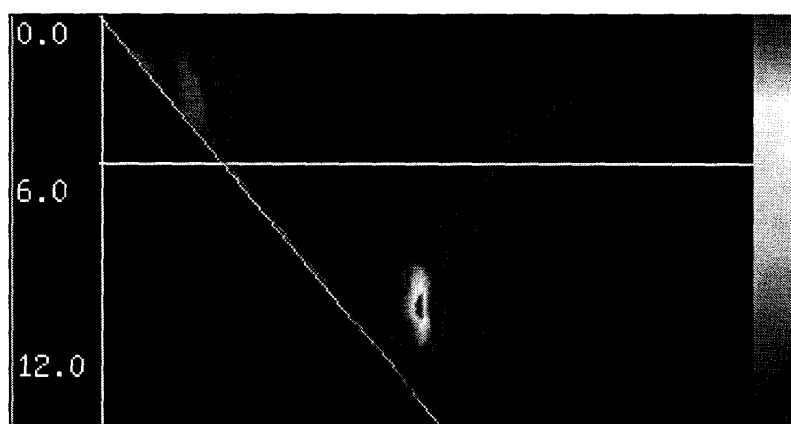


Рисунок 2.14 – Акустичне зображення, отримане на екрані дефектоскопа за допомогою УЗФР

Представлення результатів контролю у вигляді двовимірного зображення внутрішньої структури об'єкта - головна відмінність від результатів традиційного ультразвукового контролю. Завдяки новому

сприйняттю оператором інформації про внутрішню будову об'єкта контролю (на рівні образів) вже проглядається тенденція до "розмиття" межі між власне контролем і визначенням ресурсу за результатами контролю. Ймовірно, вже скоро може стати непотрібним протокол результатів контролю з параметрами дефектів, їх характером і кількістю. Актуальним і необхідним залишається питання подальшої обробки отриманих зображень з метою визначення реальних розмірів і типу дефектів з метою передбачення можливості їх росту. Розробивши спеціальну програму аналізу акустичних зображень об'єктів даного класу, можна буде отримати висновок про стан об'єкта і про його ресурс.

Висновки до розділу 2

Теоретичні дослідження можливості застосування ультразвукових фазованих решіток для проведення контролю дають можливість зробити такі висновки:

1) проводити аналіз критичності дефекту по луно-імпульсу, що свідчить про наявність дефекту досить складно. Дефекти різного розміру і конфігурації можуть давати однакові за амплітудою відгук на екрані дефектоскопа,

2) підвищити чутливість і роздільну здатність ультразвукового контролю можна, шляхом застосування когерентних методів обробки інформації.

3) існує велика кількість перетворювачів з УЗФР, що реалізують когерентні методи, але вибір основних параметрів ПЕП потрібно здійснювати у відповідності до форми та геометричних розмірів об'єкту контролю.

4) в результаті виконаних теоретичних досліджень удосконалено спосіб підбору параметрів ПЕП з УЗФР для фокусування більшої частини ультразвукової енергії в необхідному напрямі і глибині досліджуваного об'єкту. Для підвищення чутливості та роздільної здатності ПЕП з УЗФР необхідним є використання максимально можливої кількості елементів, що розташовані на відстані не більшій половині довжини хвилі.

5) в результаті досліджень отримано аналітичну залежність визначення часових затримок окремих елементів ПЕП з УЗФР для фокусування енергії на певну глибину.

6) на основі результатів теоретичних досліджень підвищення чутливості та інформативності контролю пропонується застосування УЗФР з когерентною обробкою результатів з метою спрощення процесу прийняття рішень відносно типу виявленого дефекту і передбачено можливість визначення реальних розмірів дефектів при умові проведення додаткових експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ФАЗОВАНИХ РЕШІТОК ДЛЯ КОНТРОЛЮ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

У попередньому розділі було запропоновано шляхи підвищення чутливості та інформативності ультразвукового контролю металоконструкцій. Теоретично підтверджено можливість застосування УЗФР. У даному розділі проведено експериментальне дослідження зварних з'єднань з метою підтвердження теоретичних досліджень підвищення чутливості та інформативності контролю.

3.1 Визначення чутливості та роздільної здатності ультразвукових фазованих решіток

Важливими параметрами, що характеризують інформативність результатів контролю є чутливість та роздільна здатність УЗФР [69-72].

Чутливість - важлива характеристика методу контролю, оскільки визначає можливість виявлення мінімальних дефектів. При звичайному ультразвуковому контролі (методи відбиття, проходження) поняття "чутливість" розглядається в двох аспектах: як параметр, що настроюється на забезпечення виявлення дефектів з відбивною здатністю, більшою певного рівня, і як можливість виявлення дефектів мінімального розміру [73].

У першому випадку чутливість є параметром і методу, і технічного засобу, оскільки при налаштуванні приладу обмежують можливість виявлення малих дефектів, задаючи певний розмір дефектів, які підлягають виявленню (по їх відбиваючій здатності). Розмір дефекту, як правило, визначають як діаметр або площа плоскодонного отвору [73].

У практиці контролю застосовують поняття "рівень фіксації" (контрольний рівень або рівень оцінки). Це площа плоскодонного отвору, яка повинна виявлятися дефектоскопом у всьому контрольованому виробі. Якщо сигнал від реального дефекту перевищує рівень фіксації, то такий дефект повинен бути зафіксований і повинна бути оцінена його допустимість.

Налаштування чутливості при контролі виробів зазвичай має на меті забезпечення заданого рівня фіксації. Потрібно домогтися, щоб заданий розмір плоскодонного отвору гарантовано виявлявся у всьому виробі. Для цього налаштовують чутливість для максимальної глибини, а потім зменшують її на менших глибинах за допомогою часового регулювання чутливості або застосовують інші способи коригування чутливості з глибиною.

Після того як встановлена чутливість відповідного рівня, її піднімають на деяку величину (зазвичай на 6 дБ або більше) і проводять контроль [74]. Цю підвищену чутливість називають пошуковою. Коли виявлено сигнал від дефекту, чутливість зменшують до рівня фіксації. Якщо сигнал від дефекту перевершує цей рівень, оцінюють характеристики дефекту.

Крім того, використовують поняття "рівень бракування". Йому відповідає амплітуда луно-сигналу від максимально допустимого плоскодонного отвору. Зазвичай рівень бракування по висоті амплітуд луно-сигналів на 6 дБ вище рівня фіксації. Відповідна чутливість буде на 6 дБ нижче рівня фіксації. Часто нормативно-технічна документація на контроль [75] передбачають первинне налаштування чутливості не на рівень фіксації, а на рівень бракування.

Реальна чутливість характеризується мінімальними розмірами дефектів конкретного типу, що виявляються в виробі на заданій глибині при певному налаштуванні апаратури. Вона може бути визначена в результаті статистичної обробки даних контролю, розрізання і металографічних досліджень великої партії однотипної продукції.

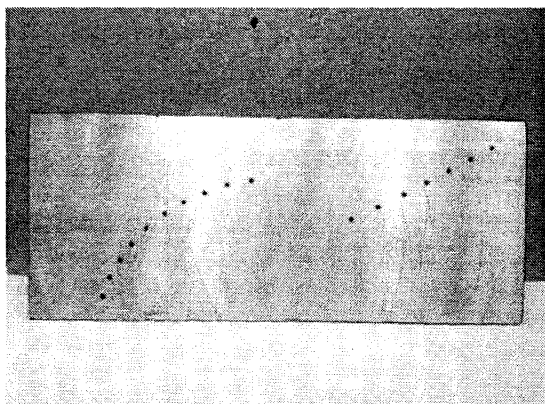
Роздільна здатність УЗК - це мінімальна відстань між двома однаковими дефектами, при якому ці дефекти фіксуються роздільно [76].

Розрізняють променеву і фронтальну роздільні здатності [77, 78]. Першу визначають мінімальним відстанню між двома роздільно виявленими дефектами, розташованими в напрямку ходу променів уздовж акустичної осі перетворювача, другу - мінімальним відстанню між двома однаковими за величиною точковими роздільно виявляються дефектами, розташованими паралельно фронту УЗ-хвилі.

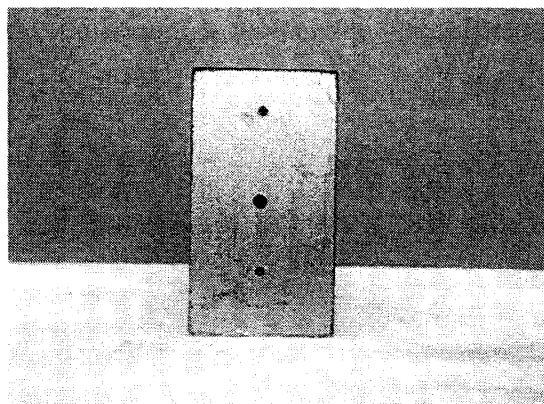
Для визначення чутливості і роздільної здатності УЗФР, а також оцінки можливості визначення дійсних розмірів дефектів і відстані між ними було розроблено та виготовлено експериментальні зразки:

- з циліндричними відбивачами діаметром 1 мм, які розташовані по радіусу 25 мм на відстані 3° один від одного та на одній прямій і під кутом 35° (рисунок 3.1, а)

- з циліндричними відбивачами діаметром 2 мм, різної довжини, які розташовані на глибині 10, 30 і 48 мм (рисунок 3.1, б)



а)



б)

Рисунок 3.1 – Зразки для визначення чутливості та роздільної здатності УЗФР

Орієнтація та розташування штучних дефектів була вибрана з метою визначення кутової роздільної здатності та чутливості неруйнівного контролю з використанням УЗФР. Найменший діаметр отвору був вибраний 1 мм, з огляду

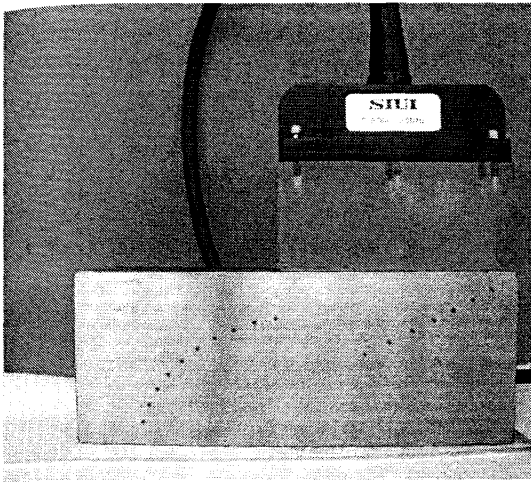
на бракувальні критерії неруйнівного контролю промислових конструкцій нафтогазової галузі.

Для проведення експериментальних досліджень було вибрано дефектоскоп SIUI CTS 602 (табл.1.3), технічні характеристики якого, в порівнянні з іншими є достатніми для контролю металоконструкцій нафтогазового обладнання.

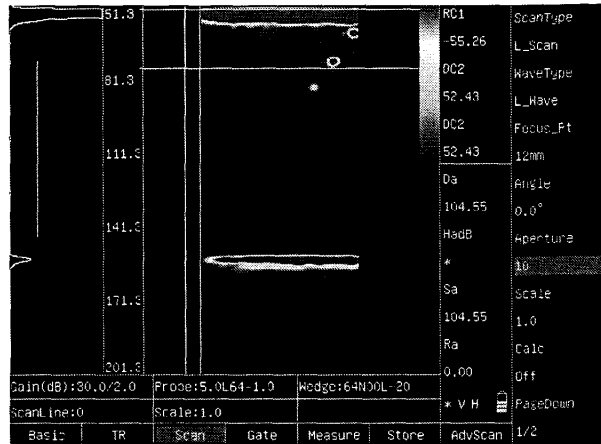
Відповідно до розробленої в розділі 2 методики вибору ПЕП з УЗФР для проведення експериментальних досліджень, з метою підтвердження теоретичних результатів, було вибрано перетворювач, що містить 64 елементи, що розташовані на відстані 0,5 мм.

Для визначення роздільної здатності дефектоскопу SIUI CTS 602 проводилось лінійне сканування внутрішнього об'єму виготовлених зразків на частоті – 5 МГц, кут сканування вибраний 0° , активна апертура – 14. Результати сканування подані на рисунку 3.2. Відповідно до результатів сканування фокусні плями відбивачів, діаметром 1 мм чітко відрізняються між собою, тому чутливість контролю з УЗФР є достатньою для проведення неруйнівного контролю з метою виявлення дефектів розміром від 1 мм. Однак на Рисунку 3.2, в зображення від циліндричного відбивача, який розміщений на глибині 48 мм довжина якого на 10 мм коротша від відбивача, що розміщений над ним, майже не вирізняється. Цей факт свідчить про те, що не всі дефекти, які розміщені один під одним в процесі контролю в режимі лінійного сканування виявляються, тобто променева роздільна здатність є недостатньою [79]. Потрібно проводити додатковий контроль в режимі S-скан.

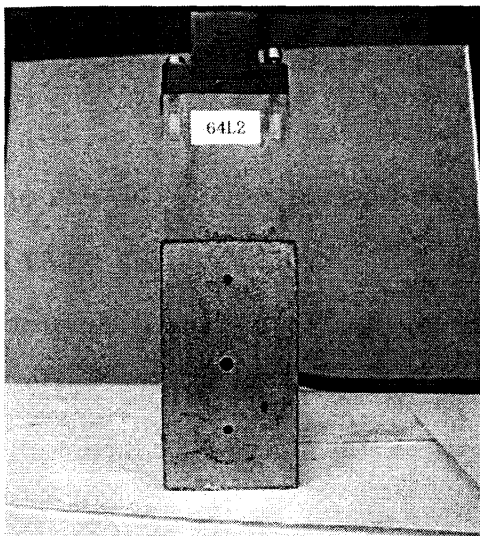
При проведенні повторних вимірювань уже в режимі секторного сканування при початковому куті вводу 30° і кінцевому -70° , усі відбивачі були виявлені. Променева роздільна здатність при секторному скануванні вища ніж при лінійному.



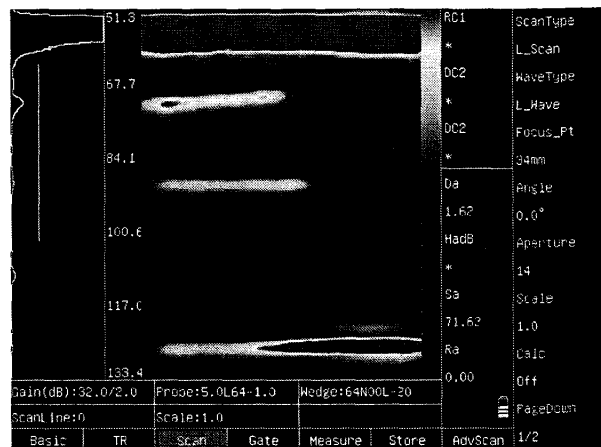
а)



в)



б)



г)

Рисунок 3.2 - Зразки для визначення чутливості і роздільної здатності та відповідні їм акустичні зображення

Отже реальна чутливість контролю з використанням УЗФР становить 1 мм. Мінімальна відстань між циліндричними отворами, які розташовані по радіусу 25 мм становила 1,5 мм. У режимі лінійного сканування отвори чітко відрізнялись один від одного (спостерігалась поява двох точок червоного кольору на екрані дефектоскопу), тому можна вважати, що роздільна здатність в режимі лінійного сканування – 1,5 мм.

3.2 Розроблення методу виявлення дефектів порушення цілісності і визначення їх типу та розмірів

Для підвищення інформативності контролю металоконструкцій [67-69] був запропонований новий підхід до ультразвукового контролю з використанням УЗФР, який передбачає проведення таких етапів:

- проведення пошукового контролю за допомогою методу відбиття;
- контроль з УЗФР з когерентною обробкою інформації.

Алгоритм проведення контролю поданий на рисунку 3.1.

Підготовка об'єкта контролю та налаштування технічних засобів

Перед проведенням діагностики ділянку контролю потрібно зачистити від бруду, окалин, лакофарбового покриття. Для зачищення поверхні використовують поверхнево-активні речовини, абразивні матеріали, тощо. Відповідно до ДСТУ ISO EN 13588:2014 шорсткість поверхні ОК повинна забезпечувати плавне переміщення ПЕП УЗФР, тому повинна бути $R_a \leq 6.3$ мкм.

Для оцінки шорсткості поверхні використовують метод порівняння [81], який полягає в порівнянні контрольованої поверхні з поверхнею спеціально виготовленого зразка - зразка шорсткості. Зразки шорсткості виготовляються відповідно до чинних нормативних документів. Вибір зразків (еталонів) шорсткості поверхні для порівняння здійснюється відповідно до ГОСТ 9378-93 (сумісний з ISO 2632-1-85, ISO 2632-2-85) [81].

Після зачищення та забезпечення необхідної шорсткості поверхні, поверхню ОК покривають контактною речовиною з метою отримання хорошого акустичного контакту. Вибір контактної речовини потрібно здійснювати відповідно до матеріалу поверхні контролю, кривизни поверхні, температурних режимів експлуатування ОК.

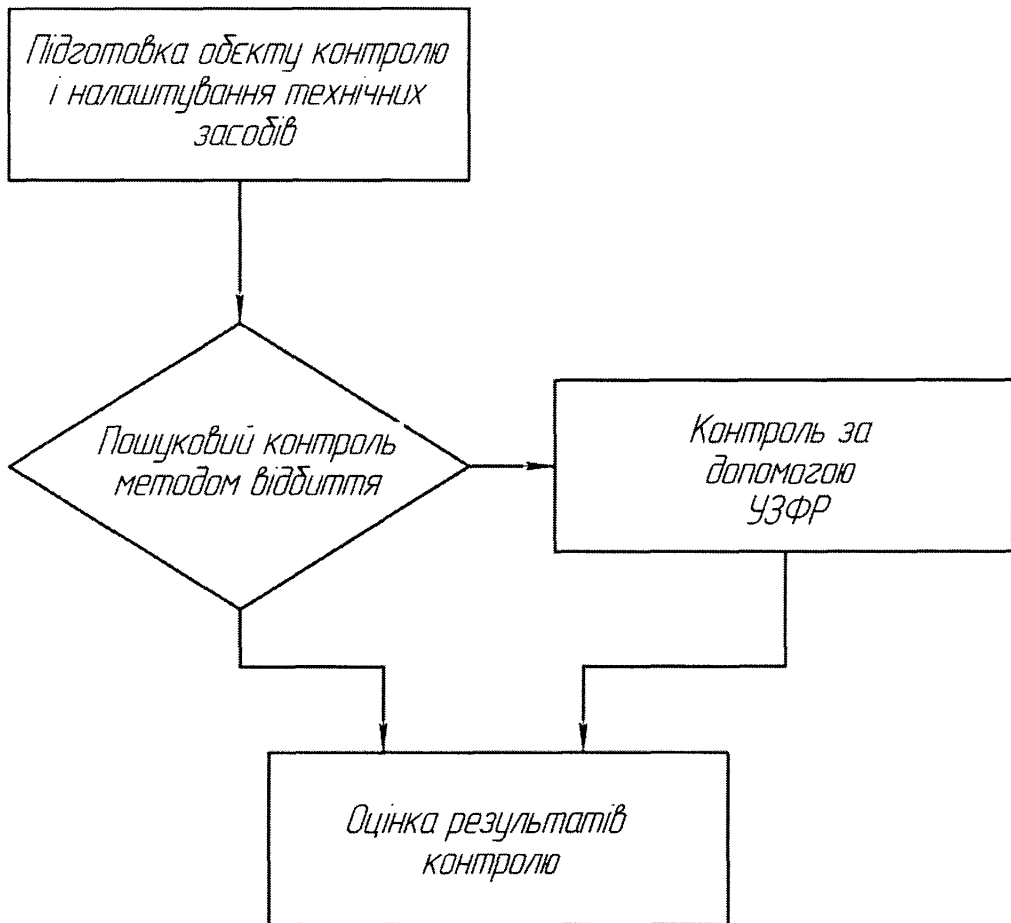


Рисунок 3.1 – Алгоритм контролю металоконструкцій

Вибір параметрів перетворювача здійснюється відповідно до товщини, типу, наявності доступу до ОК згідно з методикою, поданою в розділі 2.

Налаштування технічних засобів проводиться згідно з інструкцією з експлуатування. У ході налаштування дефектоскопів необхідно встановити швидкість поширення УЗ-хвиль в досліджуваному матеріалі, робочу частоту контролю, товщину досліджуваного ОК; для налаштування УЗФР потрібно також вибрати тип сканування (лінійне, секторне), вид хвиль (поперечні, поздовжні), активну апертуру (кількість одночасно пульсуючих п'єзоелементів).

На практиці, секторний скан проводиться в режимі реального часу з метою створення динамічного зображення за переміщенням перетворювача. Це забезпечує оптимальну візуалізацію дефектів і збільшує ймовірність їх

виявлення, особливо, в разі різноманітної орієнтації дефектів, завдяки використанню відразу декількох кутів контролю.

Проведення пошукового контролю

Пошуковий контроль здійснюється з використанням ультразвукових імпульсних дефектоскопів. Дефектоскопи повинні бути укомплектовані прямими і похилими перетворювачами. Для вимірювання і перевірки основних параметрів апаратури і контролю при луно-імпульсному методі і суміщеній схемі включення ПЕП з пласкою робочою поверхнею на робочій частоті 1,25 МГц і більше слід використовувати стандартні зразки СО-1, СО-2 і СО-3 [75].

Форма і розміри навколошовної зони повинні дозволяти переміщувати перетворювач в межах, що забезпечують прозвучування акустичною віссю перетворювача зварного з'єднання або частини металоконструкції, що підлягає контролю.

Об'єкт контролю повинен бути розділений на ділянки так, щоб зручно було визначати визначити координати виявленого дефекту.

Метою пошукового контролю є виявлення в металоконструкціях порушень цілісності, їх кількості, орієнтовних координат розташування, умовних розмірів.

Пошуковий контроль здійснюється у режимі фіксації, при якому рівень чутливості дефектоскопу встановлений на 6 дБ менше від бракувального рівня.

Основними результатами ультразвукового контролю в пошуковому режимі є:

- 1) еквівалентна площа дефекту;
- 2) координати дефекту;
- 3) відносні розміри дефекту;
- 4) умовна відстань між дефектами та їх кількість.

Якщо в результаті пошукового контролю були виявлені дефекти, потрібно провести додатковий контроль з використанням УЗФР. Якщо ж дефекти не були виявлені, переходять до блоку «Оцінка результатів контролю» і формують висновки.

Контроль з використанням УЗФР

Завданням контролю за допомогою УЗФР є проведення оцінки допустимості виявлених несучільностей, встановлення їх характеру та дійсних розмірів. Результатом контролю з УЗФР є набір зображень поперечного перерізу ділянок ОК, в яких було виявлені несучільності у ході пошукового контролю.

Після одержання набору секторних сканів та експортування даних за допомогою USB-порту до ПК, проводиться обробка зображень за допомогою графічного програмного пакету Image J [82,83], функції якого дозволяють реалізувати обробку зображень без необхідності розроблення складних алгоритмів чи дорогого програмного забезпечення, а з використанням звичайного набору функцій. На акустичне зображення наноситься координатна сітка. У випадку контролю зварного з'єднання на акустичне зображення наносять його контур відповідно до реальних геометричних розмірів зварного з'єднання (товщина стінки, кут нахилу кромки і ін.). За допомогою нанесених об'єктів можна визначити координати розташування дефекту. Для визначення реальних розмірів дефекту [84-89] проводиться додаткове оцифрування акустичних зображень і обробка за допомогою програмного пакету. За наявності дефектів в контрольованому зразку на акустичному зображенні з'являється геометрична фігура червоного кольору – ознака максимальної амплітуди, що і слід вважати діагностичною ознакою наявності недопустимого дефекту. Кольорова шкала, що відображена на екрані дефектоскопа відображає значення амплітуди перевищення сигналу відносно встановленого бракувального рівня. Чим вища амплітуда сигналу відбитого від несучільності тим колір фокусної плями є яскравішим (у кольоровому режимі -сторону від синього до червоного, у монохромному режимі – від чорного до білого). Визначення реальних розмірів дефектів відбувається шляхом нанесення контуру по периметру фокусної плями червоного (білого) кольору з метою визначення її площі. Значення площі нормується відповідно до типу

перетворювача з УЗФР, кута, на якому виявлена несучільність і глибини залягання.

Останнім етапом контролю є оцінка допустимості/недопустимості виявленого дефекту, оцінка його критичності, документування результатів контролю і складання звіту зі сформованими висновками щодо можливості подальшого експлуатування (вибору безпечного режиму) досліджуваного об'єкту.

3.3. Опрацювання результатів контролю з використанням УЗФР

Для визначення реальних розмірів дефектів було розроблено методику опрацювання акустичних зображень за допомогою програмного пакету Image J.

Процедура аналізу акустичних зображень складалась з наступних кроків:

- 1) Відкриття зображення та попередня обробка.
- 2) Бінаризація зображення
- 3) Виділення області дефекту.
- 4) Задання масштабу
- 5) Вимірювання властивостей об'єкта (дефекту) на зображенні.
- 6) Визначення геометричних параметри виділеного об'єкта.

Для визначення достовірності даного методу обробки результатів досліджень, дану методику було апробовано на стандартному зразку підприємства СО-1 (Додаток А), що містить 13 циліндричних отворів, розташованих на різній глибині з кроком 5° . Діаметр кожного отвору 2 мм, а площа поперечного січення відповідно становить $3,14 \text{ мм}^2$.

Метою даного дослідження було визначити геометричні параметри (площу поперечного перерізу) кожного з отворів за результатами опрацювань 10 акустичних зображень.

Процес отримання акустичних зображень наступний. Для отримання чіткого акустичного зображення отворів, що знаходяться на різній глибині проводилось сканування ОК в режимі L-скан (кут фокусування 0°). Глибина фокусування УЗ енергії УЗР задавалась окремо для кожного отвору, значення якої відповідало реальній глибині залягання циліндричного відбивача. Апертура та рівень підсилення вибирались таким чином, щоб на екрані дефектоскопа геометрична форма зображення максимально відповідала реальному вигляду у формі круга.

Після одержання акустичних зображень проводилась подальша оцінка результатів.

Для прикладу розглянемо поетапний процес визначення розмірів циліндричних відбивачів.

1) Відкривання зображення та попередня обробка.

Відкриваємо вихідне зображення RGB формату через команду File→Open в діалоговому вікні програми. При необхідності здійснюється попередня обробка зображення, така як покращення контрасту і яскравості з використанням функцій вкладки командного рядка Proseses (рисунок 3.2).

2) Бінаризація зображення.

Зображення конвертується у бінарне з метою підготовки до виділення контурів (рисунок 3.3) через команду Image→Type→32bit (отримаємо зображення з різними відтінками сірого фону) та Image→Adjust→Threshold.

Після бінаризації отримуємо на зображенні два класи пікселів (фонові та нефонові). Використовуючи гістограму розподілу значень яскравостей пікселів растрового зображення, шукаємо оптимальний поріг, який розділяє ці два класи пікселів, отримуючи таким чином чітке зображення контурів області дефекту, розміри якого в подальшому необхідно визначити.

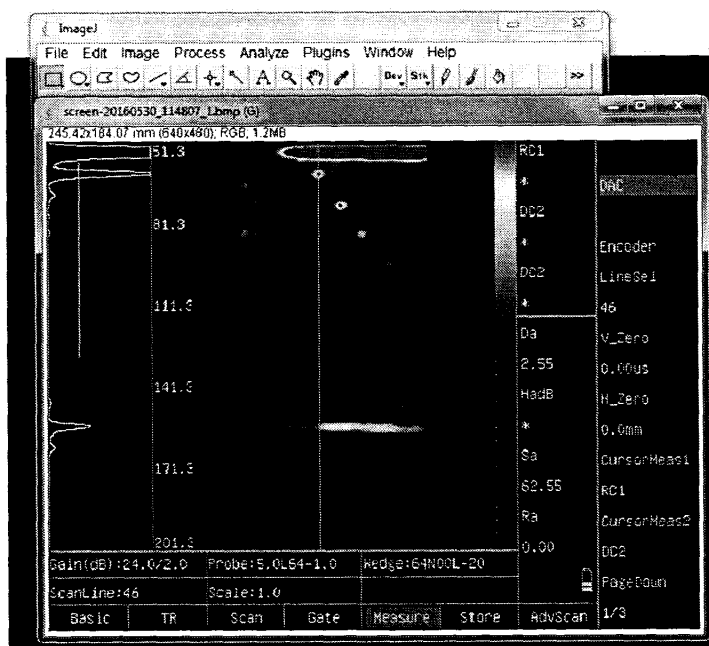


Рисунок 3.2. – Відкриття збереженого акустичного зображення для подальшого опрацювання

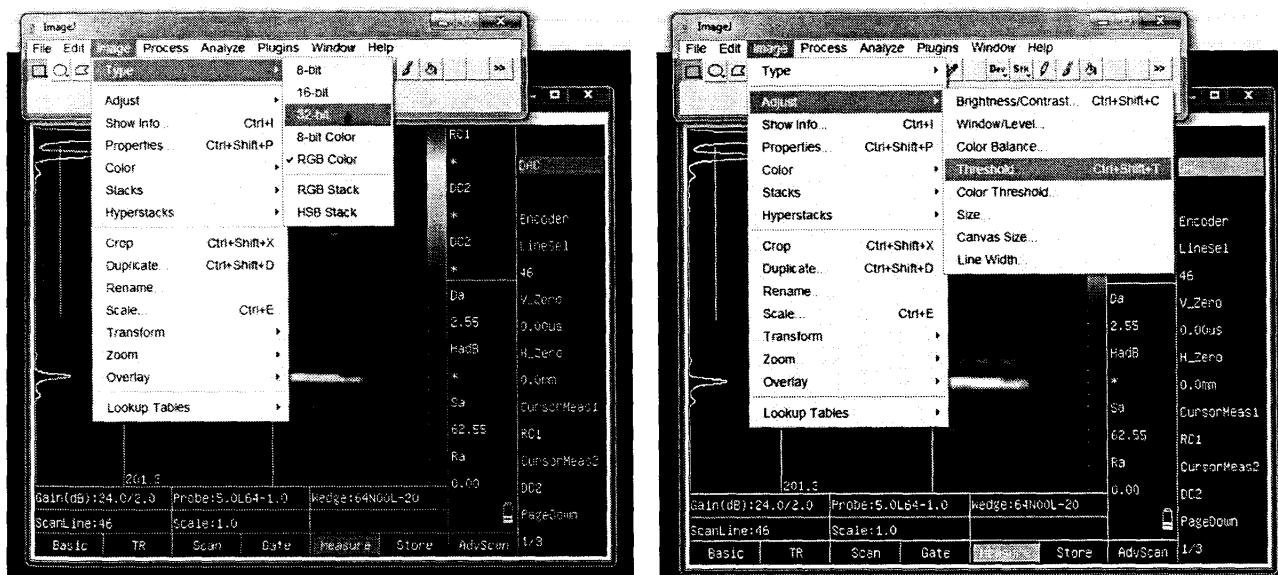


Рисунок 3.3 – Процес бінаризації акустичного зображення

Для підвищення точності визначення контуру при бінаризації зображення застосовується команда "grid", що встановлює чітко крайні точки контуру вихідного зображення (рисунок 3.4).

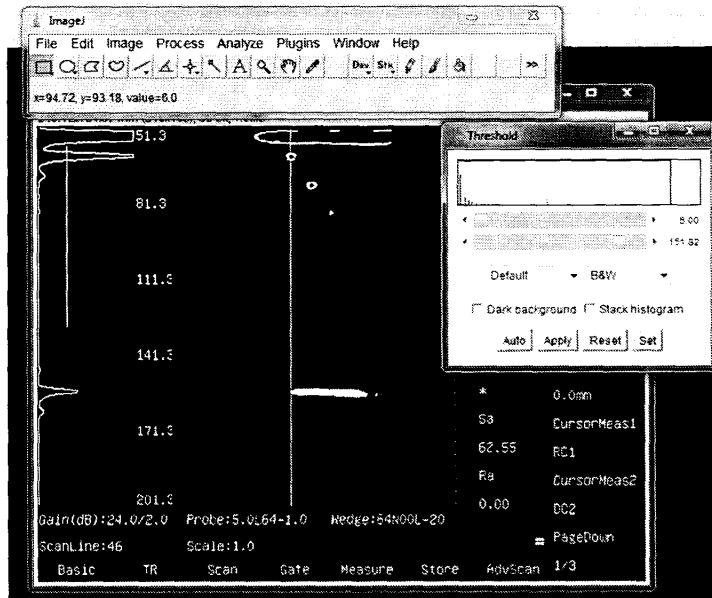


Рисунок 3.4 - Виділення контурів дефектів

3) Виділення області дефекту.

Дана операція дозволить виключити з розгляду ті об'єкти зображення, аналіз яких не передбачається. Для цього інструментом «Прямокутник» виділяємо область подальшого аналізу (рисунок 3.5).

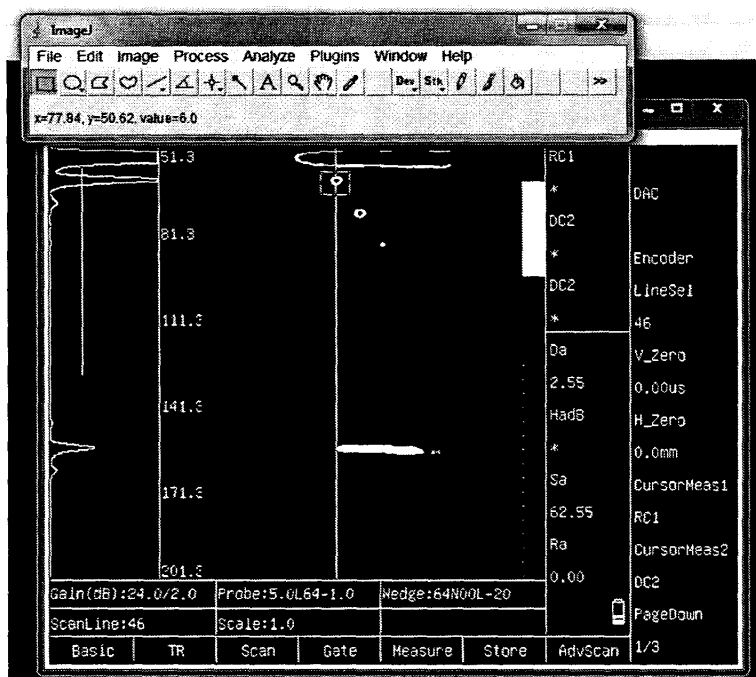


Рисунок 3.5 – Процес виділення границь командою Analyze particles в межах області площею $0,5 \text{ мм}^2$

4) Задання масштабу

Діалогове вікно використовується для задання просторового масштабу зображення. Активні результати вимірювання в даному випадку будуть представлені в заданих калібрувальних одиницях – міліметрах.

Перед запуском цієї команди треба задати початкові (вже відомі) відстані. Для цього попередньо було вибрано інструмент "Лінія" на панелі інструментів, проведено пряму лінію на зображенні, яка з'єднала 5 послідовних точок по вертикалі в правому куті поля графічного зображення, що відповідало відстані 25 мм. Після чого було натиснуто команду Set Scale (рисунок 3.6).

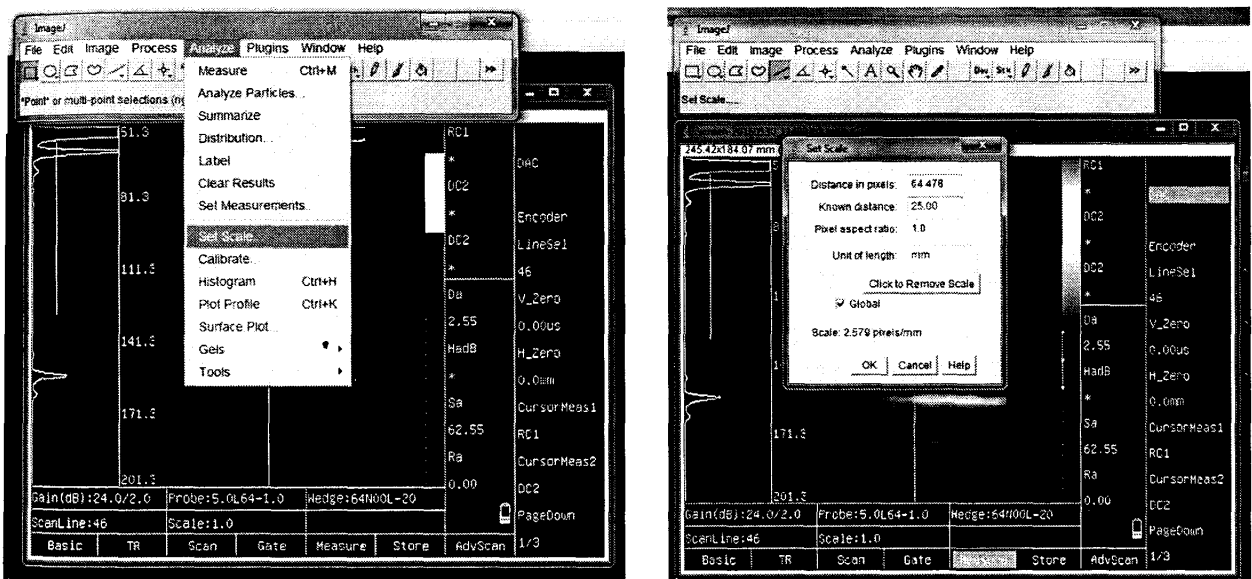


Рисунок 3.6 – Процес задання масштабу

У вкладці Known Distance вводиться те число, значенню якого відповідає лінія на зображенні (у нашому випадку 25 мм). У полі Unit of Length задаються одиниці вимірювання - міліметри. Після цього натискаємо кнопку ОК. Після виконання усього вищесказаного ImageJ здійснюватиме усі підрахунки з урахуванням заданих параметрів і калібрувальних одиниць.

5) Вимірювання властивостей об'єкта (дефекту) на зображенні.

При запуску команди Analyze→Set Measurements з'являється діалогове вікно, яке дозволяє вибрати ті параметри, які потрібні аналізувати в меню

Analyze (рисунок 3.7). В діалоговому вікні вибираємо необхідні параметри вимірювання: площа виділеного об'єкта, периметр контура (довжина зовнішньої границі виділеного об'єкта) та діаметр по методу Фере.

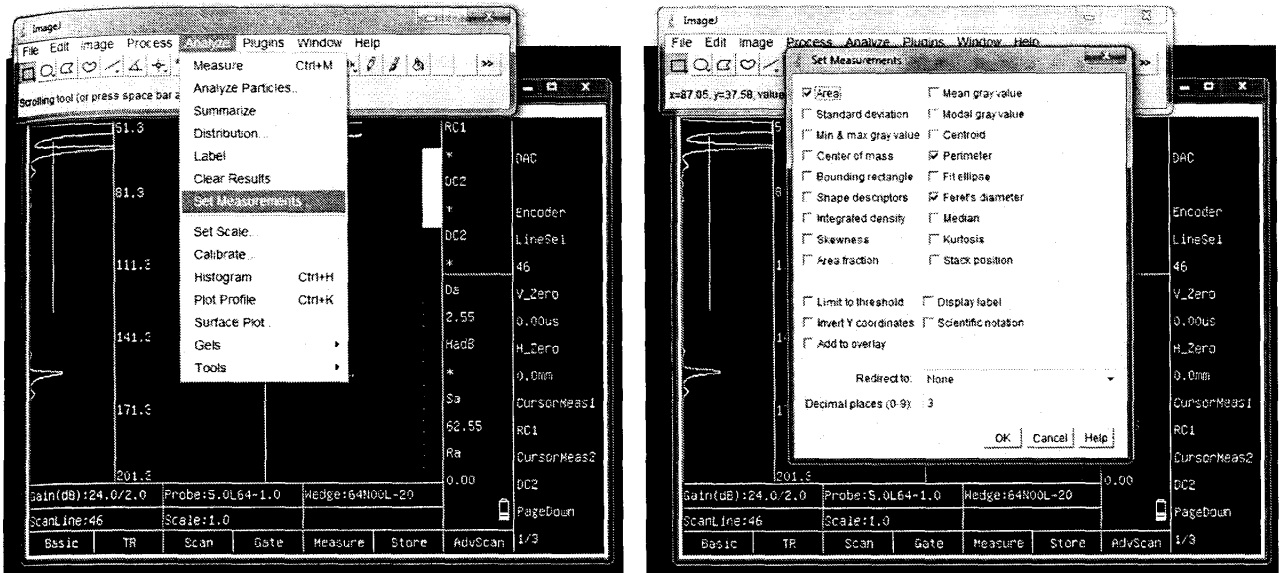


Рисунок 3.7 – Вибір параметрів, що необхідно визначити

б) Вимірюємо геометричні параметри виділеного об'єкта.

Для цього в командному меню вибираємо функцію Analyze→Analyze Particles (рисунок 3.8).

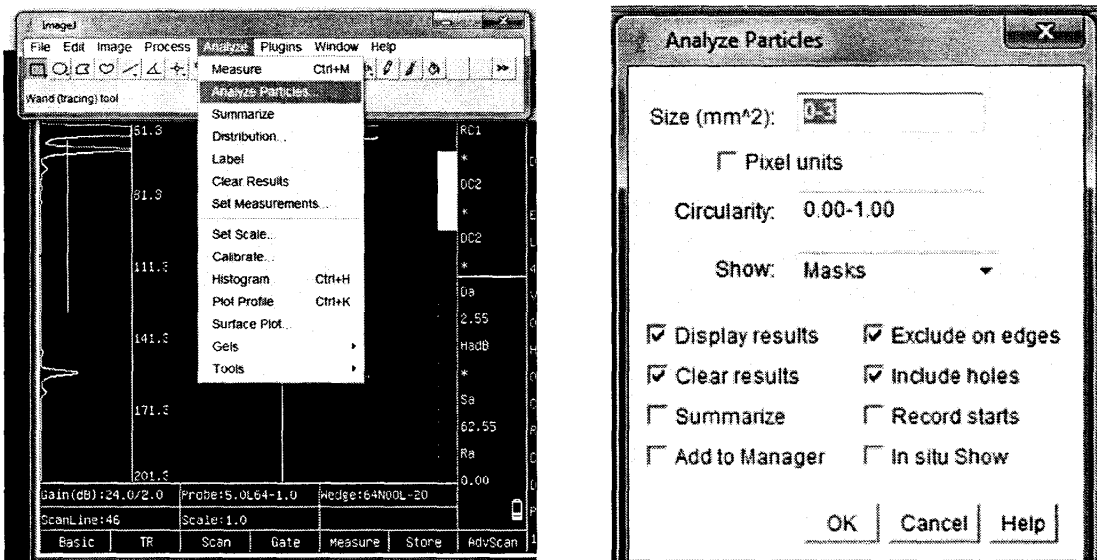


Рисунок 3.8 – Визначення геометричних розмірів

Дана команда вимірює яку-небудь частину зображення або поріг. Працює за принципом сканування усього зображення або виділення, поки не знаходить краю об'єкту. Після цього виділений об'єкт описується за допомогою інструменту Wand вимірюється командою Measure, заповнює його.

Після запуску команди Analyze Particles з'явиться діалогове вікно для налаштування Analyzer Particle.

Поле Size використовується для задання розмірів досліджуваних об'єктів. Якщо на зображенні або виділенні будуть об'єкти розміром більше за вказані, то вони враховуватися не будуть.

Поле Circularity активується для роботи з круглими об'єктами на зображенні. Значення 1.0 говорить про ідеальне коло. Вибір Masks у вкладці Show застосовується для заповнення усіх виділень поточним кольором фоном (за замовчуванням чорним). Поставивши галочку в полі Display results відбувається відображення значень кожної зміни у вікні "Results". Поле Clear Results активується для очищення попередніх значень при кожному новому вимірюванні.

Активація Exclude on Edges дозволяє виключити з розгляду ті об'єкти на зображенні, краї яких стикаються з краями зображення чи виділеної зони.

Включення Include Holes дозволяє побачити не лише об'єкт на зображенні цілком, але і дозволить побачити і підрахувати внутрішню частину таких об'єктів. При відключенні цієї опції, ImageJ заповнює усю область об'єкту кольором заливки і проводить загальний розрахунок, а при її включенні сканування відбувається з урахуванням зовнішнього і внутрішнього країв об'єкта.

Результати вимірювання представлені наступним чином (рисунок 3.9)

Представлена процедура опрацювання акустичних знімків проводилась для акустичного зображення кожного відбивача. Результати вимірювання одного і того ж відбивача проводились тричі. Середні значення геометричних параметрів кожного відбивача представлені в таблиці 3.1.

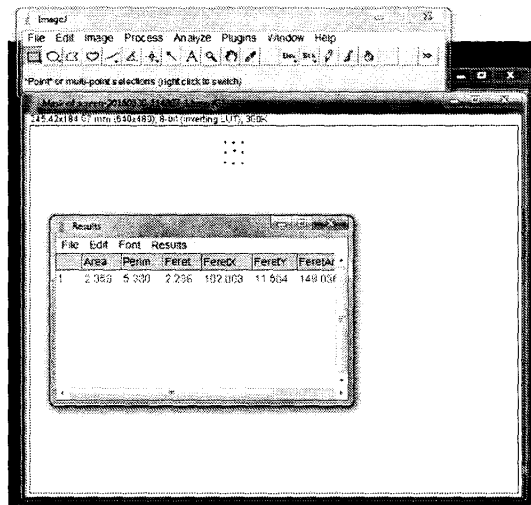


Рисунок 3.9 – В представлення результатів одного вимірювання

Таблиця 3.1 – Приклад представлення усереднених результатів опрацювання акустичного знімка в межах виділеної області програмним продуктом ImageJ

Slice	Area	Perim.	Feret
screen-20160530_114807_1	3.19	6,329803	2.236
screen-20160530_114841_2	3.110	6,249928	1.975
screen-20160530_114934_3	3.135	6,274998	2.002
screen-20160530_114934_4	3.126	6,265984	1,863
screen-20160530_114934_5	3.089	6,228791	2,051
screen-20160530_114934_6	3.113	6,252942	1,880
screen-20160530_114934_7	3.142	6,282	2,062
screen-20160530_114934_8	3.148	6,287995	1,864
screen-20160530_114934_9	3.090	6,229799	1,927
screen-20160530_114934_10	3.290	6,42825	2,107

В таблиці результатів наведені наступні дані:

Slice – позначення файлу зображення;

Area – площа, зайнята зернами перліту, мм²;

Perim – периметр контуру дефекту, мм;

Feret – середній діаметр дефекту, визначений методом січних (метод Фере), мм.

Середнє значення площі поперечного перерізу циліндричного відбивача, отримане в результаті застосування розробленої методики оброблення акустичних зображень в програмному продукті, становить $S_{вим} = 3,1431 \text{ мм}^2$. Дійсна площа поперечного перерізу відбивача діаметр якого 2 мм становить $S_0 = \frac{1}{4} \pi d^2 = 3,1415 \text{ мм}^2$. Розрахуємо значення основної відносної похибки δ [91]:

$$\delta = \frac{S_0 - S_{вим}}{S_0} \cdot 100\% = \frac{3,1415 - 3,1431}{3,1415} \cdot 100\% = 0,0509\%,$$

Значення основної відносної похибки підтверджує достовірність результатів розробленої методики оброблення акустичних зображень.

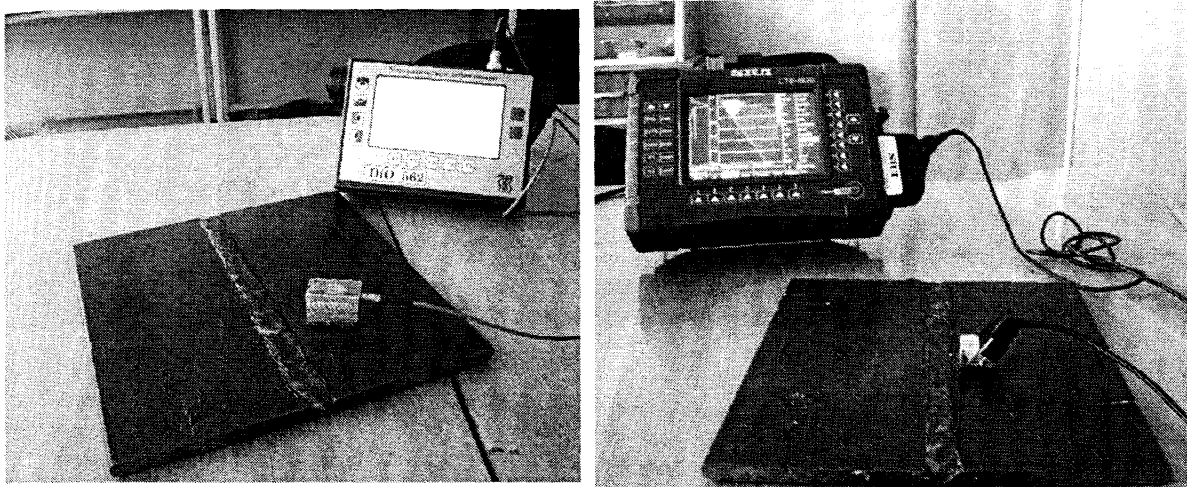
3.4. Проведення експериментальних досліджень

3.4.1 Експериментальні дослідження зразку зварного з'єднання зі штучними дефектами

Для проведення експериментальних досліджень і формування відповідності акустичних зображень дефектам виготовлено дослідний зразок стикового зварного з'єднання (рисунок 3.10). Дві пластини розміром 275×120 мм, товщиною 11 мм виготовлені з сталі 09Г2С і зварені за допомогою ручної зварки. На дослідний зразок нанесені штучні дефекти, що імітують найбільш небезпечні дефекти «несплавлення» ($2,0 \times 2,0$ мм), «непровар» ($2,0 \times 3,0$ мм), «підріз» ($3,0 \times 1,0$ мм).

Для проведення випробувань було вирішено проводити дослідження з використанням таких технічних засобів:

- ультразвуковий дефектоскоп типу DIO-652, п'єзоелектричний перетворювач типу П121 -2,5 -50-М-003 (зав. №, р.), (рисунок 3.10, а);
- ультразвуковий дефектоскоп типу SIUI CTS-602, п'єзоелектричний перетворювач типу 5,0L16-0,5-9 (рисунок 3.10 ,б)



а)

б)

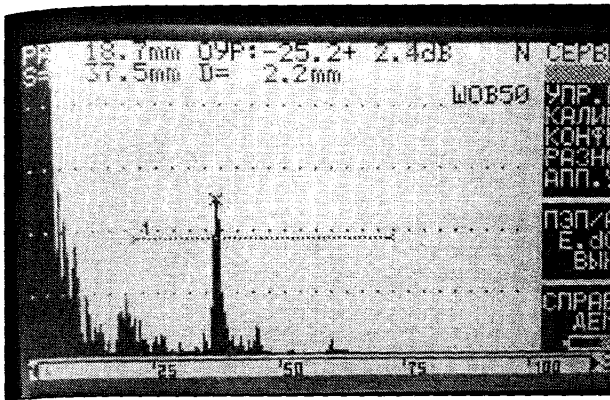
Рисунок 3.10 - Контроль зварного з'єднання в пошуковому режимі а) і в режимі УЗФР б).

З поверхні ділянок контролю розробленого взірця було видалено пил, бризки металу та інші забруднення. Поверхні із залишками забруднення очищалися вручну за допомогою абразивних матеріалів та металевих щіток з незначними натискними зусиллями та миючими засобами.

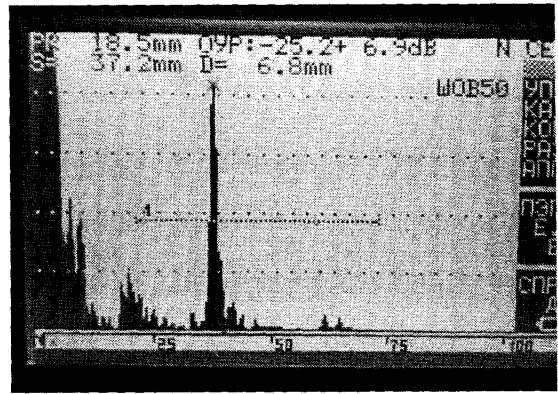
У ході роботи були проведені ультразвукові дослідження зварних швів на предмет виявлення дефектів типу порушення суцільності.

На першому етапі контролю УЗК проводився за допомогою ультразвукового луно-імпульсного дефектоскопу Dіо 562 та роздільно-суміщеного перетворювача П121-50-2,5. Підключення перетворювача і налаштування проводили згідно інструкції з експлуатації, що входить в комплект технічного засобу, на стандартних зразках для калібрування. В ролі контактної речовини використовувався солідол жировий Ж-2 згідно з ГОСТ 1033-79 для забезпечення хорошого акустичного контакту.

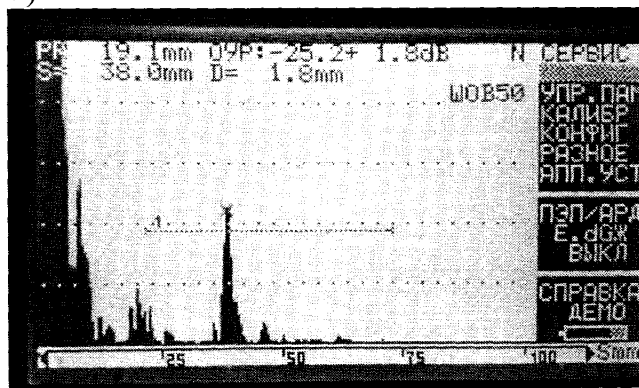
В результаті контролю зафіксовано три ділянки, на яких спостерігалось перевищення амплітуди від відбивача вище бракувального рівня (рисунок 3.11), визначено координати дефектів та позначено ділянки зварного з'єднання за допомогою крейди.



а)



б)



в)

Рисунок 3.11 – Результаты поискового контроля (А-скани):
«несплавления» (а), «непровару» (б), «пори» (в)

Наступним етапом контролю була дефектоскопія виділених попередньо ділянок зварного з'єднання з метою визначення типу та реальних розмірів дефектів.

Дефектоскопія зразка проводилась за допомогою 16-елементного перетворювача 5,0L16-0.5-9 з робочою частотою 5,0 МГц з похилою призмою (рис. 3.10, б) в режимі S-скан з кутами вводу ультразвукового променя від 30° до 70°. Підключення перетворювача і налаштування проводили згідно інструкції з експлуатації, що входить в комплект технічного засобу. Оскільки дефектоскоп має функцію збереження і відновлення параметрів налаштувань, використовувались параметри, що були вибрані при визначенні чутливості розроблених зразків. В ролі контактної речовини використовувався солідол жировий Ж-2 згідно з ГОСТ 1033-79 для забезпечення хорошого акустичного контакту.

Перетворювач розміщувався перпендикулярно до осі шва на відстані 18 мм і плавно переміщувався паралельно осі шва. В результаті контролю отримано акустичні зображення трьох внутрішніх дефектів (рисунок 3.12). Акустичні зображені було передано за допомогою USB-порту до ПК і проведено обробку за допомогою розробленого програмного алгоритму представлено в пункті 3.2.

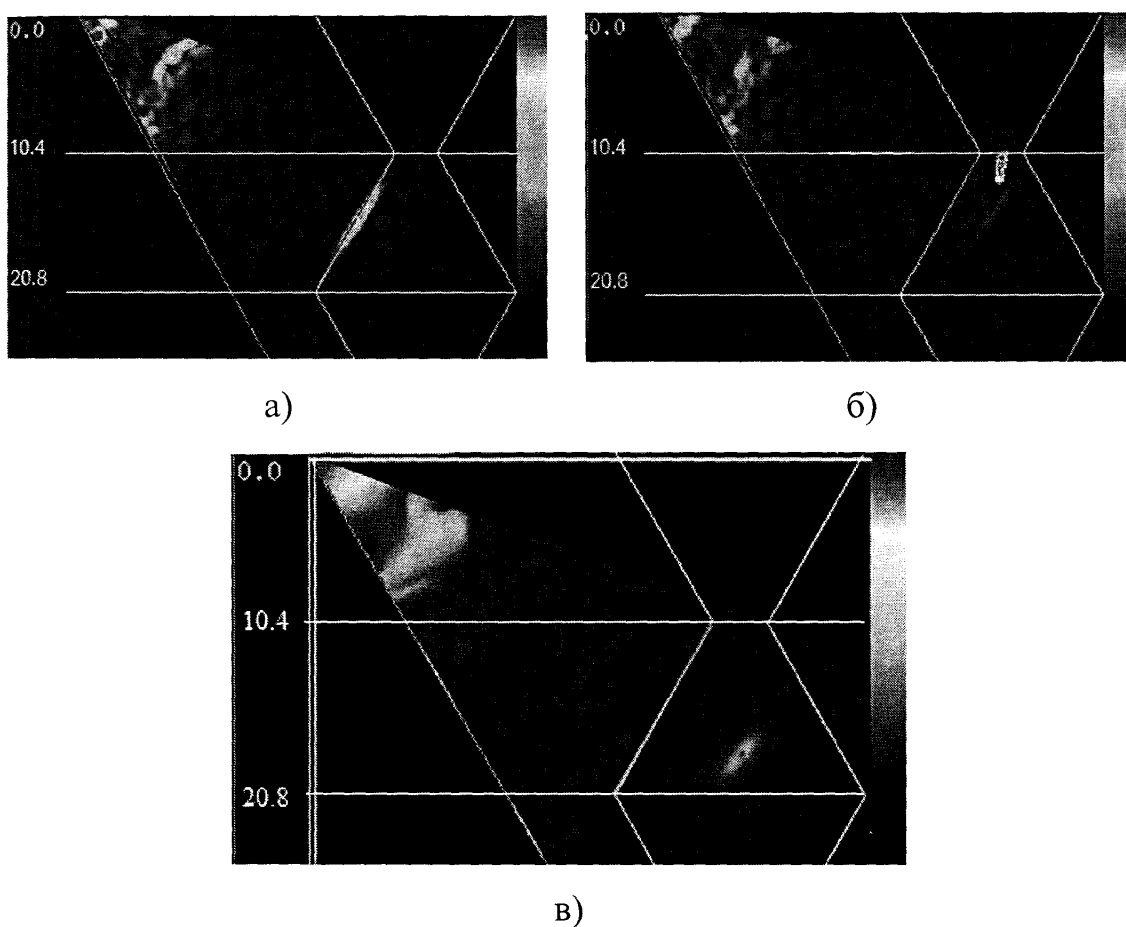


Рисунок 3.12 – Акустичне зображення «несплавлення» (а), «непровару» (б), «пори» (в)

На рисунку спостерігається поява дефектних ділянок, що проявляються жовтим та червоним кольорами: між основним металом та зварюваним металом (рисунок 3.12,а) корені шва (рисунок 3.12, б), та в центрі зварного з'єднання (рисунок 3.12, в). З допомогою програмного пакету Image J та розробленої

методики було визначено площу поперечного перерізу виявлених дефектів, шляхом опрацювання акустичних зображень.

Результати контролю зварного з'єднання зі штучними дефектами подані в таблиці 3.1. Проаналізувавши таблицю значень отриманих за допомогою звичного ультразвукового контролю та дефектоскопом з УЗФР можна зробити висновок, що запропонований метод контролю є більш точним, оскільки відносна похибка вимірювань не перевищує 5 %.

Таблиця 3.1 – Результати експериментальних досліджень зварного з'єднання зі штучними дефектами.

Дефект	Реальні розміри		Dio 562		SIUI CTS-602	
	Розміри дефекту, мм	Глибина залягання, мм	Розміри дефекту, мм	Глибина залягання, мм	Розміри дефекту, мм	Глибина залягання, мм
Несплавлення	2,0×2,0	2,1	3,0×3,0	2,2	2,1×2,3	2,24
Непровар	2,0×3,0	7,0	2,0×2,0	6,8	2,4×2,9	7,22
Пора	1,0×1,0	1,0	2,0×1,0	1,8	1,2×1,1	1,64

Слід зауважити, що час контролю в пошуковому режимі склав – 14 хв, а в режимі УЗФР – 8 хв. Для обробки акустичних зображень необхідно було 7 хв. Сумарний час, витрачений на проведення контролю з можливістю визначення реальних розмірів дефектів складає 29 хв. Продуктивність запропонованого методу контролю підтверджує її суттєві переваги над звичним ультразвуковим контролем.

Контроль проводився на зразку зі штучними дефектами тип яких був уже відомим. Завдяки можливості візуалізації внутрішнього об'єму досліджуваного зразку в першу чергу зручно визначати розташування. Для перевірки повторюваності виявлення дефектів та визначення їх типу необхідно провести дослідження на зразках з реальними дефектами.

3.4.2 Експериментальні дослідження зварних з'єднань металоконструкцій тривалої експлуатації

З метою класифікації дефектів відповідно до вигляду акустичних зображень реальних дефектів проведемо експериментальні дослідження зразків зварних з'єднань. Для проведення контролю з допомогою УЗФР контролю вибрано п'ять взірців стикових зварних з'єднань з різних типорозмірів. (рисунок 3.13).

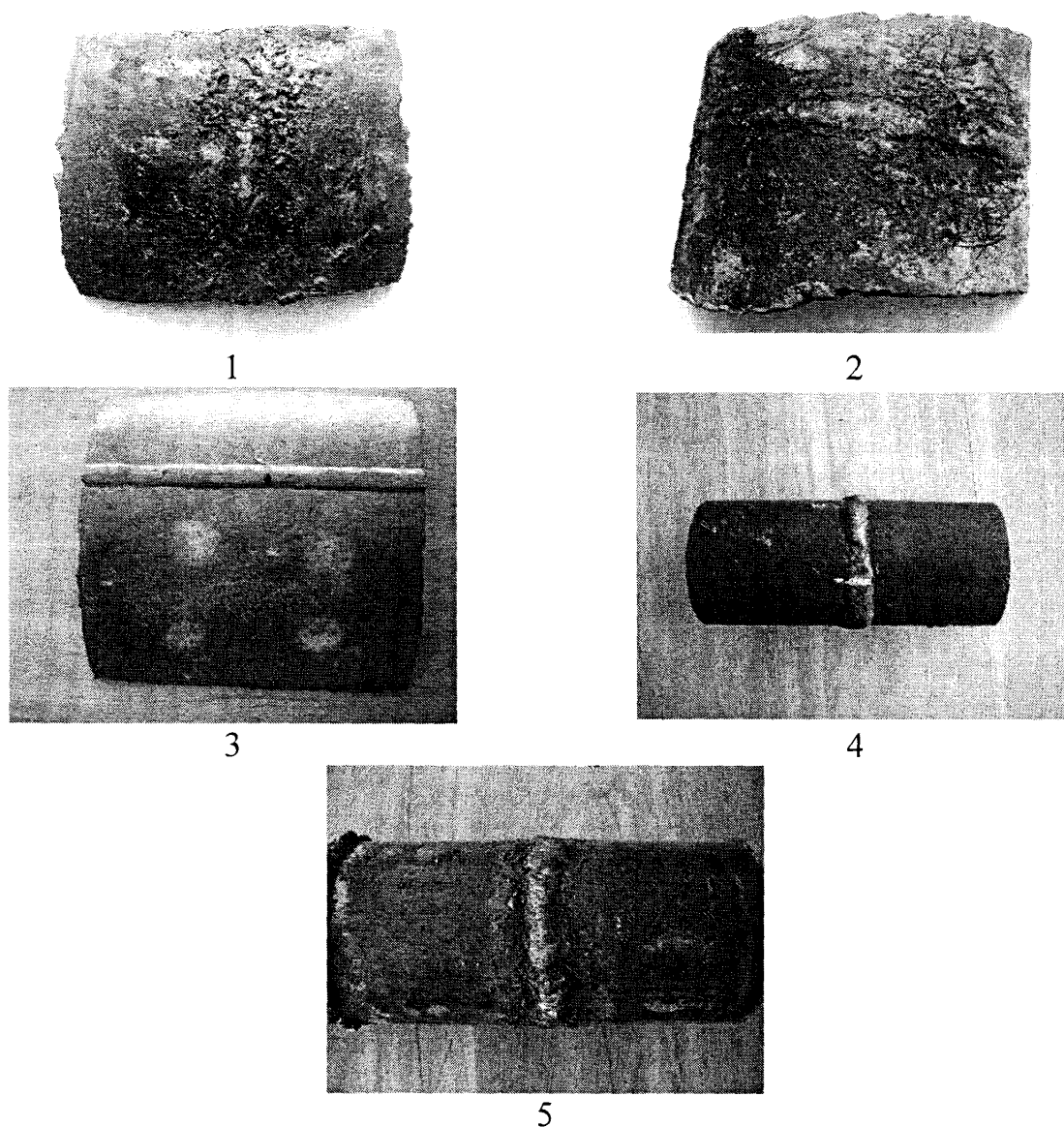


Рисунок 3.13. – Зразки зварних з'єднань тривалої експлуатації

Для проведення експериментальних досліджень з використанням УЗФР було вибрано 5 зразків зварних з'єднань тривалої експлуатації: Зразок № 1 та

зразок №2 - ділянки зварних з'єднань магістрального газопроводу діаметром 530 мм і товщиною стінки 8 мм, що був введений в експлуатацію у 1966 році. Матеріал досліджуваних трубних взірців 1,2 - низьколегована вуглецева конструкційна сталь 16ГС. Зразок №3 являється ділянкою зварного з'єднання ділянки магістрального газопроводу діаметром 820 мм, товщина стінки 8 мм, виготовлений зі сталі 09Г2с, термін експлуатації якого складає 25 років. Ділянка зварного з'єднання труби газової мережі середнього тиску діаметром 89 мм і товщиною стінки 5 мм, термін служби якої становив 12 років обрана як зразок №4. Матеріал зразку №4 – сталь ВСт3. Зразок №5 – це частина водопровідної труби діаметром 107 мм, товщиною 5 мм виготовленої зі сталі 08.

Дослідження проводились наступним чином. З поверхні ділянок контролю взірців було видалено пил, продукти корозії та інші забруднення. Поверхні із залишками забруднення очищалися вручну за допомогою абразивних матеріалів та металевих щіток з незначними натискними зусиллями та миючими засобами.

У ході роботи були проведені ультразвукові дослідження з використанням УЗФР на предмет виявлення дефектів типу порушення суцільності [92-96].

Дефектоскопія зразків проводилась за допомогою 16-елементного перетворювача 5,0L16-0.5-9 з робочою частотою 5,0 МГц з похилою призмою (рисунок 3.14). Підключення перетворювача і налаштування проводили згідно інструкції з експлуатації, що входить в комплект технічного засобу, на стандартних зразках для калібрування. В ролі контактної речовини використовувався солідол жировий Ж-2 згідно з ГОСТ 1033-79 для забезпечення хорошого акустичного контакту.

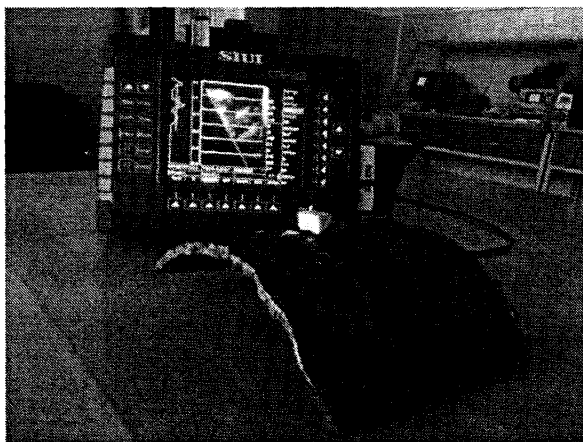


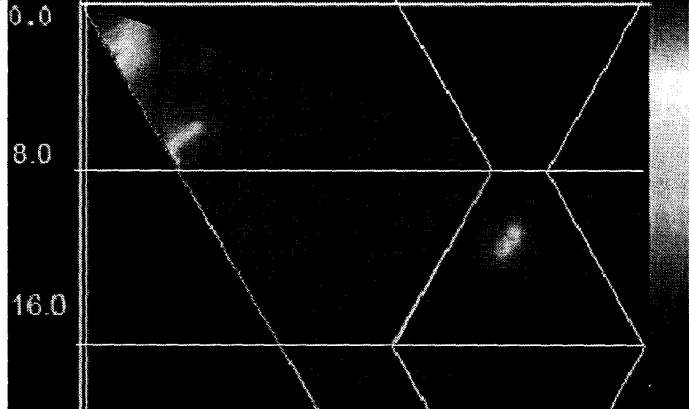
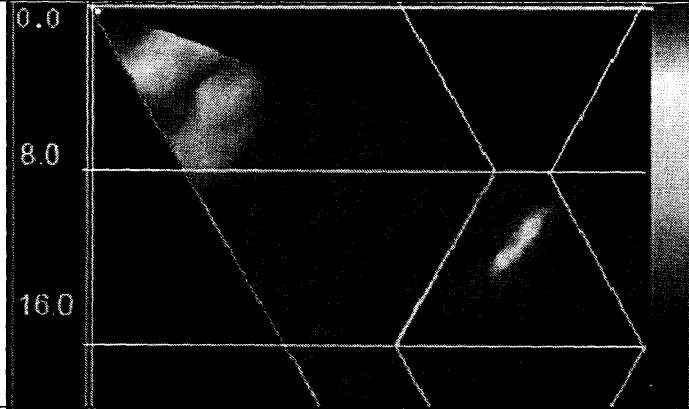
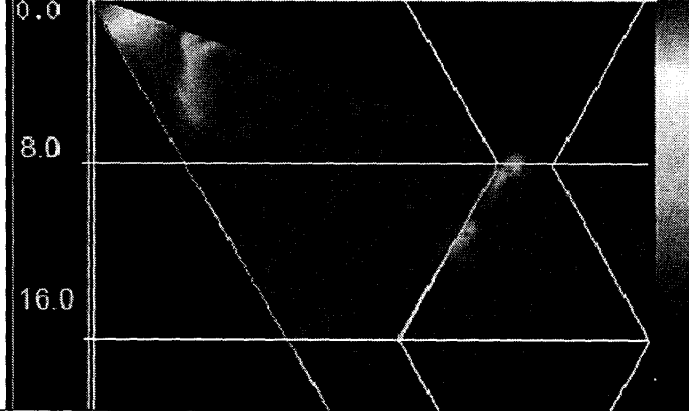
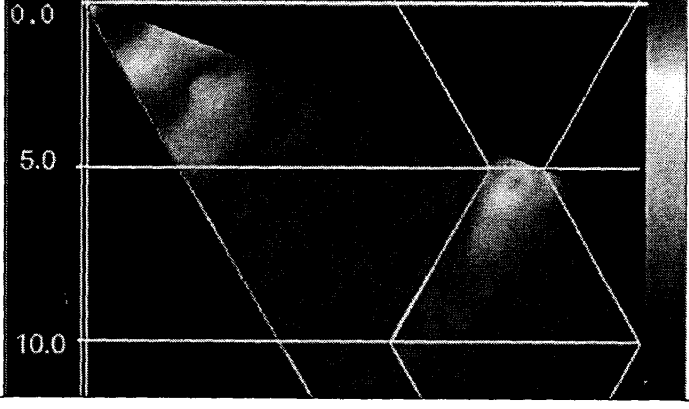
Рисунок 3.14 – Установка для контролю зварних з'єднань

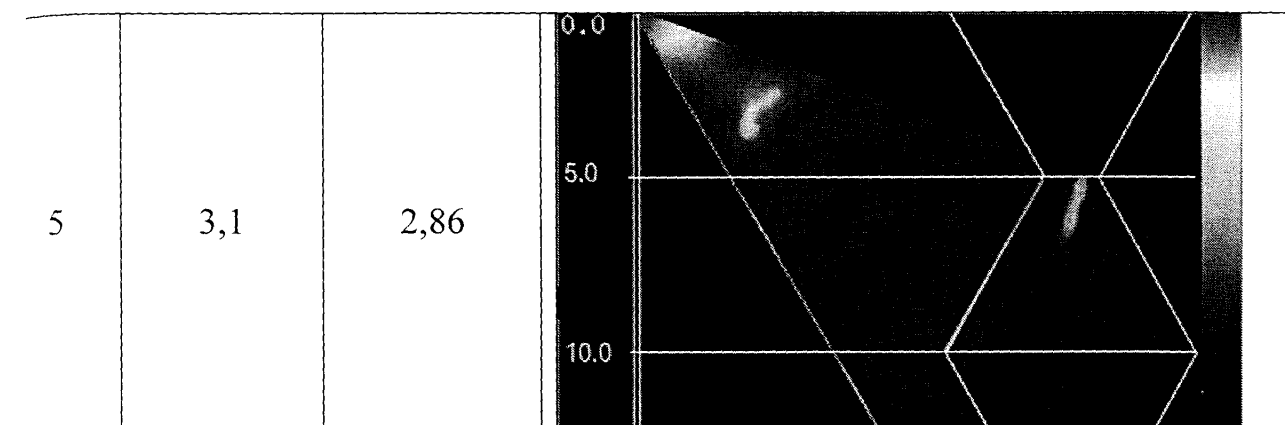
Перетворювач розміщувався перпендикулярно до осі шва на відстані і плавно переміщувався паралельно осі шва.

В результаті контролю одержано акустичні зображення поперечного перерізу тестових зразків (S-скани). До уваги приймалися ті зображення, амплітуда від виявленого дефекту в яких була найбільшою.

На кожному взірці було проведено не менше трьох вимірів. На кожному з досліджуваних зразків було виявлено внутрішній дефект та проаналізовано їх акустичні зображення. За допомогою розробленої методики опрацювання акустичних знімків було визначено площу поперечного перерізу виявленого дефекту (площа червоних «плям»). Розрахунок для кожного виявленого дефекту проводився не менше 3 разів. Усереднені значення геометричних розмірів виявлених дефектів подано в таблиці 3.2

Таблиця 3.2 – Результати експериментальних вимірювань зразків 1-5

№ зрізця	Глибина залягання дефекту, мм	Площа поперечного перерізу, мм ²	Акустичне зображення дефекту
1	2	3	4
1	5,2	3,41	 <p>Acoustic image of defect 1. The vertical scale on the left is marked at 0.0, 8.0, and 16.0. The image shows a dark, irregularly shaped defect area within a grid pattern.</p>
2	3,8-6,1	3,64	 <p>Acoustic image of defect 2. The vertical scale on the left is marked at 0.0, 8.0, and 16.0. The image shows a dark, elongated defect area within a grid pattern.</p>
3	5,6 -7,9	3,08	 <p>Acoustic image of defect 3. The vertical scale on the left is marked at 0.0, 8.0, and 16.0. The image shows a dark, irregularly shaped defect area within a grid pattern.</p>
4	4,9	4,36	 <p>Acoustic image of defect 4. The vertical scale on the left is marked at 0.0, 5.0, and 10.0. The image shows a dark, irregularly shaped defect area within a grid pattern.</p>



Завдяки можливості візуалізації внутрішнього об'єму зварного зеднання і нанесенню контуру можна попередньо оцінити тип дефекту. Для визначення типу виявлених дефектів проводився додатковий аналіз акустичних зображень, що полягав у визначенні співвідношення довжини та ширини дефектів.

Основною метою проведення експериментальних досліджень зварних з'єднань було визначення інформативних параметрів, що характеризують тип порушення цілісності.

В результаті опрацювань акустичних зображень досліджуваних зразків зварних з'єднань, сформовані характеристики акустичних зображень плоских та об'ємних дефектів.

Характерними для плоского дефекту є:

- сукупність двох і більше незалежних «плям» червоного кольору розміщених на невеликій відстані одна від одної,
- зображення різної тригонометричної форми в сусідніх шарах (поперечних перерізах, отриманих при переміщенні перетворювача з кроком 1 мм),
- затінення зображення геометричних відбивачів або інших несучільностей, розташованих далі за ним в напрямку поширення ультразвукового променя,
- співвідношення довжини до ширини поперечного перерізу дефекту ≥ 4 .

Об'ємний дефект характеризується:

- зазвичай не затінює зображення геометричних відбивачів та інших

несуцільностей, розташованих далі за ним в напрямку поширення акустичного променя;

- форма зображення порушення цілісності схожа до кола, при переміщенні перетворювача на сусідніх шарах витягується в овал;

- при зменшенні активної апертури зображення фокусної плями стає чіткішим,

- співвідношення довжини до ширини поперечного перерізу дефекту ≤ 3 .

Висновки до розділу 3

За результатами проведених експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

1) визначено фронтальну та променеву роздільні здатності дефектоскопу з УЗФР, при використанні ПЕП, який складається з 64 елементів, які розміщені на відстані 0,5 мм; визначено чутливість УЗФР, яка складає 1 мм

2) проведено порівняльні вимірювання розмірів виявлених дефектів за допомогою ультразвукового дефектоскопу і дефектоскопу з УЗФР;

3) проведено експериментальні випробування ультразвукового методу з використанням УЗФР визначення типу та розмірів штучних дефектів з метою визначення відповідності реальних розмірів та орієнтації дефектів їх акустичному зображенню.

4) сформовано характеристики результатів контролю методом УЗФР для класифікації дефектів на пласкі та об'ємні.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЮ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ НА НАЯВНІСТЬ ДЕФЕКТІВ ТИПУ ПОРУШЕННЯ СУЦІЛЬНОСТІ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

4.1. Методика оцінювання реальних розмірів дефектів та визначення їх типу

Методика встановлює порядок ультразвукового контролю з використанням УЗФР стикових, кутових, напускних зварних з'єднань виконаних дуговою, електрошлаковою, газовою, електронно-променевою і зварюванням плавленням із металів і сплавів для виявлення внутрішніх дефектів типу порушення цілісності (пори, неметалічні включення, тріщини, несплавлення і непровари зварного з'єднання, тощо).

Метод призначений для спеціалістів організацій, що здійснюють ультразвуковий контроль обладнання у нафтогазовій промисловості.

Метод поширюється на металоконструкції тривалої експлуатації, а саме труби з умовним діаметром більше 80 мм, резервуари.

Необхідність проведення контролю, обсяги контролю і розміри недопустимих дефектів установлюються в стандартах або технічних умовах на продукцію.

Даний метод може бути використаний як метод ідентифікації та визначення реальних розмірів внутрішніх дефектів за акустичним зображенням візуалізованого внутрішнього об'єму об'єкту контролю при оцінюванні фактичного стану металоконструкцій та при розрахунку залишкового ресурсу.

Діагностичною ознакою дефекту є відбиваюча здатність кожної точки поверхні дефекту.

Метод вимірювання геометричних розмірів дефектів ґрунтується на встановлених експериментальним шляхом зв'язках між реальними розмірами штучних відбивачів та відповідними їм акустичними зображеннями,

отриманими за допомогою технічних засобів контролю з використанням УЗФР. Отримані акустичні зображення обробляються за допомогою програмного забезпечення Image J портативного комп'ютера.

4.1.1 Засоби вимірювань

Для проведення контролю за допомогою технології фазованих решіток елементів устаткування відповідно до цього стандарту необхідно використовувати:

- ультразвукові дефектоскопи з комплектами перетворювачів з УЗФР;
- стандартні зразки підприємства СЗП, що використовуються для налаштування і перевірки апаратури;
- контактну рідину для забезпечення акустичного контакту між ультразвуковими п'єзоелектричними перетворювачами і контрольованими виробами;
- металеву лінійку з ціною поділки не більше 1 мм.

Дефектоскопи, що використовуються для контролю, повинні мати необхідне програмне забезпечення та можливість роботи з УЗФР та відповідати вимогам EN 16392-1, EN 16392-2, EN 16392-3 (додатково).

Дефектоскопи повинні мати такі характеристики:

- можливість одночасного виведення на екран А-скану та S-скану;
 - можливість вибору необхідного періоду часу, протягом якого оцифровується А-скан.
 - значення номінальних частот дефектоскопа 1,25; 1,8; 2,5; 5,0 МГц.
- Відхилення від номінальних частот не більше $\pm 20\%$;
- діапазон вимірювання відношення амплітуд сигналів - не менше 30 дБ;
 - нерівномірність вирівнювання амплітуд сигналів в діапазоні контролю – не більше 6 дБ;
 - діапазон швидкостей розповсюдження поздовжніх ультразвукових коливань – від 2500 до 6500 м/с;
 - діапазон товщин контрольованих матеріалів від 1 мм до 200 мм;

- можливість вибору та зміни значенням кута вводу та фокусної віддалі;
- можливість передачі та/або збереження результатів контролю на персональний комп'ютер.

- можливість вибору необхідного періоду часу, протягом якого оцифровується А-скан.

Документація перетворювачів повинна бути створена із врахуванням інформації виробника, типу, розмірів та ідентифікаційного номеру (серійного номеру).

Характеристики перетворювачів повинні містити інформацію про:

- частоту;
- кількість елементів;
- відстань між елементами;
- позначення розташування першого та останнього елементів;
- характеристики призми;
- розмір пучка;
- форма імпульсу;
- довжина імпульсу;
- відношення сигнал/шум;
- фокусна точка та відстань для фокусних перетворювачів.

Перетворювачі повинні працювати в режимах генерації поздовжньої та поперечної хвиль.

За потреби, перетворювачі повинні мати такий профіль, що відповідає вигину труби.

Перевірку та налаштування апаратури в комплекті з перетворювачами з УЗФР здійснюють відповідно до вимог експлуатаційної документації.

Стандартний зразок СО-1 (див. Додаток А) застосовують для визначення умовної чутливості, перевірки роздільної здатності та похибки глибиноміра дефектоскопа. Стандартні зразки, на яких проводиться налаштування апаратури повинні мати дефекти різного типу, для наглядного визначення відклику та вигляду образу дефекту на S-скані.

Контактні рідини, що використовуються для створення акустичного контакту, повинні бути пожежо-вибухобезпечними, нешкідливими для фахівців неруйнівного контролю і не впливати шкідливо на метал контрольованого виробу. Розмір повітряного шару між перетворювачем та об'єктом контролю повинен буде не більше 0,5 мм.

4.1.2 Підготовка до виконання контролю

Зварне з'єднання готують до ультразвукового контролю з УЗФР при відсутності в з'єднанні зовнішніх дефектів. Форма і розміри навколошовної зони повинні дозволяти переміщати перетворювач в межах, що забезпечують прозвучування акустичною віссю перетворювача зварного з'єднання або його частини, що підлягає контролю.

Поверхня з'єднання, по якій переміщують перетворювач, не повинна мати вм'ятин і нерівностей, з поверхні повинні бути видалені бризки металу, окалина, фарба, забруднення. Шорсткість поверхні повинна складати $R_a \leq 6.3$ мкм.

Розміри ділянки поверхні для зачищення визначають фахівці, що проводять обстеження відповідно до геометричних розмірів та типу вибраного перетворювача з УЗФР.

4.1.3 Проведення вимірювань

Після налаштування приладу виконують дефектоскопію устаткування. На поверхні зони деталі, що підлягає контролю, наносять шар контактної рідини і здійснюють контроль шляхом плавного переміщення перетворювача поверхнею цієї зони. Акустичний контакт п'єзоелектричного перетворювача з контрольованим металом слід створювати контактним способом введення ультразвукових коливань.

Прозвучування зварного з'єднання виконують по способу поздовжнього переміщення перетворювача при постійному кроці сканування.

Вимірювання здійснюють в режимі секторного сканування (S-скан) з початковим кутом вводу ультразвукових коливань 30° та кінцевим – 70° . Для контролю в режимі секторного сканування контроль здійснюють поперечними хвилями. При необхідності контролю основного метало використовують лінійне сканування поздовжніми хвилями.

Апертура перетворювача з УЗФР (кількість одночасно пульсуючих п'єзоелементів) вибирається відповідно до товщини досліджуваного об'єкту.

Частота контролю вибирається у відповідності до частоти п'єзоелектричного перетворювача з УЗФР.

В результаті контролю з УЗФР отримують набір поперечних перерізів досліджуваного об'єкту (акустичні зображення). Акустичні зображення зберігаються на персональному комп'ютері з подальшим опрацюванням за допомогою спеціального програмного забезпечення.

За результатами ультразвукового контролю устаткування вважають придатними до експлуатування, якщо не було виявлено дефекти, розміри яких перевищують норми допустимих дефектів.

4.1.4. Оцінка і оформлення результатів контролю

Основними характеристиками виявлюваного дефекту є:

- 1) площа поперечного перерізу в максимальному діаметрі дефекту;
- 2) координати дефекту в зварному з'єднанні.
- 3) розміри дефекту;
- 4) розміри між дефектами;
- 5) кількість дефектів на визначеній довжині зварного з'єднання.

Розмірами виявленого дефекту є:

- 1) протяжність дефекту L в міліметрах визначають по довжині зони між крайніми положеннями ПЕП, переміщеного вздовж зеднання, орієнтованого перпендикулярно до осі шва.

2) максимальна ширина дефекту X в міліметрах, яку визначають по відстані між крайніми точками акустичної плями дефекту .

3) висота дефекту в міліметрах визначається як різниця між значеннями глибини розташування дефекту.

Додатковими характеристиками дефекту є його орієнтація і тип (плаский чи об'ємний). Орієнтація дефекту визначається як горизонтальне чи вертикальне розміщення дефекту відносно нормалі, що проходить через вісь зварного з'єднання.

Тип дефекту визначають за допомогою визначення F співвідношення:

$$F = L / X \quad (1)$$

- у випадку $0 \leq F \leq 3$, дефект слід вважати об'ємним,
- якщо $3 < F < \infty$, то дефект вважають пласким.

Результати контролю повинні бути записані в журналі, висновку контролю, або на схемі зварного з'єднання, або в іншому документі, де повинні бути вказані:

тип з'єднання, що контролюється, і довжина проконтрольованого ділянки;

технічна документація, відповідно до якої виконувався контроль;

тип дефектоскопа;

тип перетворювача

результати контролю;

дата контролю;

інформація про дефектоскопіста, що проводив контроль.

4.2. Метрологічна оцінка удосконаленої методики контролю металоконструкцій

Основою моніторингу металоконструкцій є отримання інформації з результатів спостереження, які діляться: на вимір, контроль, діагностику, виявлення подій, ідентифікацію та розпізнавання образів. Всі ці види вилучення взаємопов'язані і зводяться в підсумку до стратегії вимірювання і оцінки (інтерпретації). Часто вдається забезпечити взаємозамінність одних іншими, це накладається на технологічний процес добування інформації і гранично зводиться до моніторингу систем. Тому важливе значення має формалізація вимірювальних завдань, тобто моделювання процесу отримання інформації, ідентифікація моделі об'єкта контролю з точки отримання інформації в класичній метрології заздалегідь передбачається модель вимірювання [97].

Постає питання, якою моделлю задатися. Якщо її немає, то виникає складність в стратегії оцінки, тобто в обробці одержуваної інформації. Питання УЗК - вибір моделі і проведення вимірювальної оцінки відповідності.

Поняття достовірності контролю нерозривно пов'язане з законами математичної статистики, яка говорить, що результатам контролю завжди притаманна певна частина невизначеності [91]. Однак ця частка може бути зменшена за рахунок поліпшення (підвищення якості) процесів вимірювання (зменшення похибок при вимірюванні) і отримання більш повної інформації про об'єкт контролю, але ніколи не буде дорівнювати нулю. З самого початку застосування ультразвукових дефектоскопів як приладів неруйнівного контролю до теперішнього часу не вщухають суперечки про призначення даного обладнання - чи є вони вимірювальним засобом [98].

При наявності в об'єкті контролю відомих дефектів, параметри яких можна точно відтворити на стандартних зразках для налаштування [99], можна побудувати кореляційну криву - залежність розміру від глибини залягання відбивача. Далі, при проведенні контролю, ми порівнюємо отримані значення сигналів від дефектів з атестованими характеристиками відбивачів в зразках і оцінюємо ступінь придатності виробу. Так як похибки виготовлення зразків,

похибки побудови графіків і похибку устаткування відомі, то в такому випадку, ультразвуковий дефектоскоп реалізує непрямий метод вимірювання розміру дефекту і він є засобом вимірювання.

Однак у виробках зустрічаються різні типи дефектів, які важко відтворити в стандартних зразках. Кожен дефект унікальний за своїми характеристиками (розмірами, розташуванням) та створення універсальних кореляційних графіків залежності форми дефекту і глибини його залягання не завжди можливо. Також є ймовірність пропуску дефекту (розмір, орієнтація або груба помилка оператора). Все це призводить до того, що амплітудна ознака класифікації відбивачів допускає невизначеність в оцінці типу і розмірів дефектів.

Разом з тим, метод ультразвукової дефектоскопії допомагає виявляти і оцінювати вид і параметри дефекту по заздалегідь обумовленим критеріям. Чисельні характеристики сигналів визначаються при відсутності значення похибки вимірювань. Тому ультразвуковий метод контролю за своїм прямим призначенням не є засобом вимірювання, а варіант допускового контролю.

При цьому, ультразвуковий контроль є складним багатofакторним процесом, де на кожній його стадії оцінка точності представляє собою стаціонарний випадковий процес.

Тому відповідно до ДСТУ EN 1714:2005, який встановлює процедури по розробці, атестації, стандартизації і метрологічного супроводу методик виконання вимірювань, на неруйнівний ультразвуковий контроль не поширюються загальні правила, в зв'язку з тим, що похибки вимірювань можна визначити безпосередньо після контролю.

Для розрахунку характеристик похибок в загальному випадку використовують [91]: метрологічні характеристики засобів вимірювання характеристики впливають величин, характеристики об'єкта вимірювань.

За основні складові сумарної похибки при ультразвуковому контролі можна прийняти:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{метод}} + \Delta_{\text{інст}} + \Delta_{\text{інтерп}}, \quad (4.2)$$

де $\Delta_{\text{метод}}$ – методична похибка: що представляє суму похибок:

$$\Delta_{\text{метод}} = \Delta_{\text{моделі}} + \Delta_{\text{методу}}. \quad (4.3)$$

де $\Delta_{\text{інст}}$ – інструментальна похибка; $\Delta_{\text{інтерп}}$ – похибка інтерпретації.

Для методичної похибки основним фактором є похибка моделі дефекту. Дана похибка пов'язана з неможливістю визначення точного взаємозв'язку реального дефекту з штучним відбивачем, тобто розпізнаванням образу дефекту. Визначити таку похибку майже не можливо.

При вимірюванні параметрів дефекту ехо-імпульсним методом, як і при будь-яких непрямих вимірюваннях, завжди виникають похибки результату вимірювання, які залежать від неточності визначення первинної величини. В нашому випадку такою первинною величиною є час поширення акустичних коливань, що в свою чергу залежить від багатьох параметрів. Не провівши аналіз причин, які впливають на точність вимірювання, некоректно говорити про достовірність результату. Для розуміння впливу цих причин, коротко їх проаналізуємо [100]:

- зміна товщини шару контактної речовини (для контактних товщиномірів) чи зміна відстані від перетворювача до ОК (в нашому випадку) призводить до зміни часу між зондуючим та ехо-сигналом;

- зміна рівня сигналу, що спричиняє втрату одного півперіоду ехо-імпульсу при однаковому рівні спрацювання вимірювального тригера;

- зміна тривалості переднього фронту ехо-імпульсу;

- похибка блоку, який здійснює вимірювання часу поширення УЗК;

- похибка, яка виникає перед вимірюванням при налаштуванні приладу;

- зміна швидкості поширення ультразвукових коливань, в наслідок неоднорідності матеріалу ОК, впливу зміни умов вимірювань;

- інші причини.

Оскільки аналітично врахувати вплив вище перелічених причин виникнення похибок на результат вимірювання практично не можливо, тому для оцінки достовірності вимірювання геометричних розмірів дефектів було вирішено провести експериментальну оцінку результатів вимірювань дефектів зварних з'єднань металоконструкцій за допомогою розробленої методики в ході

багатократних спостережень. Оскільки, згідно з розробленою методикою експериментальних досліджень, на кожному з 2 зрізів екзаменаційних зрізів (Додаток Д) для ультразвукового контролю було проведено 10 вимірювань, тому можемо провести метрологічний аналіз результатів цих багатократних спостережень (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Результати багатократних вимірювань розмірів дефектів

№ п/п	Результати експериментальних вимірювань					
	Зразок 1 (132)			Зразок 2 (177)		
	ΔX	ΔH	ΔL	ΔX	ΔH	ΔL
1	5,1	1,3	7,1	35,2	15,0	25,1
2	5,2	1,4	7,1	35,4	15,0	25,2
3	5,1	1,4	7,0	35,4	15,1	25,0
4	4,8	1,4	6,9	34,8	15,2	25,1
5	4,9	1,5	6,9	35,0	15,1	25,2
6	4,9	1,5	6,8	35,1	15,2	25,3
7	5,1	1,4	6,9	35,2	15,0	24,9
8	5,0	1,3	7,0	35,2	15,1	24,8
9	5,1	1,5	7,1	35,0	15,2	25,2
10	5,0	1,4	7,1	35,0	15,0	25,4

Для визначення метрологічних характеристик розробленого методу контролю, оброблення результатів таких багатократних спостережень доцільно провести згідно з стандартною методикою [101], яку розглянемо на прикладі першого зріза.

1) Розрахуємо середнє значення:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} = 5,02 \quad \bar{H} = \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{n} = 1,41, \quad \bar{L} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{n} = 6,99, \quad (4.4)$$

де $n = 10$ - кількість спостережень, X_i - значення ширини дефекту, отримане під час i -го вимірювання (Рис.4.1); H_i – значення протяжності дефекту по глибині; L_i – довжина дефекту.

2) Визначимо середньоквадратичне відхилення (СКВ) σ результатів спостережень:

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 0,1124$$

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n-1}} = 0,07453 \quad (4.5)$$

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}{n-1}} = 0,11005$$

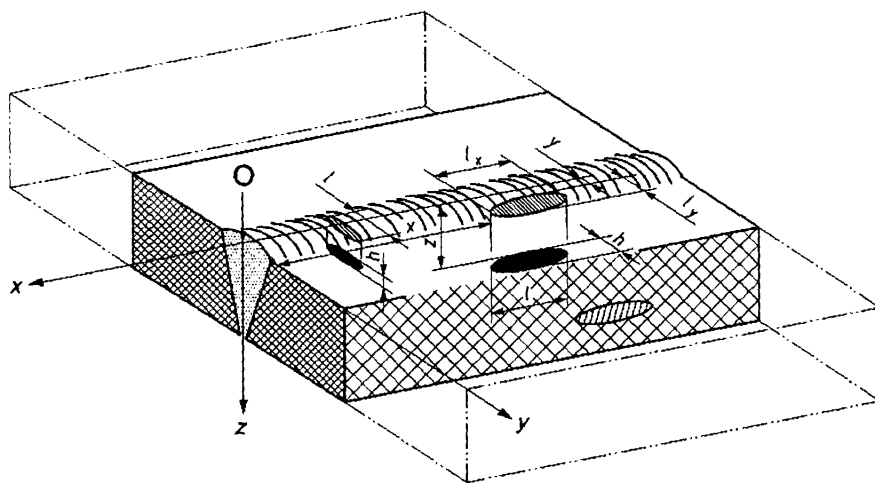


Рисунок 4.1 – Схема зварного з'єднання для визначення розмірів дефектів

2) Згідно із правилом «трьох сігм» проведемо перевірку кожного результату спостережень на аномальність.

$$\begin{cases} |X_i - \bar{X}| \leq 3\sigma_X \\ |H_i - \bar{H}| \leq 3\sigma_H \\ |L_i - \bar{L}| \leq 3\sigma_L \end{cases} \quad (4.4)$$

При перевірці виявлено, що всі значення спостережень геометричних розмірів дефектів задовільняють умову (4.4).

3) Враховуючи те, що кількість спостережень для одного взірця в нашому випадку складає 10, тоді проведемо перевірку результатів спостережень на відповідність нормальному закону розподілу за допомогою критерію W .

Для перевірки результатів спостережень товщини за критерієм W скористаємось методикою, яка подана в [91]. Спочатку всі результати

спостережень упорядкуємо у вигляді варіаційного ряду $x'_1 \leq x'_2 \leq \dots \leq x'_n$. Після цього вказані результати спостережень занесемо в розрахункову табл. 4.2.

В нижній половині третьої колонки знизу вверх впишемо значення j від l до 1 , де $l = n/2$ для парних n і $l=(n-1)/2$ для непарних n . В нашому випадку таблицю 4.2 заповнимо для результатів спостережень вимірювань товщини першого взірця.

Таблиця 4.2 – Алгоритм критерію W

i	x_i	j	a_{n-j+1}	$\Delta x = x'_{n-j+1} - x'_j$	$a_{n-j+1} \Delta x$
1	2	3	4	5	6
1	4,8				
2	4,9				
3	4,9				
4	5,0				
5	5,0				
6	5,0	5	0,0399	0.2	0.0079
7	5,0	4	0,1224	0.3	0.0367
8	5,1	3	0,2141	0.3	0.0642
9	5,1	2	0,3291	0.3	0.0987
10	5,2	1	0,5739	0.4	0.2296

на основі додатку Ж [91] для відповідних n та l знаходимо значення коефіцієнтів a_{n-j+1} для j від l до 1 і записуємо їх знизу вверх у колонку 4 табл. 4.2. Після цього розраховуємо значення різниць $x = x'_{n-j+1} - x'_j$, які заносимо в колонку 5. На основі колонок 4 і 5 заповнюємо нижню частину колонки 6 табл. 4.2.

Значення φ^2 та b^2 розраховуємо на основі даних таблиці 4.2 таким чином:

$$\varphi^2 = \sum_{i=1}^n (x'_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x'_i)^2 = 0,12 \quad (4.5)$$

$$b^2 = \left\{ \sum_{j=1}^l a_{n-j+1} \cdot (x'_{n-j+1} - x'_j) \right\}^2 = 0,1910, \quad (4.6)$$

Значення критерію W розраховуємо за формулою:

$$W = \frac{b^2}{\varphi^2} = 1,59 \quad (4.7)$$

Для перевірки критерію W задаємо певним рівнем значимості α , який відображає найбільшу ймовірність помилковості гіпотези про належність результатів спостережень даної вибірки до нормального закону розподілу. Нехай в нашому випадку $\alpha=0,05$. Тоді згідно з додатком К [105] знаходимо значення $W^*=0,842$. Оскільки $W > W^*$, то результати спостережень вимірювання товщини відповідають нормальному закону розподілу.

4) Враховуючи те, що результати спостережень описуються нормальним законом розподілу, то визначимо СКВ результатів прямих вимірювань товщини:

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma_X}{\sqrt{n}} = 0,035, \quad \sigma_{\bar{H}} = \frac{\sigma_H}{\sqrt{n}} = 0,024, \quad \sigma_{\bar{L}} = \frac{\sigma_L}{\sqrt{n}} = 0,035 \quad (4.8)$$

5) Для знаходження коефіцієнта Ст'юдента задамо значенням імовірності $P_{зад} = 0,95$. Тоді згідно з додатку В [91] коефіцієнт Ст'юдента буде рівний $t = 2,26$.

6) Запишемо результати вимірювань товщини згідно з формулою [106]:

$$X = \bar{X} \pm t\sigma_{\bar{X}}, \quad \bar{P} = \bar{P}_{зад} \quad (4.9)$$

Тоді $X=5,02 \pm 0,035$, $\bar{P}_{зад}=0,95$; $H=1,41 \pm 0,024$, $\bar{P}_{зад}=0,95$; $L=6,99 \pm 0,035$, $\bar{P}_{зад}=0,95$.

Аналогічні розрахунки проведемо для іншого взірця. Результати обчислень при $P_{зад} = 0,95$ подано в табл. 4.3. Також визначимо відносну випадкову похибку вимірювань за результатами спостережень вимірювання товщини.

Визначимо максимальне значення абсолютної похибки вимірювань [107, 108], взявши за дійсне значення вимірної величини, значення паспорту експериментального зразку.

Таблиця 4.3 Значення абсолютної та відносної випадкової похибки вимірювань

Номер зразка	Зразок 1			Зразок 2		
	X	L	H	X	L	H
Вимірне середнє значення параметру дефекту, мм	5,02	6,99	1,41	35,2	25,2	15,1
Абсолютна випадкова похибка вимірювань, мм	0,035	0,035	0,024	0,098	0,082	0,073
Відносна випадкова похибка вимірювань, %	0,7	0,5	1,7	0,3	0,3	0,5

Визначимо максимальне значення абсолютної похибки вимірювань [107, 108], взявши за дійсне значення вимірної величини, значення паспорту експериментального зразку.

Отже похибка вимірювань товщини елементів металоконструкцій удосконаленого методу не перевищує 1,7%. Абсолютна похибка вимірювань вказаному діапазоні товщин - $\pm 0,1$ мм.

4.3 Промислова апробація розробленої методики

Промислові випробування проводились в умовах ПАТ «Дрогобицький машинобудівний завод», м.Дрогобич, Львівської області та ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд» при проведенні робіт по експертному обстеженню технологічного обладнання ДК «Укравтогаз» на території АГНКС-500 посудини СК-А, що працює під тиском.

В умовах ПАТ «Дрогобицький машинобудівний завод» було здійснено експериментальні дослідження методу контролю дефектів порушення цілісності з використанням УЗФР на двох зразках технологічного обладнання.

Дослідження на обраних об'єктах проводились наступним чином.

Робочій групі були надані:

- методологія оцінки якості зварних з'єднань металоконструкцій;

- результати попередньо проведених експериментальних досліджень в спеціалізованій лабораторії неруйнівного контролю кафедри енергетичного менеджменту і технічної діагностики ІФНТУНГ;

- дефектоскоп SIUI CTS-602 (рисунок 4.2), дефектоскоп DIO-562, товщиномір УТ-31.

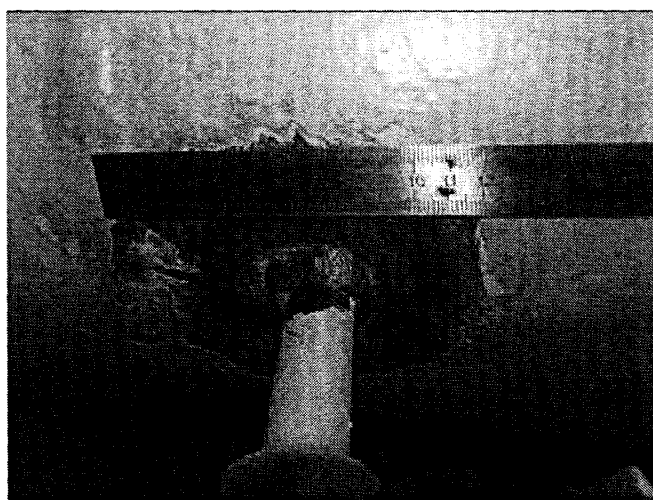
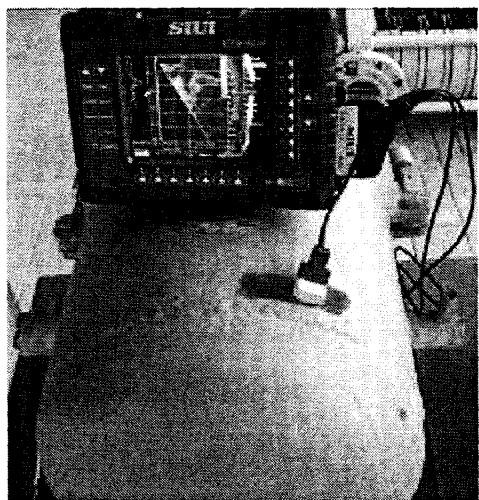


Рисунок 4.2 – Контроль якості зварних з'єднань за допомогою УЗФР

Робоча група розглянула методику контролю якості зварних з'єднань металоконструкцій і результати попередніх експериментальних досліджень та погодилася проводити промислову апробацію. Дослідження проводились на двох елементах технологічних об'єктів, які використовуються для зберігання рідких і газоподібних речовин:

- ємкість для збирання одоранта ЄО – 01.00.000;
- ємкість для збирання одоранта ЄО – 03.00.000.

Основні параметри об'єктів досліджень подані в табл. 4.4

Контроль проводився з метою перевірки стикового і кутового зварних з'єднань на наявність порушень цілісності типу «непровар», «тріщина», «пора» згідно із розробленою методикою контролю та ДСТУ ISO EN 13588:2014.

Таблиця 4.4 - Основні параметри ємкостей для збирання одоранта

Позначення	Призначення	Параметри		
		V, м ³	Ду, мм	Рy, МПа
ЄО – 01.00.000	для одоранта	2	700	2,5
ЄО – 03.00.000	для одоранта	10,8	1400	1,6

Відповідно до запропонованої методики контролю на кожній ділянці контролю проводились ультразвуковий контроль, контроль за допомогою УЗФР після чого відразу здійснювався аналіз отриманих даних.

В ході проведеного контролю та опрацювання акустичних зображень і визначенню параметру F, що визначається як відношення довжини дефекту до його ширини (у випадку $0 \leq F \leq 3$, дефект слід вважати об'ємним, якщо $3 < F < \infty$, то дефект вважають плоским) було отримано наступні результати вимірювань було отримано такі результати (наведені в таблиці 4.5).

Результати випробувань дозволяють стверджувати можливість розробленої методики виявляти дефекти у зварних з'єднання та застосувавши спеціальне програмне забезпечення ідентифікувати їх вид.

Робочою групою відзначені такі недоліки запропонованої методики контролю:

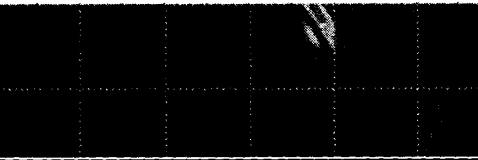
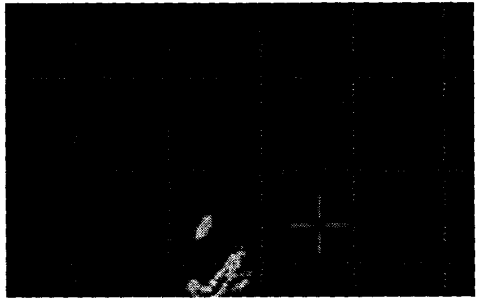
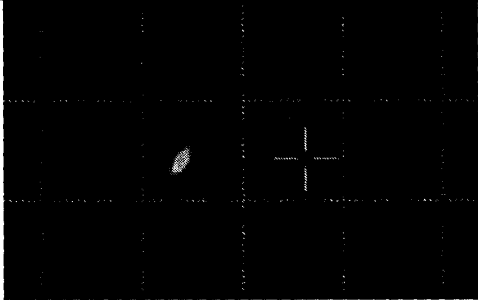
- 1) складність оцінки акустичних зображень поперечних перерізів зварного з'єднання;
- 2) необхідність зачищення поверхні контролю для забезпечення відповідної шорсткості ($R_a \geq 6,3$ мкм);
- 3) необхідність забезпечення акустичного контакту.

Робоча група пропонує:

- 1) усунути недоліки, виявлені в процесі апробації, шляхом удосконалення методики виконання контролю;
- 2) оснастити технічні засоби блоком сигналізування втрати акустичного контакту;

3) розробити спеціальне програмне забезпечення для автоматичного опрацювання даних контролю з метою визначення типу та розмірів дефектів.

Таблиця 4.5 – Результати контролю

Об'єкт контролю	Тип дефекту	Опис дефекту, глибина залягання, мм	Акустичне зображення
Ємкість для збирання одоранта 1	Плаский	підріз $h = 2$	
	Плаский	непровар в корені шва $h = 2$	
Ємкість для збирання одоранта 2	Об'ємний	газова пора $h = 4$	

Робоча група встановила, що запропонована методика контролю якості зварних з'єднань металоконструкцій успішно пройшла промислову апробацію та після урахування вказаних недоліків може бути використана для оцінки якості зварних з'єднань в умовах об'єктів нафтогазового комплексу.

Промислова дослідження також проводилася на ДП "Укравтогаз". Об'єктом контролю вибрано посудину, що працює під тиском на АГНКС-500, яка включена у вхідну лінію, за функціональним призначенням служить для збалансування перепадів тиску газу у трубопроводах (Рисунок 4.3).

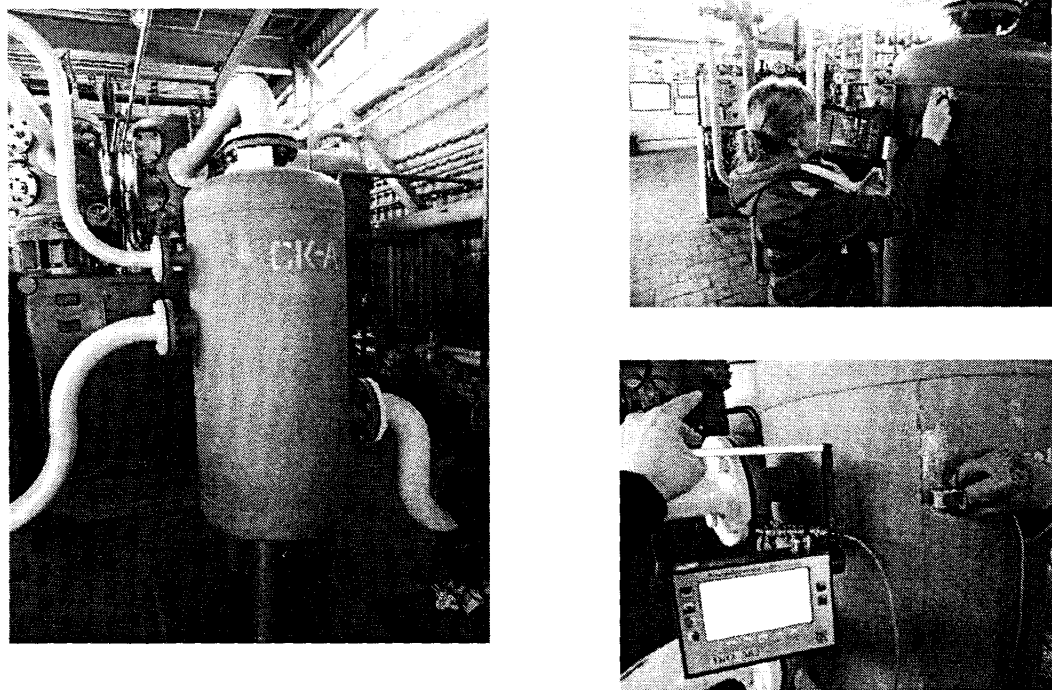


Рисунок 4.3 – Дослідження посудини СК-А за допомогою розробленої методики

Дослідження на обраному об'єкті проводились наступним чином. Для встановлення перетворювача обиралось ділянка зварного з'єднання. З біляшовної зони знімалось захисне фарбове покриття вздовж зварного з'єднання шириною 10 см, зачищались металевими щітками і протирають поверхню ганчіркою. За допомогою абразивних матеріалів поверхню контролю зачищали до значення шорсткості $R_a=6,3$ мкм. Поверхню контролю покривають шаром контактної речовини для забезпечення акустичного контакту. В ролі контактної речовини використовувався солідол жировий Ж-2.

Для проведення пошукового контролю використовувався похилий суміщений перетворювач з робочою частотою 2,5 МГц і ультразвуковий імпульсний дефектоскоп DiO 562.

Для ідентифікації порушень суцільності зварного шва перетворювач переміщався за П-подібною схемою. Про наявність дефекту свідчила поява на екрані сигналу з амплітудою, вищою за встановлений бракувальний рівень. Визначалась глибина залягання дефекту і розміщення відносно осі шва.

Для визначення типу виявленого дефекту виконувався контроль за допомогою УЗФР. Дефектоскопію виконували за допомогою 16-елементного перетворювача 5,0L16-0.5-9 з робочою частотою 5,0 МГц з похилою призмою, що підключався до портативного дефектоскопа SIUI CTS-602. Перетворювач розміщувався перпендикулярно до осі з'єднання на відстані 18 мм і плавно переміщувався паралельно його осі. Інформаційною ознакою порушення суцільності у з'єднанні є поява на екрані дефектоскопа червоної «плями». В результаті контролю одержано акустичні зображення поперечного перерізу тестового зразка (S-скани). До уваги приймалися ті зображення, амплітуда від виявленого дефекту в яких була найбільшою.

У процесі вимірювання було одержано акустичне зображення (рисунок 4.4) і визначено, що в зварному з'єднанні присутній дефект типу «несплавлення». Розміри виявленого дефекту 1,5×2,5 мм на глибині 4,6 мм. Результати експериментальних досліджень підтвердили адекватність даної технології. Основна відносна похибка вимірювань за допомогою УЗФР і ДЮ 562 встановить 5%, що є допустимим для даного виду вимірювань.

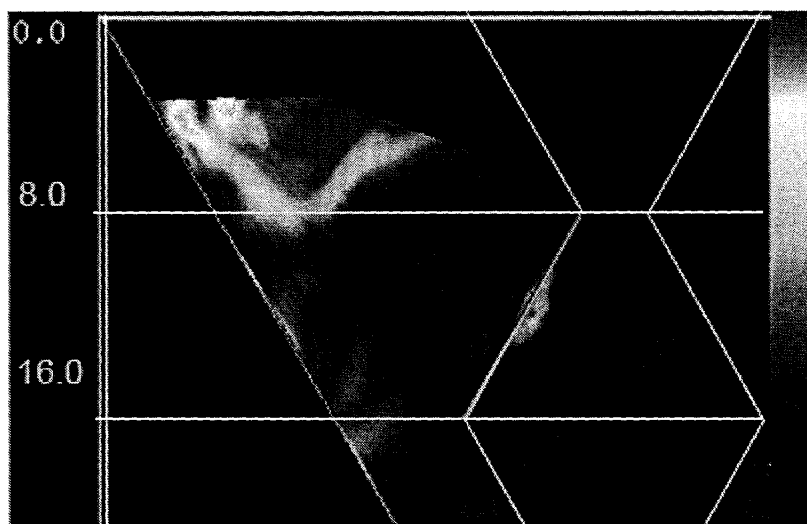


Рисунок 4.4 - Акустичне зображення виявленого дефекту

Акти промислової апробації подані в додатках Б і В відповідно.

Результати виконання дисертаційного дослідження увійшли до діючого нормативного документу ПАТ «Укртрансфат» у вигляді Додатку Є СОУ

49.5-31570412-027:2015 Магістральні нафтопроводи. Нафтоперекачувальні станції, морські термінали. технічний огляд, експертне обстеження технологічного устаткування і трубопроводів. Методи та методики (Додаток Г).

Висновки до розділу 4

Одержані в даному розділі результати дають змогу зробити такі висновки:

1) розроблено методику ідентифікації та визначення розмірів дефектів типу порушення цілісності з метою визначення фактичного технічного стану і визначення можливості подальшої експлуатації досліджуваних об'єктів.

2) проведено промислову апробацію розробленої методики визначення типу та розмірів дефектів в умовах ПАТ «Дрогобицький машинобудівний завод», м.Дрогобич, Львівської області та ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд» при проведенні робіт по експертному обстеженню технологічного обладнання ДК «Укравтогаз» на території АГНКС-500 посудини СК-А, що працює під тиском.

3) відображена практична реалізація методу виявлення та визначення типу дефектів металоконструкцій при розробленні НД, що регламентують процедуру технічного діагностування нафтового устаткування.

ВИСНОВКИ

На основі аналіз сучасних вітчизняних і закордонних публікацій, а також стану технічного забезпечення діагностування, виконаних теоретичних та експериментальних досліджень вирішено актуальне науково-прикладне завдання у галузі удосконалення ультразвукових методів контролю з метою виявлення та визначення типу і розмірів порушень суцільності шляхом розроблення і промислової апробації нового методу контролю, а саме:

1. Виконаний аналіз існуючих методів та засобів контролю металоконструкцій показав, що найбільш поширеним є акустичний контроль, недоліком якого є складність інтерпретації отриманих результатів контролю і недостатня кількість інформації про виявлений дефект, а саме його форму та дійсні розміри, що не дає можливості визначити ступінь його небезпеки для подальшої експлуатації металоконструкції. Обґрунтовано необхідність підвищення інформативності контролю та розроблення нового методу підвищення інформативності ультразвукового контролю для визначення типу і розмірів дефектів, застосування сучасних засобів контролю.

2. В результаті виконаних графо-аналітичних досліджень розроблено спосіб вибору параметрів ПЕП УЗФР, що дозволяють підвищити інформативність контролю УЗФР. Отримано аналітичну залежність для фокусування акустичної енергії на місце очікуваного дефекту для виявлення дефектів розміром від 1 мм. При групуванні дефектів, відстань між ними повинна бути не менше 2 мм для виявлення їх як окремих.

3. Розроблено новий метод оброблення дефектоскопічної інформації для визначення типів та розмірів дефектів, що полягає у опрацюванні акустичних зображень, за допомогою програмного пакету *Image J*, що дозволяє достовірно розрізняти найбільш поширені типи дефектів зварних з'єднань та визначати їх геометричні розміри з відносною похибкою до 5%.

4. Проведено експериментальні дослідження промислових об'єктів розробленим методом визначення типу дефектів металоконструкцій

(«непровар», «несплавлення», «пора») та визначення їх розмірів з похибкою 0,5 мм, що узгоджується із результатами теоретичних досліджень. Виконано порівняльні випробування розробленого та стандартного методів ультразвукової дефектоскопії в промислових умовах на діючих металоконструкціях тривалої експлуатації, яку рекомендовано застосовувати для виявлення та визначення типу дефектів трубних елементів діаметром від $ДУ \geq 80$ мм, посудин для зберігання газу та інших металоконструкцій, товщиною не менше 10 мм. Розроблена технологія увійшла до діючого нормативного документу ПАТ «Укртранснафта».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про схвалення енергетичної стратегії України на період до 2030 року [Електронний ресурс]: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.03.2006 р. № 145-р/ Кабінет Міністрів України. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=145-2006-%F0>.
2. Список країн за довжиною магістральних трубопроводів. Режим доступу: <https://goo.gl/mN680a>.
3. Глоба В. М. Основи будівництва трубопроводів: навчальний посібник / В.М. Глоба, О. Т. Мартинюк – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 2000. – 156 с.
4. Справочник по нефтепромысловому оборудованию / Под. ред. Е.И. Бухаленко – М.: Недра, 1983. – 233с.
5. Богданов Е.А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования: Учеб. пособие для вузов / Е.А. Богданов – М.: Высш. школа, 2006. – 279 с.: ил.
6. Карпаш О.М. Технічна діагностика систем нафтогазопостачання: навчальний посібник / О.М.Карпаш, М.П.Возняк, В.М.Василюк – Івано-Франківськ: Факел, 2007. – 314 с.
7. Галлямов А.К. Обеспечение надежности функционирования системы нефтепроводов на основе технической диагностики / А.К.Галлямов, К.В.Черняев, А.М.Шаммазов – Уфа: Изд-во УГНТУ, 1997. – 583 с.
8. Карпаш О. М. Технічна діагностика бурового та нафтогазового обладнання / О. М. Карпаш – Івано-Франківськ: Факел, 2007. – 272с.
9. Гумеров А.Г. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов / А.Г.Гумеров, Р.С.Гумеров, К.М.Гумеров – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 310 с.
10. Карпаш О.М. Основи забезпечення якості в нафтогазовій інженерії: навчальний посібник / О.М. Карпаш, А.В. Яворський, М.О. Карпаш - Івано-Франківськ: Факел, 2008. -439с.

11. Технічна діагностика і ресурс конструкцій після довготривалої експлуатації / О.П.Остащ, В.М.Учанін, І.М.Андрейко, І.Р.Маковійчук // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. –1999. - Вип. 4. – С. 3-8.

12. Антипьев В.Н. Оценка механической надежности магистральных газопроводов // Проблемы развития газодобывающих и газотранспортных систем отрасли и их роль в энергетике Северо-Западного региона России: Тез.докл.конф., Ухта (18-20.04.95г). – Ухта: Ухтинский индустриальный институт. – 1995. – С.160-161.

13. Иванцов О.М. Надежность магистральных нефтепроводов / О.М.Иванцов, В.И.Харитонов – М.: Недра, 1978. – 166 с.

14. Волжанин А.В. Диагностика состояния основного металла магистральных трубопроводов со сроком эксплуатации более 40 лет / А.В. Волжанин, А.И. Любомудров, Т.К. Сергеева // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2006. - №3. – С.5–13.

15. Chang James I. A study of storage tank accidents / Chang James I., Cheng-Chung Lin // *Journal of loss prevention in the process industries*». - 2006. - 19.1. – p. 51-59.

16. Pipeline Failure Causes.- Режим доступу: <http://www.corrosion-doctors.org/Pipeline/Pipeline-failures.htm>

17. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. U.S. Department of transportation. – Режим доступу: <http://www.phmsa.dot.gov/pipeline/library/data-stats>

18. Зварювання та споріднені процеси. Класифікація геометричних дефектів в металевих матеріалах. Частина 1. Зварювання плавленням (EN ISO 6520-1:2007, IDT): ДСТУ EN ISO 6520-1:2015. –[Чинний від 2016-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2016. – 58 с. - (Національний стандарт України)

19. Овчинников В.В. Дефекты сварных соединений: учеб. пособие / В.В.Овчинников - 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. - 64с.

20. Дефекты сварки: Справочник / Под ред. С.М. Новокценовой, М.И. Виноград – М.: Металлургия, 1984. – 198с.

21. Неклюдов І.М. Діагностичний контроль напружено-деформованого стану основного металу та зварних з'єднань трубопроводів енергоблоків за допомогою коерцитиметричного методу / І.М. Неклюдов, В.М.Ажажа, Л.С.Ожигов, О.Г.Руденко, О.О.Борисенко // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2004-2006 рр. – Київ: ІЕЗ ім.Є.О.Патона НАН України. – 2006. – 150 с.

22. Попов С.В. Как прозевали «слона» / С.В. Попов // Дефектоскопия. – 2002. – №12. – С.85.

23. Хромченко Ф.А. Сварные соединения трубопроводов. Диагностика и ресурс / Ф.А. Хромченко. Справочно-учебное пособие в 2-х томах. - М.: Теплотехник, 2010. - 304с.

24. Троицкий В.А. Опыт применения ультразвуковой компьютеризированной системы для оценки качества металлооборудования тепловых и атомных электростанций / В.А. Троицкий // Информ. бюллетень. – Минск: БАНК, 1995. – № 5. - С.20-30.

25. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.

26. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник / Под ред. В. В. Клюева,. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1986, – 352 с. – (в 2-х кн., кн. 2).

27. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник / Под ред. В. В. Клюева,. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1986, – 488 с. – (в 2-х кн., кн. 1).

28. Неруйнівний контроль труб нафтового сортаменту: навчальний посібник / О.М. Карпаш, П.Я. Криничний, Є.І. Крижанівський, І.Г. Мигаль, І.Й. Рибчич, Я.М. Зінчак – Івано-Франківськ: Факел, 2001. – 380 с.

29. Неразрушающий контроль: практ. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.П. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова – М.: Высшая школа, 1991. – 283 с. – («Акустические методы контроля» : в 5 кн., кн. 2).

30. Білокур І. П. Основи дефектоскопії : підручник / І. П. Білокур – К.: Азимут-Україна, 2004. – 496 с.

31. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / [Под общ. ред. В.В. Ключева]. - М.: Машиностроение, 2006 - . – (Визуальный и измерительный контроль).– 560 с.: ил.

32. Белокур И. П. Дефектоскопия материалов и изделий / И. П. Белокур, В. А. Коваленко – К.: Техника, 1989. – 192 с.

33. Шарко А.В. Современное состояние и перспективы развития акустических методов контроля прочностных свойств конструкционных материалов (обзор) / А.В. Шарко // Дефектоскопия. – 1983. – № 5. – С. 72-87.

34. Бадаян В.Г. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов / В.Г. Бадаян, Е.Г. Базулин, А.Х. Вовилкин и др. – М. Высшая школа, 2008. – 298 с.

35. McNab A. Ultrasonic phased arrays for nondestructive testing / McNab A., Campbell, M. J.// NDT international. – 1987. - 20(6).- p. 333-337.

36. Алешин Н.П. Ультразвуковая дефектоскопия : справ. Пособие / Н.П. Алешин, В.Г. Лупачев – М., Выш. школа, 1987. – 271 с.

37. Крауткремер Й. Ультразвуковой контроль материалов : справочное издание / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер – М.: Металлургия, 1991, – 752 с.

38. Trahey, Gregg E., et al. "Ultrasonic phased array imaging system with high speed adaptive processing using selected elements." U.S. Patent No. 5,331,964. 26 Jul. 1994.

39. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline. - Quebec: R/D Tech inc., 2004. - 368 p.

40. Browne B. Time of flight diffraction Ith Limitations - Actual & Perceived // NDTnet. September. 1997. Vol. 2. N9/; Geus de S.J., Dijkstra F.H., Bouma T. Advances in TOFD Inspection // Proc. of 15 World Conference on Non-Destruction Testing. 2000. 15-21 October. Rome, 2000.

41. Мелешко Н.В. Исследование и разработка технологии ультразвукового контроля сварных соединений с применением дефектоскопов, работающих с антенными решетками.: дис....канд. техн.наук. 05.11.13 /Мелешко Наталия Владимировна. – М., 2012. – 101 с.

42. ASME Code Case 2235. Режим доступа: <http://www.ndt.net/article/aipnd2009/files/orig/77.pdf/>.

43. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И.Н. Ермолов - М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.

44. Ермолов И.Н. Расчет эквивалентных размеров для некоторых имитированных дефектов / И.Н.Ермолов, А.Х. Воепилкин // Дефектоскопия. - 1998. - №4. - С.3-10.

45. Smith S.W., Trahey G.E, Two-dimensional arrays for medical ultrasound // Ultrasonic imaging.-1992. - №14. – P. 213-233.

46. Silk M.G. Ultrasonic transducers for nondestructive testing.-Bristol, Hilger, 1984. - 176 pages.

46. Sci –Chang Wooh, Lawrence Azar. Phase steering and focusing behavior of ultrasound in cementitious materials // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 1999. - Vol.18. - P.2161-2168.

47. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л.Бергман - М.: ИЛ, 1957. - 727 с.

48. Ермолов И.Н. Расчет эквивалентных размеров для некоторых имитированных дефектов / И.Н.Ермолов, А.Х. Воепилкин // Дефектоскопия. - 1998. - №4. - С.3-10.

49. Popovych O. Signal Processing Approach for Defect Classification Detected Using Ultrasonic Phased Array / O.Popovych, M.Karpash // 11th European

Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), October 6-10, 2014, Prague, Czech Republic.

50. O.Popovych. Advantages of ultrasonic phased array for corrosion inspection in oil and gas industry / O.Popovych, V.Popovych, M.Karpash // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. -2014. - №10. - С.576-578.

51. Попович О.В. Лінійне сканування з'єднань за допомогою перетворювачів з фазованими решітками / О.В. Попович, М.О. Карпаш // Матеріали VIII міжнародної конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології». -20-22.05.2015, смт Ворзель, Київська обл. – 2015. – С.191.

52. Bulavinov, A., et al. Sampling phased array a new technique for signal processing and ultrasonic imaging // Insight – Nondestructive Testing and Condition Monitoring. 2008. – 50. №3. – P.153-157.

53. Von Ramm O., Smith S.W. Beam steering with linear arrays // IEEE Trans Biomed Eng. – 1983. - ВМЕ - 30(8). – P. 438-452.

54. Скорость звука и структура сталей и сплавов / В.В. Муравьев, Л.Б. Зуев, К.Л. Комаров – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1996. - 184 с.

55. Меркулов Л.Г. Поглощение и диффузионное рассеяние ультразвука в металлах / Л.Г. Меркулов // ЖТФ. - 1957. – Т. 27. - №5. – С. 1045.

56. Hatfield, J. V., et al. An integrated multi-element array transducer for ultrasound imaging // Sensors and Actuators A: Physical. – 1994. - 41.1 – P. 167-173.

57. Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Частина 1. Загальні вимоги (EN 583-1:1998, IDT): ДСТУ EN 583-1-2001. – [Чинний від 2001-12-28]. – К.: Держстандарт України, 2001 – 16 с. - (Національний стандарт України).

58. Мазур И.И. Безопасность трубопроводных систем / И.И. Мазур, О.М. Иванцов – М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. – 1104 с., ил.

59. Промышленная безопасность и надёжность магистральных трубопроводов / А.И.Владимиров, В.Я. Кершенбаум – М.: Национальный институт нефти и газа, 2009. – 696 с.

60. Патон Б.Є. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2013—2015 рр. / Б.Є. Патон - Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2015. – 816 с.

61. Junshan Gao, Ke Wang. Study on the technology of ultrasonic imaging detection based on phased array // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Patern Recognition. -2013. - Vol. 8, No.5. - P.71-78.

62. Popovych O. Ultrasonic phased array application during technical diagnostics of oil and gas industry elements /O. Popovych, M. Karpash// Научные известия. Научные известия “NDT days 2015”. SCIENTIFIC PROCEEDINGS. XXIII (*Болгария*). – 2015. - №2 (165). – С. 26 – 28.

63. Гурвич А.К. Ультразвуковой контроль сварных швов / А.К.Гурвич, И.Н.Ермолов – К.:Техніка, 1972 – 460 с.

64. Харитонов А.В. Развитие и проблемы теории нормальных волн в ультразвуковой дефектоскопии / А.В.Харитонов // Дефектоскопия. - 1979, - №7, - С.59-67.

65. Качанов В.К. Использование радиолокационных сигналов и методов обработки в ультразвуковой дефектоскопии композиционных материалов / В.К.Качанов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1995. – №2. – С. 3-17.

66. Шрайбер Д.С. Ультразвуковая дефектоскопия / Д.С. Шрайбер - М.:Металлургия, 1965. - 392с.

67. Карпаш М.О. Підвищення чутливості акустичного методу неруйнівного контролю матеріалів / М.О.Карпаш // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2011. - №4. – с. 39-43.

68. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. И.П. Голямина - М.: Советская энциклопедия, 1979. -400с.

69. Котурбаш Т.Т. Ідентифікація типів порушень суцільності в ході ультразвукового контролю / Т.Т.Котурбаш, М.О.Карпаш, І.В. Рибіцький // Матеріали XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» ЛЕОТЕСТ-2012. – м.Славське Львівської області, 20-25 лютого 2012 року. – С.105-108.

70. Popovych O.V. Development of ultrasonic phased array technology for identification weld defects and determination of their geometrical dimensions / O.V. Popovych, M.O. Karpash // Праці конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування», м. Тернопіль.-2015 – С.88-90.

71. Попович О.В. Разработка методики оценки сварных соединений металлоконструкций с помощью ультразвуковых фазированных решеток /О.В. Попович// Научные известия “NDT days 2016”. SCIENTIFIC PROCEEDINGS. XXIV (*Болгария*). – 2016. - №1 (175).– С. 32 – 36.

72. Волченко В.Н. Вероятность и достоверность оценки качества металлопродукции / В.Н. Волченко - М.: Металлургия, 1979. - 88 с.

73. Белый В.Е. Выявляемость реальных плоскостных дефектов при различных вариантах прозвучивания / В.Е.Белый, В.Г. Щербинский // Дефектоскопия. – 1980. - №9. - С.89-90.

74. Горюнов А.А. Обратные задачи рассеяния в акустике / А.А.Горюнов, А.В.Сосковец - М.: Изд-во МГУ, 1989. - 152 с.

75. Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Налаштування чутливості і діапазону розгортки (EN ISO 16811:2014, IDT): ДСТУ EN ISO 16811-2015. – [Чинний від 2016-01-01]. – К.: Держстандарт України, 2015 – 50 с. - (Національний стандарт України).

76. Плис А.И. К вопросу о прямом восстановлении пространственной структуры акустических источников / А.И.Плис, М.В.Бабин, В.А. Железняков // Письма в ЖТФ. – 1981. - №2.- С.83-86.

77. Magginness M.G., Kay L. Ultrasonic imaging in solids // Radio a. Electron. Engine. - 1971. - V.41. - №2. - P.91-93.

78. Hanstead P.D. A new technique for ultrasonic imaging // Brit. J. NDT. -

1979. - V. 21. - №4. - P.212-213.

79. Буров В.А. Акустическая томография и дефектоскопия как обратная задача рассеяния / В.А.Буров, О.Д.Румянцева, А.В. Сасковец // Вестник МГУ, Сер.3. – 1994. - Т. 35. - №6. - С. 52-57.

80. Основні норми взаємозамінності. Шорсткість поверхні. Терміни та визначення: ДСТУ 2413-94. – [Чинний від 1995-01-01]. - К.: Держстандарт України, 1994 - 37с.- (Національний стандарт України).

81. Образцы шероховатости поверхности (сравнения). Общие технические условия: ГОСТ 9378-93. – [Действующий с 1997-01-01]. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1993 – 12с. – (Межгосударственный стандарт).

82. Миндюк В.Д. Експериментальна перевірка характеру зв'язку між параметрами мікроструктури і фізичними властивостями матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації для оцінки ступеню їх деградації / В.Д. Миндюк, М.О. Карпаш, Е.Р. Доценко // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2013. - №3 (71). – С. 153 – 163.

83. Гурвич А.К. Новый информационный признак формы дефекта / А.К.Гурвич, Г.Я.Дымкин, С.Р. Цомук // Дефектоскопия. – 1990. - № 11. - С. 3-7.

84. Акустическая В- и С-томография крупноструктурных материалов импульсным эхо-методом / В.Н. Козлов, А.А.Самокрутов, Н.Н.Яковлев, А.В.Ковалев, В.Г. Шевалдыкин // Приборы и системы управления. - 1989. - №7. - С. 21-23.

85. Silk M.G. The use of diffraction based time-of-flight measurements to locate and size defects/ M.G. Silk// Brit. J. of NDT. - 1984.- V.26. - P. 208-213.

86. Devaney A.J. Inverse source and scattering problems in ultrasonic/ A.J. Devaney // IEEE Trans on Sonic and Ultras. – 1983.- V.SU-30, N6. - P.355-364.

87. Aldridge E.E. Ultrasonic holography in the inspection of rotor forging/

E.E. Aldridge, A.B. Clare, D.A. Shepherd, C.C. Brown// NDT Int. – 1977. - V. 10. - №3. - p. 115-120.

88. Gallagher N.C. Optimum quantization and relative information content of holographic magnitude and phase / N.C. Gallagher // Acoustic imaging and holography. – 1979. - V.1. - №2. - p. 119-132.

89. Mike J.S. Defect detection in pipes using guided waves / J.S Mike, N. David, P.Cawley // *Ultrasonics*. – 1998. - 36.1. – p. 147-154.

90. Wooh, Shi-Chang, and Ji-Yong Wang. "Ultrasonic defect detection system." U.S. Patent No. 6,382,028. 7 May 2002.

91. Кісіль І. С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань: Навчальний посібник / І. С. Кісіль – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400 с.

92. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов / Под редакцией проф. Вopilкина А.Х. - М.: «Машиностроение», 2008. - 368 с.

93. Рекомендації по проведенню неруйнівного контролю бурового обладнання: ГСТУ 320.02829777.013-99 – [Чинний від 2000-05-01]. – Міністерство енергетики України, 2000. – (Галузевий стандарт України).

94. Попович О.В. Разработка методики оценки сварных соединений металлоконструкций с помощью ультразвуковых фазированных решеток / О.В. Попович // Научные известия “NDT days 2016”. SCIENTIFIC PROCEEDINGS. XXIV (*Болгария*). – 2016. -№1 (175). – С. 32 – 36.

95. Попович О.В. Удосконалення ультразвукового методу контролю для визначення виду дефектів зварних з'єднань / О.В. Попович // Методи та приладу контролю якості. - 2016. - №.1(36) – С.10-16.

96. Попович О.В. Підхід до технічного діагностування вертикальних сталевих циліндричних резервуарів / О.В.Попович, Л.Я. Жовтуля // Матеріали 15-ої міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи».- 17-18 травня, Київ. – 2016. - С.163-164.

97. Титов В. Ю. Совершенствование метрологического обеспечения ультразвукового контроля с фазированными решетками : дис. канд. техн. наук: 05.11.13 / Титов Вячеслав Юрьевич – Москва, 2015. – 146 с.

98. Володарський Є.Т. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: навчальний посібник / Є.Т.Володарський, В.В.Кухарчук, В.О.Поджаренко, Г.Б.Сердюк -Вінниця: ВДТУ, 2001. –219с.

99. Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Технічні умови на калібрувальний зразок №2 (EN ISO 7963:2010, IDT): ДСТУ EN ISO 7963:2016) – [Чинний від 2016 – 08-01]. – К.: Держспоживстандарт, 2016 – 9с.– (Державний стандарт України).

100. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник; [под ред. В. В. Клюева.]. – [2-е изд.]. – М.: Машиностроение, 1986, – 352 с. – (в 2-х кн., кн. 2).

101. Грановский В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

ДОДАТКИ

Додаток Б

Акт промислової апробації методики оцінки якості зварних з'єднань металоконструкцій за допомогою технології ультразвукових фазованих решіток в умовах ПАТ «Дрогобицький машинобудівний завод»

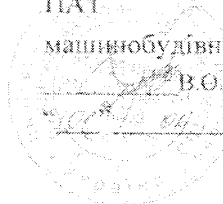
ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ПАТ «Дрогобицький
машинобудівний завод»

В.О. Ільницький

2016 р.



АКТ

промислової апробації методики оцінки якості зварних з'єднань
металоконструкцій за допомогою технології ультразвукових фазованих
решіток

Робоча група в складі:

голови – Ільницького В.О. – директора ПАТ «Дрогобицький машинобудівний завод», м.Дрогобич.

і членів робочої групи:

- 1 Круп'як Р.Я. – начальник відділу якості і метрології ПАТ «Дрогобицький машинобудівний завод», м. Дрогобич.
- 2 Попович О.В. – науковий співробітник НДІ НГЕІЕ,
- 3 Мовчан Ю.В. начальник ВДЦ ВПС ТОВ Науково-виробничої фірми «Зонд», II рівень по UT 26979, дійсне до 22.05.2016 р..

склала цей акт про таке:

1 07.05.2016 р. робоча група здійснила апробацію методики контролю якості зварних з'єднань елементів блоку очистки газу та емкостей для збирання одоранта з використанням запропонованої методології.

2 Робочій групі були надані:

- методика оцінки якості зварних з'єднань металоконструкцій;
- результати попередньо проведених експериментальних досліджень в спеціалізованій лабораторії неруйнівного контролю кафедри енергетичного менеджменту і технічної діагностики ІФНТУНГ;
- дефектоскоп SIUI CTS-602 (рис.1), дефектоскоп DIO-562, товщиномір УТ-31.

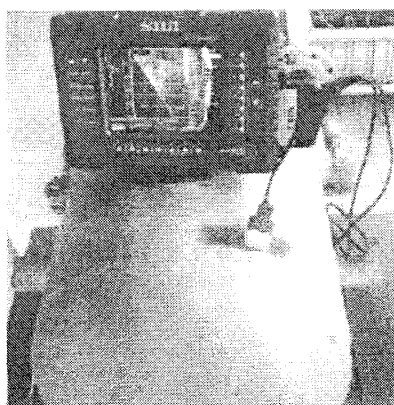


Рисунок 1 – Контроль якості зварних з'єднань за допомогою технології ультразвукових фазованих решіток

3 Робоча група розглянула методику контролю якості зварних з'єднань металоконструкцій і результати попередніх експериментальних досліджень та погодилася проводити промислову апробацію.

4 Робоча група провела апробацію методики контролю якості зварних з'єднань технологічних об'єктів на території ПАТ «Дрогобицький машинобудівний завод», м.Дрогобич.

5 Дослідження проводились на двох елементах технологічних об'єктів:

- смієть для збирання одоранта С0 – 01.00.000;

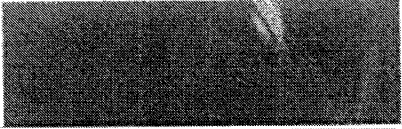
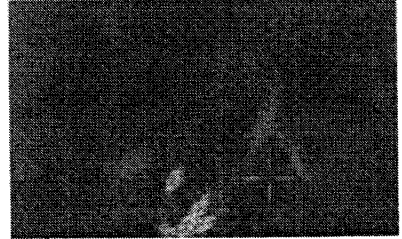
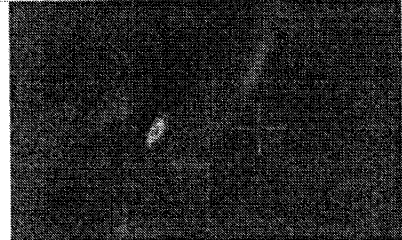
- смієть для збирання одоранта С0 – 03.00.000.

6 Контроль проводився з метою перевірки стикових зварних з'єднань на наявність порушень цілісності згідно із розробленою методикою контролю та ДСТУ ISO EN 13588:2014.

7 Відповідно до запропонованої методики контролю на кожній ділянці контролю проводилися вимірювання за допомогою технології ультразвукових фазованих решіток, ультразвуковий контроль, після чого відразу здійснювався аналіз отриманих даних.

8 В ході проведеного контролю було отримано наступні результати (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати контролю за допомогою технології ультразвукових фазованих решіток

Об'єкт контролю	Тип дефекту	Опис дефекту	Акустичне зображення
Ємкість для збирання одоранта 1	Підріз	$h = 2 \text{ мм}$	
	Непровар в корені шва	$h = 2 \text{ мм}$	
Ємкість для збирання одоранта 2	Газова пора	$\phi 2 \text{ мм}$	

Результати випробувань дозволяють стверджувати можливість розробленої методики виявляти дефекти у зварних з'єднання та застосувавши спеціальне програмне забезпечення ідентифікувати їх вид.

9 Робочою групою відзначені такі недоліки запропонованої методики контролю:

1) складність оцінки акустичних зображень поперечних перерізів зварного з'єднання;

2) необхідність зачищення поверхні контролю для забезпечення відповідної шорсткості ($R_a \geq 6,3 \text{ мкм}$);

3) необхідність забезпечення акустичного контакту.

10 Робоча група пропонує:


1) усунути недоліки, виявлені в процесі апробації, шляхом удосконалення методики виконання контролю;

2) оснастити технічні засоби блоком сигналізування втрати акустичного контакту;

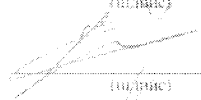
3) розробити спеціальне програмне забезпечення для автоматичного опрацювання даних контролю з метою визначення типу та розмірів дефектів.

II Робоча група встановила, що запропонована методика контролю якості зварних з'єднань металоконструкцій успішно пройшла промислову апробацію та після урахування вказаних недоліків може бути використана для оцінки якості зварних з'єднань в умовах об'єктів нафтогазового комплексу.


Члени робочої групи




 (підпис)



 (підпис)



 (підпис)



 (підпис)

В.О. Ільницький

(підпис, прізвище)

Р. Я. Круп'як

(підпис, прізвище)

О.В. Попович

(підпис, прізвище)

Ю.В. Мовчан

(підпис, прізвище)

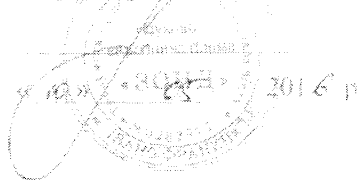
Додаток В

Акт промислової апробації методики контролю металоконструкцій на наявність дефектів типу порушення цілісності в умовах ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ЦВФ «Зонд»

Гацакович І.І.



АКТ № 58

вировадження результатів дисертаційної роботи

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю

05.11.13 – Розроблення методики контролю металоконструкцій на наявність дефектів типу порушення суцільності в процесі експлуатації

аспіранта кафедри технічної діагностики та моніторингу

Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Попович Ольги Василівни

Комісія у складі:

голови – Гацаковича Назарія Любомировича – к.т.н., директора ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд»

і членів комісії:

1 Власійчука Івана Михайловича – головного інженера ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд»

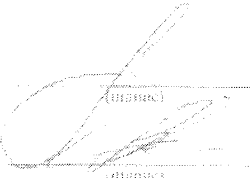


2 Мовчана Юрія Володимировича – начальник відділу випробувально-діагностичного центру (ВДЦ) вантажопідіймальних споруд (ВПС) ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд» (II рівень VT посв. № 28805, УГ № 26979, МТ № 27317).

3 Яков'юка Віталія Богдановича – провідний інженер ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд» (II рівень VT посв. № 26980, РТ № 27118, МТ № 27318)

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження (методика контролю металоконструкцій на наявність дефектів типу порушення цілісності) Попович Ольги Василівни використані фахівцями ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд» при проведенні робіт з експертного обстеження технологічного обладнання і трубопроводів на території лінійної виробничо-диспетчерської станції «Броди», філії «Магістральні нафтопроводи «Дружба» ПАТ «Укртранснафта» (договір №460НК/2013 від 20 травня 2013 року), посудин під тиском, бурового обладнання на об'єктах ТОВ «Полтавська бурова компанія» (договір № 792 НК/2016 від 03 лютого 2016 року та № 862 НК/2016 від 27 квітня 2016 року), неруйнівний контроль цистерн для зрідженого вуглеводневого газу під час реконструкції в умовах Долинської експлуатаційної дільниці ПАТ «Укрспецтрансгаз» (договір № 802НК/2016 від 01 березня 2016 року).

В подальшому планується застосування результатів дисертаційного дослідження Попович О. В. фахівцями ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд» при контролі фактичного технічного стану матеріалу металоконструкцій шляхом виявлення та визначення типу дефектів порушення цілісності.

Комісія


 (підпис)

 (підпис)

 (підпис)

Н. Л. Гацакович

(підпис, прізвище)

І. М. Власійчук

(підпис, прізвище)

Ю. В. Мовчан

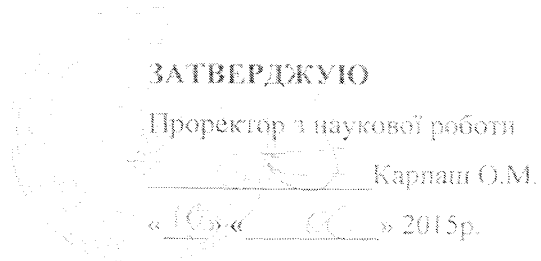
(підпис, прізвище)

В. Б. Яков'юк

(підпис, прізвище)

Додаток Г

Акт впровадження результатів роботи у навчальний процес кафедри ЕМ і ТД ІФНТУНГ



АКТ

впровадження в навчальний процес
результатів дисертаційної роботи на тему «Підвищення інформативності
акустичних методів дефектоскопії металоконструкцій тривалої експлуатації»
Попович О.В.

В результаті виконання асистентом кафедри енергетичного менеджменту і технічної діагностики Попович Ольгою Василівною дисертаційної роботи одержані нові наукові та прикладні результати, які активно використовуються на кафедрі «Енергетичного менеджменту і технічної діагностики».

Зокрема:

- при проведенні лабораторних занять з дисципліни: «Методи і засоби неруйнівного контролю» для студентів спеціальності ТЗ (5-ий курс);
- при проведенні лабораторних та практичних занять з дисципліни «Контроль якості зварювання» для студентів спеціальності ТЗВ (4-ий курс);
- при проведенні лабораторних занять з дисципліни «Технічна діагностика бурового та нафтогазопромислового обладнання» для студентів спеціальності НБ, НО (4-ий курс).

Директор енергетичного інституту

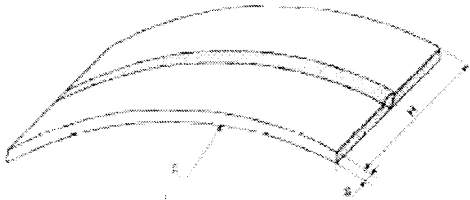
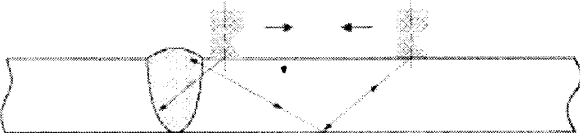
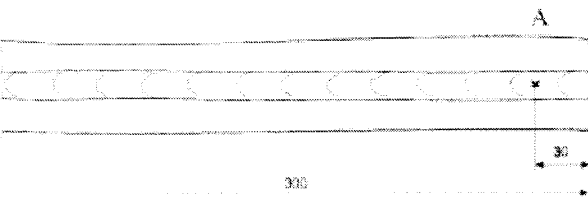
Середок О.С.

Завідувач кафедри ЕМ і ТД

Райтер П.М.

Додаток Д

Паспорти екзанаційних зразків зварних з'єднань для ультразвукового контролю

<p>"ЗАТВЕРДЖУЮ"</p> <p>Керівник ОСЛ</p> <p><i>[Підпис]</i></p> <p>В.Г. Радько</p> <p>30.08.93р.</p> <p>Для документів</p> <p style="text-align: center;">ПАСПОРТ № 132</p> <p style="text-align: center;">ЕКЗАМЕНАЦІЙНОГО ЗРАЗКА</p>	<p>"ЗАТВЕРДЖУЮ"</p> <p>Директор НВФ "ЗОНД"</p> <p><i>[Підпис]</i></p> <p>М. Карлаш</p> <p style="text-align: center;">ПАСПОРТ № 132</p> <p style="text-align: center;">ЕКЗАМЕНАЦІЙНОГО ЗРАЗКА</p>
<p>Рисунок екзанаційного зразка</p>  <p>$L = 295 \text{ мм}$ $S = 13 \text{ мм}$ $H = 300 \text{ мм}$</p> <p>Схема прозвучування</p>  <p>Дефектограма</p>  <p>$A = U_a = 24 \text{ дБ}$ $\Delta L = 7 \text{ мм}$ $x = 13 \text{ мм}$ $y = 23,1 \text{ мм}$ $\Delta H = 1,4 \text{ мм}$ $\Delta X = 3 \text{ мм}$</p>	<p>Ідентифікаційний номер</p> <p style="text-align: center;">№ 132</p> <p>Марка матеріалу</p> <p style="text-align: center;">Сталь 10</p> <p>Якість поверхні</p> <p style="text-align: center;">без обробки</p> <p>Метод контролю</p> <p style="text-align: center;">ІТ</p> <p>П'єзоперетворювач</p> <p style="text-align: center;">П121-Б, 5-65-002</p> <p>Заводський номер</p> <p style="text-align: center;">№ 35 88 4</p> <p>Марка дефектоскопа</p> <p style="text-align: center;">УД2-12</p> <p>Заводський номер</p> <p style="text-align: center;">4773</p> <p>Відомості про перевірку</p> <p style="text-align: center;">повільний (10, 11, 9 мм) Швидкість сканування: 2500</p> <p><i>Режими настройки апаратури:</i></p> <p>Стандартний зразок підпр.</p> <p style="text-align: center;">341 Н14</p> <p>Тип і розмір відбивача</p> <p style="text-align: center;">Зарубка 2,0x1,5 мм</p> <p>Контрольна чутливість</p> <p style="text-align: center;">24 ± 4 дБ</p> <p>Частота</p> <p style="text-align: center;">2,5 МГц</p> <p style="text-align: center;">НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА "ЗОНД" Атестаційний центр НК</p> <p>Зразок розробив:</p> <p><i>[Підпис]</i> П.Я. Кричинний (III рівень кваліфікації)</p> <p>Зразок перевірили:</p> <p><i>[Підпис]</i> І.І. Цюцяк (II рівень кваліфікації)</p> <p><i>[Підпис]</i> М.В. Буній (III рівень кваліфікації)</p> <p>Дата проведення перевірки <u>23.08</u> 199<u>3</u>р.</p>

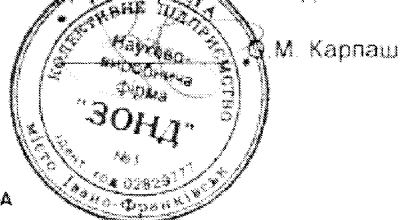
"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Керівник ОСП



"ЗАТВЕРДЖУЮ"

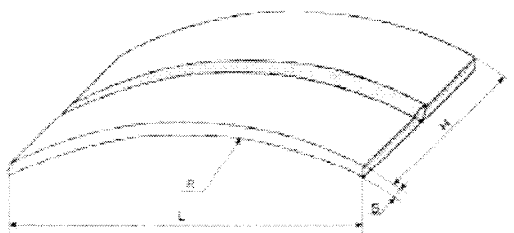
Директор НВФ "ЗОНД"



ПАСПОРТ № 177

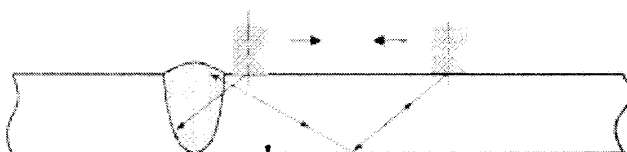
ЕКЗАМЕНАЦІЙНОГО ЗРАЗКА

Рисунок екзменаційного зразка

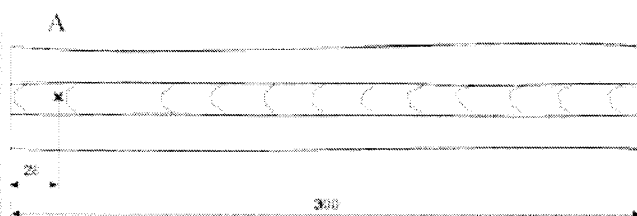


$L = 280 \text{ мм}$ $S = 17 \text{ мм}$
 $R = 220 \text{ мм}$

Схема прозвучування



Дефектограма



А: $U_d = 28 \text{ дБ}$
 $\Delta L = 25 \text{ мм}$
 $x = 45,6 \text{ мм}$
 $y = 32,4 \text{ мм}$
 $\Delta H = 15 \text{ мм}$
 $\Delta X = 35 \text{ мм}$

Ідентифікаційний номер

№ 177

Марка матеріалу

Сталь 10

Якість поверхні

без обробки

Метод контролю

УТ

П'єзоперетворювач

П131-2,5-65-002

Заводський номер

№ 35 ВВ 4

Марка дефектоскопа

УД2-12

Заводський номер

4773

Відомості про перевірку

перевіряв: П.Я. Криничий
 вивіряв: М.В. Буній

Режими настройки апаратури:

Стандартний зразок підпр.

307 К18

Тип і розмір відбивача

Варушка 2,0x1,5 мм

Контрольна чутливість

 $20 \pm 4 \text{ дБ}$

Частота

2,5 МГц

НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА "ЗОНД"
 Атестаційний центр НК

Зразок розробив:

П.Я. Криничий (п.р.к. квалифікації)

Зразок перевірили:

І.І. Цюцяк (п.р.к. квалифікації)

М.В. Буній (п.р.к. квалифікації)

Дата проведення перевірки 30.06.1997р.