

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту

Милимончак Василь Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 532.6.08

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Тема: Удосконалення ультразвукового методу контролю зварних швів полімерних
труб

(назва роботи)

152 Метрологія та вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

(шифр і назва спеціальності)

В. В. Милимончак

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Чуйко Мирослава Михайлівна, к.т.н., доцент

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІВТЕМ

Доц. _____

В.С. Цих

(посада)

(підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада)

(підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів
мають посилання на відповідне джерело

м. Івано-Франківськ – 2025 рік

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень другий (магістерський)

Спеціальність 175- Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТЕМ

В.С. Цих

« » 2025 року

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

Милимончаку Василю Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи Удосконалення ультразвукового методу контролю зварних швів полімерних труб

Верівник роботи Чуйко Мирослава Михайлівна, к.т.н, доц.

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

Затверджені наказом закладу вищої освіти від “05” 12.2025 року № 752/7

Строк подання студентом роботи 24.12.2025р.

Вихідні дані до роботи: об'єкт контролю — полімерні труби діаметром 125-150 мм, тиск газу або рідини у трубопроводі до 5 МПа, товщина стінки 7–20 мм

- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно вирішити)

Класифікація видів полімерних труб та аналіз існуючих методів і засобів контролю їх стану

Математичне моделювання процесу ультразвукового контролю полімерних труб з використанням фазованих решіток

Розроблення конструкції пристрою та методик контролю зварних з'єднань полімерних труб

- Метрологічний аналіз методу контролю якості зварних з'єднань поліетиленових труб

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

Конструкція перетворювача на фазованих решітках

Керування рухом променя фазованої решітки

Грама напрямленості фазованої решітки

- Контроль терморезисторного зварного з'єднання

Структурна схема дефектоскопа на фазованих решітках

Схема нагромадження невизначеності при УЗ контролі

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	зав. пр.
нормоконтроль	Білішук В.Б., доцент каф. ІВТЕМ		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Пр.
1.	<i>Класифікація видів полімерних труб та аналіз існуючих методів і засобів контролю їх стану</i>	08.12.2024	
2.	<i>Математичне моделювання процесу ультразвукового контролю полімерних труб з використанням фазованих решіток.</i>	11.12.2024	
3.	<i>Розроблення конструкції пристрою та методик контролю зварних з'єднань полімерних труб</i>	13.12.2024	
4.	<i>Метрологічний аналіз методу контролю якості зварних з'єднань поліетиленових труб</i>	16.12.2024	
5.	<i>Оформлення пояснювальної записки магістерської роботи</i>	18.12.2024	
6.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу магістерської роботи</i>	23.12.2024	

Студент _____
(підпис)

Милимонча
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Чуйко
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 86 с., 6 табл., 15 рис., 6 дод., 43 джерела, 7 арк. креслень.

Об'єкт дослідження — процес контролю технічного стану зварних швів полімерних труб.

Предмет дослідження — методи та засоби ультразвукового контролю зварних швів полімерних труб із використанням технології фазованих решіток.

Мета роботи — розроблення удосконаленого ультразвукового методу контролю зварних швів полімерних труб.

Методи дослідження — теорія вимірювання, теорія ультразвукового неруйнівного контролю, теорія розповсюдження звукового поля, теорія побудови фазованої решітки, математичний аналіз та моделювання процесу проходження ультразвукових коливань у полімерних матеріалах.

Розглянуті особливості двох типів зварних з'єднань полімерних труб: нагрітим інструментом встик і терморезисторного. Наведені характеристики дефектів з'єднань, їх загальні конфігурації та можливі місця розташування. З огляду на властивості матеріалу об'єкту контролю та конструкцію зварних з'єднань, визначена можливість проведення ультразвукового контролю. Обґрунтований вибір фазованих решіток і подані переваги даної технології, що дозволяють подолати обмеження ультразвукового контролю з'єднань поліетиленових труб.

Здійснено математичне моделювання формування ультразвукових променів, акустичного поля перетворювача на фазованих решітках, фокусування променя та формування часових затримок.

На основі результатів розроблено структурну схему ультразвукового дефектоскопа з можливістю проведення технічної діагностики фазованими решітками. Визначено вплив параметрів перетворювача на фазованих решітках на можливість виявлення дефектів. Запропоновані вдосконалені методики

контролю якості зварних швів поліетиленових труб з аргументацією вибору частоти перетворювача, кількості п'єзоелементів фазованої решітки, способу управління променем.

ЗВАРЮВАННЯ НАГРІТИМ ІНСТРУМЕНТОМ ВСТИК,
ПОЛІЕТИЛЕНОВІ ТРУБИ, ТЕРМОРЕЗИСТОРНЕ ЗВАРЮВАННЯ,
УЛЬТРАЗВУКОВИЙ КОНТРОЛЬ, ФАЗОВАНІ РЕШІТКИ

ABSTRACT

Master's degree work: 86 pp., 6 tables, 15 figures, 6 appendixes, 43 references, 7 sheets of drawing.

Object of study — technical state inspection process of welded joints in plastic pipes.

Subject of study — ultrasonic phased array inspection methods and means of welded joints in plastic pipes.

Purpose of the work — development of improved ultrasonic testing method of welded joints in plastic pipes.

Methods of study — measurement theory, ultrasonic testing theory, sound field propagation theory, phased array construction theory, mathematical analysis and modeling of ultrasonic vibrations transmission in plastic materials.

Two types of welded joints in plastic pipes are studied: butt fusion and electrofusion. The joints flaws characteristics, generalized constructions and possible locations are presented. Despite the properties of the inspection object material and the construction of welded joints, the possibility of ultrasonic testing is determined. The choice of phased arrays which allow overcoming the ultrasonic inspection of joints in polyethylene pipes restrictions are substantiated and the advantages of this technology are presented.

The mathematical modeling of the ultrasonic rays formation taking into account the phased array transducer acoustic field, the beam focusing, and time delay formation is carried out.

Basing on the results there was developed a block diagram of an ultrasonic flaw detector with the possibility of realization phased array inspection. An effect of phased array transducer parameters on the possibility of detecting flaws is determined. The improved quality control methods for welded joints in polyethylene pipes with

argumentation of transducer frequency choice, a number of piezoelectric elements in phased array and also the way of beam control are offered.

BUTT FUSION, POLYETHYLENE PIPES, ELECTROFUSION,
ULTRASONIC TESTING, PHASED ARRAY

ЗМІСТ

Вступ.....	100
1 Класифікація видів полімерних труб та аналіз існуючих методів і засобів контролю їх стану.....	144
1.1 Характеристика пластмасових труб.....	144
1.2 Методи з'єднання пластмасових труб	188
1.3 Дефекти з'єднань поліетиленових труб та причини виникнення дефектів .	222
1.3.1 Види руйнувань поліетилену.....	222
1.3.2 Дефекти зварювання нагрітим інструментом встик	243
1.3.3 Дефекти терморезисторного з'єднання	274
1.4 Методи контролю якості зварних з'єднань поліетиленових труб	29
1.5 Обґрунтування та постановка задач магістерської роботи.....	344
2 Математичне моделювання процесу ультразвукового контролю полімерних труб з використанням фазованих решіток.....	355
2.1 Обґрунтування принципу сканування ультразвуковим променем із використанням фазованих решіток	355
2.2 Просторово-часові характеристики лінійних фазованих решіток	377
2.3 Формування ультразвукових променів сканування	422
3 Розроблення конструкції пристрою та методик контролю зварних з'єднань полімерних труб	522
3.1 Розроблення структурної схеми ультразвукового дефектоскопа на фазованих решітках	522
3.2 Аналіз способів керування випромінюванням та прийомом ультразвукових сигналів	566
3.2.1 Особливості керування променем і відображення результатів	566
3.2.2 Прийом сигналів перетворювачем на фазованих решітках	588
3.3 Розроблення способу вибору параметрів ультразвукових фазованих решіток залежно від параметрів об'єкту контролю	59

3.4 Розроблення методики ультразвукового контролю стикових зварних з'єднань поліетиленових труб	62
3.5 Розроблення методики ультразвукового контролю терморезисторних зварних з'єднань поліетиленових труб.....	65
4 Метрологічний аналіз методу контролю якості зварних з'єднань поліетиленових труб	711
4.1 Аналіз факторів, що впливають на точність ультразвукового контролю	711
4.2 Вплив параметрів фазованої решітки на можливість виявлення відбивачів..	744
4.3 Оцінка достовірності пропонованого методу контролю	766
Висновки	800
Перелік посилань на джерел	822
ДОДАТКИ.....	825
Додаток Б Зварювання поліетиленових труб різними методами.....	88
Додаток В Вплив параметрів фазованої решітки на напрямленість перетворювача	90
Додаток Г Введення ультразвукового променя у об'єкт контролю	Ошибка!
Закладка не определена.	
Додаток Д Форма протоколу перевірки зварних з'єднань поліетиленових труб...	95
Додаток Е Настроювання чутливості контролю та вибір параметрів контролю ...	98
Додаток Ж Контроль терморезисторного з'єднання фазованими решітками	91
Додаток К Вплив параметрів налаштування давача на виявлення відбивачів	96
Бібліографічна довідка.....	99

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП	—	аналого-цифровий перетворювач
ГЗІ	—	генератор зондуючих імпульсів
ЗТВ	—	зона термічного впливу
ІХН	—	імпульсна характеристика напрямленості
ОК	—	об'єкт контролю
ПВХ	—	полівінілхлорид
ПВЩ	—	поліетилен високої щільності
ПЕ	—	поліетилен
ПЕП	—	п'єзоелектричний перетворювач
ПЧХ	—	просторово-часова характеристика
НК	—	неруйнівний контроль
УЗ	—	ультразвуковий
ФР	—	фазована решітка
ХН	—	характеристика напрямленості
ЧРЧ	—	часове регулювання чутливості
ЧХ	—	часова характеристика

ВСТУП

Актуальність теми. Застосування поліетилену (ПЕ) для виготовлення труб газо- та водопостачання спричинило докорінні зміни галузі будівництва трубопроводів у всьому світі. У більшості держав понад 90% трубопровідних розподільних мереж, що вводяться в експлуатацію, зроблені із поліетилену. Це логічний підсумок тих численних переваг, як має ПЕ у порівнянні зі звичними матеріалами, зокрема стійкість до ржавіння та хімічного впливу, легший процес зварки тощо.

В Україні наявна велика кількість металевих трубопроводів, термін експлуатації яких збіг. Ці трубопроводи поступово замінюються ПЕ трубами. Зварювання ПЕ труб відбувається двома методами: нагрітим інструментом встик і терморезисторним. Для стикових і терморезисторних з'єднань ПЕ труб, як і для зварних з'єднань металевих труб, характерні дефекти пор, несплавлень, непроварів, включень і тріщин, які впливають на надійність і можуть спричинити руйнування трубопроводу.

Попри широке застосування полімерних трубопроводів у різних галузях промисловості, надійного методу контролю якості з'єднань досі не запроваджено. Тому гостро постає питання на рахунок підвищення безпеки об'єктів, що знаходяться в експлуатації, відбувається зростання об'ємів і темпів проведення робіт з обстеження та діагностики з метою визначення технічного стану. Отже, враховуючи те, що візуальний контроль не дає належної інформації про внутрішні дефекти, існує потреба у надійному методі неруйнівного контролю (НК) наявних типів зварних з'єднань ПЕ труб різних розмірів.

Ультразвуковий (УЗ) контроль у цьому випадку залишається чи не єдиною альтернативою. Цей метод забезпечує достатню точність у виявленні внутрішніх дефектів об'єктів контролю (ОК) різних матеріалів і конфігурацій. Однак діагностика звичайними одноелементними п'єзоелектричними перетворювачами (ПЕП) залишається доволі трудомісткою і довготривалою.

Технологією, що дозволяє прискорити процес, забезпечити повноцінне сканування всього перерізу зварного шва та задовольнити підвищеним вимогам до отриманих результатів, є використання пристроїв із фазованими решітками (ФР).

Питанням неруйнівного контролю зварних з'єднань ПЕ труб і вдосконаленню технології ФР присвячені роботи вчених: Caravaca D. S., Bird C., Kleiner D., Hagglund F., Robson M, Troughton M., Spicer W., Pinson I., Seonghee Kil, Youngdo Jo, Zhibin Zhu, Shuncong Zhong, Larson J.D., Dias J.F., Hanafy A., Sato J., Туза Ю. М., Красковського О. П. та інших.

Ультразвуковий контроль із застосуванням ФР з можливістю візуальної інтерпретації отриманих результатів є одним із найперспективніших методів вивчення цілісності матеріалів. Кожен п'єзоелектричний елемент давача з багатьма елементами збуджується за допомогою незалежного генератора. Тривалість збудження контролюється програмно. Затримка формується відповідно до принципу Ферма таким способом, щоб циліндричний хвильовий фронт досягав певної точки простору одночасно — для фокусування, або ж був спрямований під заданим кутом до площини введення — для кутового сканування. Відповідно, змінюючи час затримки збудження елементів, можна створювати фокусування акустичного поля у будь-яку точку простору, а також керувати нахилом введення ультразвукового променя. У підсумку на екрані дефектоскопа формується двовимірне зображення у вигляді секторного скана, отриманого з множини A -сканів, здобутих для заданого діапазону кутів.

Здійснений аналіз можливостей і параметрів ФР дозволив виявити потенційні можливості покращення методики та підвищення точності контролю терморезисторних і стикових зварних з'єднань ПЕ труб. Використання цих можливостей вимагає розроблення вдосконалених методів сканування та систематизації вибору параметрів при контролі з'єднань різних діаметрів. Поза тим, необхідно враховувати просторово-часові характеристики (ПЧХ) ФР, від яких залежить роздільна здатність УЗ інформаційно-вимірювальних систем і, як наслідок, вірогідність контролю.

Таким чином, впровадження удосконалених УЗ методів контролю якості зварних з'єднань полімерних труб на основі ФР, що забезпечують необхідну точність виявлення наявних типів дефектів, є актуальною задачею.

Мета та завдання дослідження. Метою даної магістерської роботи є розроблення удосконаленого ультразвукового методу контролю якості зварних швів полімерних труб.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні задачі:

1. Аналіз характеристик і особливостей полімерних труб.
2. Аналіз методів з'єднання ПЕ труб, типів дефектів, що виникають у зварних швах, причин їх появи.
3. Вивчення наукового прогресу в розробці методів контролю стикового та терморезисторного зварних з'єднань різних діаметрів.
4. Теоретичне обґрунтування та математичне моделювання контролю ПЕ труб УЗ методом на основі ФР.
5. Визначення впливу параметрів ФР на вірогідність виявлення дефектів, проведення розрахунку невизначеностей, що виникають у процесі контролю якості зварних з'єднань УЗ методом на основі ФР.
6. Розроблення методик контролю якості стикових і терморезисторних зварних з'єднань ПЕ труб ультразвуковим методом з використанням ФР із врахуванням акустичних властивостей поліетилену: високого затухання та низької швидкості поширення ультразвуку.

Об'єкт дослідження — процес контролю технічного стану зварних швів полімерних труб.

Предмет дослідження — методи та засоби УЗ контролю зварних швів полімерних труб із використанням технології ФР.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використовувалися різні методи теорії ультразвукового неруйнівного контролю та теорії розповсюдження звукового поля, а також теорії вимірювання, цифрової обробки сигналів, математичного моделювання та аналізу. Чисельне

моделювання із застосуванням комп'ютерної техніки проведено за допомогою пакетних програм Mathcad і MatLAB.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалено методики контролю зварних з'єднань ПЕ труб УЗ методом на основі ФР, які відрізняються меншою тривалістю контролю, більшою точністю визначення геометричних характеристик дефектів.

2. Встановлено вплив параметрів активної апертури ФР і типу фокусування на можливість виявлення дефектів.

3. Запропоновано вибір оптимальних параметрів перетворювачів на ФР для контролю терморезисторних і стикових зварних з'єднань відповідно до діаметра ПЕ труб, затухання та швидкості поширення ультразвуку.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновані ефективні та інформативні методи контролю зварних з'єднань ПЕ труб із підвищеною достовірністю результатів дефектоскопії, що дає можливість використовувати ці методи при будівництві трубопроводів із ПЕ.

1 КЛАСИФІКАЦІЯ ВИДІВ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ЇХ СТАНУ

У даному розділі подано опис характерних особливостей різновидів пластмасових труб, їх класифікація за розмірами, матеріалом, способами виготовлення, призначенням, способами з'єднань. Проаналізовано види та причини виникнення дефектів поліетиленових труб, визначені переваги і недоліки методів і засобів їх контролю, обґрунтовано необхідність розроблення удосконаленого методу ультразвукового контролю з використанням фазованих решіток, визначені задачі, які необхідно вирішити у магістерській роботі.

1.1 Характеристика пластмасових труб

На сьогодні розвиток ринку пластмасових труб досяг швидких темпів. Тому для їх раціонального використання та застосування ефективних методів контролю якості необхідним завданням є вивчення та систематизація характерних особливостей, різновидів, переваг і недоліків різноманіття труб, виготовлених з полімерних матеріалів.

На даний час на ринку представлені різновиди труб, виготовлених на основі таких термопластичних матеріалів і їх композицій: полівінілхлориду (ПВХ), поліпропілену, поліетилену (ПЕ), зшитого поліетилену, металопластику, полібутилену, акрилонітрилбутадієнстиролу та інших.

Перші пластмасові труби для водопостачання були зроблені з полівінілхлориду. Перший ПВХ водопровід був змонтований у Німеччині у 30-ті роки ХХ століття. Основна відмінність ПВХ труб у порівнянні з іншими пластмасовими трубами — при монтажі трубопроводу з ПВХ не має потреби у процесі зварювання або сполучних деталях. ПВХ труби з'єднуються за допомогою розтруба з гумовим ущільнювальним кільцем [1] або методом «холодного зварювання» (зварювання тисненням з пластичним деформуванням стикувальних поверхонь заготовок без необхідності додаткового нагрівання

іншими джерелами тепла [2]). ПВХ труби використовуються для будівництва обсадних труб свердловин водяного покладу, систем водопостачання та каналізаційних мереж.

Поліетиленові труби призначені для спорудження та реконструкції зовнішніх напірних водопровідних мереж житлово-комунального та промислового призначення, а також для транспортування горючих газів у мережах газопостачання низького, середнього та високого тиску [3]. ПЕ використовується у будівництві трубопроводів з 1950-х років [4]. Поліетилен має найнижчу у порівнянні з іншими полімерними матеріалами граничну температуру виконання робіт (мінус 20°C), що дозволяє проводити укладання й експлуатацію труб при низьких температурах взимку. З метою підвищення термостійкості та зміцнення, поліетилен обробляють під високим тиском, що призводить до утворення між молекулами додаткових поперечних зв'язків.

Є два способи виробництва поліетилену: за низького тиску здобувають поліетилен високої та середньої густини, за високого тиску — поліетилен низької густини. Застосування поліетилену низької густини для напірних труб обмежується сферами використання, що потребують достатньої гнучкості труб, та малими діаметрами з огляду на у 2–3 рази меншу міцність порівняно з поліетиленом високої густини (ПВЩ) [5].

Першим ПВЩ, що застосовувався для виготовлення напірних труб, був лінійний гомополімер, високомолекулярна будова якого містила лише молекули етилену. Попри досить високу миттєву міцність, він не мав сталої стійкості до розтріскування і при довготривалій роботі характеристики міцності матеріалу різко зменшувались внаслідок зміни роду руйнувань (переходу від в'язкого до ламкого). Значення найменшої тривалої стійкості (MRS) [6], яке описує довготривалу міцність і використовується при обчисленні робочого тиску трубопроводів, становило 6,3 МПа [5].

Необхідність уникнення переходу від в'язкого до ламкого руйнування в межах терміну експлуатації та нарощування стійкості до розтріскувань спричинила виникнення поліетилену другого покоління. Різке збільшення

витривалості полімеру до розтріскування та зростання значення MRS до 8,0 МПа вдалося отримати завдяки додаванню у процес синтезу сомономерів (гексен або бутен), які формують на макромолекулах поліетилену бокові відгалуження. При цьому зменшилися модуль пружності, опір швидкому поширенню тріщин та миттєва міцність, що унеможливило застосування такого поліетилену для виробництва газопроводів із тиском понад 6 атм.

Поліетилен з третього покоління — бімодальний поліетилен, який сполучає у собі властивості високої стійкості до розтріскування та короткочасної міцності. Низькомолекулярна частина полімеру формує кристалічні ділянки, завдяки яким зростає густина, короткочасна та тривала (MRS 10,0 МПа) міцність і збільшується модуль пружності. Цей полімер не має обмежень для виготовлення труб на робочий тиск до 25 атм (для водопровідних) та до 12 атм (для газових труб) [5].

Переваги використання поліетиленових труб:

- трубопроводи з поліетилену мають значно довший гарантований термін експлуатації (50 років);
- не піддаються ржавінню, стійкі до хімічних впливів;
- маса ПЕ трубопроводів у 2–4 рази менша металевих, чавунних і бетонних труб, що полегшує роботи по монтажу та перевезення;
- невисока теплопровідність матеріалу зменшує теплові втрати й понижує утворення конденсату ззовні труб;
- гладка внутрішня поверхня забезпечує відмінне транспортування води, запобігає утворенню відкладень і замулюванню трубопроводу;
- ПЕ трубам характерна висока еластичність, тому можуть піддаватися змінним навантаженням від ґрунту, деформуватися до 7 % без руйнувань;
- процес зварювання досить простий у виконанні, порівняно значно швидший, менш затратний, в тому числі через те, що зварне з'єднання не потребує додаткових витрат на матеріали ізоляції та електродів;

— низька ймовірність пошкодження трубопроводу при замерзанні рідини, бо при цьому труба збільшується в діаметрі, а при розморожуванні рідини повертається до початкових її розмірів;

— діаметри діапазоном від 20 мм до 110 мм виготовляються та випускаються окремими бухтами 50–1000 метрів, що значно знижує використання затратних матеріалів при монтажі, а також підвищує швидкість монтажних робіт;

— токсикологічна і бактеріологічна безпека, матеріал ПЕ труб не віддає транспортованим речовинам жодних шкідливих домішок;

— тривалість підготовки працівників у сфері зварювання у роботі з полімерними трубопроводами є коротшим, ніж для працівників по сталі;

— існує ймовірність багаторазового використання поліетиленових трубопроводів при невисоких витратах перемонтажу;

— при необхідності легко переробляються чи утилізуються;

— можливість прокладання ПЕ трубопроводів безтраншейними технологіями (методом протягування);

— низька шорсткість у внутрішній поверхні труби з ПЕ дозволяє застосовувати менші діаметри труб і при цьому зберігати гідравлічні властивості трубопроводу;

— внаслідок достатньо низького модуля пружності матеріалу у трубі ПЕ 100 значно знижується ймовірність виникнення гідроудару.

В Україні ПЕ труби виготовляються згідно зі стандартами ДСТУ Б В.2.7–151 «Труби поліетиленові для подачі холодної води» та ДСТУ Б В.2.7–73 «Труби поліетиленові для подачі горючих газів». Труби виробляються з поліетилену високої щільності класів ПЕ 100+, ПЕ 100 та ПЕ 80.

Труби марки ПЕ 80 здатні витримати тиск – 8 МПа, а труби марки ПЕ 100 — 10 МПа терміном 50 років не втрачаючи своїх властивостей [5].

ПЕ 100 — це вдосконалений ПЕ 80. Щільність ПЕ 100 вища, ніж у ПЕ 80, а це означає, що труба з ПЕ 100, розрахована на певний робочий тиск, має товщину стінок помітно меншу, на відміну від труби з ПЕ 80, для такого ж робочого тиску

в трубі. Окрім збільшення пропускної здатності ПЕ 100, зменшується час зварювання та знижується вага. За своїми властивостями матеріал ПЕ 100 придатний для виробів великих габаритів, а ПЕ 80 — для виробів малих розмірів.

1.2 Методи з'єднання пластмасових труб

Існує ряд методів з'єднання полімерних труб, застосування яких відрізняється в залежності від матеріалу труби, її номінального зовнішнього діаметра, наявності напору у трубопроводі та конструктивних вимог. До основних типів з'єднань пластмасових трубопроводів належать: муфти та розтруби з ущільнювальними кільцями, клейове з'єднання, торцеве зварювання (стикове), зварювання труб врозтруб, фланцеве з'єднання, різьбове з'єднання та електромуктове (терморезисторне) [7]. У таблицях 1.1 та 1.2 наведені найчастіше застосовувані види з'єднань безнапірних і напірних трубопроводів виготовлених із полівінілхлориду, поліетилену та поліпропілену. Найпершим методом з'єднання ПЕ трубопроводів – зварювання. Труби значних діаметрів, за звичай, зварюють нагрітими елементами встик [8].

Таблиця 1.1 — Поширені типи з'єднань безнапірних трубопроводів

Тип з'єднання	Матеріал труби			Можливість передачі розтягувальних зусиль
	ПВХ	ПЕ	ПП	
Муфти та розтруби з ущільнювальними кільцями	+	+	+	ні
Клейове з'єднання	+	—	—	так
Стикове зварювання	—	+	+	так
Терморезисторне зварювання	—	+	+	так
Різьбове з'єднання	—	+	+	так
Усадкові муфти	+	+	+	ні

Таблиця 1.2 — Поширені типи з'єднань напірних трубопроводів

Тип з'єднання	Матеріал труби			Можливість передачі розтягувальних зусиль
	ПВХ	ПЕ	ПП	
Муфти та розтруби з ущільнювальними кільцями	+	—	—	ні
Клейове з'єднання	+	—	—	так
Стикове зварювання	—	+	+	так
Терморезисторне зварювання	—	+	+	так
Фланцеве з'єднання	+	+	+	так
Різьбове з'єднання	—	+	+	так

Оскільки зварювання є найбільш надійний і тому найбільш затребуваний спосіб з'єднання ПЕ труб, то розглянемо цей тип з'єднання детальніше. Існують наступні типи електрозварювання пластмас: нагрітим інструментом врозтруб, нагрітим інструментом встик (стикове) та терморезисторне. Згідно ДБН В.2.5–41 з'єднання поліетиленових труб між собою та з поліетиленовими деталями з'єднувальними здійснюються двома способами зварювання [9]:

— нагрітим інструментом встик або зварювання за допомогою нагрівального елемента (дод. А, рис. А.1, а);

— терморезисторним зварюванням (дод. А, рис. А.1, б) або зварювання із використанням з'єднувальних деталей із закладними нагрівальними елементами, тобто фітінгів.

Зварювання може проводитися при температурі від мінус 15°C до плюс 45°C. Монтажні й зварювальні роботи при температурах зовнішнього повітря нижче мінус 10°C повинні проводитись у кабінах з температурою повітря у зоні зварювання не нижче 0°C [9]. Зона зварювання також повинна бути захищена від атмосферних опадів, вітру, пилу й піску, а в літню пору й від інтенсивного сонячного випромінювання.

Способи зварювання труб необхідно вибирати у залежності від номінального зовнішнього діаметра [10], як це подано у таблиці 1.3.

Стикове зварювання полягає у підготовці торців труби до подальшого їх розігріву заданою температурою і безпосереднього з'єднання розігрітих кінців ПЕ труби. Зварюванням встик можна з'єднувати труби лише однакового діаметра, SDR та однієї марки поліетилену [11].

Таблиця 1.3 — Способи зварювання труб різних зовнішніх діаметрів

d_n , мм	Тип матеріалу	Спосіб зварювання
До 700	ПЕ 80, ПЕ 100	Терморезисторне
Понад 63	ПЕ 80, ПЕ 100	Нагрітим інструментом встик

Параметри, потрібні для зварювання певних труб (залежать від діаметра, матеріалу виготовлення труби, SDR), вказані у таблицях режимів зварювання, відповідно до яких і відбувається процес зварювання.

Зварювання встик здійснюється наступним чином. Кінці труб очищуються, центруються і закріплюються у центраторі, зображеному на рис. А.2 (дод. А), після чого кінці труб піддаються торцюванню. Далі через контакт з нагрівальним інструментом відбувається розплавлення країв труб. Дзеркало забирається, а кінці труб з'єднуються під впливом тиску. Частина розплавленого полімеру при цьому вивільняється назовні, формуючи кільцеве потовщення з'єднання, так званий грат.

Вирізняльною рисою стикового зварювання є повільне глибоке прогрівання поверхонь зварювальним дзеркалом, нагрітим до порівняно невисокої температури (200–220°C) [8].

Основу стикового зварювання зумовлює хімічний процес — нагрівання торців труби до руйнування сил взаємодії між молекулами при доведенні матеріалу до в'язко-текучого стану [122], який надалі при охолодженні переходить у змішування молекул між собою і зчепленні матеріалу у тверде тіло, що призводить до спаювання поліетиленових труб.

Даний спосіб має ряд безсумнівних переваг:

— дозволяє візуально контролювати процес зварювання;

- дозволяє досягти високої якості й міцності шва;
- має порівняно невисоку вартість;
- зварювання виконується на універсальному обладнанні (одні й ті ж апарати зварювання здатні працювати з трубами різних діаметрів).

Основним і єдиним недоліком є більша маса та габарити зварювального обладнання у порівнянні з терморезисторним зварюванням.

Технологічний процес терморезисторного зварювання включає очищення, циклювання (для зняття оксидного шару), розмітку та знежирювання поверхонь, що зварюються, з подальшим закріпленням кінців труб, посадкою сполучної деталі (муфта, коліно, трійник тощо) та її підключенням до зварювального апарата, після чого відбувається зварювання [133].

Фітинги (рис. А.3) виготовляються з матеріалу, аналогічного матеріалу ПЕ труби. В тілі муфт закладена нагрівальна спіраль, при подачі напруги на яку відбувається розігрів і плавлення внутрішньої поверхні муфти та зовнішньої поверхні труби, внаслідок чого утворюється нероз'ємне з'єднання. Труби зварюють при гарантії нерухомості з'єднань в процесі нагрівання і подальшого природного процесу охолодження.

Параметри зварювання (напруга, час зварювання, час охолодження) подаються у паспортах виробів, а також записуються на штрих-кодів, дані з якого мають можливість зчитати усі сучасні зварювальні апарати, що значно прискорює та полегшує процес, а також дозволяє виключити людський фактор при введенні параметрів [122].

Кінці труб, що входять у з'єднувальні деталі не повинні перебувати під дією зусиль від власної ваги і згинальних напружень [9].

Перевагами терморезисторного зварювання є:

- підвищення надійності та довговічності з'єднання у зв'язку зі збільшенням площі зварюваної поверхні та механічного стискання труб муфтою;
- на відміну від зварювання встик є можливість зварювання труб з товщиною стінки менше як 5 мм;
- швидкість і легкість монтажу;

- дозволяє зварювати труби різної товщини стінок;
- невеликі маса та габарити зварювальних апаратів, а також низьке, у порівнянні зі стиковим методом, енергоспоживання.

До недоліків даного методу можна віднести такі фактори:

- порівняно високу вартість з'єднувальних деталей;
- відносно тривалий процес охолодження стику;
- трудомістке поздовжнє переміщення трубопроводу через збільшення діаметра на місці з'єднання.

Для успішного з'єднання напірних ПЕ труб за допомогою розглянутих вище методів необхідний строгий контроль параметрів і умов зварювання. Для задоволення вимог безпеки водо- та газопостачання з'єднання повинні бути абсолютно надійними, тому для повної оцінки зварних з'єднань важливо знати причини виникнення дефектів і залучати неруйнівні методи контролю.

1.3 Дефекти з'єднань поліетиленових труб та причини виникнення дефектів

1.3.1 Види руйнувань поліетилену

Таке явище, як розтріскування під напруженням, виникає в ПЕ матеріалах через повільне поширення тріщин, яке може утворюватися внаслідок напружень у матеріалі. Відомо, що довговічність напірних ПЕ труб залежить від їх стійкості до утворення тріщин. Подібного роду ушкодження може також виникати в будь-яких зварних з'єднаннях.

Руйнування при повзучості відповідає моменту, коли матеріал під впливом постійного навантаження розтягу руйнується. На прискорення процесу руйнування при повзучості можуть впливати:

- температура;
- концентрація напружень;
- втома матеріалу;
- хімічне середовище.

Початок розтріскування характеризується тим, що до виникнення тріщин утворюються порожнечі, які, поступово розростаючись, заповнюються натягнутими волокнами. Цей процес, відомий як утворення сітки тріщин, триває до того моменту, поки максимально розтягнуті волокна не порвуться, тим самим викликавши розтріскування.

Руйнування третього типу пов'язане зі зносом і підвищенням крихкості пластмаси в результаті термічного окислення з плином часу.

Тріщини утворюються з мікроскопічних розривів і подряпин, або початково притаманних трубі, або, що більш імовірно, отриманих через пошкодження. Крихкі механічні руйнування, як правило, являють собою щілинні розломи, які з'являються паралельно напрямку екструзії труби. Кільцеве розтяжне напруження на стінці труби провокує розкриття тріщин.

У результаті вторинних впливів, наприклад згину або удару, на зовнішній або внутрішній поверхні труби також можуть з'являтися кільцеві тріщини.

1.3.2 Забруднення поліетиленових з'єднань

Чиста поверхня без забруднень — основний і найважливіший фактор створення якісного шва між двома поверхнями, що з'єднуються. Забруднення погіршує цілісність зварного з'єднання, а сторонні включення можуть діяти як області концентрації напружень, що є передумовою для розтріскування під напруженням. З огляду на те, що з'єднання ПЕ труб, як правило, виконується в польових умовах, де постійно присутня загроза забруднення, підготовку необхідно проводити з особливою ретельністю. За таких обставин забруднення є головним предметом уваги при оцінці цілісності з'єднання. Нижче перераховані види забруднень, які негативно впливають на цілісність ПЕ з'єднання:

1. Сильні забруднення, такі як відкладення бруду, ґрунту або смоли на поверхні труби.
2. Незначні забруднення, наприклад пил.
3. Жирові або масляні сліди, що з'явилися від дотику поверхонь, що з'єднуються із забрудненою тканиною або руками.

4. Окислення поверхні в результаті впливу атмосферного повітря.

5. Ерозія поверхні в результаті тривалого впливу ультрафіолетового випромінювання (наприклад, зберігання на вулиці більше ніж 12 місяців).

6. Вологість або вода на поверхні.

Окислення поверхні труби через контакт з повітрям уникнути неможливо. З цієї причини, до того як приступити до зварювання, трубу необхідно очистити, щоб видалити окислений шар. Існують спеціальні інструменти для очищення поверхні при підготовці її до з'єднання. Необхідно видалити дуже тонкий шар матеріалу (близько 0,2 мм).

Вологість або вода на поверхні можуть стати перешкодою для отримання якісного зварного шва. Хоча зазвичай незначна кількість води випаровується при нагріванні, в деяких випадках уздовж границі з'єднання з'являються бульбашки, що призводить до утворення пор і передчасного руйнування з'єднання.

Всі технології зварювання вимагають вжиття належних заходів, для того щоб запобігти забрудненню зварного з'єднання та захистити його від впливу зовнішнього середовища.

1.3.3 Дефекти зварювання нагрітим інструментом встик

Типовим руйнуванням, характерним для зварювання встик, є розтріскування під напруженням, що виникає при концентрації напружень у зварних швах. Вторинні згинальні напруження, до яких зазвичай відносяться зміщення кромки, нерівномірність опор або осей, сприяють поширенню тріщин навколо з'єднання. В результаті воно втрачає міцність, що призводить до повного руйнування.

Швидкість поширення тріщин залежить від прикладеного зусилля і може становити як кілька тижнів, так і кілька років, при цьому кінцевий результат — руйнування всього з'єднання.

Існує безліч виробничих факторів, що впливають на якість зварного з'єднання. Розглядаючи кожен фактор окремо, можна описати потенційне пошкодження.

Зварювальний тиск. Зварювальний тиск є важливим параметром у процесі стикового зварювання, оскільки він забезпечує взаємопроникнення розплавів для утворення з'єднання. При високому тиску весь розплавлений матеріал буде видавлений у грат зварного шва, залишивши в місці контакту поверхонь матеріал, недостатньо прогрітий для якісного сплаву. Занадто низький тиск може призвести до недостатнього змішування розплавленого матеріалу — у результаті з'єднання буде неякісним, з низькою міцністю.

Неправильний вибір рівня тиску може бути віднесений до помилок зварника. Він проявляється в збільшенні або зменшенні ширини зварювального грата (валик зварного шва). При низькому тиску грат буде занадто вузьким, а при високому, навпаки, надто широким.

Температура плавлення. Значний вплив на якість зварювання встик мають величини температури нагрівального елемента (зварювальне дзеркало) та температури навколишнього середовища. Тому нагрівальний елемент не повинний змінювати задану температуру у процесі зварювання. З метою мінімізації людського фактора наявні апарати з автоматичним контролем, що підвищує надійність стику. Щоб здійснити зварювання ПЕ, температура на поверхнях, що підлягають з'єднанню, повинна бути вище температури плавлення матеріалу (140°C). Температура при стиковому зварюванні становить $200\text{--}230^{\circ}\text{C}$, цього достатньо для плавлення матеріалу, але мало, щоб викликати термічний розклад. Недостатня температура плавлення призведе до більш високого коефіцієнта в'язкості плавлення, опору плавленню і молекулярному змішуванню та у кінцевому рахунку неналежної якості зварного шва.

Овальність труби. При зварюванні встик поверхня з'єднання обмежується торцями труб, у зв'язку з цим дуже важливо максимально використовувати їх площу. Овальність ПЕ труб обумовлена способом їх транспортування та зберігання. Овальність труби, як правило, не розглядається як серйозна проблема при стиковому зварюванні, та майже певно, що вона стане причиною передчасного руйнування з'єднання, за винятком тих випадків, коли присутня значна розбіжність у формі труб.

Підготовка кінців труби (торцювання) і забруднення. Якщо зачистка торців виконана не у повному обсязі, кінці труб будуть нерівними, деякі ділянки стануть окислюватися, на них залишаться сліди бруду та пилу, при контакті з нагрівальним елементом почнуть утворюватися зазори, через які теплопередача на кінцях труби буде нерівномірною.

Центрування труб. Центрування труб впливає на термічний контакт між трубою та нагрівальним елементом. Без центрування фактична маса труб може зігнути раму зварювального апарату та тим самим підвищити ймовірність виникнення зазору між кінцями труб і верхньою частиною нагрівального елемента. Кожен з цих факторів становить небезпеку для цілісності з'єднання. Однак деяка неспіввісність є неминучою (до 1 мм для труб діаметром менше ніж 180 мм і 10% товщини стінки — для труб більше ніж 180 мм), при цьому передбачається, що ширина зварного ґрата знаходиться в допустимих межах.

Час нагріву торців — це час, протягом якого торці труби контактують з нагрівальним елементом. Якщо час нагрівання буде занадто коротким, розплавлені поверхні не досягнуть потрібної температури і при знятті труб з нагрівального елемента швидко охолонуть. У результаті збільшується ступінь в'язкості розплаву, кристалізація починає відбуватися ще до моменту з'єднання, що зрештою призводить до неповного сплавлення торців труб. Таке з'єднання буде неміцним і при вигині повністю розпадеться.

Технологічна пауза — це час, необхідний для зняття нагрівального елемента та стикування кінців труби. Чим швидше кінці труби буде зістиковано, тим менша ймовірність того, що розплавлені поверхні встигнуть охолонути. Результат тривалої затримки при стиковому зварюванні виявиться точно таким же, як і при недостатньому нагріванні.

У таблиці 1.4 наведено загальну класифікацію дефектів з'єднання ПЕ труб зварюванням встик [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Таблиця 1.4 — Класифікація внутрішніх дефектів стикових зварних з'єднань ПЕ труб

Вид внутрішнього дефекту	Визначення	Можлива причина виникнення
Включення	Дефект зварного з'єднання у вигляді вкраплення сторонніх часток між зварюваними кромками	Забруднення зварюваних поверхонь
Непровар	Дефект у вигляді несплавлення у зварному з'єднанні між зварюваними кромками	Недостатній тиск чи час осадження; недостатній час нагрівання, мала температура нагрівача
Пора	Дефект зварного з'єднання у вигляді порожнини сферичної форми, заповненої газом	Забруднення зварюваних поверхонь; перегрів; надмірний контакт з повітрям оплавлених кромок у технологічній паузі, недостатній тиск осадження
Ланцюжок пор	Група пор у зварному шві, розташованих на лінії	
Тріщини (зовнішні, внутрішні, поздовжні, поперечні)	Дефект зварного з'єднання у вигляді розриву у зварному шві та (або) у прилеглих до нього зонах	Підвищений рівень усадкових напружень через порушення технології зварювання

1.3.4 Дефекти терморезисторного з'єднання

Фітинг для електромуфтового зварювання має спеціальні «холодні зони», розташовані в центрі та збоку кожного входного отвору. Коли на фітинг подається напруга, розплавлена пластмаса збирається в звареному шві у холодних зонах і завдяки термічному розширенню створюється тиск, необхідний для взаємопроникнення розплавів і створення міцного зварного з'єднання. У тих випадках, коли труба не повністю введена в отвір муфти або не виконане центрування, провідники оголюються та розплавлений матеріал стікає зі поверхні шва. Це, у свою чергу, призводить до того, що провідники зміщуються в розплаві та в результаті можуть стикатися один з одним або сплутуватися, викликаючи тим самим коротке замикання або локальний перегрів. Зрештою з'являється ризик

термічного розкладання, виникнення пор в області зварювання або втрати споживаної потужності, через що плавлення відбувається не в повному обсязі. Щоб попередити ці несправності, потрібно забезпечити центрування і фіксації труби в процесі зварювання.

Дефекти в зоні плавлення, що виникають у результаті помилок при монтажі, виступатимуть як концентратор напружень й ініціюватимуть подальше розтріскування. Коли зварний шов піддається внутрішньому тиску, значному зсуву або згинанню, розтріскування під напруженням поширюється по поверхні шва, викликаючи тим самим передчасне руйнування.

Забруднення — важливий фактор, який може привести до передчасного руйнування електрозварювальних швів. Забруднення зазвичай з'являється на поверхні ПЕ труби в ході транспортування, зберігання, експлуатації тощо. Проте для отримання якісного шва важливо не забувати і про стан поверхні фітинга.

Для видалення поверхневого забруднення і окислених шарів труби використовується скребок. Неочищена поверхня не плавиться належним чином, і всі електрозварні шви, виконані без відповідної зачистки, з високою ймовірністю зруйнуються.

На зменшення надійності з'єднання впливає ускладнення процесу формування зони з'єднання і зниження ступеня дифузії, викликані недостатнім прогріванням з'єднувальних елементів. Перегрівання розплаву викликає термічну деструкцію поліетилену [8], яка виражається у деформації поверхні труб або муфт, що теж чинить негативний вплив на якість зварювання. Експлуатаційну надійність зварного з'єднання значною мірою визначають температурні параметри та час зварювання.

Дефекти, характерні для терморезисторного зварного з'єднання:

1. Пори — дефект, який знаходиться під поверхнею, об'ємний (не плоский) і не містить жодної речовини. Цей дефект з'являється над провідниками.
2. Несплавлення — дефект, пов'язаний з не повністю закріпленою трубою.

3. Непровар — несплавлена поверхня труби та фітингу, зазвичай розташовується нижче провідників.

4. Неочищеність — поверхня труби в зоні зварення, що не була видалена, тобто залишився оксидний шар.

5. Неправильний цикл нагрівання — дефект, який призводить до слабкого з'єднання через короткий час нагрівання.

Загальна конфігурація та розташування дефектів зображене на рис. 1.1.

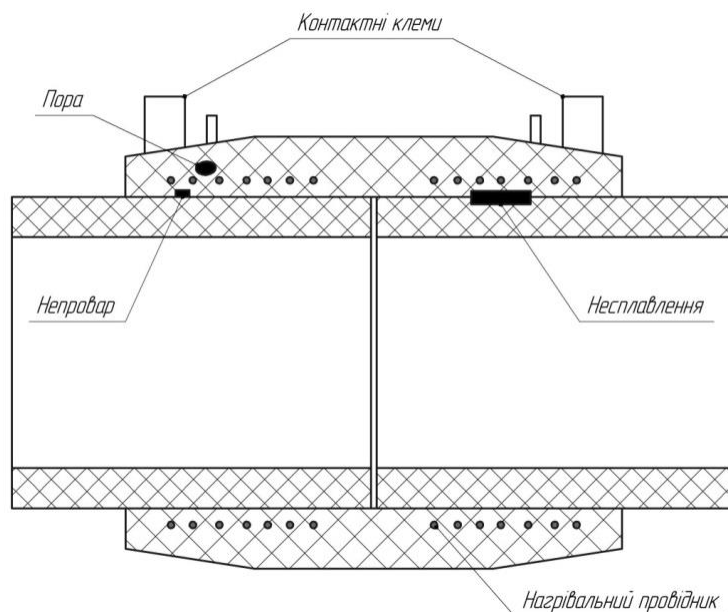


Рисунок 1.1 — Розташування дефектів у терморезисторному з'єднанні

1.4 Методи контролю якості зварних з'єднань поліетиленових труб

Головна загроза цілісності ПЕ трубопроводу є погана якість зварного шва, оскільки з'єднання — це найбільш вразливе місце будь-якої технічної системи.

Імовірність виявлення несуцільностей залежить від достовірності кожного методу неруйнівного контролю. Згідно з дослідженнями вірогідність виявлення дефектів коливається в межах 30–90% від загальної кількості та виду дефектів у залежності від обраного методу та ОК.

Радіографічний метод контролю, який для зварних з'єднань виробів з металу залишається основним, для зварних з'єднань ПЕ труб є неефективним, тому застосовуються інші методи НК.

Згідно з ДБН В.2.5–41 візуальний контроль є обов'язковий метод при проведенні контролю якості зварних з'єднань, виконаних будь-яким способом зварювання.

Візуальний контроль зварних з'єднань проводять з метою виявлення поверхневих дефектів [144], перевірки геометричних розмірів і допустимості виявлених деформацій.

Зовнішній вигляд зварних з'єднань, виконаних зварюванням нагрітим інструментом встик, має відповідати наступним вимогам:

- валики зварного шва повинні бути симетрично й рівномірно розподілені по окружності зварених труб;
- колір валиків повинен бути одного кольору із трубою і не мати тріщин, пор, сторонніх включень;
- симетричність шва (відношення ширини зовнішніх валиків ґрата до загальної ширини ґрата) повинна бути в межах 0,3–0,7 у будь-якій точці шва. При зварюванні труб зі з'єднувальними деталями це відношення допускається в межах 0,2–0,8 [9];
- зсув зовнішніх крайок елементів, що зварюються, не повинен перевищувати 10% товщини стінки труби (деталі);
- западина між валиками ґрата (лінія сплавки зовнішніх поверхонь валиків ґрата) не повинна перебувати нижче зовнішньої поверхні труб (деталей);
- кут зламу зварених труб або труби та з'єднувальної деталі не повинен перевищувати 5°.

Окремі зовнішні пошкодження валиків зварного шва (зрізи, відколи, здавленості від таврування стику) завдовжки не більше 20 мм і такі що не зачіпають основного матеріалу труби вважати браком не слід [155].

Зовнішній вигляд зварних з'єднань, виконаних за допомогою деталей із закладними нагрівальними елементами, має відповідати наступним вимогам:

- труби за межами з'єднувальної деталі повинні мати сліди механічної обробки (зачищення);
- індикатори зварювання деталей повинні перебувати у висунутому положенні;
- кут зламу зварених труб або труби та з'єднувальної деталі не повинен перевищувати 5° [9];
- поверхня деталей не повинна мати слідів температурної деформації або згорілого поліетилену;
- по периметру деталі не повинно бути слідів розплаву поліетилену, що виник у процесі зварювання [16].

Недоліком візуального контролю є забезпечення тільки поверхневого контролю, а також те, що даний метод може виявити лише дефекти, що супроводжуються зміною розмірів і форми ґрата чи поверхні навколо муфти. Проблемою візуального контролю також є модифікації пластичних і пружних властивостей розплавів різних марок трубних полімерів, а також варіації технологічних параметрів зварювання. Тому цей метод може використовуватися тільки у вузьких експериментально обґрунтованих межах застосування [177]. Вірогідність виявлення внутрішніх дефектів, які не супроводжуються зовнішніми ознаками, при візуальному контролі практично рівна нулю **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

При відсутності альтернативних методів, які б забезпечували необхідну точність і достовірність контролю, ультразвуковий метод є найбільш ефективним і очевидним вирішенням проблеми контролю поліетиленових труб, адже він дозволяє виконувати весь комплекс робіт з ультразвукової діагностики трубопроводів, виявляти слабкі місця зварних швів і контролювати товщину стінки.

Мета ультразвукового контролю — виявлення внутрішніх дефектів типу пор, несплавлень, непроварів, включень і тріщин.

Використовуючи принцип відбиття звукових хвиль від границі двох середовищ, ультразвуковий метод дозволяє визначити розмір і місцезнаходження

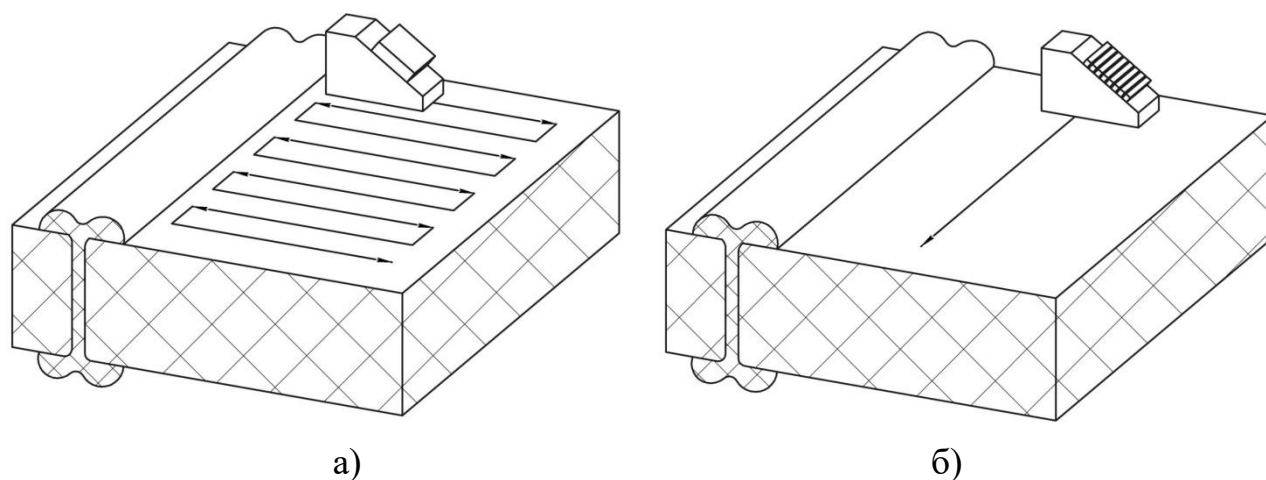
дефектів, розташованих всередині зварного з'єднання. Ультразвукові дефектоскопи дозволяють виявити плоскі дефекти і дефекти типу газових пор, включень і тріщин з еквівалентною площею до $0,5 \text{ мм}^2$ [7].

Ультразвуковий контроль зварних з'єднань ПЕ труб проводиться з допомогою луно-імпульсних дефектоскопів, які дозволять запам'ятовувати та зберігати інформацію про результати контролю, а також здійснювати вивід інформації на екран персонального комп'ютера.

На сучасному етапі розвитку ультразвукової дефектоскопічної науки і техніки явно простежується тенденція до підвищення оперативності та достовірності контролю, розширення кола завдань, вирішення яких ґрунтуються на застосуванні фазованих решіток, що викликано як вимогами практики, так і природним розвитком техніки [18].

Метод ФР є більш вдосконаленим і продуктивнішим у порівнянні з традиційним ультразвуковим контролем, у якому використовуються одноелементні перетворювачі. Головною перевагою ФР можна вважати можливість програмного формування діаграми направленості, включаючи точку та кут введення. За допомогою матричного перетворювача можна керувати пучком і фокусувати його точно в область дефекту. Також є можливість відтворення точно такого ж пучка з тою самою фокусною відстанню, глибиною проникнення і шириною на програмному рівні. Це дозволяє застосовуючи один п'єзоелектричний перетворювач реалізовувати всі схеми контролю, що застосовуються у багатоелементних системах сканування. Наприклад, контроль прямим і однократно відбитим променем, схема тандем тощо.

Беззаперечною перевагою використання ФР при контролі зварних швів є значне підвищення продуктивності контролю внаслідок заміни растрового сканування (переміщення перетворювача паралельно до осі зварного з'єднання з одночасним зворотно-поступальним переміщенням перпендикулярно осі шва) на лінійне — вздовж шва [19]. На рис. 1.2 приведено порівняння схем сканування звичайним перетворювачем і перетворювачем на ФР.



а — растрове сканування звичайним ПЕП; б — лінійне сканування ФР

Рисунок 1.2 — Схеми сканування стикового зварного з'єднання

Програмне керування параметрами ультразвукового променя дозволяє виявляти дефекти, довільно орієнтовані відносно акустичної осі. Це значна перевага перед звичайним одноелементним ПЕП, використовуючи який є велика ймовірність пропустити дефекти, розташовані під великим кутом до акустичної осі.

Дефектоскопи зі ФР перевершують за рівнем технічних можливостей «звичайні» дефектоскопи. Виробники обладнання для НК випускають різні моделі дефектоскопів зі ФР, які відрізняються кількістю каналів, смугою робочих частот, розміром і роздільною здатністю екрану, внутрішньою архітектурою електронного блоку, сервісними функціями тощо [19], а також різноманітним перетворювачів зі ФР до них. Як наслідок розрізняються і їх технічні можливості з управління ультразвуковим пучком.

Розробкою дефектоскопів з можливістю використання ФР займаються компанії Olympus [19], General Electric (рис. Ж.9) [20], R/D Tech, Sonatest [21] тощо.

Недолік відносно високої вартості та необхідності проведення контролю кваліфікованим оператором компенсується більшими можливостями та значним зменшенням часу, необхідного для проведення заданого контролю [22].

Області застосування ФР у НК широко висвітлені у світовій літературі [23]. Їх застосовують для контролю несучільностей різних матеріалів у конструкціях атомних електростанцій [24, 25], магістральних трубопроводів [26], зварних швів у різних конструкціях [27], багатошарових покриттів [28], об'єктів з високою температурою, зразків зі складною геометрією [29], деталей корпусів літаків, сопел ракет, а також у мостобудівній, залізничній галузях і видобувній промисловості [30].

1.5 Обґрунтування та постановка задач на магістерську роботу

Отже, основними перевагами дефектоскопії ФР є візуальність (можливість бачити в реальному часі розташування дефекту в об'єкті контролю), рівномірність сканування (відсутність зон меншої чутливості) [18], динамічне фокусування, продуктивність, можливість автоматизації процесу контролю, а також постійне вдосконалення методу, спрямоване на підвищення точності.

Однак на даний момент методику проведення ультразвукового контролю ПЕ труб з використанням ФР розроблено недостатньо. Тому метою магістерської роботи є розроблення удосконаленого методу ультразвукового контролю. Для цього необхідно вирішити наступні задачі.

1. Вивчення наукового прогресу в розробці методів контролю для стикового та терморезисторного зварних з'єднань різних діаметрів.
2. Теоретичне обґрунтування та математичне моделювання контролю ПЕ труб УЗ методом на основі ФР.
3. Визначення впливу параметрів ФР на вірогідність виявлення дефектів, проведення розрахунку невизначеностей, що виникають у процесі контролю якості зварних з'єднань УЗ методом на основі ФР.
4. Розроблення методик контролю якості стикових і терморезисторних зварних з'єднань ПЕ труб ультразвуковим методом з використанням ФР.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ З ВИКОРИСТАННЯМ ФАЗОВАНИХ РЕШІТОК

У даному розділі теоретично обґрунтовано можливість проведення та керування процесом сканування ультразвуковими променями об'єктів контролю за допомогою давачів на фазованих решітках, визначені їх основні властивості та характеристики, розроблено математичну модель, яка пов'язує характеристики ультразвукових давачів із фазованими решітками та параметри об'єкта контролю.

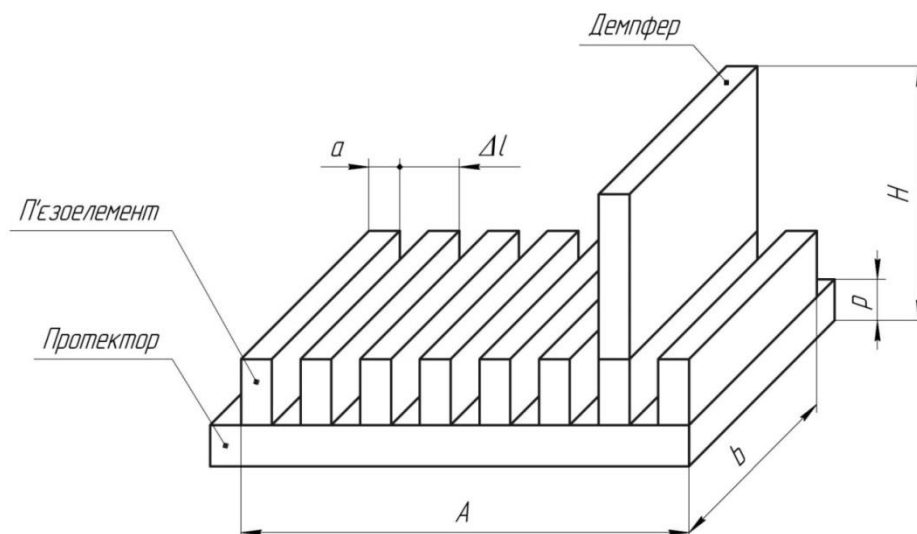
2.1 Обґрунтування принципу сканування ультразвуковим променем із використанням фазованих решіток

За видом сканування, геометричною формою та положенням перетворювальних елементів ФР можуть бути умовно поділені на три типи: кільцеві, лінійні та матричні, які відповідно забезпечують одномірне, двомірне та тримірне сканування ультразвуковим променем. У зв'язку зі складністю виготовлення кільцевих та матричних ФР, а також систем керування ними, найбільше поширення на сьогодні отримали лінійні ФР.

Конструктивно ФР є набором п'єзоелементів різної форми, як правило прямокутних або кільцеподібних, розділених між собою проміжками. У практиці найбільшого поширення набули ФР, що являють собою набір еквідистантно розташованих, не зв'язаних між собою електрично і акустично однотипних полоскових п'єзоелементів, встановлених уздовж однієї лінії на загальному протекторі, що зображено на рис. 2.1.

Контактні ділянки елементів металізуються і до них припаюються з'єднувальні провідники, об'єднані у джгут. Як правило, така ФР складається з 16, 32 елементів (максимум 256 елементів) і працює на частотах від 1 до 10 МГц. У цілому, конструкція перетворювача відрізняється високою складністю і тяжкістю

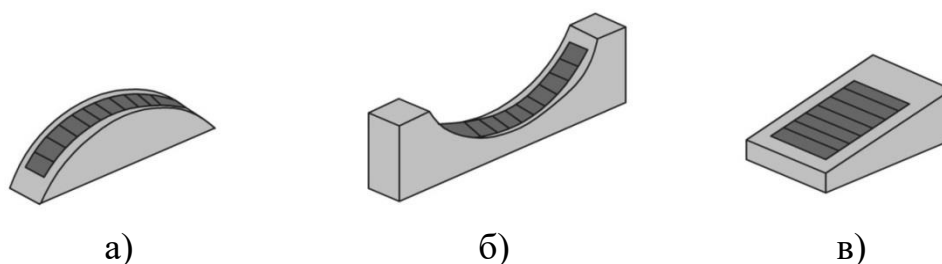
відтворення характеристик окремих елементів. Тому вартість таких решіток дуже висока [30].



A — активна апертура ФР; a — ширина п'єзоелемента решітки; b — довжина п'єзоелемента решітки; Δl — період решітки; p — товщина протектора; H — сумарна товщина протектора, п'єзоелемента і демпфера

Рисунок 2.1 — Схематичне зображення конструкції багатоелементної ФР

Для введення поперечної хвилі під великим кутом до поверхні або для компенсації форми ОК на багатоелементні перетворювачі для НК додатково можуть встановлюватися призми різної форми, які наведено на рис. 2.2 [31].



а — випукла; б — вгнута; в — нахилена

Рисунок 2.2 — Різні форми призми для перетворювачів на ФР

Лінійна ФР являє собою набір ідентичних п'єзоперетворювачів, які розташовані вздовж однієї лінії, на відстані $d \leq \lambda$ один від одного (зазвичай

$d = \lambda/2$, де λ — довжина ультразвукової хвилі в об'єкті, що досліджується), які у режимі випромінювання при збудженні електричними імпульсами зі заданим розподілом часових затримок (фазових зсувів) випромінюють в об'єкт, що досліджується, ультразвукові хвилі. В результаті їх інтерференції формується напрямлене поле — ультразвуковий промінь лінійної ФР.

Змінюючи напрям збуджуючих імпульсів на п'єзоперетворювачі ФР, можливо керувати напрямком, формою та енергією променя ультразвуку, генерувати поперечні, поздовжні та поверхневі хвилі.

Електричне управління рухом променя, який формується фазованою решіткою (рис. 2.3), що здійснюється за допомогою пристрою, який забезпечує часові затримки для випромінювання і сприйняття п'єзоелементів матриці [32].

2.2 Просторово-часові характеристики лінійних фазованих решіток

Роздільна здатність ФР визначається такими характеристиками:

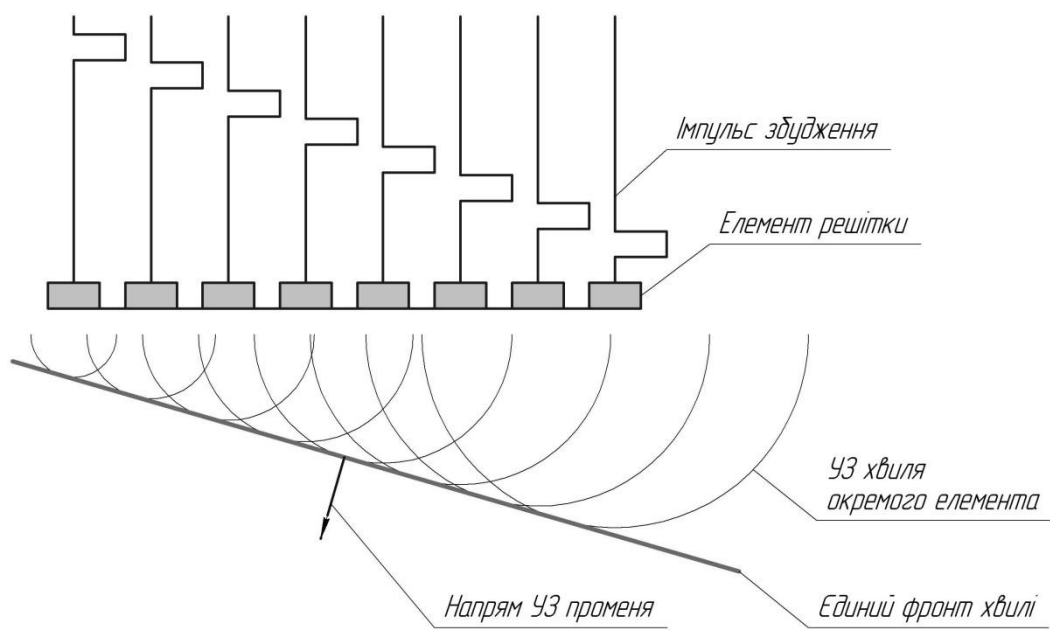
- роздільна здатність поперечна ФР, яка визначається за шириною імпульсної характеристики, що є просторовою характеристикою поля;
- роздільна поздовжня здатність ФР, яка визначається за параметрами часової характеристики прийнятого луно-сигналу.

Збудження п'єзоперетворювачів ФР здійснюється неперервними або імпульсними сигналами. Форма характеристики напрямленості (ХН) залежить від типу збудження. Зі зниженням імпульсів збудження згладжуються бокові пелюстки ХН, і залишається тільки основна пелюстка.

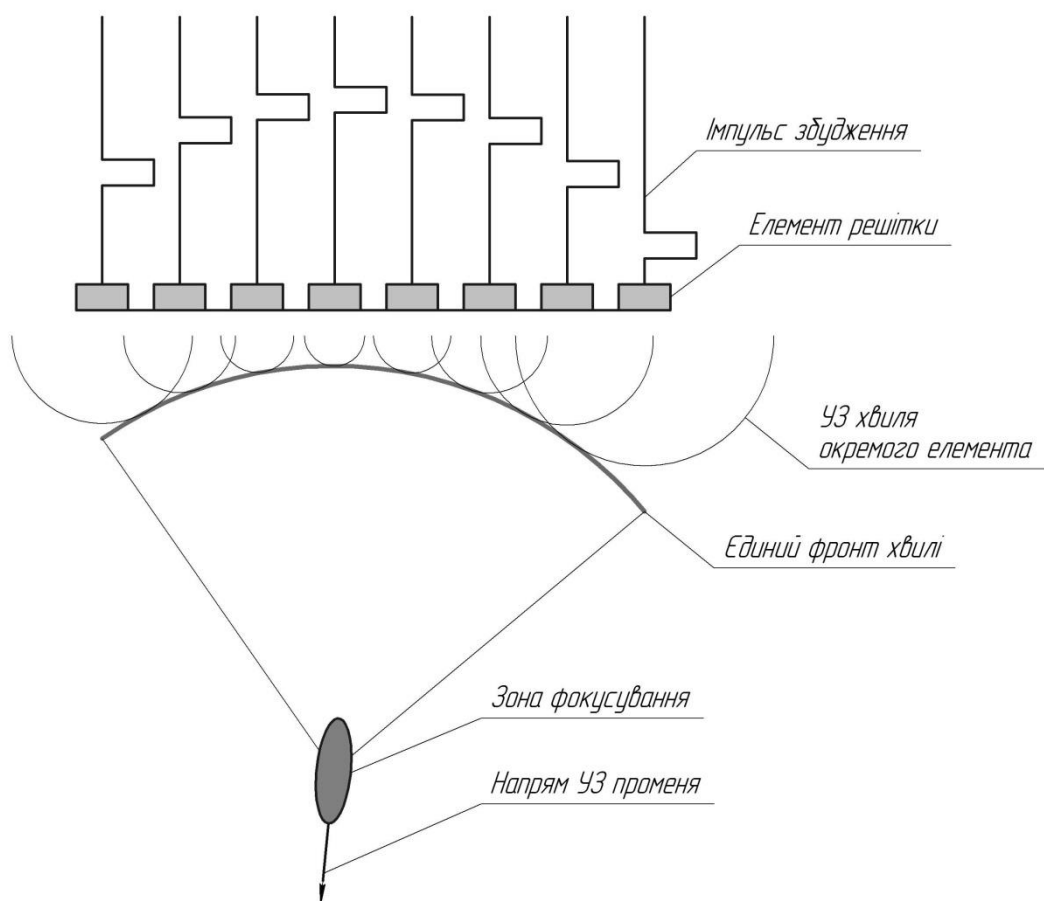
Опис ХН моделі ФР ПЕП представляється у вигляді [32]:

$$R(\theta) = \left| \frac{P(r, \theta)}{P(r, \theta_0)} \right|, \quad (2.1)$$

де $P(r, \theta)$ — акустичний в т. поля $C(r, \theta)$ довільного напрямку на відстані r ; $P(r, \theta_0)$ — акустичний тиск в симетрично віддаленій т. $C(r, \theta_0)$, в якій тиск максимальний; θ — кут огляду; θ_0 — кут відхилення основної пелюстки ФР.



а)



б)

Рисунок 2.3 — Керування кутом вводу (а) та фокусуванням (б) УЗ променя

Множник комбінування ФР вираховується суперпозицією УЗ хвиль, які випромінюються різними точковими елементами решітки [322]:

$$A(\theta) = \left| \frac{\sin \left[\frac{n\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]}{n \sin \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0)} \right|, \quad (2.2)$$

де n — кількість елементів решітки; θ_0 — кут, що можна визначити за виразом [322]:

$$\theta_0 = \arcsin \frac{\Delta \varphi}{kd} = \arcsin \frac{c \Delta \tau}{d}, \quad (2.3)$$

де Δt та Δj — відповідно часова затримка та фазовий зсув між сигналами сусідніх елементів ФР; c — швидкість звуку в ОК; $k = 2\pi/\lambda$ — хвильове число.

Для п'єзоелемента прямокутної форми ФР характеристика напрямленості описується рівнянням:

$$E(\theta) = \frac{\sin \left(\frac{\pi w}{\lambda} \sin \theta \right)}{\frac{\pi w}{\lambda} \sin \theta}, \quad (2.4)$$

де w — ширина п'єзоелемента.

Імпульсні характеристики напрямленості ФР визначаються просторовими розподілами значень амплітуди тиску. Характер ІХН залежить від її характеристик, тривалості імпульсу, робочої частоти та амплітудно-фазового розподілу коливань її поверхні. Загалом ІХН є функцією всіх трьох просторових координат. В УЗ дефектоскопії в більший мірі розглядаються ХН у перпендикулярних площинах. Вираз, що представляє ІХН ФР у площині сканування XOZ (рис. 2.4, а, б) [323]

- у декартовій системі координат:

$$R_+(x, z) = \max_t \frac{P_+(x, z, t)}{P_+(x_0, z_0, t)}, \quad (2.5)$$

$$R_-(x, z) = \max_t \frac{P_-(x, z, t)}{P_-(x_0, z_0, t)}, \quad (2.6)$$

$$R(x, z) = \max_t \frac{|P(x, z, t)|}{|P(x_0, z_0, t)|}, \quad (2.7)$$

- у полярній системі координат:

$$R_+(r, \theta) = \max_t \frac{P_+(x, \theta, t)}{P_+(r, \theta_0, t)}, \quad (2.8)$$

$$R_-(r, \theta) = \max_t \frac{P_-(x, \theta, t)}{P_-(r, \theta_0, t)}, \quad (2.9)$$

$$R(r, \theta) = \max_t \frac{|P(x, \theta, t)|}{|P(r, \theta_0, t)|}, \quad (2.10)$$

де $\max_t P_+(x, z, t)$, $\max_t P_+(r, \theta, t)$, $\max_t P_-(x, z, t)$, $\max_t P_-(r, \theta, t)$, $\max_t |P(x, z, t)|$, $\max_t |P(r, \theta, t)|$ — максимально можливі в часі додатні та від'ємні значення акустичного тиску або його модулю в точці поля $C(x, z)$ або $C(r, \theta)$; $\max_t P_+(x_0, z_0, t)$, $\max_t P_+(r, \theta_0, t)$, $\max_t P_-(x_0, z_0, t)$, $\max_t P_-(r, \theta_0, t)$, $\max_t |P(x_0, z_0, t)|$, $\max_t |P(r, \theta_0, t)|$ — максимально можливі в часі додатні та від'ємні значення акустичного тиску або його модуля в точці поля C з координатами x_0, z_0 або r, θ_0 , де акустичний тиск має максимальне значення.

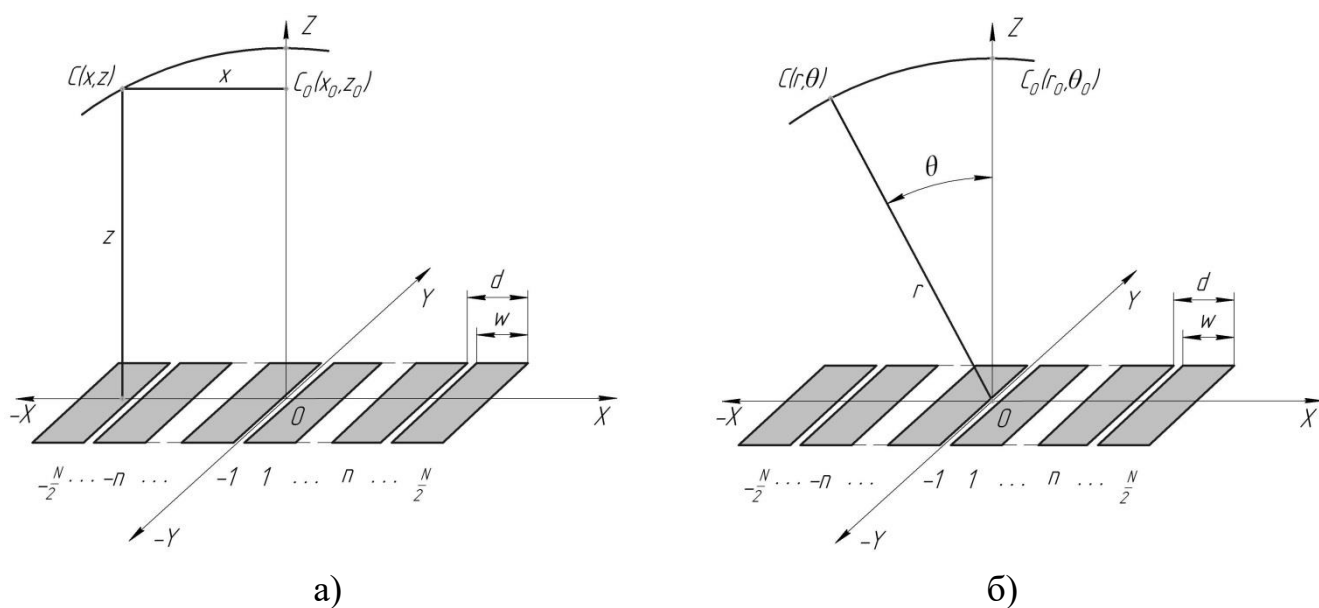
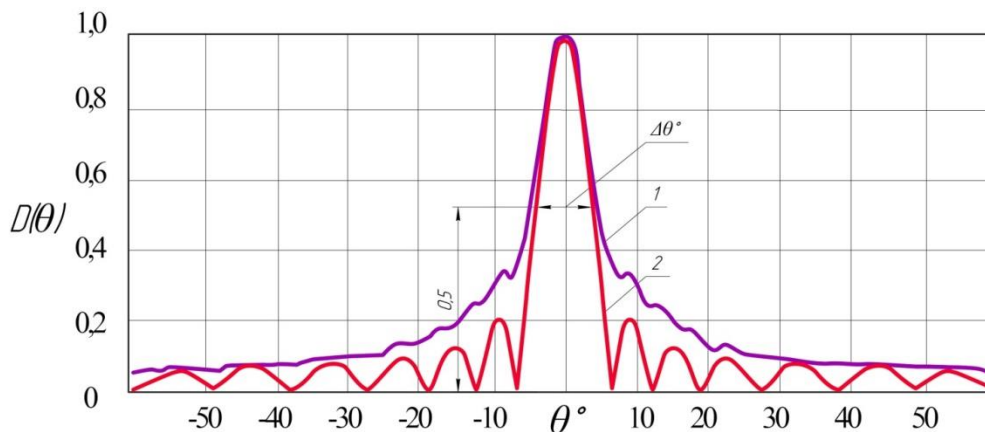


Рисунок 2.4 — Співвідношення при побудові ІХН у декартовій (а) та полярній (б) системах координат

На рис. 2.5 зображено типову ІХН ФР у XOZ площині сканування.

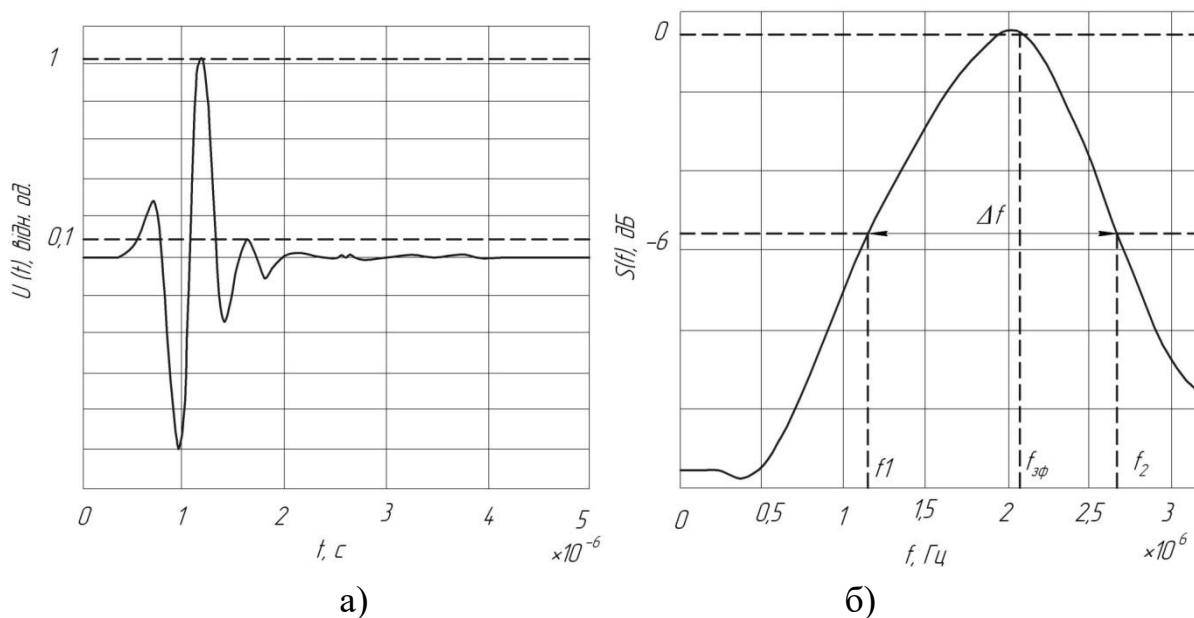


1 — імпульсне збудження; 2 — неперервне збудження

Рисунок 2.5 — ХН ФР у режимах випромінювання–прийому

Вимоги до лінійних ФР [34]:

1. Забезпечення мінімальної ширини головної пелюстки ІХН її бокових пелюсток при скануванні досліджуваного ОК (рис. 2.6).



а — часова характеристика; б — спектральна характеристика

Рисунок 2.6 — Характеристики сигналу ФР у режимах випромінювання–прийому

2. Створення найбільш широкої смуги пропускання ПЕП ФР при перетворенні сигналів.

3. Висока чутливість, що сприяє покращенню відношення сигнал-шум.

4. Зниження шумів у ПЕП ФР, що сприяє покращенню ревербераційно-шумових характеристик.

5. Узгодження електричних опорів ПЕП ФР з багатоканальними генераторами та приймачами УЗ дефектоскопа.

6. Забезпечення максимального акустичного контакту ПЕП ФР з ОК.

2.3 Формування ультразвукових променів сканування

Під скануванням ультразвукових променів розуміється просторова зміна положення характеристик напрямленості електроакустичних перетворювачів. У загальному випадку характеристика напрямленості електроакустичного перетворювача є функцією трьох просторових координат і часу. В ультразвуковому контролі найбільш часто розглядаються характеристики напрямленості у взаємно перпендикулярних площинах. Їх основними параметрами є: ширина основної пелюстки, співвідношення максимумів основної і найбільшої бічної пелюсток, кут між акустичною та геометричною осями, протяжність ближнього поля, кут розкриття дальнього поля.

При луно-імпульсному методі ультразвукового контролю часто доводиться мати справу з випромінюванням або прийомом досить коротких імпульсів. У такому режимі сигнали, що випромінюються окремими ділянками або елементами перетворювача, в деяких областях простору можуть не перекриватися за часом через різниці часу їх приходу в розглянуту точку, що перевищує просторову тривалість імпульсу. Аналогічна ситуація можлива і в режимі прийому. Такий режим формування акустичного поля електроакустичними перетворювачами прийнято характеризувати як несталий і виражати імпульсною характеристикою напрямленості, яка визначається просторовим розподілом максимальних у часі значень амплітуди коливального тиску [34]. Характер ІХН ультразвукової антени

залежить як від її розмірів, робочої частоти і тривалості імпульсу, так і від амплітудно-фазового розподілу коливань на її поверхні, і ці ІХН можуть істотно відрізнятися від відповідних характеристик для безперервного режиму роботи.

При описі поля пристроїв сканування-фокусування доцільно використовувати такі параметри сфокусованого ультразвукового променя (рис. 2.7): фокусна відстань (r_f), початок (r_{fn}), кінець (r_{fk}) і загальна протяжність фокальної області (Δr_f), а також ширина ультразвукового променя в фокусі ($x_{0,5}$) і на кордонах фокальної області ($1,5x_{0,5}$). Ввівши узагальнену просторову (лінійну, або кутову) координату θ , поперечний розподіл амплітуд сигналів в ультразвуковому промені визначається за формулою [34]:

$$b(\theta, z) = \frac{\max_t |p(\theta, z, t)|}{\max_{\theta} \max_t |p(\theta, z, t)|}, \quad (2.11)$$

де $p(\theta, z, t)$ — коливальний акустичний тиск у довільній точці акустичного поля, яке створюється електроакустичним перетворювачем; $\max_t |p(\theta, z, t)|$ — максимальне значення модуля цього сигналу у точці акустичного поля, що розглядається; $\max_{\theta} \max_t |p(\theta, z, t)|$ — значення модуля сигналу, яке відповідає координаті θ з найбільшою амплітудою сигналу в імпульсі.

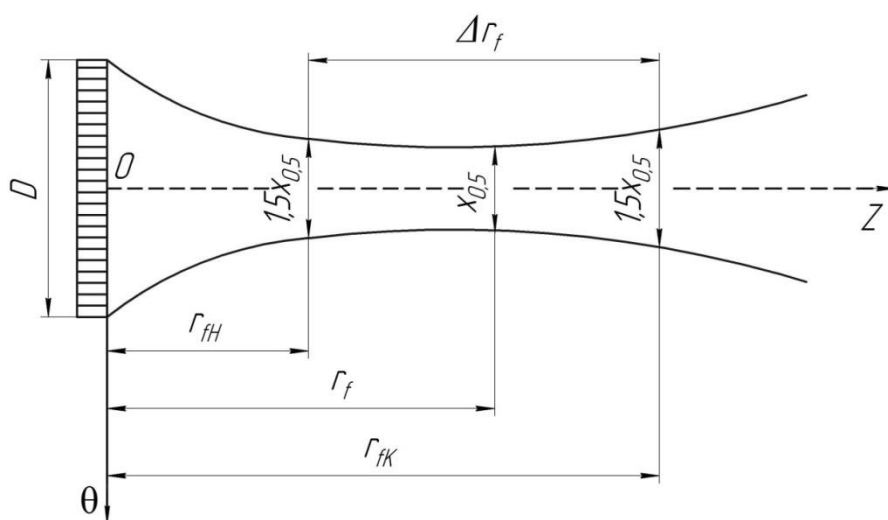


Рисунок 2.7 — Параметри сфокусованого УЗ променя

Ширина ультразвукового променя $x_{0,5}(z_0)$ за рівнем 0,5 у фіксованій точці z_0 визначається:

$$\frac{b[x_{0,5}(z_0)]}{\max_{\theta} b(\theta, z_0)} = 0,5. \quad (2.12)$$

Розглянемо характеристики поля багатоканальних електрично керованих скануючих пристроїв, побудованих на основі матриць п'єзоелектричних перетворювачів. Будемо вважати, що матриця поміщена в початок декартових координат і орієнтована таким чином, що п'єзоелементи розміщені лінійно уздовж осі x , а їх довжина паралельна координатній осі y (рис. 2.8). При цьому формування характеристики напрямленості відбувається у площині xz . Загальна кількість елементів у матриці — N , крок матриці — d і розмір апертури — D .

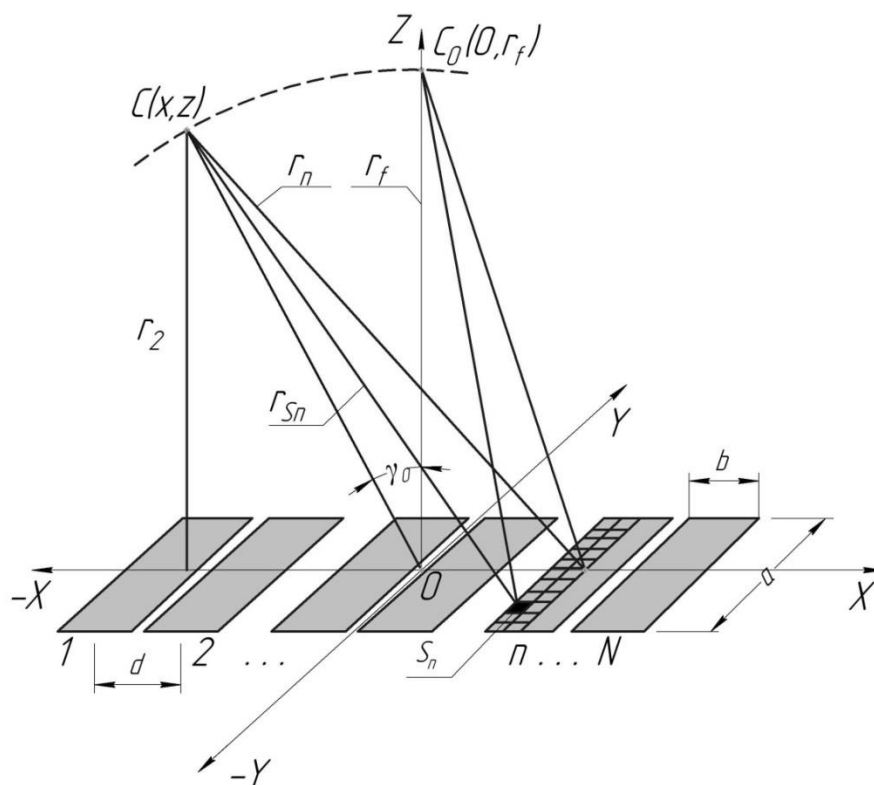


Рисунок 2.8 — Геометричні параметри при аналізі поля лінійної матриці п'єзоперетворювачів

Вважаючи, що елементи закріплені жорстко і випромінюють у напівпростір, для потенціалу швидкості $d\Phi$, створюваного в точці C елементарної поверхні випромінювання dS , можна записати:

$$d\Phi = \frac{v_s dS}{2\pi r} \sigma \left(t - \frac{r}{c} \right) = \frac{p_s dS}{2\pi r z} \sigma \left(t - \frac{r}{c} \right), \quad (2.13)$$

де r — відстань від елемента випромінювання до точки C ; v_s і p_s — відповідно коливальна швидкість і акустичний тиск, що розвиваються елементом dS ; c — швидкість акустичних хвиль; z — хвильовий акустичний опір робочого середовища; σ — функція включення.

Акустичний тиск у точці, що розглядається, відповідно:

$$dp = \rho (\partial / \partial t) (d\Phi), \quad (2.14)$$

де ρ — густина робочого середовища.

Тому при збудженні п'єзоелемента матриці одиничним стрибком напруги отримаємо:

$$dp = \frac{dS}{2\pi r_s c} g_{dS} \left(t - \frac{r_s}{c} \right) \sigma \left(t - \frac{r_s}{c} \right), \quad (2.15)$$

де $g_{dS}(t)$ — імпульсна характеристика п'єзоелемента, визначена відносно елементарної поверхні dS ; r_s — відстань від елементарної області, що розглядається, до точки C у просторі.

Інтегруючи вираз (2.14) по поверхні п'єзоелемента, можна отримати нормований тиск, що створюється у точці $C(x, z)$ n -им п'єзоелементом матриці:

$$P_n = P_0 \int_{S_n} \frac{z A_s}{r_n^2} g_{dS} \left(t - \frac{r_n}{c} \right) \sigma \left(t - \frac{r_n}{c} \right) dS_n, \quad (2.16)$$

де P_0 — нормуючий множник, що характеризує ослаблення циліндричної хвилі від відстані; A_s — розподіл амплітуди коливального тиску на поверхні розглянутого п'єзоелемента матриці; S_n — площа п'єзоелемента; r_n — відстань від центру п'єзоелемента до точки $C(x, z)$.

Оскільки матриця складається з N дискретних п'єзоелементів, сумарний акустичний тиск буде визначатися виразом

$$p(x, z, t) = P_0 \sum_{n=\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \int_{S_n} \frac{z A_s}{r_n^2} g_{S_n}(t - t_3) \cdot \sigma(t - t_3) dS_n. \quad (2.17)$$

У загальному випадку $t_3 = t_{rn} + t_{3n}$, де $t_{rn} = r_n/c$, t_{3n} — додаткова часова затримка збудження n -го п'єзоелемента для фокусування променя на відстані $z = r_f$.

Замінивши для простоти інтеграл у виразі (2.16) дискретною сумою, для чого поверхню елементів умовно ділиться на квадратні площадки Δ , орієнтовані паралельно координатним осям x, y, z урахуванням просторової приналежності елементарної площадки відповідного елементу отримаємо:

$$p(x, z, t) = \Delta \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \frac{A_{iml}}{r_{iml}^2} f\left(t - \frac{r_{iml}}{c} - t_{3n}\right) \sigma\left(t - \frac{r_{iml}}{c} - t_{3n}\right), \quad (2.18)$$

де M, L — число елементарних площадок, на які поділяються поверхні п'єзоелементів; A_{iml} характеризує розподіл коливального тиску на поверхні розглянутих ділянок п'єзоелемента; $r_{iml} = \sqrt{y_m^{(i)2} + (x_l^{(i)} - x)^2 + z^2}$; $y_m^{(i)}, x_l^{(i)}$ — координати центрів елементарних площадок на i -й ділянці.

Вираз (2.18) дозволяє визначити миттєве значення і форму акустичного імпульсу при довільній просторовій структурі матриці та при будь-яких розподілах амплітуди коливань по поверхні окремих її елементів.

Кількісне значення акустичного тиску в заданій точці робочого простору можна оцінити за максимально можливим у часі позитивним або негативним значенням функції (2.18), або за її модулем, які позначимо $\max_t p_+(x, z, t)$, $\max_t p_-(x, z, t)$, $\max_t |p(x, z, t)|$, що демонструють вирази (2.5)–(2.10).

Вирішуючи зворотну задачу, тобто припустивши, що випромінювання виходить з точки $S(x, z)$, неважко отримати подібні вирази для опису характеристик напрямленості прийомних решіток [34].

ІХН матриці в режимі випромінювання-адитивний прийом у полярній системі координат записується в такий спосіб:

$$D(z, \gamma) = \left[\max_t \frac{p(z, \gamma)}{p(r_f, \gamma_0)} \right] \left[\max_t \frac{V(z, \gamma)}{V(r_f, \gamma_0)} \right], \quad (2.19)$$

де $\max_t \frac{V(z, \gamma)}{V(r_f, \gamma_0)}$ — нормована імпульсна характеристика напрямленості матриці в режимі адитивного прийому; γ_0 — кут між нормаллю до активної поверхні матриці та напрямком головного максимуму імпульсної характеристики напрямленості; γ — незалежна кутова змінна.

Найбільш загальним і водночас важливим для практики є випадок, коли точка $C(x, z)$ розташована в ближній зоні матриці п'єзоелементів, тобто $r_f \leq D^2/4\lambda$. У даному випадку часові затримки для синфазного підсумовування сигналів будуть визначатися виразом:

$$t_{zn} = (r_f/c) [1 - \sqrt{1 + x_n^2/r_f^2 - 2(x_n/r_f)(\sin \gamma_0 - \sin \gamma)}]. \quad (2.20)$$

Представивши підкореневий вираз добутком:

$$\sqrt{1 + x_n^2/r_f^2} \sqrt{1 - [2x_n r_f / (r_f^2 + x_n^2)](\sin \gamma_0 - \sin \gamma)}. \quad (2.21)$$

Розклавши другий множник у ряд Тейлора, в першому наближенні отримаємо:

$$t_{zn} = \frac{r_f}{c} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{x_n^2}{r_f^2}} \right] + \frac{x_n}{c} \frac{\sin \gamma_0 - \sin \gamma}{\sqrt{1 + (x_n/r_f)^2}}. \quad (2.22)$$

Необхідно відзначити, що в разі побудови лінійних фазованих матриць, у яких сканування ультразвукового променя здійснюється введенням в канали

п'єзоелементів відповідних варіюючих затримок t_{zn} , ці затримки можна розглядати як суму двох складових:

$$t_{zn} = t'_{zn} + t''_{zn}, \quad (2.23)$$

де перший доданок $t'_{zn} = (r_f/c) \left(1 - \sqrt{1 + x_n^2/r_f^2} \right)$ виражає затримки, що забезпечують фокусування УЗ променя на відстань r_f по осі z , а другий доданок

$t''_{zn} = (x_n/c) \left(\sin \gamma_0 / \sqrt{1 + (x_n/r_f)^2} \right)$ визначає поворот променя на кут γ_0 .

У дальній зоні поля і при умові $r_f \gg x_n$

$$t''_{zn} \approx (x_n / c) \sin \gamma_0 = [(n-1)d / c] \sin \gamma_0. \quad (2.24)$$

При заданому значенні апертури D на ширину основної пелюстки ІХН мало впливають число випромінюючих елементів N і відстань між ними d . Число елементів N впливає на коефіцієнт концентрації енергії в основній пелюстці, а також в деякій мірі на рівень бічних пелюсток. Тому в більшості випадків збільшення числа одночасно працюючих в апертурі п'єзоелементів більше ніж 16–32 недоцільно. Разом із тим необхідно відзначити, що в разі адитивної обробки сигналів для більшості типів луно-сигналів ІХН $R_+(z, \gamma)$ і $R_-(z, \gamma)$ практично збігаються аж до рівня 0,3.

Дослідження впливу тривалості імпульсів на характеристику напрямленості матриці показує, що в тих випадках, коли просторова протяжність імпульсів не перевищує лінійних розмірів апертури D , на імпульсній характеристиці напрямленості відсутні бічні пелюстки, і вона має вигляд обвідної пелюсток характеристики напрямленості стаціонарного режиму.

З поворотом ультразвукового променя фазованої матриці при скануванні зменшується ефективне значення апертури, що призводить до розширення характеристики напрямленості, в результаті чого при великих кутах повороту ультразвуковий промінь стає несиметричним. Кут, при якому починають значно проявлятися ці зміни, виходить тим більшим, чим менше r_f . При збільшенні до 100λ фокусування зберігається до кута повороту $\gamma_0 = \pm 45^\circ$, що дає можливість реалізувати секторні скануючі пристрої в межах 90° .

У разі більш складних коливань п'єзоелементів, які мають місце при сумірності їх розмірів, при відсутності механічної або електричної фільтрації побічних мод ІХН таких елементів характеризується більшою шириною основної пелюстки та більш вираженими боковими пелюстками. Причому головний максимум формується переважно квазіпоzdовжньою модою, а бічне випромінювання — квазіпоперечною модою коливань п'єзоелемента [34]. Вплив побічних мод на ІХН може бути зменшено підбором відповідних співвідношень характерних розмірів п'єзоелементів і параметрів електричних ланок включення.

Можливість прийому матрицями п'єзоелементів досить коротких імпульсів дозволяє використовувати мультиплікативну обробку луно-сигналів не тільки для зменшення ширини основної пелюстки характеристики напрямленості, але і для поліпшення поздовжньої роздільної здатності, оскільки мультиплікативна обробка дозволяє одночасно зменшити ефективну тривалість прийнятих луно-імпульсів. У порівнянні з адитивною обробкою луно-сигналів на виході блоку мультиплікативної обробки спостерігається вкорочення обвідної сигнального імпульсу приблизно на 30%.

Як зазначалося вище, при динамічному фокусуванні приймального променя матриці зміна часових затримок луно-сигналів повинна відбуватися таким чином, щоб фокальна зона супроводжувала сигнал. Реалізація подібної умови може бути здійснена або безперервно, або дискретно; в останньому випадку перемикання фокусної відстані здійснюється стрибком.

Перейшовши від кутових змінних у виразі (2.20) до лінійних, для визначення фокусуючих затримок отримаємо такі вирази [34]:

— для неповернутого УЗ променя:

$$t_{zn} = \frac{r_f}{c} \left\{ 1 - \left(1 + \frac{x_n^2}{r_f^2} \right)^{1/2} - \frac{r}{r_f} \left[\left(1 - \frac{x^2}{r^2} \right)^{1/2} - \left(1 + \frac{(x - x_n)^2}{r^2} \right)^{1/2} \right] \right\}; \quad (2.25)$$

— для повернутого УЗ променя:

$$t_{zn} = \frac{r_f}{c} \left\{ 1 - \left(1 + \frac{x_n^2}{r_f^2} - 2 \frac{x_n}{r_f} \sin \gamma_0 \right)^{1/2} - \frac{r}{r_f} \left[1 + \frac{x'^2}{r^2} - \left(1 + \frac{(x_n + x')^2}{r^2} - 2 \frac{x_n}{r} \left(\sin \gamma_0 + \frac{x'}{r} \cos \gamma_0 \right) \right)^{1/2} \right] \right\}, \quad (2.26)$$

де r — аксіальна відстань від апертури матриці, на якій фіксується імпульсна характеристика напрямленості; x — незалежна змінна; x' — незалежна змінна у координатах, повернутих на кут γ_0

З урахуванням того, що найчастіше задовольняється умова $x_n \ll r_f$, можна перейти до спрощеного визначення t_{3n} . Перерахувавши також t_{3n} відносно крайніх для фокусуєної апертури елементів (оскільки затримці підлягають сигнали середніх елементів), отримаємо наступний вираз для визначення фокусуєної затримки i -го елемента:

$$t_{fi} = \frac{d}{2cr_f} \left[\left(\frac{N-1}{2} \right)^2 - \left(i - \frac{N+1}{2} \right)^2 \right]. \quad (2.27)$$

Для фокусуєних систем зручно ввести узагальнюючу величину K , яка визначає степінь фокусування УЗ променя:

$$K = \frac{D^2}{4\lambda r_f}. \quad (2.28)$$

Величина K має значення коефіцієнта відносного фокусування, нормованого протяжністю ближньої зони фокусуєної матриці, яка, у свою чергу, пов'язана з розмірами апертури та довжиною ультразвукової хвилі в досліджуваному середовищі. Коли $K \gg 1$, сила фокусуєного ефекту велика і протяжність зони фокусування обмежується областю точки фокуса. У випадку, коли K наближається до одиниці, протяжність фокальної зони збільшується, проте степінь фокусування стає нижче. Нарешті, коли $K \ll 1$, фокусування майже не проявляється.

Ширина ультразвукового променя в фокусі слабо залежить від розмірів апертури та визначається, головним чином, відносною глибиною фокусування r_f/D [34]. За умови $r_f \leq D^2/4\lambda$ сталість ширини променя зберігається в широкому діапазоні робочих апертур. Протяжність фокальної зони Δr_f при фокусуванні матриці на відстані однієї апертури практично не залежить від її значення, а при віддаленні фокуса лінійно зростає зі збільшенням апертури, досягаючи при певному її значенні максимуму, який залишається постійним при подальшому збільшенні апертури. Для області досить ефективного фокусування ($r_f/D \leq 4$) сталість протяжності фокальної зони зберігається тільки для великих апертур $D/\lambda > 30$. В діапазоні апертур $D/\lambda \leq 30$ протяжність фокальної зони починає сильно спадати зі зменшенням розмірів апертури. Слід також зазначити, що

початок фокальної зони практично лінійно залежить від відносної глибини фокусування і розмірів апертури, збільшуючись з їх зростанням. Для кінця фокальної зони ця залежність стає нелінійною в області малих ($D/\lambda < 15$) і великих ($D/\lambda > 40$) апертур при значеннях фокусування $r_f/D > 4$, що призводить до скорочення фокальної зони у цих випадках. Для забезпечення фокусування з постійним коефіцієнтом K по всій протяжності ультразвукового променя необхідно змінювати апертуру, зменшуючи її при наближенні фокуса. Однак оскільки при зміні фокусної відстані змінюється протяжність фокальної зони, необхідно вибрати такі фіксовані фокусні відстані, при яких досягається квазіколімований ультразвуковий промінь з мінімальними дифракційними спотвореннями. Дана умова забезпечується при збереженні сталості r_f/D при одночасній зміні D і r_f . При цьому у зв'язку зі збільшенням протяжності фокальної зони можна в багатьох практичних випадках обмежитися невеликим числом кінцевих значень апертур D (в межах від трьох до п'яти).

3 РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРИСТРОЮ ТА МЕТОДИК КОНТРОЛЮ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ

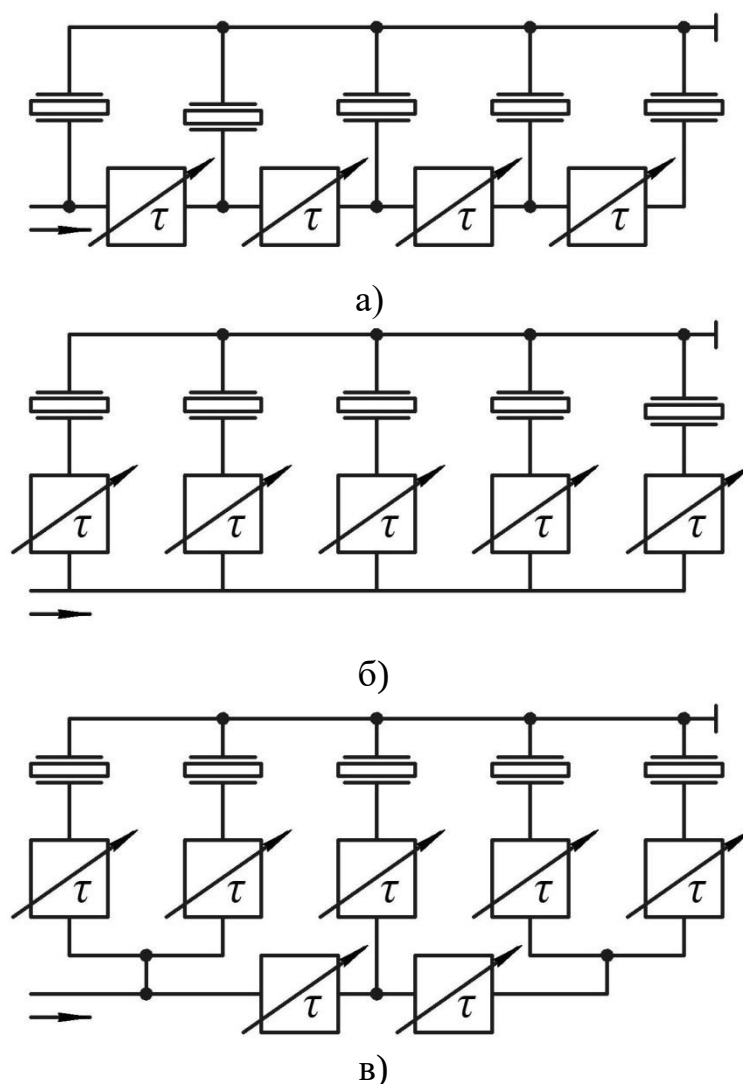
У даному розділі розроблено структурну схему ультразвукового дефектоскопа на ФР. На основі описаної схеми проаналізовано особливості випромінювання та прийому ультразвукових сигналів. Розроблено методики ультразвукового контролю з використанням ФР стикових і терморезисторних з'єднань ПЕ труб.

3.1 Розроблення структурної схеми ультразвукового дефектоскопа на фазованих решітках

Фазуючі пристрої ультразвукових решіток можуть бути побудовані по послідовній, паралельній і змішаній схемах включення фазуючих ланок і ланок затримки (рис. 3.1). При послідовній схемі всі п'єзоелементи решітки підключаються через ідентичні ланки затримки до однієї лінії прийому-передачі (рис. 3.1, а). Для сканування ультразвукового променя затримка сигналів у всіх ланках повинна змінюватися в певних межах і однаково. Це говорить про простоту схеми. Однак послідовне включення ланок затримки призводить до нерівномірного розподілу амплітуди сигналів уздовж апертури решітки та впливу помилок у затримці окремої ланки на всі наступні ланки фазуючого пристрою. У цьому відношенні кращими властивостями володіє паралельна схема (рис. 3.1, б), де через кожну ланку затримки проходять сигнали тільки одного п'єзоперетворювача решітки. Тут, однак, діапазон варіювання затримки в кожній ланці повинен бути різним, причому для досягнення необхідного кута сканування ультразвукового променя потрібна значно більша кількість ланок затримки. Що стосується помилок керування, то в цьому випадку вони даються взнаки у меншій мірі, оскільки впливають на роботу тільки окремих п'єзоперетворювачів решітки.

Змішана схема (рис. 3.1, в) являє собою поєднання попередніх. Число послідовно включених ланок затримок тут менше, ніж в послідовній схемі; їх

використання дозволяє значно знизити діапазон необхідних затримок, які повинні забезпечити паралельно включені ланки. Зменшення числа послідовно включених ланок затримки знижує роль помилок управління, що має важливе значення, особливо при великому числі п'єзоперетворювачів у решітці.



а — послідовна; б — паралельна; в — змішана

Рисунок 3.1 — Схеми ввімкнення фазованих ланок

При побудові фазуючих ланок найбільш широко застосовуються багатовідвідні лінії затримки з електронною комутацією відводів. Регулювання часу затримки можливе шляхом зміни ємностей варикапів або напівпровідникових стабілітронів, що працюють у допробійній області зворотної

характеристики, а також підмагнічуванням феритових сердечників котушок індуктивності. Крім того, представляють інтерес електрично керовані лінії затримки, побудовані на активних еквівалентах ланок другого порядку при використанні каскадного з'єднання дрейфових транзисторів. Застосування двох останніх різновидів електрично керованих ліній затримки в ультразвуковому контролі особливо перспективно, тому що вони легко піддаються мікромініатюризації та можуть бути виготовлені в інтегральному виконанні.

Застосування в якості фазуючих пристроїв електрично керованих ліній затримки з необхідною смугою пропускання дозволяє зробити практично незалежним процес обробки сигналів від їх тривалості та тим самим не обмежує можливість підвищення роздільної здатності контролю. Однак наявність у складі схем фазування великого числа широкосмугових ліній затримки значно ускладнює конструкцію перетворювачів зі фазованими матрицями, особливо при аналоговому управлінні часом затримки. При реалізації, наприклад, фазуючого пристрою по послідовній схемі включення електрично керованих ліній затримки, в кожен канал п'єзоелемента решітки необхідно включати постійні (не керовані) лінії затримки для компенсації початкового значення затримки сигналів, щодо якого відбувається варіювання затримки в керованих ланках. Зі збільшенням числа елементів матриці довжина цих ліній різко зростає, що ускладнює конструкцію фазуючої схеми та знижує ефективність електроакустичного перетворення [35].

Структурна схема розробленого пристрою для ультразвукового контролю зварних з'єднань наведена на кресленні (МР.МТТ_м– .00.00.00).

Дефектоскоп має певну кількість незалежних каналів ($1 \dots M$), в кожному з яких міститься програмована лінія затримки 1, яка утворює необхідні часові затримки запуску відповідного генератора зондуючих імпульсів (ГЗІ) 2 для формування фазового зсуву згідно з заданим законом фокусування. З виходів ГЗІ через мультиплексор 3 імпульси напруги однакової амплітуди та тривалості поступають на п'єзoeлектричні елементи ФР 4, збуджуючи у перетворювачах ультразвукові коливання. Сформований фронт хвилі проходить через об'єкт

контролю. Відбитий від дефекту чи дна об'єкта промінь трансформується перетворювачами в електричні луно-імпульси, які окремими каналами подаються через мультиплексор на вхід попередніх підсилювачів 9. Коефіцієнт підсилення регулюється системою часового регулювання чутливості (ЧРЧ) 8.

Підсилені до необхідного рівня сигнали оцифровуються за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) 10. Потім сигнали поступають на регістри зсуву 13, де забезпечується компенсація між каналами фазових зсувів, заданих при формуванні імпульсів у тракті випромінювання. Виходи приймальних каналів об'єднуються у суматорі 15, де з отриманих синфазних імпульсів на виході формується один сигнал, який відповідає поточному куту введення та глибині фокуса.

Обчислювальний пристрій 14 забезпечує перетворення систем координат для коректної візуалізації зображення перерізу, а також фільтрацію (за необхідності) сигналу, вимірювання амплітуди, часу проходження сигналу (координат дефектів) та інших параметрів. Оброблені дані зображуються на пристрої виведення інформації — дисплеї 11. Пам'ять 12 служить для зберігання фокальних законів, наборів сканів, даних, отриманих під час контролю.

Традиційне застосування мультиплексора полягає у керованому передаванні даних від кількох вхідних каналів до одного вихідного, тобто відбувається послідовне опитування логічних станів великого числа змінних і передача їх на один вихід. У нашому випадку використання мультиплексора дозволяє проводити сканування об'єкту під різними кутами, залишаючи перетворювач при цьому нерухомим, що значно прискорює процес контролю. До того ж, з'єднання виходів тракту випромінювання та входів приймального тракту з елементами ФР через мультиплексори (багатоканальний комутатор) дозволяє одночасно залучити необхідну групу п'єзоелектричних елементів ФР (апертуру випромінювання) при лінійному скануванні, оскільки число елементів ФР N може перевищувати число каналів дефектоскопа M . Це дозволяє спростити електронні схеми й, як наслідок, скоротити витрати.

Модуль керування 6 здійснює контроль елементами, які беруть участь у формуванні та прийманні ультразвукових променів. Через пристрій введення інформації 5 (клавіатура на панелі керування дефектоскопа) оператором задається тип сканування, закон фокусування та інші параметри контролю. Згідно з уведеними установками модуль керування ФР встановлює відповідні затримки для кожної з ліній затримок і регістрів зсуву та оперативно керує роботою вузлів трактів випромінювання та приймання. Обчислювальний пристрій і модуль керування пов'язані з метою ефективних роботи з результатами сканування та комунікації зі запам'ятовувальним пристроєм.

Синхронізатор 7 забезпечує необхідну часову послідовність роботи вузлів дефектоскопа. Зазвичай всі електронні схеми розміщуються у корпусі дефектоскопа, а ФР з'єднується з ним багатожильним кабелем [36].

3.2 Аналіз способів керування випромінюванням та прийомом ультразвукових сигналів

3.2.1 Особливості керування променем і відображення результатів

Існують три основні способи управління променем: електронне сканування, динамічне фокусування, секторне сканування. При електронному скануванні один фокальний закон перемикається у межах групи елементів, сканування виконується з постійним кутом і вздовж довгої сторони решітки (цей процес еквівалентний механічному переміщенню звичайного одноелементного перетворювача). При динамічному фокусуванні за глибиною сканування виконується за допомогою зміни фокусної відстані. Для випромінювання використовується один і той же імпульс, тоді як у режимі прийому решітка перефокусується послідовно на різні значення глибини. При секторному скануванні (азимутному, кутовому) випромінювання проводиться однією і тією ж групою елементів при одній фокусній відстані послідовно під різними кутами.

Відображення результатів контролю на екрані при використанні дефектоскопів на ФР різняться, вони являють собою різні типи розгорток, так

званих сканів. *A*-скан — форма представлення сигналів у прямокутній системі координат, де по осі ординат відкладається амплітуда прийнятих сигналів, а по осі абсцис — час від циклу зондування [37]. При механічному скануванні дані збираються за допомогою датчиків координат. Потім дані представляються в зручному для аналізу вигляді. Фазовані решітки зазвичай використовують масив згрупованих *A*-сканів (який являє собою *B*-скан), отриманих під різними кутами, з використанням безлічі фокальних законів. Інформація, отримана і записана з одного положення фазованої решітки у вигляді великого числа *A*-сканів, представляється в реальному часі у вигляді секторного *S*-скана або електронного *B*-скана. *S*-скан — це зображення, отримане від пучків, сформованих при зміні кута введення від меншого до більшого. *B*-сканом називається зображення, на якому сукупність прийнятих сигналів відображається точками, які належать перерізу об'єкта контролю в площині падіння хвилі та паралельного їй. Як *S*-, так і *B*-скани являють собою зображення, що містить інформацію про прозвучуваний матеріал і несучільності, що знаходяться на шляху ультразвуку в усіх напрямках, за якими здійснюється електронне сканування. Відображення результатів прозвучування у вигляді двовимірного перерізу об'єкта контролю дає пряме уявлення про результати контролю. *S*-скан дає такі переваги, як виведення зображення під час сканування, точне уявлення про глибину, двовимірне подання контрольованого об'єму. Для отримання кращого зображення комбінується лінійне та секторне сканування.

Комбінація сканів, отриманих поздовжніми і поперечними хвилями, може бути вельми корисна для виявлення і вимірювання розмірів дефектів при можливості малих переміщень перетворювача. У цьому випадку активна частина апертури перетворювача може переміщатися для отримання оптимальних кутів прозвучування. По-різному сфокусовані звукові пучки (циліндричні, еліптичні, сферичні) забезпечують кращу наочність корисного сигналу на тлі шумів. При електронному скануванні перетворювач може механічно переміщатися, після чого отримані дані можна об'єднати в загальне високоінформативне зображення дефекту з різних ракурсів. За допомогою комбінації секторного електронного

сканування в одній площині і механічного переміщення перетворювача в іншій площині можна отримати об'ємне зображення об'єкта контролю. Кожне положення перетворювача являє собою «зріз» дефекту в площині коливання променя.

3.2.2 Прийом сигналів перетворювачем на фазованих решітках

Завдяки малому кроку лінійної ФР кожен з її елементів є ненаправленим приймачем. Для прийому того чи іншого сигналу формується так звана приймальня апертура, яка характеризується наступними параметрами:

- M_R — кількість елементів, яка не обов'язково має дорівнювати M_E або N ; слід також відзначити, що у залежності від очікуваних сигналів прийомна апертура може повністю або частково збігатися з випромінювальною або не збігатися взагалі;
- номери елементів, що формують прийомну апертуру (при $M_R < N$), тобто їхнє розташування всередині ФР; для лінійної ФР досить задати номер стартового елемента;
- напрямок, з якого приймається сигнал (кут α_R);
- координати фокальної точки;
- тип прийомної хвилі (задається шляхом введення швидкості хвилі у матеріалі ОК, наприклад V_{S2} або V_{L2}).

Приймальний тракт забезпечує підсилення сигналів для кожного з елементів до рівня, достатнього для їх оцифровки, після якої кожен з елементарних А-сканів є одновимірний вектор (масив) A_J миттєвих значень амплітуди невідпрямленого сигналу, визначених з обраною частотою квантування протягом заданого інтервалу часу: $A_{J1}, A_{J2}, \dots, A_{JQ}$. Тут J — номер елемента ФР, а Q — кількість значень миттєвої амплітуди сигналу, що формують вектор [37]:

$$Q = \text{TimeBase} \cdot F_{ADC}, \quad (3.1)$$

де TimeBase — тривалість інтервалу, а F_{ADC} — частота квантування.

Для виділення сигналу хвилі заданого типу, прийнятого з певного напрямку із забезпеченням бажаних координат фокусної точки, отримані числові масиви

додаються зі зсувом, причому часові затримки визначаються за співвідношеннями, аналогічним наведеним вище для режиму випромінювання, а кроки зсуву — шляхом множення отриманих значень затримок на частоту квантування. Обчислені таким чином кроки зсуву реалізуються зсувними регістрами, і фазовані належним чином елементарні *A*-скани підсумовуються; у результаті в пам'ять завантажується результуючий масив — суперпозиційний *A*-скан.

Таким чином, формування суперпозиційного *A*-скану шляхом додавання зі зсувом сигналів, які сприймаються усіма елементами апертури прийому, повторює фізичний процес прийому сигналу віртуальним монолітним п'єзоелементом, чий нахил, форма приймаючої поверхні й ефективна площа прийому визначаються перерахованими вище параметрами.

На підставі розглянутого найпростішого прикладу можна зробити висновок, що електронне маніпулювання кутом введення для заданої прийомної апертури супроводжується зміною:

- ефективної площі прийому;
- довжини центрального променя в призмі.

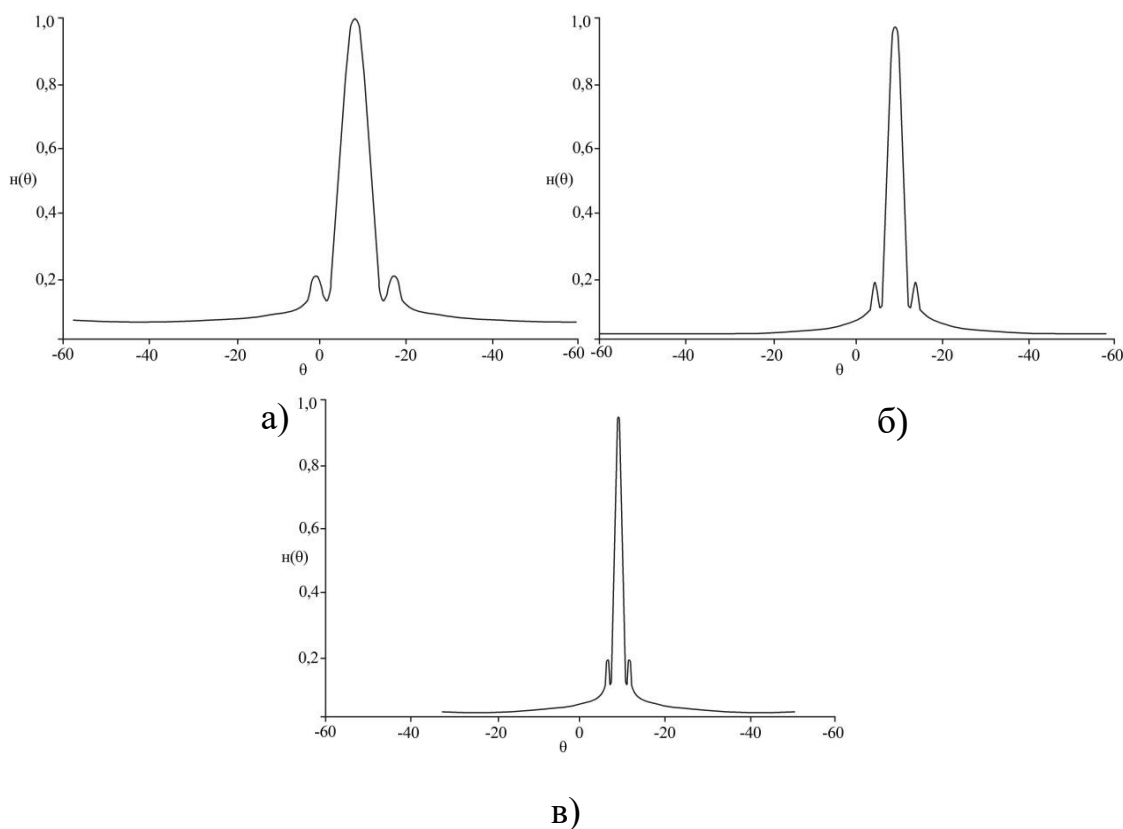
3.3 Розроблення способу вибору параметрів ультразвукових фазованих решіток залежно від параметрів об'єкту контролю

Для досягнення вищої роздільної здатності в процесі НК при використанні ФР необхідно вибрати такі параметри перетворювача, щоб акустичний тиск в точці фокусування був максимальний, а в інших напрямках поширення — мінімальним.

Напрявленість звукового поля ФР залежить від кількості п'єзоелементів. 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 спрямованості бокових віток необхідно дослідити діаграми

напрямлєності ФР при збільшенні кількості їх елементів. На рис. 3.2 подані діаграми напрямлєності ФР при однакових параметрах ($\theta = 20^\circ$, $d = 0,5\lambda$) і $f = 5$ МГц, але з різною кількістю елементів $N = 16$, $N = 32$ та $N = 64$ [38].

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 напрямлєності на куті фокусування і дві малих бічних. Бокові пелюстки виникають внаслідок взаємодії між елементами ФР. При $N = 16$ ширина основної пелюстки рівна $9,3^\circ$. Кут розкриття основної вітки зменшується до $4,6^\circ$ при $N = 32$, та до $2,1^\circ$ при $N = 64$.



а) $N = 16$; б) $N = 32$; в) $N = 64$

Рисунок 3.2 — Напрямлєність ультразвукового променю $H(\theta)$ при зміні кількості елементів N

Для зменшення кута розкриття бокових віток необхідно зменшити взаємодію між елементами ФР шляхом зміни відстані між ними. Для цього

необхідно провести дослідження діаграми напрямленості при зміні відстані між елементами. Рисунок Б.1 (дод. Б) демонструє вплив зміни міжелементної відстані на напрямленість акустичного поля.

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 $1,2\lambda$ спостерігається поява пелюсток на кутах -20° , -30° , що свідчить про появу небажаних дифракційних максимумів. Зменшення кута розкриття основної вітки, зменшення рівня бокових віток і віддалення від основної вітки бокових віток — умова забезпечення максимальної напрямленості ультразвукового поля, досягається при $d = 0,5\lambda$. Тому, підвищення точності контролю з допомогою ФР досягається при збільшенні кількості елементів розташованих на відстані $0,5\lambda$.

Збільшення кількості перетворювачів чи відстані між ними призводить до збільшення геометричних розмірів перетворювачів у цілому та їх вартості, яка в першу чергу залежить від кількості п'єзоелементів. При виборі кількості п'єзоелементів ФР потрібно врахувати їх геометричні розміри так, щоб забезпечити акустичний контакт ФР і поверхні ОК. Для контролю трубних об'єктів збільшення кількості елементів обмежуються кривизною поверхні контролю.

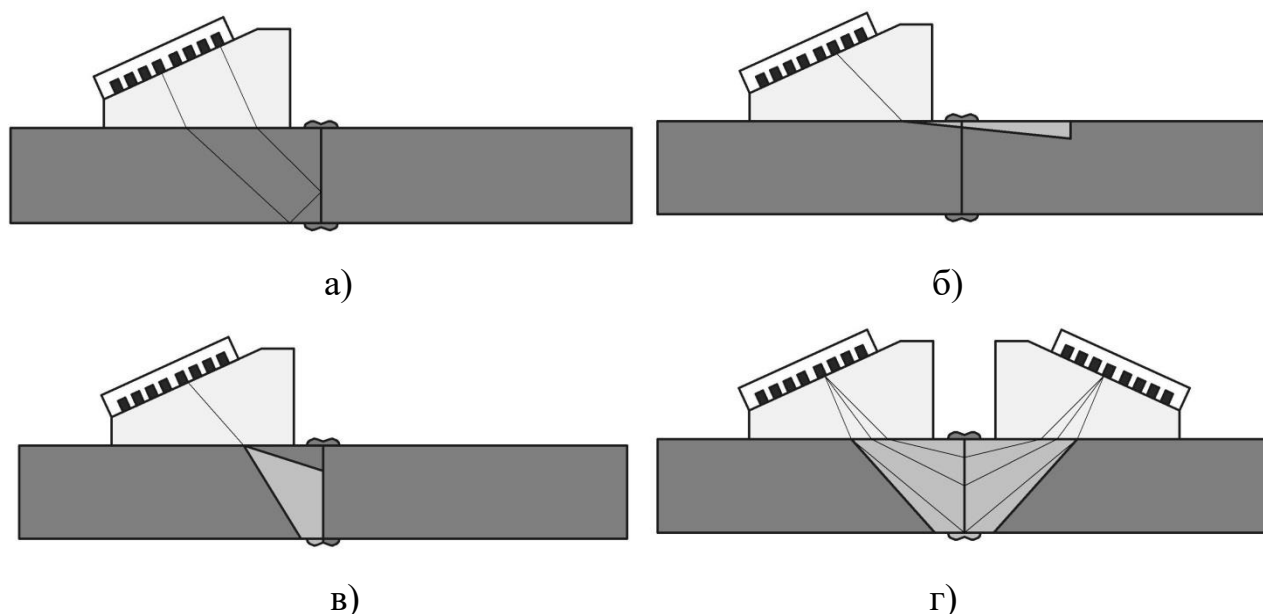
Результати проведеного аналізу можна підсумувати наступним чином:

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;

2) Направленість променю може бути підвищена шляхом 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 $\lambda/2$.

3.4 Розроблення методики ультразвукового контролю стикових зварних з'єднань поліетиленових труб

Для контролю стикових з'єднань проведено аналіз чотирьох різних методів [39]: самотандем, секторний луно-імпульсний, повзучої хвилі та дифракційно-часовий (рис. 3.3). У більшості випадків ці методи є доречними, як з точки зору об'єму контролю, так і типів дефектів, що виявляються. Технологія самотандему використовує половину елементів ФР для передачі, а іншу — для прийому. Ця методика є корисною для виявлення плоских дефектів, але зона охоплення обмежена площею близькою до внутрішньої поверхні.



а — самотандем; б — метод повзучої хвилі; в — секторе луно-імпульсне;
г — дифракційно-часовий

Рисунок 3.3 — Методи сканування стикового зварного з'єднання

У луно-імпульсному методі використовуються всі елементи ФР, щоб створити апертуру, що направляє УЗ промінь від малого до великого кута. Ця методика дозволяє просканувати зварне з'єднання з охопленням більшої частини зони сплавлення, за винятком кількох міліметрів поблизу зовнішньої поверхні.

Метод повзучої хвилі спрямований на покриття області, близької до зовнішньої поверхні, яка є частиною зварного з'єднання, не охопленого першими двома методами. Для методу повзучої хвилі використовується секторне сканування під великим кутом, яке створює поздовжні хвилі, що поширюються безпосередньо під контрольованою поверхнею, для виявлення поверхневих і близьких до поверхні дефектів.

Дифракційно-часовий метод спрямований на охоплення всієї зони сплавлення. Ця технологія чутлива до вертикальних дефектів. Застосовуються роздільні перетворювачі, отримуючи скани двох секторів. Обидва перетворювачі використовують велику апертуру для передачі променів, охоплюючи весь зварний шов.

Ультразвуковому контролю піддаються з'єднання ПЕ труб, які відповідають вимогам візуального контролю (зовнішнього огляду). Кількість зварних з'єднань, що піддаються ультразвуковому контролю, слід визначати за нормами в залежності від умов прокладки трубопроводу і ступеня автоматизації зварювальної техніки.

До виконання робіт з ультразвукового контролю допускаються спеціалісти, що мають сертифікат встановленої форми на право проведення контролю не нижче другого рівня кваліфікації за акустичними методами контролю, а також посвідчення про додаткове навчання з контролю зварних стикових з'єднань поліетиленових трубопроводів.

За допомогою ультразвукового контролю повинні виявлятися внутрішні дефекти типу несплавлення, тріщин, окремих або ланцюжків (скупчень) пор, включень. Дефекти зварних стикових з'єднань ПЕ трубопроводів за результатами ультразвукового контролю відносять до одного з наступних видів:

- поодинокі (пори, механічні включення, домішки);
- протяжні (несплавлення, тріщини, подовжені пори та включення, ланцюжки або скупчення пор, включень).

Оцінка якості зварних стикових з'єднань ПЕ трубопроводів проводиться за такими ознаками: максимально допустимої площі дефекту (амплітудний

критерій), за умовною протяжністю дефекту (амплітудно-часовий критерій), за кількістю допустимих дефектів на периметрі стику. У разі визначення різних значень умовної протяжності дефекту при контролі зварного шва з двох його сторін оцінка якості проводиться за більшим з них. Результати ультразвукового контролю оформляють у вигляді протоколу перевірки зварних стиків трубопроводу ультразвуковим методом, згідно зі додатком Г.

Ультразвуковий контроль зварних стикових з'єднань здійснюють у ручному, механізованому або автоматизованому варіантах.

При проведенні ультразвукового контролю слід застосовувати:

- ультразвукові луно-імпульсні дефектоскопи з можливістю роботи зі ФР, розраховані на робочу частоту ультразвуку в діапазоні від 4 до 5 МГц;
- стандартні зразки підприємства (СЗП) з еталонними відбивачами для налаштування параметрів контролю (рисунк Е.1);
- перетворювачі ФР з робочою частотою у діапазоні від 4 до 5 МГц та кількістю п'єзоелементів від 16 до 64 (таблиця Е.1).

Використане для проведення ультразвукового контролю обладнання повинно бути сертифіковане в установленому порядку.

Ультразвуковий контроль зварного стикового з'єднання повинен проводитися при температурі біляшовної зони стику не вище 30°C. Перед проведенням контролю біляшовної поверхні зварного стикового з'єднання ретельно очищаються від бруду, снігу тощо. Ширина зони очищення визначається конструкцією застосовуваних перетворювачів на ФР і технологією контролю.

Підготовлені для ультразвукового контролю поверхні безпосередньо перед проведенням прозвучування стикового з'єднання покриваються шаром контактної рідини. Як контактну рідину в залежності від температури навколишнього повітря слід застосовувати: при позитивних температурах — спеціальні водорозчинні гелі, шпалерний клей, гліцерин, при негативних температурах навколишнього повітря — моторні мастила, розведені до необхідної концентрації дизельним

паливом. При застосуванні гліцерину і моторних мастил поверхню труби після проведення ультразвукового контролю треба очистити та знежирити.

Контроль якості стикового з'єднання проводять на двох рівнях чутливості — бракувальному і пошуковому. Пошукова чутливість відрізняється від бракувальної на 6 дБ. Налаштування чутливості контролю здійснюють при температурі, що відповідає температурі навколишнього повітря в місці проведення контролю.

Оцінка якості стикових зварних з'єднань ПЕ трубопроводів проводиться за альтернативною ознакою — «придатний» або «не придатний».

Зварне стикове з'єднання вважається «не придатним», якщо в ньому виявлені:

— дефекти, амплітуда відбитого сигналу від яких перевищує амплітуду сигналу від еталонного відбивача в СЗП на бракувальному рівні чутливості;

— дефекти, амплітуда відбитого сигналу яких перевищує амплітуду сигналу, відбитого від еталонного відбивача в СЗП на пошуковому рівні чутливості, якщо умовна протяжність дефекту або кількість дефектів перевищують нормативні значення.

3.5 Розроблення методики ультразвукового контролю терморезисторних зварних з'єднань поліетиленових труб

На рис. 1.1 зображено поперечний переріз муфти, розташування нагрівальних провідників і можливі місця виявлення дефектів. Рисунок показує зовнішню змінну форму муфти та деякі обмеження контролю, наприклад, маркування та індикатори зварювання. Крім того, зовнішня конструкція муфти різниться в залежності від виробника.

Потрібно враховувати місце непровару. Єдиний можливий доступ для контролю — зовнішня поверхня муфти. На шляху ультразвукового променя до дефектів непровару знаходяться нагрівальні провідники муфти. При дослідженнях [40] мали місце мідні дроти діаметром від 0,6 мм до 1,7 мм із

відстанню від 2 до 4 мм залежно від конструкції муфти. Для усунення будь-яких артефактів від провідників потрібен щільно сфокусований ультразвуковий промінь.

Контактний контроль можливий для труб великого діаметра, а для контролю труб меншого зовнішнього діаметра більш доцільним є застосування іммерсійного контролю. Крім того, для забезпечення достатньої роздільної здатності потрібно використовувати сфокусований ультразвуковий промінь.

Щоб забезпечити економічність контролю, метод повинен бути швидким і простим. Для полегшення контролю було вирішено, що доцільно переміщати один давач навколо кожного кінця муфти.

Важливим фактором для проведення контролю є знання кількості часу, що минув після зварювання до того, як ультразвукові характеристики зварного шва стали достатньо стабільними для забезпечення надійного контролю.

Виміряно, що швидкість поздовжніх хвиль ультразвуку у муфті при 20°C становить 2220 м/с.

Для визначення часу, після якого можна проводити ультразвуковий контроль у терморезисторному зварному з'єднанні, проведено ряд експериментів для вимірювання затухання та швидкості матеріалу в залежності від температури границі сплавлення. У таблиці 3.1 представлені результати вимірювання [40] для муфти зовнішнього діаметру 250 мм після зварювання.

Таблиця 3.1 показує, що середня швидкість для з'єднання швидко змінюється від 1730 м/с до 2220 м/с, і наявна втрата 15 дБ чутливості контролю через 75 хв. З цього випливає, що зміни передатних характеристик ультразвуку настільки великі, що вони впливатимуть на будь-які ультразвукові вимірювання, поки муфта буде гарячою.

З цієї причини було зроблено висновок, що з'єднання діаметром 250 мм потребують очікування двох години після нагрівання та перед контролем, тоді як з'єднання з діаметром 125 мм можна перевірити лише через годину після циклу нагрівання.

Таблиця 3.1 — Зміна ультразвукових властивостей з часом і температурою для муфти діаметром 250 мм

Час після зварювання, хв.	Температура межі розділу, °C	Амплітуда від провідників, дБ	Швидкість, м/с
1	2	3	4
0	100	0	1730
2	99	-9	1731
5	94	-9	1749
10	86	-8	1830
15	80	-8	1864
20	74	-8	1912
30	68	-7	1927
45	59	-10	2042
75	48	-14	2110
105	39	-3	2191
125	37	-3	2191
Холодне	20	1	2220

Метод перевірки терморезисторних зварних швів — звичайне лінійне сканування, сфокусоване на зоні сплавлення між фітингом і трубою (рис. 3.4). Найважливішими факторами для контролю терморезисторних з'єднань є охоплення та роздільна здатність. Зона сплавлення розташована нижче провідників і потрібна достатня роздільна здатність для контролю між провідниками. Як правило, роздільна здатність зростає зі збільшенням частоти. Тим не менш, ПЕ має високий коефіцієнт затухання, а затухання збільшується наближено з коефіцієнтом потужності та частотою. Таким чином, частота повинна бути низькою для великих труб, щоб мати можливість досягти достатньої відстані поширення звуку. У більших фітингах діаметр провідників і проміжок між ними також більший, тому роздільна здатність достатня. Для менших труб діаметр та інтервал провідників стають меншими, тому необхідний перетворювач із більш високою частотою для перевірки зони сплавлення.

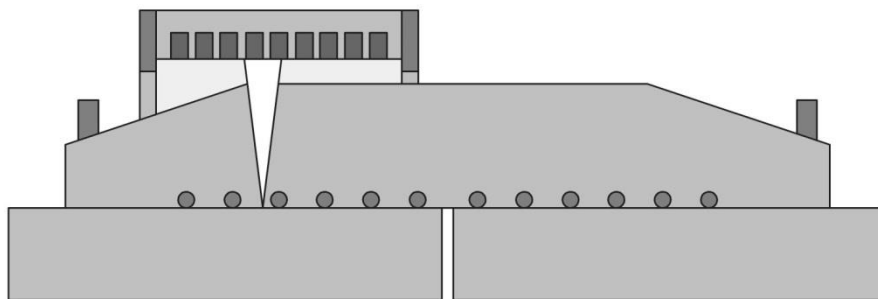


Рисунок 3.4 — Сканування терморезисторного з'єднання

Для досягнення необхідної роздільної здатності дефекту терморезисторного зварного з'єднання, було обрано частоту контролю 7 МГц для муфти 125 мм. Це компроміс між затуханням матеріалу, розміром фокусної віддалі та роздільною здатністю виявлення дефектів.

Чим менший розмір елементів перетворювача, тим більша кількість елементів ФР потрібна для перевірки повної довжини зони сплавлення. Крім того, чим більше елементів ФР потрібно, тим дорожчою стає система контролю. З усіх цих міркувань був досягнутий компроміс між розміром елементів, відношенням «сигнал-шум» та тривалістю контролю. Остаточні технічні характеристики перетворювача для з'єднань труб діаметром 125 мм є частота 7 МГц з відстанню між центрами сусідніх елементів 0,6 мм з механічним фокусом в напрямку вздовж кола для підтримки кругового фокуса на циліндричній поверхні муфти. Це дало змогу використати перетворювач на ФР із фокусом 0,4 мм на поверхні крайки зварного шва, що дозволяє розпізнавати провідники та дефекти.

З усіх цих міркувань було досягнуто компромісної конструкції перетворювача, який забезпечує зону дії контролю близько половини довжини муфти за один прохід.

Потрібно проводити контроль двох кінців терморезисторного зварного з'єднання. Розміри перетворювача на ФР є відправною точкою для конструювання маніпулятора (дод. В, рис. В.1) [39], що забезпечує надійний акустичний контакт з ОК, полегшений запис позиції перетворювача та сканування навколо муфти з кожного кінця труби.

З проведених у роботі [40] випробувань було зроблено висновок, що дефекти типу непровар можна достовірно виявляти у конфігураціях з'єднань, що були проконтрольовані. Ультразвукове зображення на рис. В.2 (дод. В) наводить приклад непроварів через забруднення на поверхні труби.

На додаток до непроварів вздовж поверхні поділу труби, шляхом вимірювання розташування нагрівальних провідників може бути визначене несплавлення. Переміщені провідники є показником несплавлення. Цей випадок показано на рис. В.3 (дод. В).

Характеристика непроварів і несплавлень забезпечується положенням проводів. Обидва види дефектів знаходяться під нагрівальними провідниками, але при непроварах провідники знаходяться на прямій лінії, тоді як при несплавленні можна спостерігати їх зміщення.

Недостатнє нагрівання може спричинити зменшення міцності з'єднання. Тому це можна вважати дефектом, який, проте не обов'язково зумовлює непровар. Цей дефект виявляється шляхом вимірювання положення зони термічного впливу (ЗТВ): якщо час нагрівання зменшується, ЗТВ з'являється ближче до провідників на ультразвуковому зображенні. На рис. В.4 (дод. В) показано зображення правильно нагрітого з'єднання та з'єднання з недостатнім нагріванням.

Встановлено залежність між фізичним вимірюванням ЗТВ [40], і результатами отриманими при ультразвуковому контролі. Ці результати показані на рис. В.5 (дод. В). Графік показує правильну кореляцію між двома результатами, методом контролю ФР може дати надійне значення ЗТВ та діагностування неправильного циклу нагрівання.

Проведено оцінювання електронних секторних сканів на терморезисторної муфти в одному положенні навколо неї [39]. На сканах видно поверхню фітингу, а також донну поверхню з провідниками, розташованими трохи вище. Деякі частини донної поверхні, очікувано, закриті провідниками. Скани фітингу труби розміром 180 мм та 710 мм показано на рис. В.6 (дод. В). Електронні скани з

використанням перетворювача 7 МГц для фітинга 180 мм та перетворювача 5 МГц для фітинга 710 мм.

Результати сканування терморезисторного з'єднання зовнішнім діаметром 180 мм подано на рис. В.7 (дод. В). Відсутні відбиття від поверхні під провідниками і зони сплавлення. Над провідниками можна побачити лінію, яка вказує на ЗТВ. Більш чітко це спостерігається на рис. В.7 (дод. В), б, де було додано підсилення 12 дБ.

Порівняння деяких результатів УЗ контролю і руйнівних випробувань подану на рис. В.8 (дод. В) [37].

Отже, розроблено структурну схему пристрою ультразвукового контролю із використанням ФР, на її основі описано принцип роботи дефектоскопа. При аналізі випромінювання та прийому УЗ сигналів ФР стало зрозуміло, що електронне керування кутом введення для заданої апертури випромінювання та прийому супроводжується зміною: ефективної площі випромінювання, довжини центрального променя в призмі. Розглянуто реалізацію фокальних законів і визначено, що для забезпечення рівномірності чутливості у поперечному перерізі ОК, який сканується шляхом електронного керування променем, дефектоскоп із ФР повинен бути оснащений можливістю повторного індивідуального підстроювання підсилення для реалізованих фокальних законів. Розроблено методики контролю якості зварних швів ПЕ труб зі систематизацією вибору частоти перетворювача та методу сканування.

4 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ

У даному розділі здійснено метрологічний аналіз розробленої методики з використанням концепції невизначеності вимірювання.

4.1 Аналіз факторів, що впливають на точність ультразвукового контролю

Ультразвуковий контроль є складним багатофакторним процесом, де на кожній його стадії оцінка точності є стаціонарним випадковим процесом. Для розрахунку характеристик невизначеностей у загальному випадку використовують: метрологічні характеристики засобів вимірювань, характеристики величин, що впливають, характеристики об'єкта вимірювань.

При контролі параметрів дефектів луно-імпульсним методом завжди з'являються невизначеності результатів вимірювання, які залежать від непевності визначення початкової інформації. Тому проаналізовано причини їх виникнення.

Зміна товщини шару контактної речовини чи зміна відстані між перетворювачем та ОК (в нашому випадку) призводить до зміни тривалості проходження від зондуючого до відбитого сигналу. Зміна рівня сигналу спричиняє втрату одного півперіоду луно-імпульсу при однаковому рівні спрацювання вимірювального тригера. Зміна тривалості переднього фронту луно-імпульсу.

На точність має вплив невизначеність блоку, що здійснює визначення тривалості поширення УЗ коливань, та невизначеність, що зумовлена налаштуванням приладу.

Стан поверхні. Температура поверхні змінює швидкість поширення ультразвуку, а також затухання (з підвищенням температури швидкість поширення ультразвуку в поліетилені зменшується).

На результат при ультразвуковому контролі впливає формат і розмір біляшовної зони, робоче середовище, затухання, анізотропія та структура ОК.

Міжканальні відхилення інтервалів випромінювання та прийняття сигналів, оскільки їм притаманні Багатоканальним міжканальні амплітудні та фазові відхилення. У дійсних системах, через ці відхилення збудження п'єзоперетворювачів ФР та прийняття ним сигналів здійснюється не ідентично. При цьому відхиляються власні параметри вимірювальних системи і параметри ПЕП.

Коефіцієнт підсилення. Точність визначення коефіцієнта підсилення пояснюється невизначеністю коефіцієнта передачі підсилювача та розсіюванням параметрів зовнішніх компонент.

Невизначеності вимірювання тривалості та амплітуди відбитого сигналу залежать від параметрів засобів вимірювання.

Вплив нестабільності акустичного контакту. Внаслідок перевідбиття УЗ коливань в контактній рідині форма акустичного сигналу спотворюється. Для цього потрібно стабілізувати зусилля притискання ПЕП до поверхні ОК. Також необхідно звертати увагу на шорсткість поверхні ОК.

Невизначеності, зумовлені необ'єктивним зчитуванням оператором показів вимірювальних засобів.

У ДСТУ EN 12668–2 наведено допустимі відхилення параметрів УЗ п'єзоперетворювачів задекларованих виробником в діапазоні частот 0,5–15,0 МГц [41]:

— тривалість імпульсу відбитого від ОК не повинна відхилятися більше ніж на $\pm 10\%$ від встановленої тривалості;

— ширина імпульсу не повинна відхилятися більше ніж на ± 10 мм або на $\pm 5^\circ$ від встановленої.

Невизначеність встановлення ФР по координатам X та Y становить не менше $\pm 0,1$ мм.

Для застосування дефектоскопів з технологією ФР необхідно також однозначно визначати чутливість до несучільностей, що виявляються, у двох

площинах: горизонтальній і вертикальній. Для цього при калібруванні необхідні зразки, які містять відбивачі, розташовані на різній глибині, а як відбивачі використовувати або бічні циліндричні отвори, або плоскодонні відбивачі.

Помилка при калібруванні приладу викликає систематичну невизначеність при наступних вимірах.

Зміна рівня сигналу. У процесі контролю амплітуда електричних імпульсів змінюється. Невизначеність значно знижується при введенні в прилад систем автоматичного та часового регулювання чутливості.

Зміна тривалості переднього фронту відбитого імпульсу. Невизначеність пояснюється залежністю загасання УЗ коливань від частоти. В першу чергу загасають високі частотні спектра імпульсу, що зумовлюють його передній фронт. Для підвищення точності вимірювань зондуючий імпульс повинен бути з максимально крутим переднім фронтом, а смуга пропускання підсилювача та ПЕП розширена в область високих частот, щоб забезпечити проходження імпульсів з таким фронтом. Для цього використовують генератор, що забезпечує крутий передній фронт зондуючого імпульсу. Розширюють смугу частот підсилювача і шукача в сторону високих частот, від яких залежить крутизна переднього фронту.

Кривизна поверхні ОК. При нестійкому положенні ПЕП луно-сигнали спотворюються, що також призводить до неточних показань.

Акустичний взаємний зв'язок між п'єзоелектричними елементами в ультразвукових ФР. Достовірність і точність ультразвукового контролю з використанням дефектоскопів значною мірою залежить від чутливості та ПЧХ фазованих решіток п'єзоелектричних перетворювачів.

Для визначення умовної чутливості, перевірки роздільної здатності та невизначеності глибиноміра дефектоскопа застосовують стандартний зразок. Стандартні зразки, на яких проводиться налаштування апаратури повинні мати дефекти різного типу, для наглядного визначення відклику та вигляду зображення дефекту на S-скані. При проведенні контролю, ми порівнюємо отримані значення сигналів від дефектів з атестованими характеристиками відбивачів у зразках й

оцінюємо ступінь придатності виробу. Оскільки невизначеності виготовлення зразків, невизначеності побудови графіків і невизначеність устаткування відомі, то в такому випадку, ультразвуковий дефектоскоп реалізує непрямий метод вимірювання розміру дефекту.

Амплітудна ознака класифікації відбивачів допускає невизначеність в оцінці типу та розмірів дефектів.

4.2 Вплив параметрів фазованої решітки на можливість виявлення відбивачів

Вивчено вплив параметрів налаштування (активної апертури, фокусної відстані, кутової роздільної здатності, типу фокусування) на виявлення відбивачів у зразку за допомогою ультразвукового дефектоскопа і ПЕП на ФР з призмою. Дані параметри зазнавали змін, що дозволило отримати і згодом порівняти ряд S-сканів (протоколів), деякі з них представлені на рис. Д.1–Д.3 (дод.Д) [36].

Зображення фіксувалися при прозвучуванні кутом введення α , розрахованим за законом Снелліуса, виходячи з відомого кута призми β і швидкості поширення ультразвукових хвиль у матеріалах ОК і призми.

При вивченні впливу активної апертури отримані три протоколи контролю: для 32 і 8 активних елементів апертури. На рис. Д.1 наведені протоколи, записані при використанні 32 і 8 активних елементів, відповідно [36].

Застосування меншого числа активних елементів апертури супроводжується появою сторонніх сигналів, а також впливає на протяжність плями, що видно при порівнянні S-розгортки на наведених у додатку К рисунках.

При зміні типу фокусування — постійний шлях/глибина/зміщення — отримані протоколи, зображені на рис. Д.2.

Тип фокусування помітно впливає на характер зображення плями від дефекту на S-скані. Попри те, що в більшості випадків даний параметр не редагується (зазвичай при контролі встановлюється режим «постійний шлях»),

неправильне налаштування даного параметра може негативно позначитися на результатах контролю.

Кутова роздільна здатність змінювалася з $0,5^\circ$ на $5,0^\circ$. На рис. Д.3 для оцінки представлені протоколи, отримані при значеннях кутовий роздільної здатності $0,5^\circ$ і $5,0^\circ$ [36].

Кутова роздільна здатність прямо впливає на отримані протоколи контролю. Її збільшення призводить до погіршення зображення на S-скані, до зменшення роздільної здатності. При малих об'ємах контролю оптимальним варіантом для роботи є значення кутової роздільної здатності $0,5\text{--}1^\circ$. При значному обсязі контролю для таких значень роздільної здатності буде створено великий масив даних, що може негативно вплинути на роботу приладу. Таким чином, даний параметр необхідно вибирати виходячи з конкретного завдання і об'єкта контролю.

Порівнюючи протоколи, отримані при вивченні впливу фокусної віддалі, записані при виявленні відбивача на глибині 10 мм при різних значеннях фокусування, виявилось, що, фокусуючись на глибину 10 мм, отримали насичено забарвлену яскраву пляму на S-скані, однак при цьому ж налаштуванні спостерігається велика кількість перешкод на глибині, близькій до тої, що цікавить (сигнали, відображені на S-скані, є сигналами від границі зразка). При зміні фокусування спостерігається зменшення даних шумів, проте і у корисного сигналу характеристика яскравості на S-скані зменшується, пляма від відбивача стає більш протяжною [42].

Таким чином, можна зробити висновок, що правильне настроювання фокусування дозволяє виключити помилкові спрацьовування і фіксацію несущільностей.

На підставі розглянутих результатів можна зробити ряд висновків. Використання більшої кількості активних елементів апертури позитивно впливає на виявлення відбивачів. Кутову роздільну здатність краще приймати на рівні 1° , бо її зменшення не призведе до значних змін, а тільки створить великий масив даних, який може утруднити роботу дефектоскопа; збільшення кутової роздільної

здатності веде до погіршення зображення на S -скані та до зменшення роздільної здатності.

Тип фокусування впливає на характер зображення на S -скані. Редагування даного параметра може бути необхідним для виявлення дефектів, напрямок яких заздалегідь відомий або передбачуваний. Фокусна відстань значно впливає на результат контролю. Даний параметр важливо не тільки правильно задати при підготовці до роботи, але також коригувати при вимірюванні характеристик дефектів для найбільшої точності. Вірне налаштування параметрів контролю забезпечить правильне виявлення дефектів і вимірювання їх характеристик, а також дозволить уникнути фіксації хибних сигналів.

4.3 Оцінка достовірності пропонованого методу контролю

На основі аналізу впливу різноманітних факторів на процес УЗ контролю якості зварних з'єднань встановлено основні складові невизначеності, за якими розроблена схема нагромадження сумарної невизначеності, представлена на рисунку 4.1.

Для оцінювання стандартної невизначеності за типом A для рівномірного закону розподілу використовують формулу [43]:

$$u_A(x) = \frac{x_v - x_n}{\sqrt{2(n-1)(n-2)}}, \quad (4.1)$$

де x_v , x_n — відповідно верхнє і нижнє значення результатів спостережень, що описуються рівномірним законом розподілу.

Стандартна невизначеність типу B для рівномірного закону розподілу визначається згідно з виразом [43]:

$$u_B(x) = \frac{x_v - x_n}{2\sqrt{3}}. \quad (4.2)$$

Відносна невизначеність розраховують як відношення відповідної невизначеності до модуля знайденої найкращої оцінки вимірюваної величини і виражають у відсотках [43]:

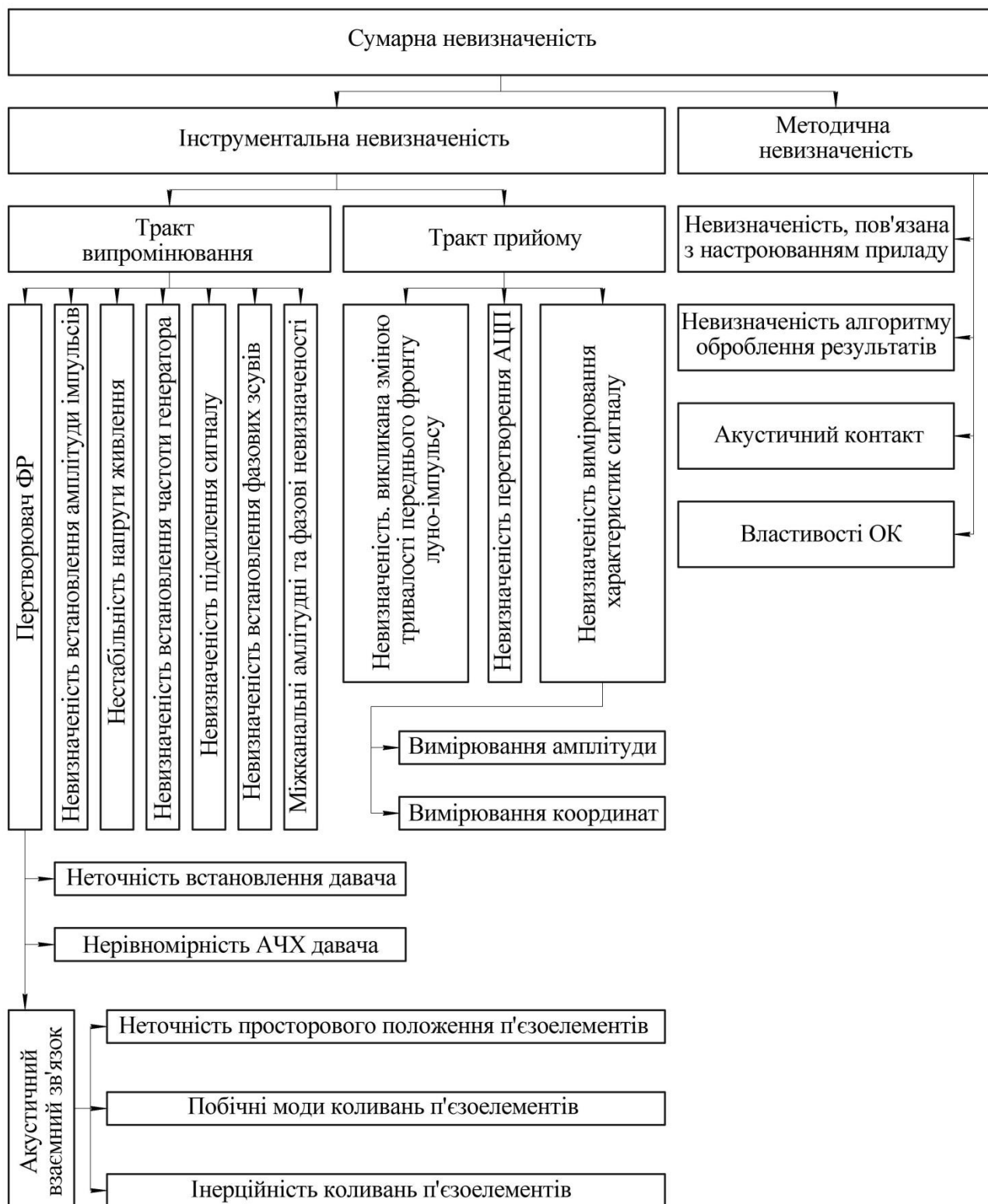


Рисунок 4.1 — Схема нагромадження невизначеності при УЗ контролі

$$\delta_u(x) = \frac{u(x)}{|x|} 100\%. \quad (4.3)$$

Сумарну методичну невизначеність визначимо наступним чином:

$$\delta_m = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_o^2 + \delta_{ак}^2 + \delta_{ок}^2} = 2,74\%, \quad (4.4)$$

де δ_n — невизначеність настроювання (калібрування) приладу, δ_o — невизначеність обробки результатів, $\delta_{ак}$ — невизначеність, викликана нестабільністю акустичного контакту, $\delta_{ок}$ — невизначеність, викликана властивостями ОК.

Визначимо невизначеності тракту випромінювання та прийому.

Розширена невизначеність швидкості поширення звуку:

$$U_p(v) = k_p u_c(v) = 30 \text{ м/с}, \quad (4.5)$$

де k_p — фактор покриття.

Невизначеність вимірювання розмірів і розташування дефектів визначаємо на основі даних дослідження [39] у таблиці 4.1, де приведено дійсні розміри та взяті з показів S-сканів при секторному луно-імпульсному контролі ультразвуковими фазованими решітками ПЕ труби зовнішнього діаметра 450 мм зі штучними дефектами. Розширена невизначеність вимірювання глибини залягання дефектів рівна $U_p(h) = 1,01 \text{ мм}$. Аналогічно розширена невизначеність вимірювання амплітуди сигналу $U_{p,ампл} = 0,5 \text{ дБ}$. Стандартна невизначеність встановлення амплітуди зондуючих імпульсів та невизначеність встановлення підсилення відповідно $u_{ампл} = 10\%$, $u_{підс} = 0,3 \text{ дБ}$.

Невизначеність i -го каналу багатоканального тракту випромінювання для спектра частот вхідного сигналу у діапазоні частот від 0 до 5 МГц складає 1,95%.

Інструментальна невизначеність визначається наступним чином:

$$\delta_i = \sqrt{\sum \delta_{тв}^2 + \sum \delta_{тп}^2} = 4,18\%, \quad (4.6)$$

де $u_{тв}$ — невизначеність тракту випромінювання, $u_{тп}$ — невизначеність тракту прийому.

Таблиця 4.1 — Дійсні та отримані в ході ультразвукового контролю розміри плоскодонних отворів

Властивості		Властивості, виміряні зі сканів		
Діаметр отвору, мм	Глибина розташування, мм	Довжина, мм	Ширина, мм	Глибина розташування
8	8	9,28	7,51	8,91
8	14	8,25	7,10	14,07
8	20	6,19	8,095	21,20
6	6	8,25	5,51	9,15
6	14	5,16	5,24	14,79
6	22	5,15	2,96	24,61
4	4	6,19	2,96	6,08
4	7	4,12	3,45	8,39
4	14	2,06	2,41	13,32
4	21	5,16	3,03	20,70
4	24	3,12	2,20	25,88
2	2	5,15	1,93	5,84
2	7	2,06	2,00	7,18

Сумарна відносна невизначеність контролю якості зварних з'єднань складається з інструментальної та методичної невизначеностей і дорівнює:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_m^2 + \delta_i^2} = 5,0\%. \quad (4.7)$$

Таким чином, на основі аналізу факторів впливу в процесі проведення контролю зварних з'єднань ультразвуковим дефектоскопом з використанням ФР розроблена схема нагромадження сумарної невизначеності, розраховано значення її складових. Отримане значення сумарної невизначеності свідчить про доцільність впровадження методів на основі даного засобу за критерієм точності вимірювання.

ВИСНОВКИ

У результаті виконаних теоретичних досліджень у магістерській роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу розроблення удосконаленого, інформативного й ефективного ультразвукового методу контролю якості зварних швів ПЕ труб на основі технології ФР.

Здійснено аналіз характеристик і особливостей полімерних труб. Розглянуто методи з'єднання ПЕ труб, типів дефектів, що виникають у зварних з'єднаннях, причин їх появи. Проаналізовано науковий прогрес у розробці методів контролю для стикового та терморезисторного зварних з'єднань різних діаметрів.

На основі аналізу параметрів перетворювачів на ФР та розробленої математичної моделі процесу УЗ контролю обґрунтовано розроблення удосконаленого методу контролю зварних з'єднань полімерних труб з використанням ФР із забезпеченням оптимальних характеристик і можливістю автоматизації процесу контролю.

Розроблено структурну схему та описано принцип роботи ультразвукового дефектоскопа з можливістю проведення контролю зі застосуванням ФР. Розглянуто особливості випромінювання та прийому УЗ сигналів перетворювачами на ФР. Наведено принципи електронного керування променем і реалізації фокальних законів. Визначено вплив параметрів ФР на достовірність виявлення дефектів. Розроблено спосіб вибору оптимальних параметрів ФР залежно від особливостей ОК. Розроблено вдосконалені методи контролю якості стикових і терморезисторних зварних з'єднань ПЕ труб, які враховують акустичні властивості високого затухання та низької швидкості поширення ультразвуку.

На основі аналізу факторів впливу в процесі проведення контролю зварних з'єднань ультразвуковим дефектоскопом з використанням ФР розроблена схема нагромадження сумарної невизначеності, розраховано значення її складових. Отримане значення сумарної невизначеності свідчить про доцільність

впровадження методів на основі даного засобу за критерієм точності вимірювання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Пластикові труби для водопостачання. Застосування ПВХ труб для напірного водопостачання [Електронний ресурс] // ktz.com.ua. — Режим доступу : <http://ktz.com.ua/ua/vodoprovidni-trubi/truby-pvh>
2. ДСТУ 3761.2–98. Зварювання та споріднені процеси. Частина 2. Процеси зварювання та паяння. Терміни та визначення. К. : Держстандарт України, 1999. 54 с.
3. Газові ПЕ труби [Електронний ресурс] // ktz.com.ua. — Режим доступу : <http://ktz.com.ua/ua/gazoprovidni-trubi/pe-truby>
4. Fast guide to materials [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.teppfa.eu/fast-guide-to-materials/>
5. Труби з різних типів поліетилену [Електронний ресурс]. 2006. Режим доступу : <http://polyplastic.ua/ua/news/news-107.html>
6. MRS поліетилену [Електронний ресурс]. 2009. Режим доступу : http://polyplastic.ua/ua/news/mrs_polyethylene.html
7. Способи з'єднання полімерних труб. О.О. Мацієвська *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва* : [зб. наук. пр.] / відп. ред. М. А. Саницький. — Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львів. Політехніка», 2004. С. 146–151.
8. Підвищення якості зварних швів пластмасових трубопроводів. Л. С. Шлапак, М. В. Панчук, О. М. Матвієнків, Є. А. Дацун *Наук. вісн. Івано-Франків. нац. техн. ун-ту нафти і газу*, 2009. № 1. С. 106–110.
9. ДБН В.2.5–41:2009 Газопроводи з поліетиленових труб. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. К. : Мінрегіонбуд України, 2010. 149 с.
10. ДСТУ Б В.2.7–73–98 Труби поліетиленові для подачі горючих газів. Технічні умови. К. : Держбуд України, 1998. 48 с.
11. Steven A. Laser Welding: It's Not Just for Metals Anymore S. A. Kocheny, B. Miller. *Welding Journal*, 2009. Т. 88, № 3. С. 28–30.

12. Методи з'єднання поліетиленової труби [Електронний ресурс], 2010. — Режим доступу : http://polyplastic.ua/ua/news/vid_svarki.html
13. Технологія терморезисторного зварювання [Електронний ресурс], 2010. — Режим доступу : http://polyplastic.ua/ua/news/technology_fusion.html
14. Кімельблат В. І. Задачі оптимізації зварювання нагрітим інструментом встик [Електронний ресурс] В.І. Кімельблат // Полімерні труби. — Режим доступу : <http://polypipe.info/production-quality/1435-zada4i-optimizacii-zvaruvannya>
15. Візуальний контроль якості зварних з'єднань поліетиленових труб з використанням нагрівальних елементів в стик [Електронний ресурс], 2010. — Режим доступу : http://polyplastic.ua/ua/news/visual_styk.html
16. Візуальний контроль якості стику (терморезисторне зварювання) [Електронний ресурс], 2010. — Режим доступу : http://polyplastic.ua/ua/news/visual_kontrol.html
17. Кімельблат В. І. Нова парадигма у підготовці зварювальників та її зв'язок з розвитком техніки і технології зварювання поліетиленових труб [Електронний ресурс]. В. І. Кімельблат, І. В. Волков // Полімерні труби, 2015. — Режим доступу : <http://polypipe.info/production-quality/1283-nova-paradigma>
18. Berke M., Ballenger T. Phased array technology for standard ultrasonic testing / M. Berke // Insight, 2006. Vol. 48., №. 4. P. 218–220.
19. Phased Array [Електронний ресурс] // Olympus. — Режим доступу: <http://www.olympus-ims.com/en/phasedarray/>
20. Inspection & Non-Destructive Testing [Електронний ресурс] // General Electric. — Режим доступу : <https://www.gemeasurement.com/inspection-ndt>
21. Veo+. Overview // Sonatest. 2017. — Режим доступу : <https://sonatest.com/products/flaw-detectors/veo>
22. Phased Array Tutorial — Table of Contents. What are the advantages? [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/intro/advantages/>

23. Poguet J. Phased Array technology : Concepts, probes and applications [Электронный ресурс] / J. Poguet, J. Marguet, F. Pichonnat — IMASONIC S. A. / A. Garcia, J. Vasquez — TECNATOM // 8th European Congress on NDT, 17–21 June, 2002, Barcelona, Spain. — Режим доступа: <http://imasonic.com/Papers/PA2-02.pdf>
24. Crowther P. Practical experience of phased array technology for power station applications. P. Crowther *Insight*, 2004. Vol. 46, № 9. P. 525–528.
25. Development of an ultrasonic phased array system for nondestructive tests of nuclear power plant components S. J. Song, H. J. Shin, Y. H. Jang. *Nuclear Engineering and Design*, 2002. Vol. 214. P. 151–161.
26. Cziraki D., Danis A. Cost-effective pipeline girth weld AUT for Brazil. *Insight*. 2007. Vol. 49, № 3. P. 130–131.
27. Poguet J., Fleury G. Circular phased array probes for inspection of Superphoenix steam generator tubes [Электронный ресурс]. IMASONIC S.A. / O. Burat, G. Moreau — FRAMATOME // *EPRI Phased Array inspection seminar*. September 1998, Portland, Main, USA. — Режим доступа: http://www.ndt.net/article/v05n07/ima_p2/ima_p2.htm
28. Roach D. Use of focused pulse-echo ultrasonics for non-destructive inspection of thick carbon-carbon structures // *Insight*, 2006. Vol. 48, № 12. P. 743–750.
29. A flexible phased array transducer for contact examination of components with complex geometry [Электронный ресурс]. O. Casula, C. Poidevin, G. Cattiaux, G. Fleury // *16th World Conference on NDT*. August — September, 2004, Montreal, Canada. — Режим доступа : http://www.imasonic.com/Papers/WCNDT2004_773.pdf
30. Industrial Solutions. Railway [Электронный ресурс] // Olympus. — Режим доступа : [https://www.olympus-ims.com/en/solutions/#!/chooser\[industries\]=Railcar&chooser\[applications\]=weld-inspection](https://www.olympus-ims.com/en/solutions/#!/chooser[industries]=Railcar&chooser[applications]=weld-inspection)

31. Туз Ю. М., Красковський О. П., Мосолаб О. О. Методи та засоби вимірювання просторово-часових характеристик лінійних фазованих антенних решіток. *Інформаційні системи, механіка та керування*, 2012. С. 37–47.

32. Туз Ю. М., Красковський О. П., Мосолаб О. О. Метод та система вимірювання просторово-часових характеристик лінійних фазованих антенних решіток п'єзоелектричних перетворювачів. *Методи та прилади контролю якості. Науково-технічний журнал*, 2012. № 1 (28). С. 148–153.

33. Туз Ю. М., Красковський О. П., Мосолаб О. О. Аналіз похибок системи вимірювання просторово-часових характеристик лінійних фазованих антенних решіток п'єзоелектричних перетворювачів. *Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал*, 2012. № 6 (82). С. 62–66.

34. Мосолаб О. О. Методи та засоби підвищення точності вимірювання просторово-часових характеристик ультразвукових лінійних фазованих решіток : дис. канд. техн. наук : 05.01.02 / О. О. Мосолаб. К., 2016. 190 с.

35. Nageswaran C. Sound field modeling using SimulUS / C. Nageswaran, C.R.A. Schneider, C.R. Bird. *Insight*. 2008. Vol. 50, № 5.— P. 258–263.

36. Ultrasonic flaw detection method and ultrasonic flaw detection equipment [Електронний ресурс] : pat. G01N29/07 / J. Murai, D. Braconnier. ; Krautkramer Japan Co., Ltd. — № US8584526 B2 ; заявл. 16.09.08 ; опубл. 19.11.13. — Режим доступу : <http://www.google.tl/patents/US8584526>

37. A Novel Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) System for On-Site Inspection of Welded Joints in Plastic Pipes F. Hagglund, M. Robson, M. J. Troughton, W. Spicer, I. R. Pinson. *The e-Journal of Nondestructive Testing*. 2014. Vol. 20, № 6.

38. Попович О. В. Удосконалення акустичних методів визначення типів та розмірів дефектів металоконструкцій : дис. канд. техн. наук : 05.11.13 : захищена 03.11.16 / О. В. Попович. Івано-Франківськ, 2016. 139 с.

39. Development of Phased Array Ultrasonic Inspection Techniques for Testing Welded Joints in Plastic (PE) Pipes / F. Hagglund, M. J. Troughton, W. Spicer. *18th World Conference on Nondestructive Testing*. 2012.

40. Caravaca D. C., Bird C., Kleiner D. Ultrasonic phased array inspection of electrofusion joints in polyethylene pipes [Електронний ресурс] *NDT.net.*, 2006. Режим доступу :

<http://www.ndt.net/article/insight/papers/insi.49.2.83.pdf>

41. ДСТУ EN 12668–2:2015 (EN 12668–2:2010, IDT) Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 2. Перетворювачі. Введ. 01.01.2016. К.: Держстандарт України, 2015.

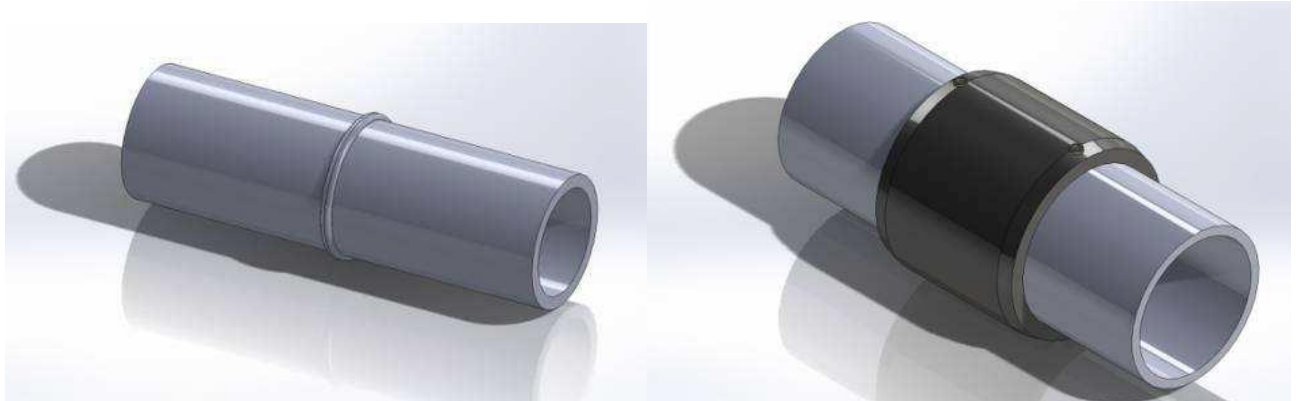
42. Hosseini S., Harrold S. O., Reeves J. M. Resolutions Studied on an Electronically Focused Ultrasonic Array. *British J. Non-Destr. Test*, 1985. Vol. 27, № 4. P. 234–238.

43. Поджаренко В. О., Васілевський О. М., Кучерук В. Ю. Опрацювання результатів вимірювань на основі концепції невизначеності: Навч. посібник. Вінниця: ВНТУ, 2008. 126 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Зварювання поліетиленових труб різними методами



а)

б)

а — нагрітим інструментом встик; б — терморезисторне

Рисунок А.1 — Типи зварних з'єднань ПЕ труб

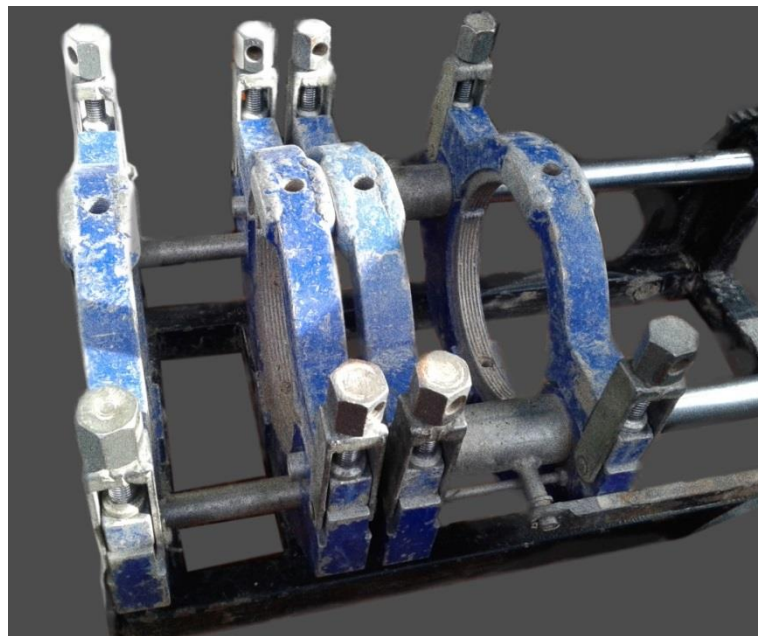


Рисунок А.2 — Обладнання для центрування та закріплення труб при зварюванні



Рисунок А.3 — Муфта для терморезисторного зварювання

ДОДАТОК В

Контроль терморезисторного з'єднання фазованими решітками

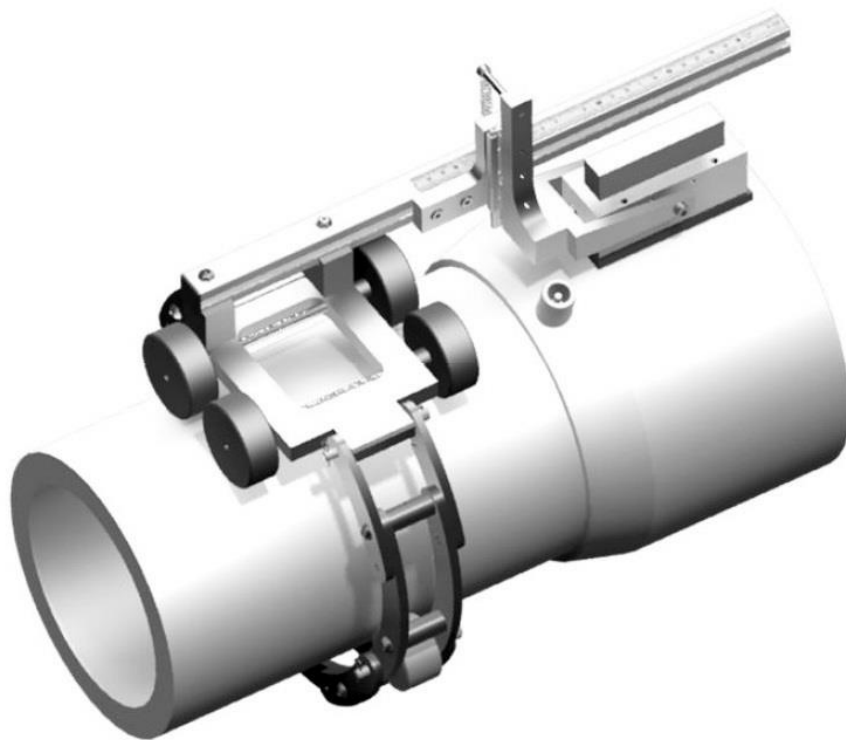


Рисунок В.1 — Конструкція маніпулятора для проведення контролю

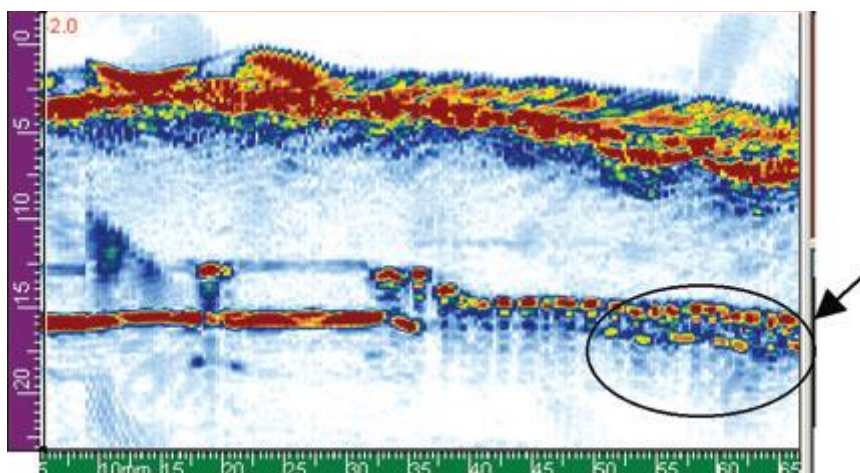


Рисунок В.2 — Дефект типу непровар

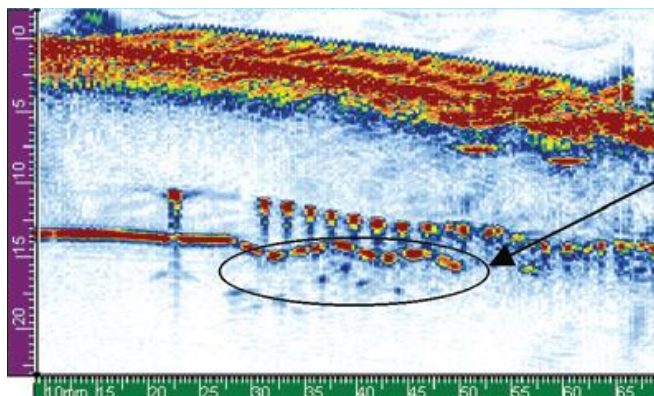
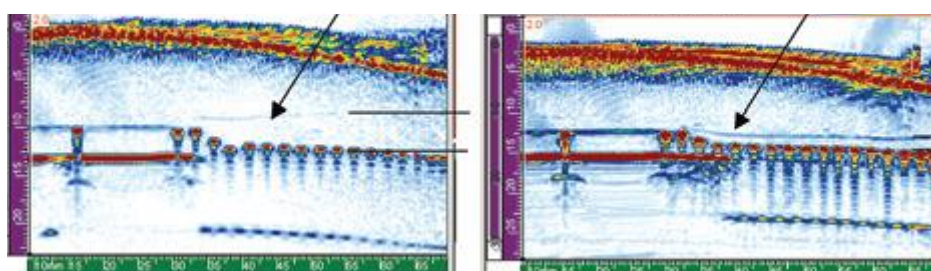


Рисунок В.3 — Дефект типу несплавлення, провідники зміщені



а)

б)

Рисунок В.4 — Порівняння зварювання з повним (а) та коротким (б) періодом нагріву показує зниження ЗТВ (на правому зображенні ЗТВ знаходиться поруч із нагрівальними провідниками, тоді як на лівому — ЗТВ знаходиться далі)

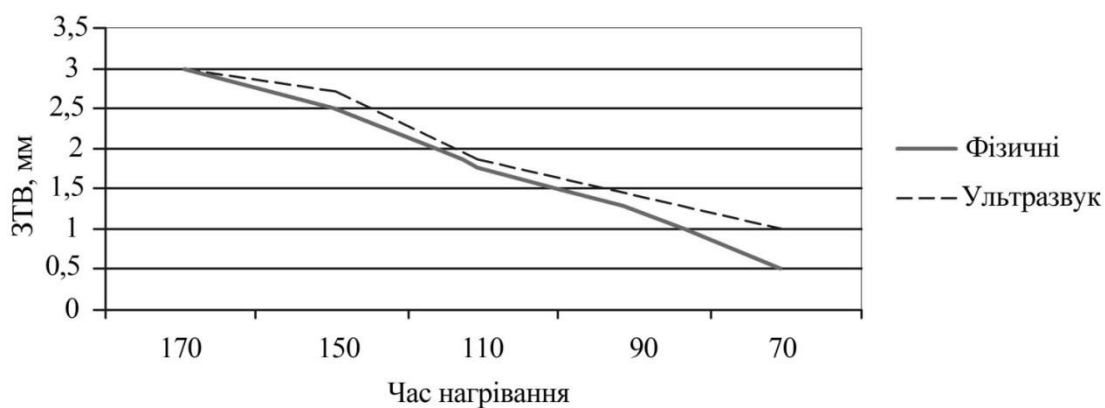
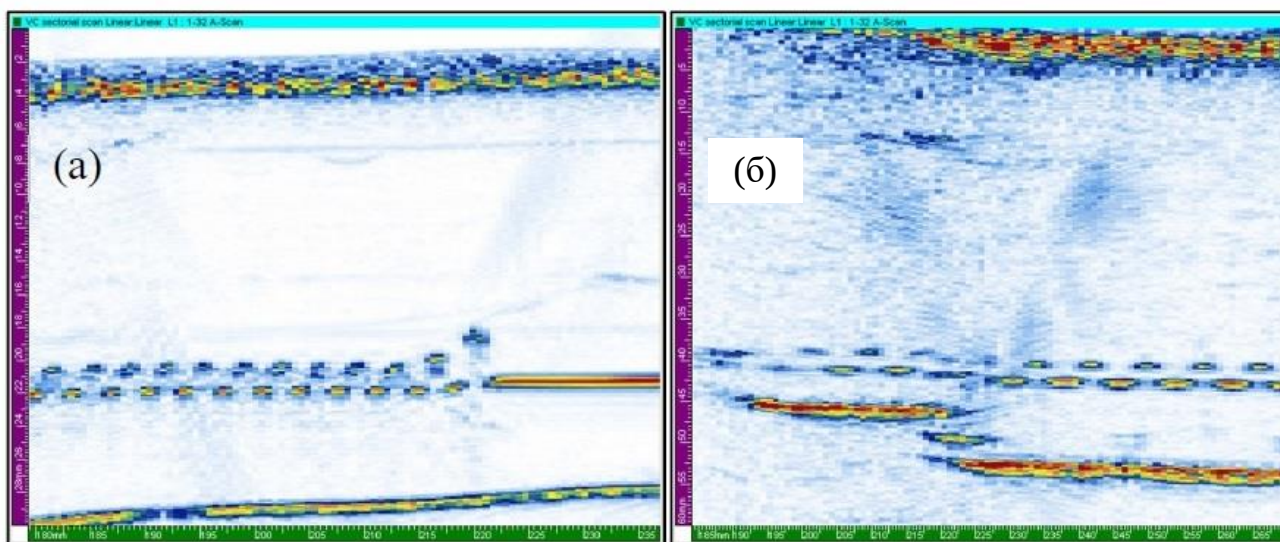
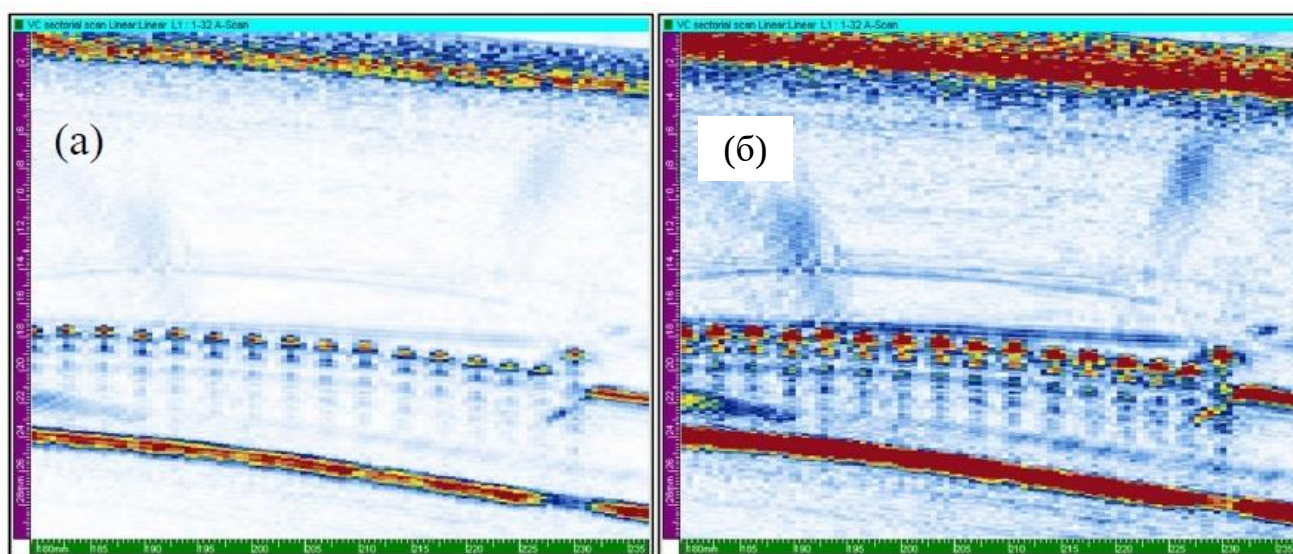


Рисунок В.5 — Зв'язок між фізичним вимірюванням ЗТВ та значеннями, отриманими при контролі фазованими решітками



а — зовнішній діаметр 180 мм; б — зовнішній діаметр 710 мм

Рисунок В.6 — Результати сканування фітингів



а — зовнішній діаметр 180 мм; б — підсилення +12 дБ

Рисунок В.7 — Результати сканування терморезисторного

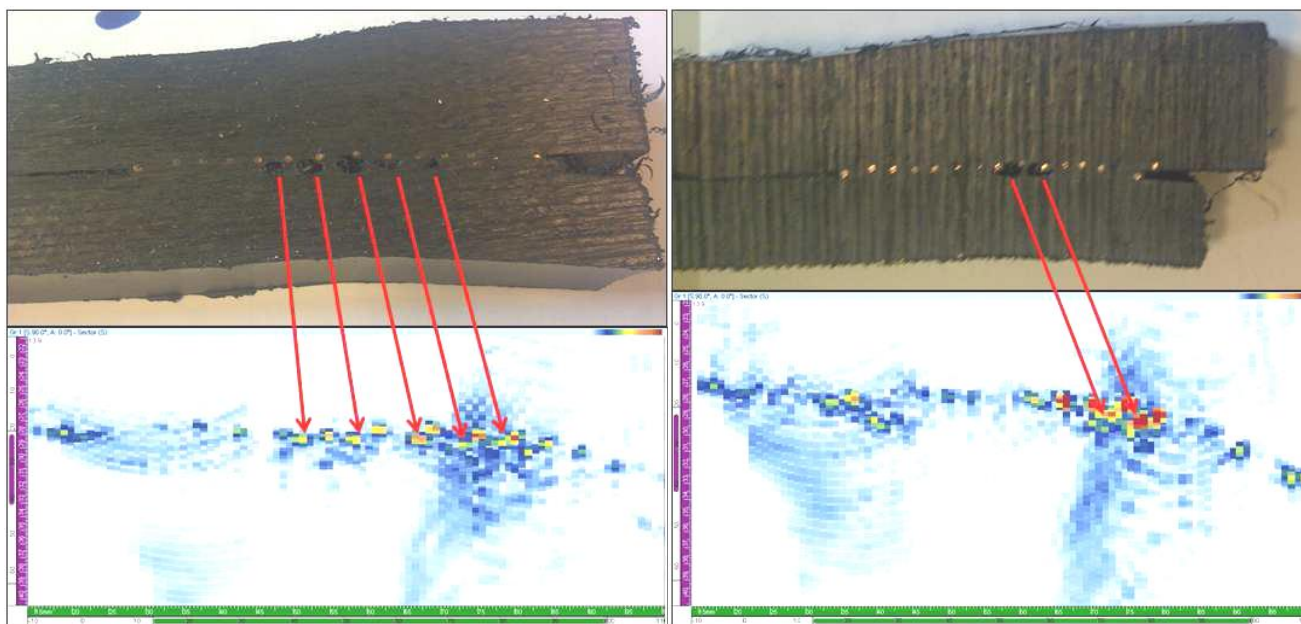


Рисунок В.8 — Перерізи та відповідні УЗ скани двох треморезисторних з'єднань діаметром 315 мм



Рисунок В.9 — Ультразвуковий дефектоскоп з можливістю контролю перетворювачами на ФР Phasor XS

ДОДАТОК Г

Форма протоколу перевірки зварних з'єднань поліетиленових труб

Лабораторія _____

Підстава: _____

Підприємство: _____

Об'єкт _____

ПРОТОКОЛ № _____

від _____ 20__ р.

по ультразвуковому контролю якості стикових зварних з'єднань

Контроль якості зварних стиків _____
(об'єкт, назва трубопроводу)

виконується ультразвуковим дефектоскопом типу _____

робоча частота _____ (свідоцтво про повірку № _____ від _____)

Умови проведення контролю _____

Температура _____

Оператор _____ Посвідчення № _____

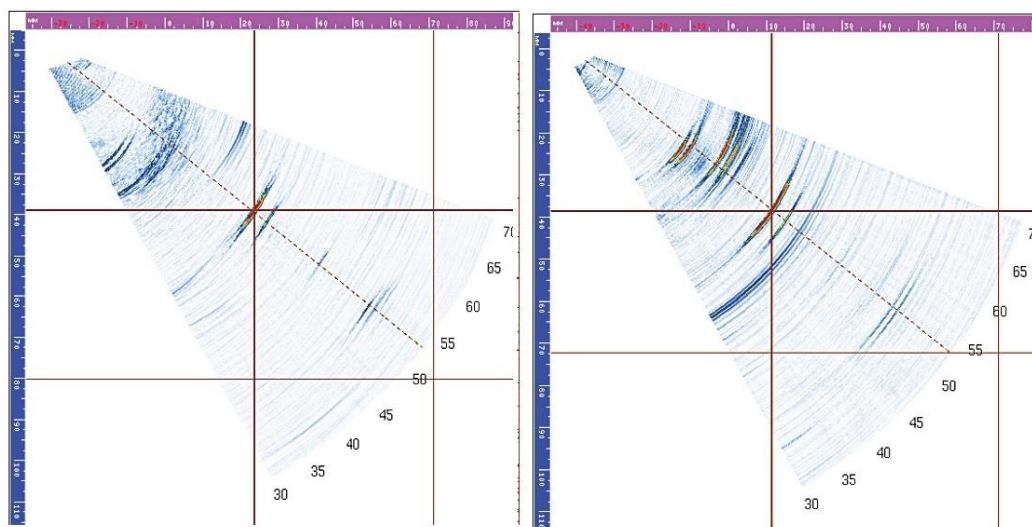
РЕЗУЛЬТАТИ КОНТРОЛЮ

№ стику за журналом зварки	Прізвище зварника	Кут вводу променя, град.	Бракувальна чутливість	Опис дефектів	Заключення (придатний, не придатний)

Висновок

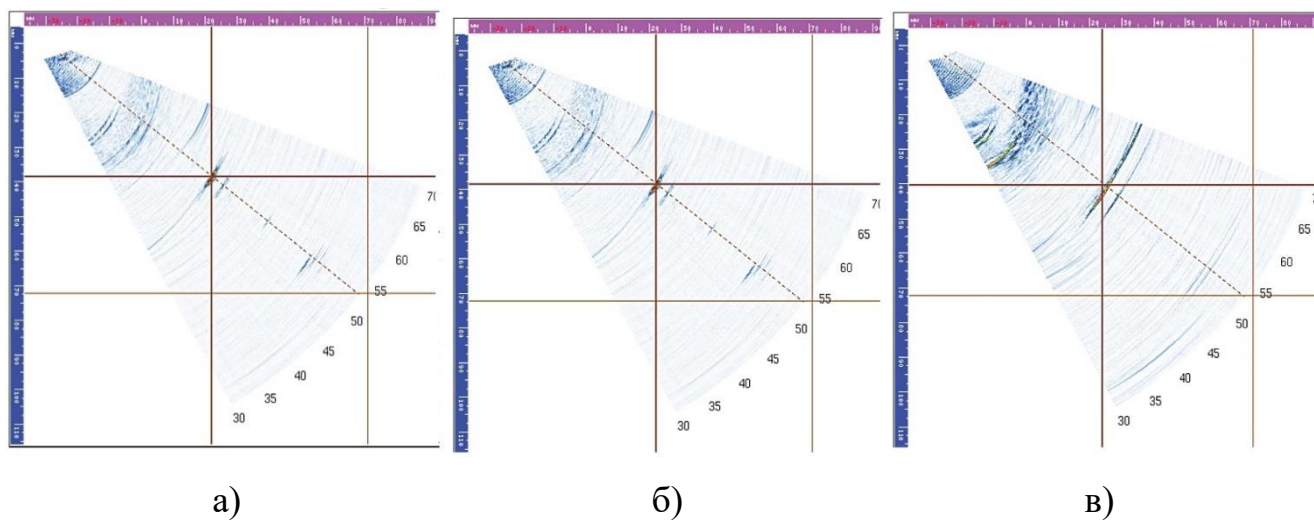
ДОДАТОК Д

Вплив параметрів налаштування давача на виявлення відбивачів



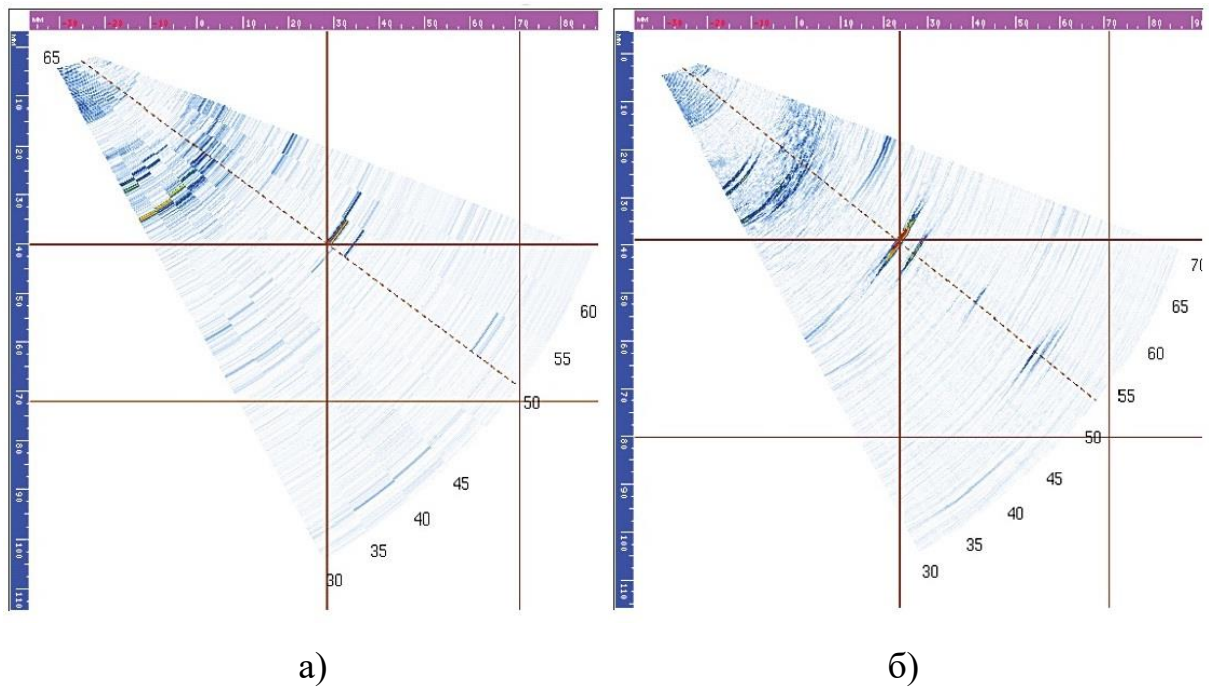
а — 32 активних елемента; б — 8 активних елемента

Рисунок Д.1 — Вивчення впливу активної апертури



а — постійний шлях; б — постійна глибина; в — постійне зміщення

Рисунок Д.2 — Вивчення впливу типу фокусування

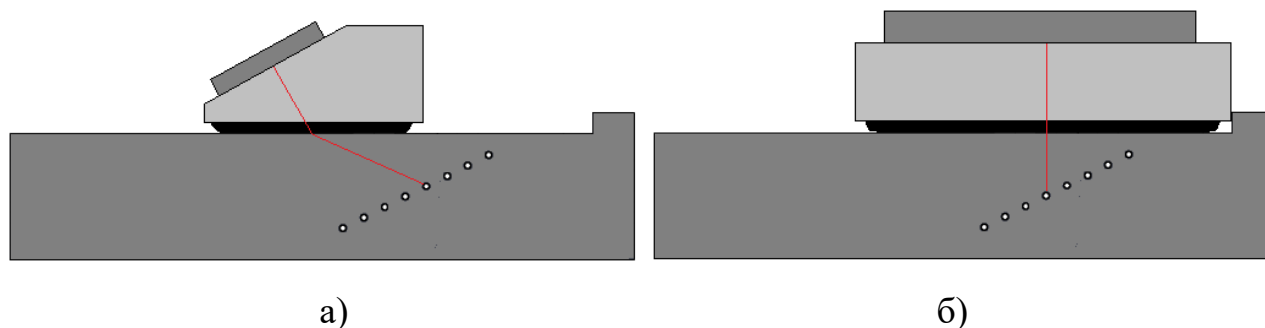


а — 5° ; б — $0,5^\circ$

Рисунок Д.3 — Вивчення впливу кутової роздільної здатності

ДОДАТОК Е

Настроювання чутливості контролю та вибір параметрів контролю



а — для стикового з'єднання; б — для терморезисторного з'єднання

Рисунок Е.1 — Настроювання чутливості контролю на стандартних зразках
(відбивачі — бокові отвори різної довжини діаметром 3 мм)

Таблиця Е.1 — Вибір параметрів контролю зварних з'єднань ПЕ труб

Зовнішній діаметр, мм	Мінімальна товщина стінки, мм		Тип давача		Частота, МГц		Кількість п'єзоелемен- тів ФР		Метод сканування							
	SDR 17	SDR 11	а ¹⁾	б ²⁾	а	б	а	б	а	б						
125	7,4	11,4	нахилений	прямий	5 — 4	7,5 — 7	32	128	Самотандем, дифракційно-часовий, секторне луно-імпульсне, повзучої хвилі	Лінійне секторне сфокусованим променем						
140	8,3	12,7					—									
160	9,5	14,6					16									
180	10,7	16,4					32									
200	11,9	18,2			4	7,5 — 7		128								
225	13,4	20,5														
250	14,8	22,7														
280	16,6	25,4														
315	18,7	28,6														
355	21,1	32,2				64 — 32	128 — 64									
400	23,7	36,3			4						5					
450	26,7	40,9														
500	29,7	45,4														
560	33,2	50,8														
≥630	37,4	57,2														

¹⁾ а — стикове з'єднання

²⁾ б — терморезисторне з'єднання

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема магістерської роботи: Удосконалення ультразвукового методу контролю зварних швів полімерних труб

Обсяг пояснювальної записки: 86 с., 6 табл., 15 рис., 6 дод., 43 джерела, 6 арк. креслень.

Графічний матеріал:

1. МР.МТТМ– 00.00.001 – Конструкція перетворювача на фазованих решітках ;
2. МР.МТТМ– 00.00.002 Керування рухом променя фазованої решітки;
3. МР.МТТМ– 00.00.003 –
4. МР.МТТМ– 00.00.004 – Контроль терморезисторного зварного з'єднання;
5. МР.МТТМ– 00.00.005 – Структурна схема дефектоскопа на фазованих решітках;
6. МР.МТТМ– 00.00.005 – Схема нагромадження невизначеності при УЗ контролі.

Студент _____ Милимончак В.В.
(особистий підпис) (прізвище та ініціали)

«24» _____ грудня _____ 2025 р.