

Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу



На правах рукопису

Семеген Михайло Михайлович

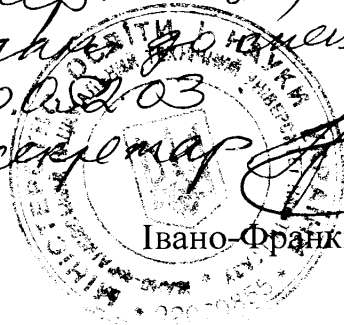
УДК 622.691.4.002.5

**УДОСКОНАЛЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РЕМОНТНИХ
ДІЛЯНОК МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ**

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

**Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Цей примірник дисертації
ідеальною за змістом
в інших примірниках - Науковий керівник:
кандидат технічних наук,
проф. Лютак Зіновій Петрович
ради ДЗОВ
Всемі секретар *М. Драгошук*
17.05.2010р.



Івано-Франківськ - 2010

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ.....	11
1.1 Загальні положення.....	11
1.2 Характеристика умов роботи та аналіз впливу навантажень, які діють на трубопровід.....	12
1.3 Аналіз неруйнівних методів та засобів контролю технічного стану магістральних трубопроводів.....	21
1.3.1 Аналіз методів неруйнівного контролю технічного стану магістральних трубопроводів.....	21
1.3.2 Вибір акустичних методів контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів.....	26
1.3.3 Аналіз приладів для контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів.....	32
1.4 Постановка завдань дослідження.....	38
РОЗДІЛ 2	
ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЮ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РЕМОНТНИХ ДІЛЯНОК МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ.....	40
2.1 Загальні положення та основні напрямки дослідження напружено- деформованого стану металу труб діючого трубопроводу на ремонтних ділянках.....	40
2.2 Аналіз напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів.....	42
2.2.1 Оцінка величини напружень у стінках трубопроводів на ремонтних ділянках.....	42
2.2.2 Оцінка величини переміщень ремонтних ділянок магістральних трубопроводів.....	53
2.3 Розробка методики контролю напружено-деформованого стану трубопроводу на ремонтних ділянках.....	57
2.3.1 Обґрунтування вибору типу пружних хвиль.....	57
2.3.2 Поширення ультразвукових хвиль у тілі циліндричної труби.....	60
2.4 Аналіз та обґрунтування вибору частоти ультразвукових хвиль.....	62
2.5 Розробка математичної моделі для проведення контролю напружено- деформованого стану металу стінки трубопроводу.....	63
2.6 Визначення місць прикладання зусиль на ділянці трубопроводу.....	87
Висновки до розділу.....	93

ВСТУП

Актуальність теми. Нафтогазотransпортна система України є важливою складовою частиною соціально-економічного розвитку в державі. Забезпечення безаварійної експлуатації основної ланки нафтогазотransпортної системи – магістральних трубопроводів є важливим науковим та технічним завданням. Завдання відноситься до визначення та оцінки небезпечних експлуатаційних ділянок трубопроводів, які потребують ремонту, зокрема підземної їх частини. Основним параметром, що визначає експлуатаційні характеристики ремонтної ділянки трубопроводу є величина напружень у стінці його труб, які залежать від ряду чинників, наприклад, товщини стінки, величини зусиль тощо. Ділянки трубопроводів, які потребують ремонту знаходяться в складному напруженому стані, піддаючись дії навантажень, які не завжди можна врахувати при проектуванні, так як вони проявляються в експлуатаційних умовах через зсуви ґрунту, розмиву схилу гір та пагорбів, корозію його стінок, зсувах бетонних опор під трубопроводами на річкових переходах тощо, а також при дії різних їх комбінації. Звідси випливає, що характер пошкоджень та руйнувань може бути різний. Результати аналізу відмов свідчать про те, що однією з основних причин пошкодження підземних трубопроводів є дія зовнішніх сил, яка приводить до зміни їх напружено-деформованого стану, утворення поверхневих тріщин, розривів по зварних з'єднаннях і по тілу труби.[31]. Тому важливим є визначення виду зусиль, напрямку і місць їх дії, які створюють напружено-деформований стан трубопроводу на ремонтній ділянці. При звільненні від ґрунту ремонтної ділянки підземного трубопроводу порушують його рівновагу. При цьому визначення виду зусиль та величини напружень в її критичних перерізах дасть можливість оптимізувати проведення ремонтно-відновлюваних робіт та мінімізувати вплив даних зусиль, забезпечивши цілісність конструкції трубопроводу, що зумовить безпечне проведення даних робіт.

Виявляти дію навантажень, які не враховані при проектуванні, можна в період експлуатації трубопроводів шляхом контролю їх напружено-

деформованого стану. Аналіз розрахунків показує, що випучування або просідання окремих ділянок трубопроводу приводить до появи недопустимих напружень у стінках металу труб. При великих просіданнях ділянок трубопроводів виникають пластичні деформації, що не допустимі для подальшої експлуатації. Тому оцінка напружено-деформованого стану та визначення найбільш навантажених ділянок трубопроводів з врахуванням діючих зусиль, є важливим напрямком досліджень у визначенні умов безпечної експлуатації трубопроводів. Визначення напружень та векторів зусиль вирішує не тільки проблему оцінки дійсного напруженого стану трубопроводу, але і причини їх виникнення, що важливо для прийняття подальших правильних рішень у проведенні ремонтних робіт і забезпечення їх подальшої експлуатації.

Тому завдання розробки нових методів і пристроїв для визначення напружено-деформованого стану трубопроводів при їх ремонті є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за планами науково-дослідної теми № 286/05 згідно договору з Управлінням магістральних газопроводів “Черкаситрансгаз” “Контроль напружено-деформованого стану обв'язки технологічних трубопроводів компресорних станцій КС 37Б “Тальне”, “Кременчук” номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ 0104U0050000, та наукової тематики № 267/05 “Контроль напружено-деформованого стану магістральних газопроводів на підприємствах “Укртрансгаз”, номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ 0105U004995. Автор брав участь у виконанні даних тем, як відповідальний виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є обґрунтування та удосконалення ультразвукового контролю напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів на ремонтних ділянках в експлуатаційних умовах.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз методів і засобів контролю напружено-деформованого стану трубопроводів, проаналізувати фактори впливу і навантаження, які

впливають на зміну напружено-деформованого стану трубопроводу в експлуатаційних умовах;

- розробити математичну модель визначення напружено-деформованого стану ремонтної ділянки магістрального трубопроводу ультразвуковим методом, яка дозволить підвищити точність обчислення сумарного напруження в його стінках на основі явища акустопружності в трьох взаємоперпендикулярних напрямках;

- удосконалити ультразвуковий метод контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів, який дасть можливість визначити вид, місце та напрям дії зусилля, що діє на ремонтній ділянці;

- удосконалити модель електромеханічного перетворення енергії коливання чутливого елемента ультразвукового п'єзоелектричного перетворювача представленого у вигляді електричної схеми-аналога;

- удосконалити пристрій для ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтної ділянки магістрального трубопроводу та розробити проект методики проведення контролю, провести метрологічний аналіз складових загальної похибки розробленого методу та пристрою;

- провести лабораторні та натурні дослідження напружено-деформованого стану трубопроводу на ремонтній ділянці з допомогою розроблених методу та пристрою.

Об'єкт дослідження. Процес ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів.

Предмет дослідження. Метод та засіб ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів.

Методи дослідження. Методи дослідження, що покладені в основу роботи, базуються на використанні методів математичного моделювання; числових методів розрахунку напружень; теорії похибок вимірювань і контролю, регресійного та кореляційного аналізів, які використовувались для дослідження похибок визначення величини напружень за одержаною математичною моделлю,

впливають на зміну напружено-деформованого стану трубопроводу в експлуатаційних умовах;

- розробити математичну модель визначення напружено-деформованого стану ремонтної ділянки магістрального трубопроводу ультразвуковим методом, яка дозволить підвищити точність обчислення сумарного напруження в його стінках на основі явища акустопружності в трьох взаємноперпендикулярних напрямках;

- удосконалити ультразвуковий метод контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів, який дасть можливість визначити вид, місце та напрям дії зусилля, що діє на ремонтній ділянці;

- удосконалити модель електромеханічного перетворення енергії коливання чутливого елемента ультразвукового п'єзоелектричного перетворювача представленого у вигляді електричної схеми-аналога;

- удосконалити пристрій для ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтної ділянки магістрального трубопроводу та розробити проект методики проведення контролю, провести метрологічний аналіз складових загальної похибки розробленого методу та пристрою;

- провести лабораторні та натурні дослідження напружено-деформованого стану трубопроводу на ремонтній ділянці з допомогою розроблених методу та пристрою.

Об'єкт дослідження. Процес ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів.

Предмет дослідження. Метод та засіб ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів.

Методи дослідження. Методи дослідження, що покладені в основу роботи, базуються на використанні методів математичного моделювання; числових методів розрахунку напружень; теорії похибок вимірювань і контролю, регресійного та кореляційного аналізів, які використовувались для дослідження похибок визначення величини напружень за одержаною математичною моделлю,

а також на класичних виведеннях теорії пружності, акустики і статистичних методів обробки результатів досліджень. Теоретичні висновки базуються на математичних залежностях та підтверджуються результатами, які отримані в лабораторних та експлуатаційних умовах.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше розроблена математична модель визначення напружено-деформованого стану магістрального трубопроводу, що дозволяє підвищити точність обчислення сумарного напруження в його стінках, яка полягає в тому, що за явищем акустопружності розраховується сумарне напруження в околі однієї точки стінки труби від зміни швидкості трьох ультразвукових хвиль, що поширюються у взаємоперпендикулярних напрямках;
- дістав подальший розвиток ультразвуковий метод контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів, що дає можливість визначати вид, місце та напрям дії зусилля, яке діє на ділянку трубопроводу як по околу труби так і вздовж її вісі та полягає у визначенні максимального значення еквівалентного напруження за результатами дискретного контролю;
- вдосконалена модель електромеханічного перетворення енергії коливання чутливого елемента ультразвукового п'єзоелектричного перетворювача представленого у вигляді електричної схеми-аналога, яка відрізняється від відомих введенням додаткових коливальних контурів і полягає у врахуванні демпфувальних параметрів коливання п'єзопластини та наявності серії бічних резонансних частот, що дало можливість більш точно врахувати вплив амплітудно-частотної характеристики акустичного тракту на ультразвуковий сигнал, підвищити точність визначення його параметрів.

Практичне значення отриманих результатів. Були отримані наступні результати:

- представлено алгоритм визначення залежності зміни швидкості поширення ультразвукових поздовжніх хвиль у стінці трубопроводу в трьох взаємоперпендикулярних напрямках від величини напружено-деформованого

стану, що дає можливість використати результати обчислення розробленої математичної моделі безпосередньо при виконанні ремонтних робіт;

- на основі розробленого методу, а також експериментальних досліджень, які полягають у визначенні напружено-деформованого стану в стінках трубопроводу в трьох взаємноперпендикулярних напрямках, які співпадають з напрямками його головних осей удосконалений ультразвуковий пристрій для вимірювання швидкості поширення ультразвуку, на що отримано патент України на корисну модель;

- проведено метрологічний аналіз складових загальної похибки розробленого методу, пристрою контролю та розроблено методику її визначення;

розроблено проект методики проведення ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів в експлуатаційних умовах, яка дає можливість визначати вид, напрям та місце дії зусилля;

- одержані результати оцінки напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів впроваджено в Управлінні магістральних газопроводів «Прикарпаттрансгаз»;

- теоретичні та практичні результати роботи використовуються у навчальному процесі при підготовці студентів спеціальності 7.090903 – «Прилади та системи неруйнівного контролю» з дисципліни «Акустичний контроль».

Особистий внесок здобувача полягає в наступному:

- проведено теоретичний аналіз методів і засобів неруйнівного контролю технічного стану магістральних трубопроводів, проаналізовані деструктивні фактори, які впливають на зміну фізико-механічних характеристик металу стінок трубопроводів в експлуатаційних умовах. Досліджені інформативні параметри, які визначають зміну фізико-механічних характеристик металу трубопроводу, запропонований метод контролю напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів на ремонтних ділянках [4];

- обґрунтовано та розроблено підхід до визначення величини напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів [56, 80, 81];
- визначено напружено-деформований стан трубопроводу на ремонтних ділянках [35, 13];
- визначені міри прогинів трубопроводу на ремонтних ділянках, розроблено функціональну схему ультразвукового пристрою для визначення швидкості поширення ультразвуку [72];
- отримано аналітичну залежність, яка пов'язує величину напружень в середовищі поширення ультразвукових поздовжніх хвиль із зміною величини їх швидкості; удосконалено ультразвуковий метод контролю, який полягає у визначенні напружень у трьох взаємоперпендикулярних напрямках, які співпадають з напрямками осей симетрії ремонтної ділянки трубопроводу за допомогою системи первинних п'єзоелектричних перетворювачів, проведено лабораторні дослідження [68, 95];
- виконано експериментальні дослідження та аналіз впливу нерівностей на границі розділу поверхні п'єзоперетворювача та трубопроводу, які впливають на точність та чутливість проведення контролю акустичним методом [66];
- представлено спосіб підвищення точності вимірювання швидкості поширення ультразвуку [61];
- обґрунтовано та розроблено метод визначення напружень у стінках трубопроводу та розроблено конструкцію системи ультразвукових первинних перетворювачів для генерування та приймання поздовжніх ультразвукових хвиль [60, 74];
- вдосконалено модель електромеханічного перетворення енергії коливання чутливого елемента ультразвукового п'єзоелектричного перетворювача, яка полягає у врахуванні демпфувальних параметрів коливання п'єзопластики та наявності серії бічних резонансних частот, що дало можливість більш точно врахувати вплив амплітудно-частотної характеристики акустичного тракту на ультразвуковий сигнал, підвищити точність визначення його параметрів [89].

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні та експериментальні результати обговорювались на науково-технічних конференціях:

- всеукраїнській науково-технічній конференції «Вимірювання витрати та кількості газу» (м. Івано-Франківськ, 2005 р.);
- міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці «ІФТУНГ – 40» (м. Івано-Франківськ, 2007 р.);
- VI науково-технічній конференції «Приладобудування 2007: стан і перспективи» (м. Київ, 2007 р.);
- V міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання» (м. Івано-Франківськ, 2008 р.);
- VI національній науково-технічній конференції і виставці «Неруйнівний контроль та технічна діагностика» (м. Київ, 2009 р.);
- на наукових семінарах кафедри МПКЯ і СП ІФНТУНГ (2004 – 2009 рр.).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 14 наукових праць, з них 8 статей у фахових виданнях (1 стаття одноособова), рекомендованих ВАК України та 5 тез доповідей в матеріалах науково-технічних конференцій, одному патенті України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний зміст дисертації викладено на 152 сторінках, робота містить 5 таблиць, 60 рисунків, список використаних джерел, що налічує 95 найменування та 15 додатків, які займають 38 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

1.1 Загальні положення

Зважаючи на велику різноманітність та область застосування трубопроводів, вони піддаються впливу чинників різного характеру та інтенсивності. Напруження, які виникають у трубах магістральних трубопроводів під дією температурних змін, перерозподілу діючих навантажень при локальних зміщеннях труб, старінні металу труби можуть привести до зниження міцності окремих їх елементів та зміни властивостей металу трубопроводів. Це приводить до обмеження терміну їх експлуатації до нормативних значень і при цьому не забезпечуються використання їх повного ресурсу. В окремих випадках навіть протягом нормативного терміну експлуатації трубопроводів не забезпечується їх надійна робота, наприклад, при появі ділянок сповзаючого ґрунту на прокладеній трасі трубопроводу, ділянки просідання або розрідження ґрунту тощо.

Із-за складності конструкції трубопровідних систем, особливо в районах компресорних станцій, наявності в металі труби технологічних напружень, пов'язаних з технологією виробництва труб, не завжди є можливим проведення точного розрахунку напружень, які діють у стінці труби. Тому однією із важливих умов забезпечення роботоздатності та збільшення терміну служби магістральних нафтогазопроводів, які є функціональними вузлами промислово-транспортного комплексу, є проведення якісного і своєчасного контролю їх стану, зокрема напружено-деформованого. У зв'язку з цим, все більш стає актуальним завдання створення системних пристроїв і методик, які б стали невід'ємною частиною технологічних систем при обробці та визначенні даних напружено-деформованого стану трубопроводів на ремонтних ділянках. Це особливо важливо для нафтогазопроводів і трубопровідних систем у цілому на їх

небезпечних ділянках, відмова яких може привести до значних матеріальних втрат та забруднення навколишнього середовища, а також до аварій з важкими наслідками.

1.2 Характеристика умов роботи та аналіз впливу навантажень, які діють на трубопровід

Трубопроводи знаходяться в складному напруженому стані, піддаючись дії навантажень, які при проектуванні неможливо врахувати, так як вони проявляються лише в особливих ситуаціях, наприклад: при появі ділянок сповзаючого ґрунту на прокладеній трасі трубопроводу, ділянки просідання або розрідження ґрунту (рис. 1.1) та (рис. 1.2). При цьому міцнісні показники трубопроводу повинні забезпечувати його роботоздатність в експлуатаційних умовах.

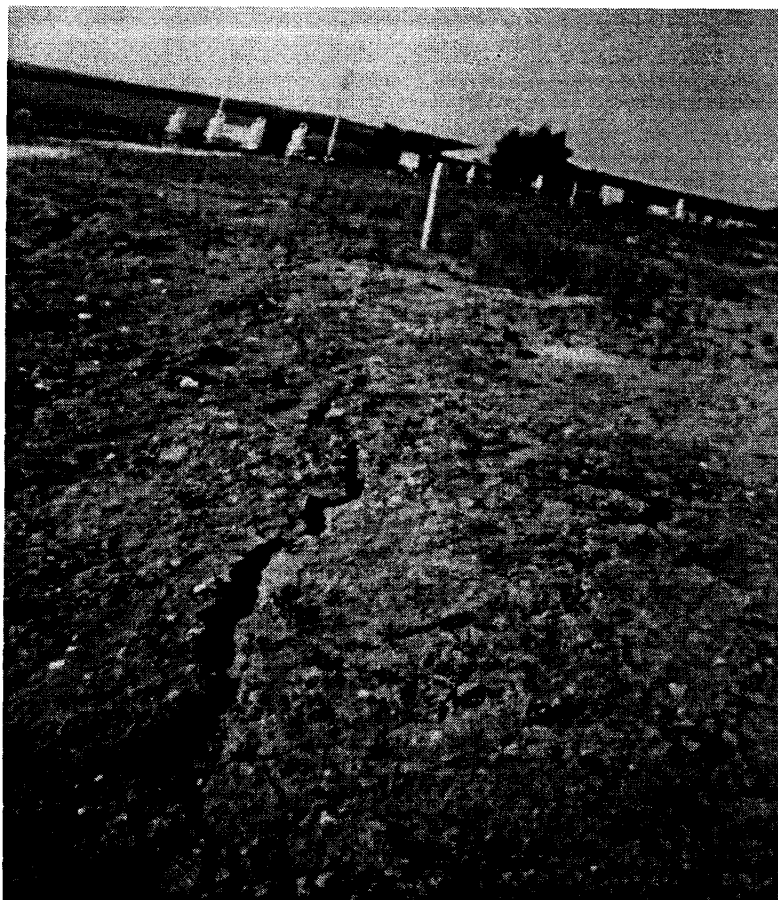


Рис. 1.1. Ділянка трубопроводу з сповзаючим ґрунтом

Трубопроводи піддаються силовому впливу як зовнішніх, так і внутрішніх чинників, а основною їх властивістю є здатність чинити опір цій дії, зберігаючи свій робочий стан. При появі вище вказаних факторів на трубопровід діють поперечні та поздовжні сили, які змінюють попереднє положення елементів трубопроводу, що приводить до виникнення в матеріалі труб цих елементів додаткових зусиль, які можуть привести до руйнування цієї ділянки.

Від дії зовнішніх сил у поперечних перерізах трубопроводів можуть відбуватися деформації згину, кручення тощо. Це відбувається внаслідок дії в поперечних перерізах трубопроводів поперечних сил, згинаючих та крутних моментів. Основним механічним показником металів, з яких виготовлені трубопроводи, є величина досягнення ним напружень границі пружності. Визначення напружень границі пружності в металевих конструкціях, якими є трубопроводи, є непростим завданням, оскільки в елементарному об'ємі його стінки можуть діяти внутрішні силові фактори, нормальні та тангенційні напруження тощо.



Рис. 1.2. Розмита ділянка магістрального газопроводу внаслідок повені 2008 р. в с. Витвиця Долинського району Івано-Франківської області

Внутрішні зусилля в трубопровідних конструкціях появляються від зовнішніх та внутрішніх навантажень. Причому ці навантаження змінюються в залежності від характеристик навколишнього середовища, яке знаходиться навколо трубопроводу, параметрів продукту, що перекачується тощо. В результаті аналізу можливих навантажень, їх можна звести наступним чином:

Таблиця 1.1

Навантаження на трубопровід

Характер навантажень	Навантаження	Граничні стани, які викликають руйнування трубопроводу
постійні	- власна вага трубопроводу; - вплив попередньо напруженого стану (рис. 1.3), внаслідок будівельно-монтажних робіт; - тиск засипання ґрунту;	- втрата міцності від дії силового зусилля; - втрата запасу пластичності при деформації; - втрата стійкості при дії напружень стиску;
тривалі	- внутрішній тиск трубопроводу; - температурна дія; - просідання або розрідження ґрунту; - поява ділянок сповзаючого ґрунту;	- руйнування трубопроводу від потоншення його стінки в результаті корозії або механічного зношування внутрішньої поверхні; - втрата герметичності, утворення тріщин (випадкові механічні зусилля, місцева корозія);
короткочасні	- при випробуванні трубопроводу; - тиск рухомих навантажень (рис. 1.4);	- втрата герметичності, утворення тріщин (випадкові механічні зусилля, місцева корозія);
інші	- втома металу; - корозія стінок трубопроводу; - механічне зношування внутрішньої поверхні; - випадкові механічні зусилля; - згин трубопроводу по рельєфу місцевості; - брак в процесі виробництва.	- вібрація трубопроводу від руху продукту.

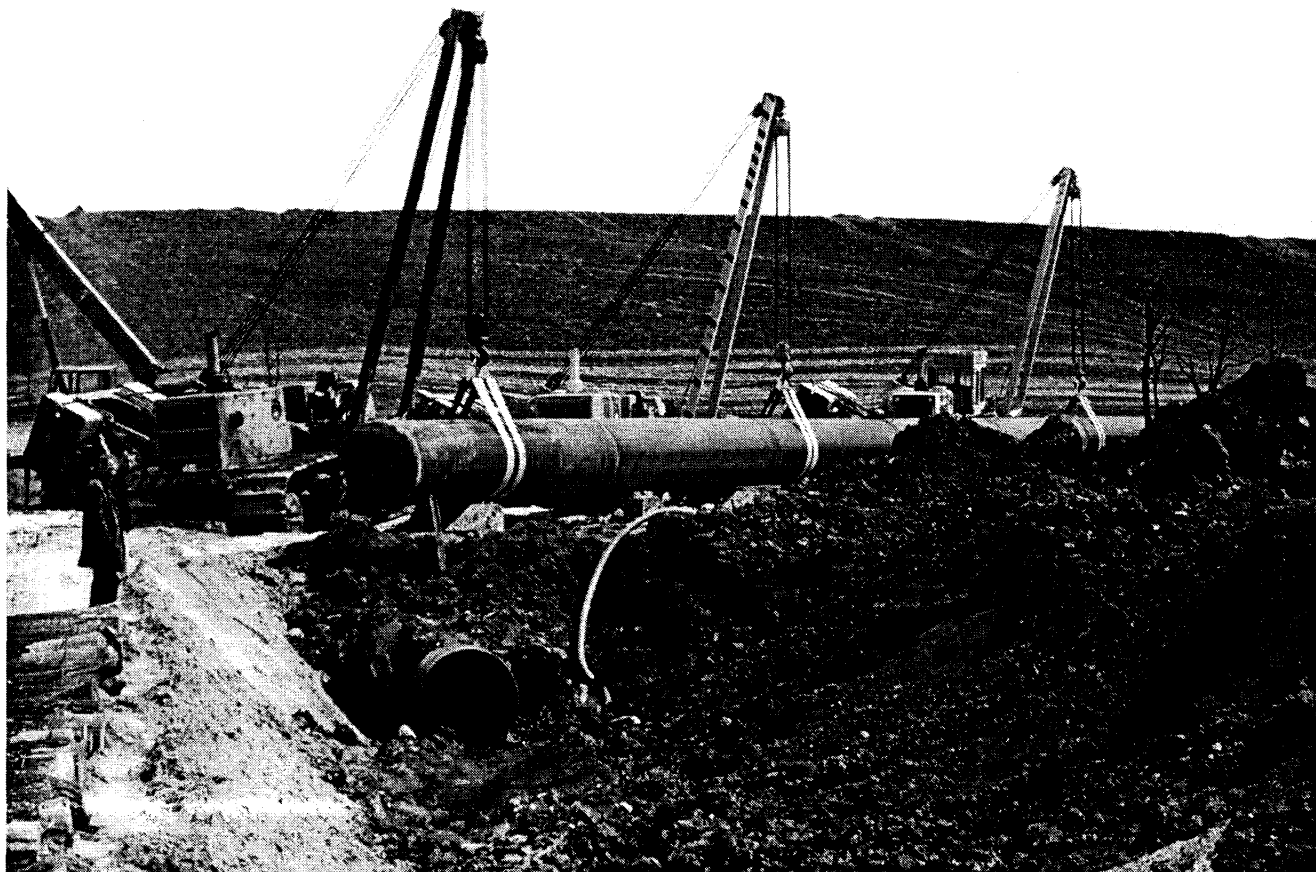


Рис. 1.3. Ділянка трубопроводу, на якій проводяться будівельно-монтажні роботи

Загалом, як бачимо, в таких ситуаціях положення трубопроводу і відповідно напружений стан відрізняється від проектного [1, 10] тому одним із найважливіших експлуатаційних завдань трубопроводів є забезпечення безаварійної його роботи.



Рис. 1.4. Ділянка трубопроводу, яка піддається короткочасному впливу внаслідок дії тиску рухомих навантажень при русі по польовій дорозі

Умови роботи трубопроводів характеризуються наступними особливостями:

- метал трубопроводу протягом всього терміну експлуатації знаходиться під дією значних навантажень з різними відношеннями кільцевих і поздовжніх напружень, які залежать від багатьох факторів;
- у металі трубопроводу практично неминуче присутні різні концентратори напружень. Вони можуть бути технологічного (подряпини, вм'ятини, підрізи, навколо шовні зони зварних з'єднань і т. ін.) й експлуатаційного (корозійні

виразки, каверни і т. ін.) походження, як показано на рис. 1.5. Дія концентраторів напружень підсилюється в місцях відхилення труби від циліндричної форми. Дефекти, які розташовані на поверхні труби, так само як і локальні корозійні пошкодження, можуть ініціювати тенденційні руйнування трубопроводів;

- трубопроводи сприймають велику кількість енергії газу або нафти, що перекачується та зумовлює їх високу схильність до руйнувань, особливо під дією динамічних навантажень.

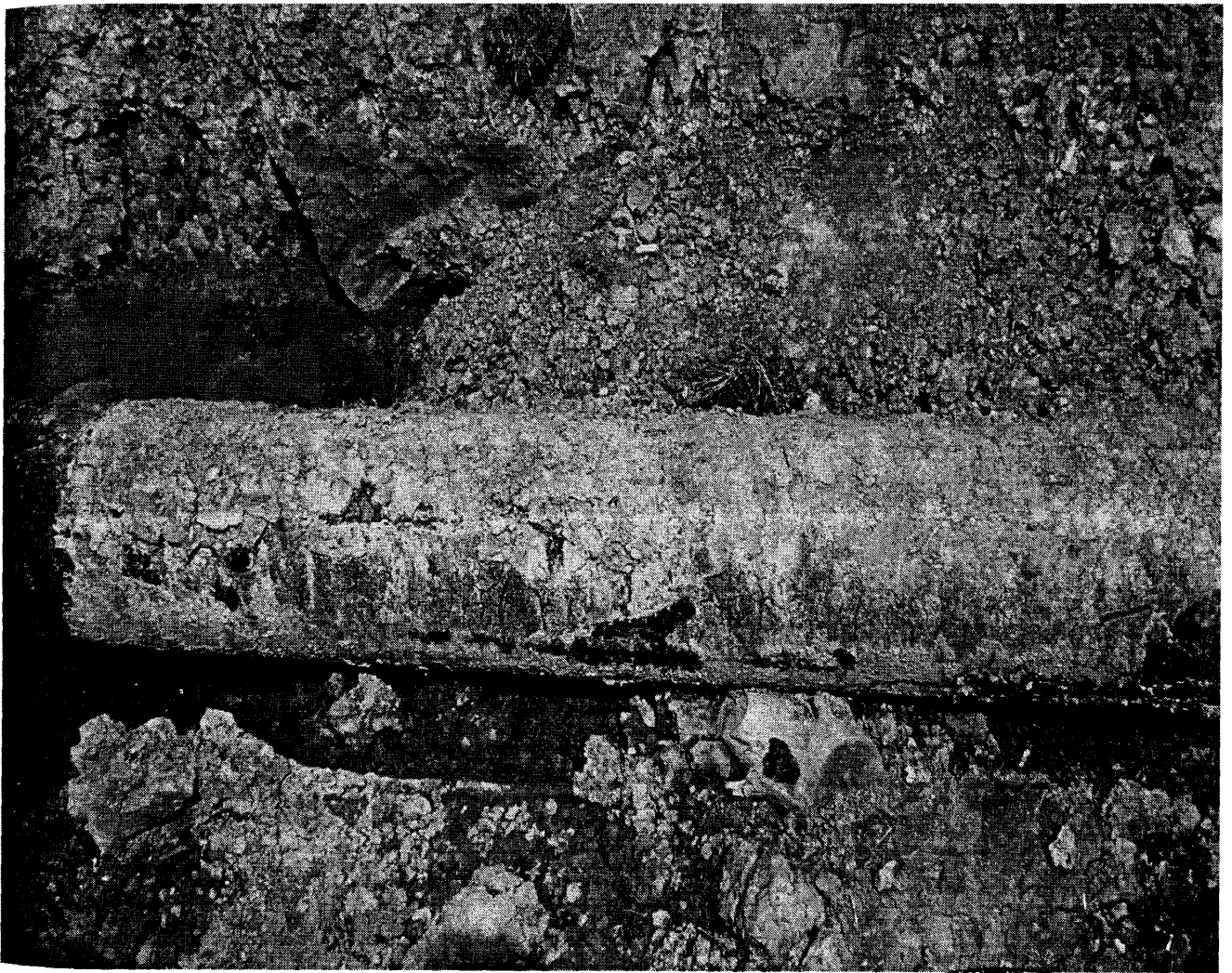


Рис. 1.5. Корозія стінок трубопроводу



Найбільш ймовірними причинами відмов та аварій конструкцій трубопроводів є дефекти у вихідному матеріалі, з якого вони виготовлені, або вторинні – технологічні та експлуатаційні дефекти, які утворюються в

трубопроводах під час їх виготовлення, а також під час проведення їх ремонту, які розвиваються до недопустимих розмірів під час тривалої їх експлуатації [2]. Дані дефекти проявляються в залежності від величини навантажень, які діють на трубопровідні конструкції на різних етапах деформування матеріалів, що також впливають на їх напружений стан.

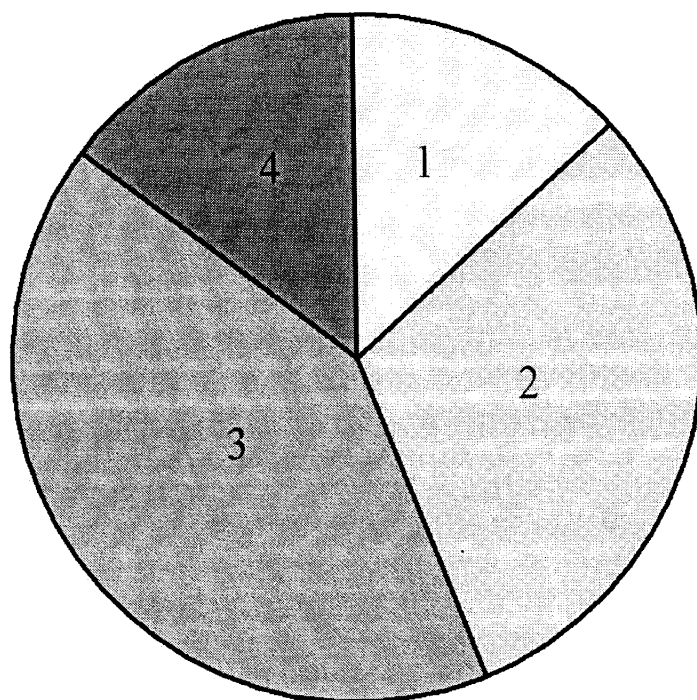


Рис. 1.6. Дефекти, які виявляються в процесі тривалої експлуатації в газопроводах

1-вихідні дефекти труб складають 13%;

2-дефекти, допущені при будівництві, складають 28%;

3-дефекти, які пов'язані з корозією металу труб, складають 39%;

4-інші дефекти.

Як видно з рис.1.6, структура даних дефектів різна. Найбільший об'єм в загальній кількості дефектів займає корозія (39%) та дефекти, які виникли при будівництві газопроводів (28%). Необхідним є врахування дефектів, які не показали себе при проведенні випробувальних робіт при здачі трубопроводів в експлуатацію, так як матеріали нових труб за рахунок високих вихідних

пластичних властивостей витримували більші напруження, що були викликані концентрацією біля дефектів [2]. Під час тривалої експлуатації пластичні властивості погіршуються, матеріал труб старіє та приймає інші властивості з більш низькою пластичністю. При досягненні даним матеріалом граничного показника по механічним властивостям концентрація напружень може відобразитись на здатності труби нести розрахункове корисне навантаження. На рис. 1.7 та в додатку А приведені графіки зниження пластичності та ударної в'язкості a_n , Дж/см² для сталей марок 14ХГС та 17Г за 25 років експлуатації [2, 30].

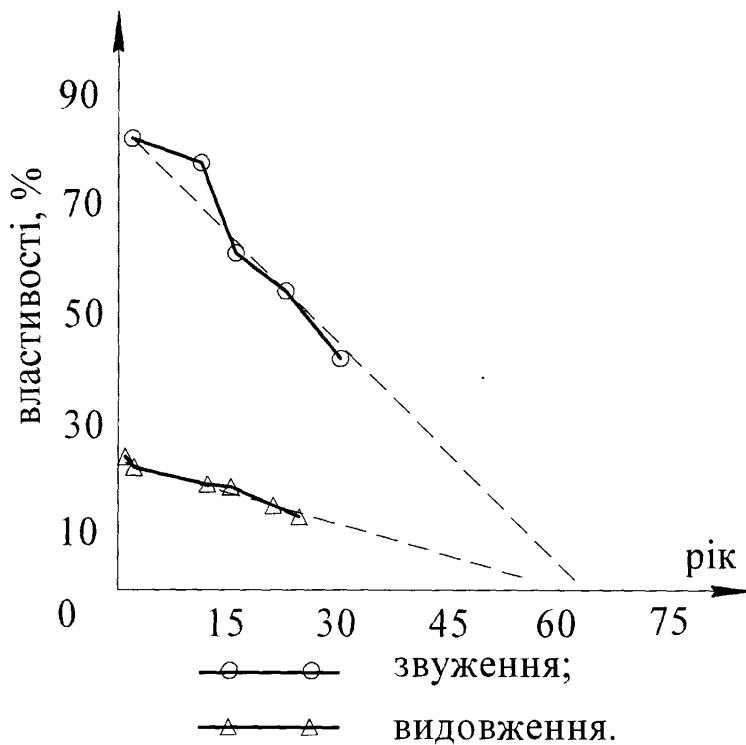


Рис. 1.7. Зміна пластичних властивостей матеріалу труб виготовлених з сталі 14ХГС часом

На показаних рисунках видна явна тенденція до поступового зниження цих характеристик. Пунктиром показана тенденція до зниження за періодом спостережень. Розглянемо також рис. 1.8, де показано розподіл дефектів, виявлених при здачі трубопроводів в експлуатацію [3, 30].

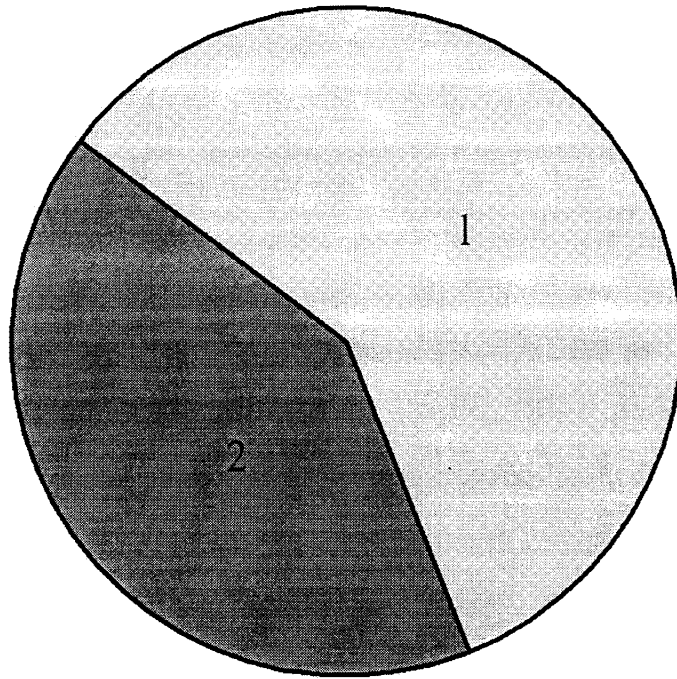


Рис. 1.8. Руйнування трубопроводів при здачі їх в експлуатацію

1-дефекти, допущені при монтажі, складають 60%;

2-дефекти технологічного та механічного походження складають 40%.

Як бачимо, в цей період переважаючими видами дефектів є дефекти технологічного та механічного походжень (40%) та дефекти, які були допущені та виявлені при монтажних роботах (60%).

Отже, не всі дефекти та впливи на стан трубопроводу виявляються під час випробувань, частина з них проявляє себе під час експлуатації, наприклад корозія металу труб, вплив температури [4], механічне зношування внутрішньої поверхні, втома металу і інші. Розглянуті дефекти та навантаження складають суттєву загрозу роботоздатності магістральних трубопроводів під час тривалої експлуатації і тим самим впливають на їх напружено-деформований стан.

1.3 Аналіз неруйнівних методів та засобів контролю технічного стану магістральних трубопроводів

1.3.1 Аналіз методів неруйнівного контролю технічного стану магістральних трубопроводів

На сьогоднішній день для нафтогазової галузі на перший план виходить завдання забезпечення високої надійності і ефективності роботи вже побудованих трубопроводів. При терміні експлуатації трубопроводів понад нормативний, вони потребують реконструкції. У зв'язку з цим тривала експлуатація трубопровідного транспорту України в даний час особливо ставить високі вимоги безпеки до їх технічного стану. Тому, важливим напрямком цілісної оцінки технічного стану трубопроводів є контроль їх фізико-механічних параметрів, основними з яких є напружено-деформований стан металу трубопроводу. Наявність інформації про величину напружень у стінках металу труб, порівняння його з допустимим значенням, вирішує проблему безпечної експлуатації самих трубопроводів та їх системи в цілому.

Існуючі методи контролю технічного стану магістральних нафтогазопроводів, зокрема визначення їх напружено-деформованого стану [5], можна поділити на теоретичні, тензометричні, фізичні з використанням неруйнівних методів контролю.

Для вирішення цього завдання було проведено аналіз методів і засобів контролю, основними з яких є:

- теоретичний метод;
- тензометричний метод;
- рентгенівський метод;
- вихрострумний метод;
- магнітний метод;
- метод внутрішньотрубної діагностики (пропускання інтелектуального снаряду).

Найбільш точним методом оцінки напружено-деформованого стану трубопроводів є теоретичний метод, який базується на математичній моделі роботи трубопроводу. Але неможливість врахування впливу як окремих, так і специфічних факторів може призвести до значних похибок у розрахунках [5]. Використання такої методики не дає можливості зробити висновок про об'єктивні зміни об'єкта контролю, не завжди вдається врахувати весь комплекс чинників впливу та їх взаємозв'язок, і тому застосування його для оцінки напруженого стану є проблематичним. Визначення напружень вимагає даних про міцнісні характеристики металу, що в умовах тривалої експлуатації є ускладненим завданням.

Для контролю статичних та динамічних навантажень широко використовуються тензометричні методи [6]. Методи тензометрії можна поділити на наступні групи:

- поляризаційно - оптичні (методи фотопружності);
- методи, що базуються на перетворенні деформацій поверхні об'єкта дослідження з допомогою тензометрів і тензометричних перетворювачів.

З поміж тензометричних перетворювачів найбільш широке розповсюдження знайшли тензорезистори. Принцип роботи тензорезистора базується на явищі тензоефекту, що полягає у використанні лінійної залежності величини зміни омичного опору тензорезистора від величини його деформації. Зміна величини опору тензорезистора коливається від тисячних доль Ома до 1 Ома.

Тензометричний метод з застосуванням давачів опору є одним із найбільш широко використовуваних методів оцінки напруженого стану металу трубопроводу. Недоліком методу крім необхідності виконання великого об'єму робіт по їх встановленні для вимірювання деформації і обробки результатів є те що, вимірювання виконуються з моменту їх встановлення і при цьому не враховуються набуті напруження в результаті експлуатації. Незважаючи на широкі можливості тензометричного методу, його використання для контролю магістральних трубопроводів є обмеженим, а саме:

- неможливістю визначення залишкових напружень;

- невизначеністю напрямків дії силових факторів;
- можливістю оцінки зміни деформацій тільки від моменту початку контролю.

Умови експлуатації магістральних трубопроводів (постійні вібрації, широкий діапазон зміни температури навколишнього середовища, вологість і т.д.), в яких вимірюється напружений стан трубопроводів, обмежують використання окремих тензOMETричних методів.

Суть вимірювання напружень рентгенівським методом полягає у визначенні міжатомних відстаней у кристалічній ґратці під дією напружень. Перевагою такого виду контролю є те, що мала база вимірювань дозволяє досліджувати поля напружень з великим градієнтами та не потрібно еталонного взірця. Проте, даний метод має недоліки, які звужують його широке використання:

- в першу чергу, це низька точність вимірювань;
- метод використовують у лабораторних умовах, коли вимірювання можна виконати на малих взірцях та базах;
- дослідження даним методом напруженого стану магістральних трубопроводів в експлуатаційних умовах вимагає великих затрат засобів та часу, а також є таким, що складно реалізувати.

Недоліком рентгенівського та поляризаційно-оптичного методів є те, що з їх допомогою можна оцінити тільки одноосний напружений стан металу об'єкта контролю в лабораторних умовах, у той час, як під впливом діючих навантажень напружений стан ділянки трубопровідної конструкції буде складним.

Вихрострумний метод неруйнівного контролю базується на аналізі взаємодії електромагнітного поля вихрострумного перетворювача з електромагнітним полем вихрових струмів, які наводяться в контрольованому об'єкті. Інтенсивність і розподіл вихрових струмів в об'єкті контролю залежить від геометричних розмірів об'єкта контролю, електричних і магнітних властивостей матеріалу, від наявності в матеріалі порушень суцільності, взаємного розміщення перетворювача і об'єкта контролю, тобто від багатьох параметрів. Це визначає широкі можливості методу, як засобу контролю різних

властивостей металу об'єкта контролю. Але в той же час ускладнюється його застосування, так як досить важко ідентифікувати інформативний параметр, оскільки властивості металу залежать у різній степені від параметрів, що визначають інтенсивність магнітного потоку. Його використовують тільки для контролю виробів з електропровідникових матеріалів [6].

Вихрові струми збуджують в об'єкті за допомогою перетворювача у вигляді котушки індуктивності, яка живиться змінним або імпульсним струмом. Приймальним перетворювачем (вимірювачем) служить та чи інша котушка. Отримувані таким чином первинні інформативні параметри дозволяють контролювати геометричні розміри виробів (товщину стінки при односторонньому доступі), визначати хімічний склад і структуру матеріалу виробу, внутрішні напруження, знаходити поверхневі та підповерхневі (на глибині декількох міліметрів) дефекти в тому числі і на виробах з покриттям.

При вирішенні поставлених завдань контролю механічних властивостей трубопроводів у промисловості широко застосовуються магнітні методи контролю [7, 8], а саме: метод коерцитиметрії та імпульсно-локальний магнітний метод.

При оцінці напружено-деформованого стану магнітним методом проводять зачистку ізоляційного покриття і очистку металу трубопроводу до металевого блиску. Площу поверхні, яку зачищають для проведення одного вимірювання, доводять до 1 дм². Вимірювання проводять у зоні навколо зварного з'єднання (до 10 см від зварювального з'єднання) і далі – в зоні основного металу, який не підлягав впливу напружень, що виникають внаслідок проведення зварювальних робіт. Вимірювання проводять при двох положеннях перетворювача: при розташуванні магнітного поля вздовж вісі трубопроводу та при його розташуванні в поперечному напрямку відносно вісі трубопроводу. Суть коерцитивного методу полягає у вимірюванні коерцитивної сили, що в багатьох випадках однозначно пов'язана з контрольованими механічними властивостями металу трубопроводу. Для виключення впливу якості магнітного контакту з об'єктом контролю використовується безконтактний спосіб вимірювання коерцитивної сили методом

вищих гармонік. Суть даного методу полягає в тому, що на об'єкт контролю одночасно діють постійними і змінними магнітними полями, виокремлюють n -ну гармоніку перетворювача, вимірюють її амплітуду та зсув по фазі по відношенню до опорного сигналу такої ж частоти і на їх основі визначають величину коерцитивної сили.

Недоліком даного методу є низька чутливість, тобто мала зміна коерцитивної сили при зміні відносної одиниці напружень об'єкта контролю.

Суть імпульсно-локального методу контролю механічних властивостей полягає в тому, що об'єкт контролю намагнічують полюсом постійного магніту або електромагніту нормально до поверхні об'єкта контролю і визначають величину залишкового магнітного поля, яка в силу фактора великого розмагнічування, пропорційна коерцитивній силі матеріалу об'єкта контролю [9].

Недоліками імпульсно-локального методу є:

- величина вимірюного градієнта залишкового магнітного поля залежить від властивостей намагнічування середовища;
- вплив якості магнітного контакту з об'єктом контролю на результати вимірювань.

Використання магнітного методу пов'язано зі значними труднощами при вимірюванні напружень з боку як зовнішніх, так і залишкових навантажень, які спричинені зварювальними та монтажними роботами. На покази давачів впливають структура металу і методи термообробки. Виникають також додаткові похибки, що пов'язані з впливом таких чинників, як магнітна текстура та форма об'єкта контролю. Суттєвим недоліком відомих магнітних методів вимірювання напружень є їх непридатність до аналізу двоосного напруженого стану. При двохосних напруженнях з допомогою магнітних давачів можна визначити лише напрямок головних напружень, а встановити їх величини та знаки неможливо, тому що неможливо отримати будь-яку характеристику, пропорційну до їх суми.

На основі магнітного методу побудована внутрішньотрубна діагностика [5]. Недоліком внутрішньотрубної діагностики є те, що в середньому визначається 60%-70% дефектів, даний метод потребує тривалої підготовки, створюються

небезпечні умови при проходженні інтелектуального снаряду, оскільки на дефектних ділянках додатково створюються динамічні навантаження.

Практика використання окремих методів неруйнівного контролю напружено-деформованого стану трубопроводів показала, що попередньо розглянуті методи можуть використовуватись як експрес-методи або в локальних середовищах.

Виходячи з вищесказаного, видно, що існуючі методики контролю напружено-деформованого стану конструкцій мають ряд недоліків, і тому їх застосування для контролю магістральних трубопроводів є недоцільним. Розробка нових методик для контролю напружено-деформованого стану трубопроводів є важливим і актуальним завданням.

1.3.2 Вибір акустичних методів контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів

Акустичні методи базуються на використанні залежності параметрів пружних коливань, які збуджуються в контрольованому об'єкті, від наявності або відсутності дефектів.

Найбільше розповсюдження серед акустичних методів контролю отримали методи звукового (вільних коливань) і ультразвукового діапазонів [11]. Із існуючих методів використання ультразвуку на практиці визначення напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів найбільш широкого використання набули резонансний, імпедансний, метод акустичної емісії і луно-імпульсний метод.

Метод вільних коливань базується на аналізі частотного спектра вільних коливань у системі, яка збуджена ударом. Використовуються для виявлення зон порушення жорсткого зв'язку між елементами багаточарових конструкцій.

Метод акустичної емісії, який викликаний рухом груп дислокацій в кристалічній решітці використовує такі інформативні параметри, як кількість сигналів за одиницю часу, їх частота, амплітудний розподіл, локалізація місця

виникнення хвиль, за якими судять про стан металу трубопроводу, зміни які проходять у ньому, прогнозують роботоздатність об'єкта контролю в цілому. Даний метод може використовуватись для контролю якості зварних з'єднань, є ефективним для знаходження та оцінки параметрів втомних тріщин у металі трубопроводу як у взірцях простої геометричної форми, так і в елементах реальних трубопроводів при їх випробуванні або експлуатації. Нерівномірність розподілу внутрішніх напружень у місцях зварювання при навантаженні та під час застигання металу ускладнює використання даного методу контролю напружено-деформованого стану металу трубопроводу.

Імпедансний метод базується на використанні залежності повного механічного опору (імпеданса) об'єкта контролю від якості з'єднання окремих його елементів між собою. Імпедансний метод використовують найбільш широко для контролю твердості металу трубопроводу. Через даний параметр визначають напружено-деформований стан металу трубопроводу. Практика застосування даного методу підтверджує визначення опосередкованого значення напружено-деформованого стану. При цьому не враховуються зовнішні і внутрішні фактори, які вносять найбільший вплив на значення напружено-деформованого стану трубопроводу. Тому даний метод можна використовувати для отримання і перевірки окремих параметрів.

Луно-імпульсний метод базується на поширенні в об'єкті контролю коротких імпульсів коливань з високою частотою і реєстрації інтенсивності та часу приходу луно-сигналів, відбитих від дефектів або границь розділу.

Резонансний метод базується на використанні залежності параметрів пружних коливань в умовах резонансу від наявності дефекту в об'єкті контролю. Цей метод застосовують для контролю якості виробів порівняно невеликої товщини з металу, скла, кераміки та інших матеріалів. Також його використовують для вимірювання товщини виробів (при односторонньому доступі), виявлення зон корозійного зносу, розшарувань у тонких листах. Внаслідок складності використання в експлуатаційних умовах його застосовують для калібрування приладів у лабораторних умовах.

Акустичні параметри матеріалу, такі як: швидкість поширення пружних хвиль, коефіцієнт затухання, акустичний імпеданс визначаються ультразвуковими методами дослідження експлуатаційних властивостей матеріалу, а через них – фізико-механічні характеристики: міцність, внутрішнє напруження, твердість і т. ін., що кореляційно пов'язані з акустичними [12].

Кожний метод має свою область застосування, в межах якої він є найбільш ефективним. Однак, якщо застосовувати методи неруйнівного контролю без врахування їх реальних можливостей, то ефект їх використання може бути низьким. Тому при виборі методу контролю необхідно враховувати цілий ряд факторів, які визначають їх ефективність. Найбільш ефективні результати контролю об'єкта контролю можуть бути досягнуті тільки при технічно правильному виборі та застосуванні методів неруйнівного контролю. Вибір того чи іншого методу неруйнівного контролю визначається конкретними вимогами практики і залежить від наступних факторів:

- матеріалів об'єкта контролю, які відрізняються хімічним складом, рівнем деформації, макроструктурою, термічною обробкою, густиною та іншими фізичними властивостями;
- конструкції об'єкта контролю;
- стану його поверхні (чистота обробки поверхні, наявність захисних покриттів);
- характеристики дефектів, які необхідно виявити;
- умов контролю і техніко-економічних показників.

Найбільш прийнятним методом контролю напружено-деформованого стану трубопроводів у даний час є ультразвуковий метод з використанням поздовжніх та поперечних хвиль, поверхневих хвиль, пластинчатих хвиль [13]. Метод базується на залежності швидкості поширення ультразвукових коливань від зміни параметрів металу трубопроводу. Даний метод є простим у реалізації і точним при вимірюванні часу поширення ультразвукових коливань у металі труби. В залежності від використання тих чи інших хвиль, від напрямку їх поширення і отримання відбитих коливань можна визначити механічні параметри металу трубопроводу, зокрема визначити напружено-деформований стан трубопроводу, за яким встановлюють

можливість його подальшої безаварійної експлуатації або потребу в проведенні ремонтно-відновлюваних робіт.

У порівнянні з іншими методами контролю ультразвукові методи мають високу чутливість, велику продуктивність, є можливість проведення контролю безпосередньо на робочих ділянках трубопроводу без порушень технологічного процесу. З використанням ультразвукового методу можна виявити як поверхневі, так і внутрішні дефекти на відміну від акустичного, вихрострумowego та тензометричного. Ультразвукові методи контролю легко піддаються автоматизації на відміну від тензометричного. Вони прості і надійні у використанні. Недоліками інших методів є неможливість визначення окремих компонентів напружень, що на практиці є актуальним завданням в умовах експлуатації, яка дозволить визначити причину та напрям зусиль, що діють на стінки трубопроводу та вчасно запобігти аварійним ситуаціям.

Вище сказане робить актуальним проведення досліджень, які пов'язані з вдосконаленням і розробкою більш ефективних методів і засобів неруйнівного контролю міцнісних характеристик металу трубопроводів, найбільш раціональним з яких є ультразвуковий метод. Актуальним також є завдання, яке полягає у розробці методу контролю напруженого стану трубопроводу, що визначить безпечні передумови проведення ремонтно-відновлюваних робіт на лінійних частинах нафтогазопроводів. Над вирішенням даного завдання працюють вчені різних науково-дослідних організацій.

Провівши аналіз науково-технічної літератури, зокрема в [14] знаходимо основні положення теорії розповсюдження пружних хвиль у попередньо деформованих тілах та опис способу визначення двоосних напружень ультразвуковим методом. Також у даній роботі наведені висновки та результати визначення одноосних напружень у металі.

На основі запропонованого математичного опису малого зміщення, яке накладене на великі деформації абсолютно пружного тіла довільної симетрії, отримано Б. Тоупіном та Бернстейном рівняння, на основі яких проводиться аналіз плоских хвиль малої амплітуди, що поширюються в попередньо

напруженому анізотропному матеріалі. Було доказано, що при зміні початкових напружень у досліджуваному матеріалі, змінюється швидкість звуку та відповідно можна визначити пружні константи третього порядку [15, 16].

Проводились дослідження вченими Стенфордського університету, двовимірного розподілу залишкових напружень у металевих листах прокату за допомогою поперечних та поверхневих ультразвукових хвиль методом подвійного імпульсу [17]. Також проводились акустичні вимірювання величини пластичної деформації, ступеня структурної анізотропії матеріалу. Розроблена дослідниками методика застосовується для аналізу напруженого стану протяжних об'єктів контролю та в зварних з'єднаннях трубопроводів великих діаметрів. Наукові співробітники міністерства оборони, енергетики, транспорту США, Національного бюро стандартів проводять дослідження кількісних методів неруйнівного контролю, які спрямовані на визначення гістерезисних явищ в акустопружності при переході матеріалу до пластичної деформації, а також відношення акустопружних властивостей полікристалу до складових його кристалів [18].

Дослідження акустопружності французькими вченими центру промислової механіки міста Сент-Етьєн пов'язані з реєстрацією зміни часу розповсюдження повздовжньої ультразвукової хвилі в об'єкті контролю при його навантаженні. Французькими дослідниками запропонований метод реєстрації наведеної анізотропії за зміною форми ультразвукових імпульсів під дією прикладеного зусилля [20].

Група японських вчених університету міста Кіото, працюють над теоретичним описом ефекту акустопружності [21]. Також на даній теоретичній основі в університеті м. Осака вчені проводять експериментальні дослідження акустопружних властивостей конструкційних матеріалів. Досліджують рівень впливу непостійності температури та структурної анізотропії матеріалу об'єкта контролю на результати визначення залишкових напружень у зварних конструкціях [22].

у Німеччині більшість досліджень акустопружності проводяться в місті Саарбрюкен у центрі вивчення неруйнівних методів контролю - в інституті Фраунгофера. Тут вивчається вплив мікроструктури речовини на характер типових залежностей акустопружності. Велика увага приділяється дослідженню частотно залежної швидкості розповсюдження і поглинання ультразвуку в деформованих полікристалічних матеріалах [23].

У центрі неруйнівного контролю м. Харвелль, що у Великій Британії, проводяться теоретичні та експериментальні дослідження, спрямовані на реєстрацію полів залишкових напружень у зразках типу сталюї плити з тріщиною, при цьому враховується структурна неоднорідність полікристалічного матеріалу. Для збудження поздовжніх та поперечних хвиль використовуються п'єзоелектричні та електромагнітно-акустичні давачі. У центрі неруйнівного контролю розроблений метод вимірювання часу розповсюдження ультразвукових коливань за допомогою швидкого перетворення Фур'є [19].

З вищезгаданого стає очевидним, що пріоритетним напрямком для контролю технічного стану об'єкта контролю є використання ультразвукових методів. Дані методи поділяються на декілька груп, в залежності від способу отримання інформаційного сигналу та від способу його обробки.

До методів обробки ультразвукового сигналу відносяться методи, які використовують для контролю проходження ультразвукових хвиль, продетектовані імпульси, високочастотні імпульси зондування та його луно-сигнали. Точність даних методів не менше 1 % [24]. Підвищення точності даних методів можна досягнути шляхом визначення часових інтервалів по відношенню до визначеного періоду заповнення кожного відбитого імпульсу [12].

Широко поширеним методом є радіо-імпульсний метод вимірювань. При цьому визначається зміна частоти високочастотного коливання ультразвукової хвилі. Точність даного методу становить 0,1 % на частотах до 10 МГц [25].

Найбільш широкого застосування набув ультразвуковий луно-імпульсний метод з використанням поздовжніх і поперечних хвиль, поверхневих хвиль, пластинчатих хвиль. Слід відмітити, що на практиці явища інтерференції та

дифракції взаємно зв'язані і існують одночасно. Ці явища значно ускладнюють проведення ультразвукового контролю особливо в режимі безперервного випромінювання. Тому більшу перевагу віддають імпульсному методу, при якому падаюча і відбита хвилі не зустрічаються і не інтерферують. Це пояснюється тим, що короткі імпульси слідуєть один за одним через деякий достатній проміжок часу для повного затухання кожного імпульсу. Луно-імпульсний метод є простим в реалізації і точним при вимірюванні часу поширення ультразвукових коливань в металі труби. В залежності від використання тих чи інших хвиль, від напрямку їх поширення і отримання відбитих коливань можна визначити механічні параметри металу трубопроводу, зокрема, визначити напружено-деформований стан ремонтних ділянок трубопроводу, для безпечного проведення ремонтно-відновлюваних робіт на даних ділянках.

1.3.3 Аналіз приладів для контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів

Для контролю напружено-деформованого стану трубопроводів використовуються традиційні засоби діагностування, такі як: ультразвукові дефектоскопи, магнітні дефектоскопи, товщиноміри, твердоміри з використанням відповідних схем контролю.

При характеристиці напружено-деформованого стану металу труби магістральних нафтогазопроводів визначальними параметрами є їх деформації і, як наслідок, появи в них напружень. Найбільш поширеними для контролю величини і напрямку деформацій трубопроводів є вимірювачі деформацій. Вторинними пристроями для вимірювання відносних деформацій є прилад ИДЦ-1 та вимірювальна система ИДЦ-5. Прилад ИДЦ-1 розрахований для роботи як у лабораторних, так і у експлуатаційних умовах. Даний прилад може реєструвати почергово сигнали від восьми давачів, які можна встановити не тільки в окремому перерізі трубопроводу, але і по довжині. Вимірювальна система ИДЦ-5 розрахована на 1024 давача, які можуть працювати почергово та паралельно з

можливістю запису інформації в пам'ять. Дана система розрахована для роботи в лабораторних умовах. Первинними перетворювачами даних пристроїв служать тензодавачі, принцип дії яких базується на зміні опору від величини деформацій. Як правило, тензодавачі виготовляються у вигляді хвилеподібного тензорезистора і групуються за способом вимірювання та конструктивними особливостями. Тензорезистори поділяються на дротяні, фольгові та напівпровідникові. Дротяні тензорезистори використовують при базах більше 5 мм, так як в інших випадках їх надійність є недостатньою. Характеристики фольгових тензорезисторів є більш стабільними при базах 0,5-1 мм. Напівпровідникові тензорезистори мають високу чутливість, що в десятки разів перевищує чутливість дротяних чи фольгових тензорезисторів, але при їх використанні потрібно враховувати значну залежність їх характеристик від температури. Тому при тензоконтролі напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів найбільш підходять для використання фольгові тензорезистори.

У польових умовах, особливо в складних кліматичних умовах успішно використовують магнітопружний метод і прилад-вимірювач механічних напружень трубопроводу ІНІ-1А, який розроблений Київським політехнічним інститутом і інститутом електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України [27, 29].

Іншим класом приладів, в основі яких лежить магнітний метод вимірювання напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів, є коерцитиметри. За способом намагнічування вони поділяються на коерцитиметри для локального контролю з намагнічуючим пристроєм накладного типу та з намагнічуючим пристроєм типу прохідного соленоїда, в якому об'єкт контролю намагнічується повністю. У даних приладах присутній суттєвий недолік: результат вимірювання коерцитивної сили хоча не залежить від якості магнітного контакту між полюсами електромагніту та об'єктом контролю, але зменшує чутливість контролю.

Відомі такі пристрої, що використовують метод коерцитиметрії [29]: КИФМ-1, КИФМ-3, КИФМ-10.1, КТИ-1, ФК-10, МФ-32КЦ.

Недоліками коерцитиметрії є:

- необхідність намагнічування трубопроводів;
- необхідність попереднього визначення хімічного складу матеріалу трубопроводів, встановлення кореляційної залежності зміни (в допустимих межах) хімічного складу на магнітні та механічні властивості;
- вплив товщини стінки трубопроводів на результати вимірювання.

Для імпульсно-локального методу контролю розроблені спеціальні пристрої типу ИМА різних модифікацій: ИМА-2А, ИМА-3, ИМА-5.

Для неруйнівного прямоконтактного вимірювання або тривалого контролю напружень у стінках металу магістральних трубопроводів, спільно українськими та чеськими науковцями розроблений прилад типу «ГУПЕТРОН-Z». Абсолютна похибка його вимірювань у пружній області матеріалу становить $\pm 2\%$, МПа [29].

Особливим класом приладів для контролю технічного стану трубопроводів є прилади акустичної емісії, які реагують як на дефектні явища в металах, так і на зміну граничного значення напруження межі плинності матеріалу. Оскільки при експлуатації трубопроводів, згідно з вимогами нормативних документів, які діють в Україні, значення напруження межі плинності металу не повинно виходити за граничне, використання цих приладів обмежується контролем явно виражених дефектів металу (тріщини, інородні включення, дефекти зварних з'єднань і т. п.).

Для реєстрації приладами параметрів акустичної емісії, які використовується в країнах СНД, є комплекс "Гроза-16". Даний комплекс являє собою 4-х каналний приймач акустичних сигналів у смузі підсилювальних частот каналу підсилення 0,1 - 40 МГц з коефіцієнтом підсилення 30-70 дБ [29]. В апаратурі передбачені можливі зміни амплітудного і частотного діапазонів реєстрації сигналів акустичної емісії. В умовах акустичних шумів передбачено звуження смуги пропускання і зниження чутливості апаратури для виключення спрацювання лічильників від побічних шумів. Інформація видається на цифрове табло та друкуючий пристрій з можливістю запису аналогових сигналів.

Успішно використовуються для вищевказаних цілей розроблений діагностичний комплекс ЕМА-3 спільно ІЕЗ ім. Патона і АТ "VIDEOTON"

(Угорщина). Серед найбільш відомих приладів такого спрямування, це серійні прилади АФ-15, АФ-41, АФ-44.

Для вимірювання швидкості поширення і загасання ультразвукових коливань у різних матеріалах, а також вимірювання амплітуди луно-сигналів використовується спільно розроблений фірмою "VOTUM" та МДТУ ім. Баумана дефектоскоп УД-4Т. Відомий дефектоскоп, розроблений компанією "Krautkramer" (Німеччина) з серією перетворювачів MWB 60-4 з частотою 10 МГц. Недоліком даних приладів є низька точність вимірювання швидкості ультразвуку, тому їх використовують, в основному, для дефектоскопії.

Для вимірювання діючих напружень в зоні дефекту також може бути використаний ультразвуковий вимірювач напружень «АСТ-2000» [36]. Прилад дозволяє вимірювати кожний з компонентів поздовжніх та кільцевих напружень в умовах плоского напруженого стану. Значення діючих напружень відображається на екрані дисплею в МПа. Похибка вимірювань не перевищує 5% від межі текучості. Також в Україні розроблено прилад «Сігма-2», який використовується для контролю напружень по товщині стінки трубопроводу.

Для товщинометрії металу використовуються прилади як вітчизняних, так і іноземних виробників. Зокрема, НВП "Машинобудування" (м. Дніпропетровськ) розроблені ультразвукові товщиноміри УТ-93П/1, УТ-98 "СКАТ", прецизійний товщиномір УТ-99. SONAGAGE II розробка компанії "SONATEST" з комплектом первинних перетворювачів на частотах 2,25-5 МГц типу SG1, SG2HT, SG2. Основна похибка вимірювання часу проходження ультразвуку складає $\pm 0,05$ %. Ці прилади є малочутливими при визначенні деформацій досліджуваних об'єктів контролю.

Однією з характерних властивостей металу трубопроводів при тривалій експлуатації є зміна його твердості, що в свою чергу впливає на граничне значення напруження плинності.

Для визначення твердості використовується твердомір динамічний ТД-003М з похибкою вимірювання твердості:

- за Брінелем ± 15 НВ;

- за Роквеллом ± 2 HRC;
- за Віккерсом ± 15 HV.

Іноземним аналогом динамічного твердоміра є прилад EQUOTIP (Швейцарія). До даного класу приладів з підвищеними метрологічними характеристиками відноситься також ультразвуковий твердомір з мікропроцесором ТДУ-005М.

Для визначення динамічних навантажень внаслідок вібрацій використовуються комплекси апаратури, які розроблені вітчизняними та зарубіжними вченими.

Двоканальним варіантом аналізатора спектра коливань, що працює в реальному масштабі часу, є модель 2134 фірми "Bruel and Kjaer" (Данія). Аналізатор працює в двох режимах: один є режимом триоктавного частотного аналізу в реальному масштабі часу в 42 смугах частот у діапазоні 1,6 Гц ... 20 кГц; в другому здійснюється октавний аналіз у реальному масштабі часу в 14 смугах в діапазоні 2 Гц ... 16 кГц одним лінійним каналом. Іншими моделями аналізаторів на смугових фільтрах є модель 3580А компанії "Hewlett-Packard Co." (США), що працює в діапазоні частот від 5 Гц до 50 кГц, та модель 800 фірми "BBN Instruments Corp." (США), що працює в діапазоні частот від 3 Гц до 20 кГц.

Моделі 440А фірми "Nicolet Scientific Corp." (США), DA-6203 фірми "IMV Corp." (Японія) та модель 1201 фірми "Solartron Schlumberger" (Великобританія), RT FSA компанії "Real Time Microsystems", Computerscope компанії "R. C. Electronics Inc." Базуються на використанні алгоритмів прямого перетворення Фур'є [32]. Особливістю даних пристроїв є застосування ними принципу Винограда для вирішення алгоритму швидкого перетворення Фур'є, який є більш швидким, ніж традиційний алгоритм Кулі-Тьюки. Вищевказані пристрої працюють у діапазонах частот від 1 Гц до 30 кГц.

Недоліком даної групи приладів є низька чутливість до зміни стану об'єкта діагностування при сильно зашумленому сигналі, виникнення специфічних похибок, що зумовлені ефектом квантування та особливостями представлення

даних у процесі обчислень. Такі похибки є параметричними і впливають на динамічні характеристики пристроїв обробки сигналів [33].

В СНД серійно випускається обчислювальний аналізатор типу СК 4-72/2, призначений для дослідження спектру періодичних і неперіодичних (в тому числі однократних) процесів та стаціонарних шумів. Аналізатор використовується як самостійно, так і в складі інформаційних вимірювальних систем. Він складається з аналізатора спектра С4-73, багатоканального інтегратора Я4С-78, вимірювального блоку Я4С-76 та індикатора. Кожний із цих пристроїв може використовуватись індивідуально і в різних поєднаннях. Діапазон робочих частот вхідного сигналу від 1 Гц до 20 кГц. Наведена похибка вимірювання частоти гармонічних складових за екраном індикатора за допомогою чотирьох яскравих міток не більше 1%.

У Московському науково-виробничому відділенні "Спектр" розроблений багатоканальний мікропроцесорний пристрій типу ВАР-031, призначений для реєстрації та аналізу вібросигналів. Реєстрація вібросигналів проводиться 20-ма каналами в частотному діапазоні від 1 Гц до 100 кГц [34]. Функціональні можливості пристрою ВАР-031 визначаються його програмним забезпеченням. Недоліком даної системи є мала швидкодія, великі розміри системи, що затрудняє її використання поза лабораторними дослідженнями.

На даний час широко впроваджуються для діагностики технічного стану об'єктів багатоцільові системи на базі сучасних електронно-обчислювальних машин. Їх перевагою є використання для аналізу вхідних величин потужного математичного апарату, який складається з поєднання таких методів, як кепстральний, біспектральний, модальний та інші. Вони мають можливість формувати еталонні діагностичні ознаки і порогові значення, класифікувати функції та оптимізувати правила для розпізнавання технічного стану об'єкта контролю. Такий підхід реалізовано корпорацією "Data Physics" у моделі SignalStar.

1.4 Постановка завдань дослідження

Ознайомившись з станом та проблемами практичних, теоретичних та експериментальних досліджень в області проведення неруйнівного контролю трубопроводів, які під час експлуатації піддаються різного роду навантаженням і факторам впливу та внаслідок проведення аналізу даних методів контролю, можна зробити висновок про те, що найбільш ефективним для контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів є ультразвуковий метод контролю. Проте слід відмітити, що на практиці серед багатьох ультразвукових методів найбільшу перевагу віддають імпульсному методу, при якому падаюча і відбита хвилі не зустрічаються і не інтерферують, оскільки це приводить до ускладнення розшифрування інформації особливо в режимі безперервного випромінювання. Тому найбільш широкого застосування набув ультразвуковий луно-імпульсний метод. Швидкість поширення ультразвукової хвилі залежить від багатьох фізико-механічних властивостей металу трубопроводу, а також від дії різного роду навантажень та факторів впливу. Дані чинники мають як випадковий, так і постійний характер, а їхній зв'язок не завжди можна пов'язати. Дія згаданих чинників може спричинити аварійні ситуації на окремих ділянках трубопроводу, зокрема, на ремонтних. Практика експлуатації трубопроводів показує, що не завжди зміна навантажень та різного роду факторів впливу спричинює аварійні ситуації.

Достовірний опис моделі напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів у реальних умовах експлуатації має пріоритетне значення з метою прийняття правильних рішень для безпечного проведення ремонтних робіт.

Завданням дослідження даної дисертаційної роботи є:

- розробити математичну модель визначення напружено-деформованого стану ремонтної ділянки магістрального трубопроводу ультразвуковим методом, яка дозволить підвищити точність обчислення сумарного напруження в його

стінках на основі явища акустопружності в трьох взаємноперпендикулярних напрямках;

- удосконалити ультразвуковий метод контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів, який дасть можливість визначити вид, місце та напрям дії зусилля, що діє на ремонтній ділянці;
- удосконалити модель електромеханічного перетворення енергії коливання чутливого елемента ультразвукового п'єзоелектричного перетворювача представленого у вигляді електричної схеми-аналога;
- удосконалити пристрій для ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтної ділянки магістрального трубопроводу та розробити проект методики проведення контролю, провести метрологічний аналіз складових загальної похибки розробленого методу та пристрою;
- провести лабораторні та натурні дослідження напружено-деформованого стану трубопроводу на ремонтній ділянці з допомогою розроблених методу та пристрою.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЮ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РЕМОНТНИХ ДІЛЯНОК МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВІДІВ

2.1 Загальні положення та основні напрямки дослідження напружено-деформованого стану металу труб діючого трубопроводу на ремонтних ділянках

Ділянки трубопроводів в експлуатаційних умовах знаходяться в складному напруженому стані, піддаючись дії навантажень, які не завжди можна врахувати при проектуванні, так як вони проявляються лише в особливих ситуаціях, наприклад:

- зсувні процеси на схилах гір та пагорбів;
- сезонні температурні деформації трубопроводів;
- при порушенні технології в ході ремонтних робіт;
- при розмивах ґрунтових основ і зсувах бетонних опор під трубопроводами на річкових та балкових переходах;
- при сезонних змінах (розтавання або замороження) основ під трубопроводами при перетині великих боліт тощо.

При високих значеннях температурного перепаду в слабонесучих ґрунтах або при звільненні від ґрунту підземного трубопроводу можливі втрата стійкості трубопроводу та викид його із траншеї [4].

Дані навантаження можуть привести до значних відхилень просторового положення трубопроводу відносно проектного положення. Таким чином крім проектних навантажень, таких як внутрішній тиск, власна вага трубопроводу, тиск ґрунту на трубопровід можуть діяти додатково напруження, які викликані деформацією внаслідок непроєктних зміщень. Дані напруження не враховуються проектом. Як показує практика, інколи навіть не дуже значне зміщення

трубопроводу від проектного положення (4 – 10 мм) може привести до перевищення гранично допустимих напружень в його стінках [1]. Відомо, що основними джерелами виникнення пошкоджень у діючих магістральних трубопроводах є зони концентрації напружень, в яких процеси корозії, втоми та плинності розвиваються більш інтенсивніше. Відповідно, визначення зон концентрації напружень є одним із важливих напрямків контролю напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів, зокрема, на їх ремонтних ділянках.

При цьому міцнісні показники трубопроводу повинні забезпечувати його роботоздатність в експлуатаційних умовах. В нормативних документах на проектування магістральних трубопроводів максимальне напруження на криволінійних ділянках в стінках труб і їх жорсткість приводяться без врахування граничних умов [10]. Тому виникає завдання визначення напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу.

Основними напрямками визначення напружено-деформованого стану металу труб діючого трубопроводу, які необхідні для аналізу умов його безпечної та тривалої експлуатації є [36]:

- визначення дефектів у металі труб і зварювальних з'єднаннях трубопроводу;
- дефектоскопія зовнішньої поверхні металу труб і зварювальних з'єднань трубопроводу, в першу чергу виявлення геометричних параметрів дефектів зовнішньої поверхні труб;
- визначення мінімальних значень товщини стінки трубопроводу;
- оцінка ступеня небезпеки виявлених дефектів шляхом розрахунку коефіцієнтів інтенсивності напружень у металі стінки трубопроводів.

Вище вказані параметри визначаються класичними методами, але вони не є визначальними для характеристики напружено-деформованого стану трубопроводу, зокрема на ремонтних ділянках. Найбільш значущим параметром, який визначає даний стан металу труб є напруження, за допомогою яких виявляються їх механічні властивості, такі як: зниження початкової межі міцності

(тимчасового опору розриву), зниження межі його плинності, ударної в'язкості та інших механічних властивостей.

2.2 Аналіз напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів

2.2.1 Оцінка величини напружень у стінках трубопроводів на ремонтних ділянках

Розглянемо ділянку трубопроводу заглибленого в ґрунт, частина якого під час ремонтних робіт вже звільнена від ґрунту, як видно з рис. 2.1, що має місце при заміні ізоляційного покриття трубопроводу, заміні корозійних ділянок.



Рис. 2.1. Ремонтна ділянки трубопроводу

Крім того, трубопровід внаслідок експлуатації піддався навантаженням, які привели до згину його поздовжньої вісі, внаслідок чого трубопровід на даній ділянці отримав викривлення відносно неї. Дану ділянку трубопроводу ABC з вибраною системою координат XYZ покажемо у вигляді схеми, яка зображена на рис. 2.2. Вважаємо, що дана ділянка трубопроводу в перерізі B защемлена та ділянка AB знаходиться заглибленою в ґрунті. Також ділянка BC навантажена в перерізі C силою P , яка перпендикулярна площині викривлення та відповідно, паралельна осі Y .

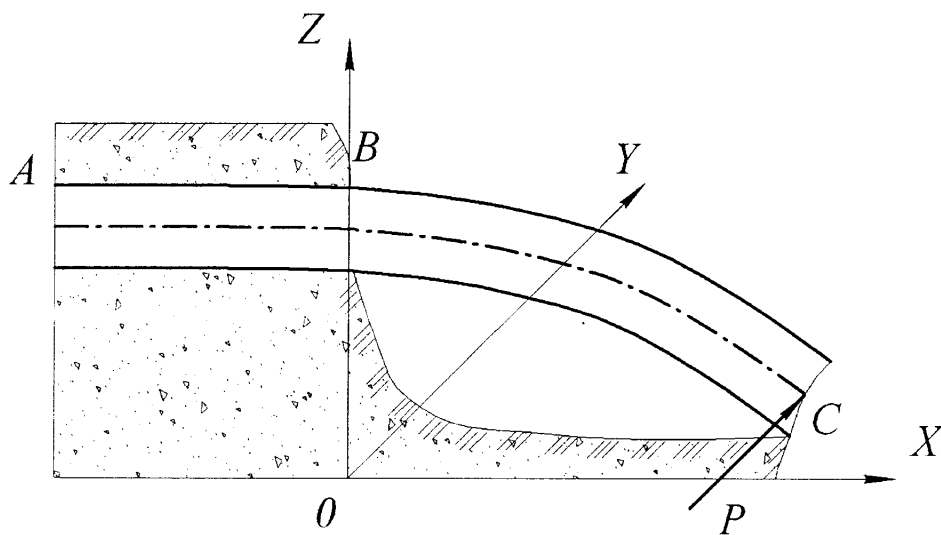


Рис. 2.2. Схема ремонтної ділянки трубопроводу

Зобразимо ремонтну ділянку трубопроводу BC таким чином, як показано на рис. 2.3. На рис. 2.3 ділянка трубопроводу BC показана у вигляді дуги, що знаходиться у площині ZX , з радіусом кривизни дугової ділянки R та кутом дуги α . Вибираємо на даній ділянці трубопроводу елементарну дугу довжиною ds і позначимо її mn . Нехай положення перерізу в точці n визначається деяким кутом φ , тоді кут між радіусами проведеними в точках m та n буде $d\varphi$. Сила P в даному випадку перпендикулярна площині дуги ZX і прикладена в точці C . Відстані від точки прикладання сили P до положення поперечного перерізу в точці n позначимо a та b .

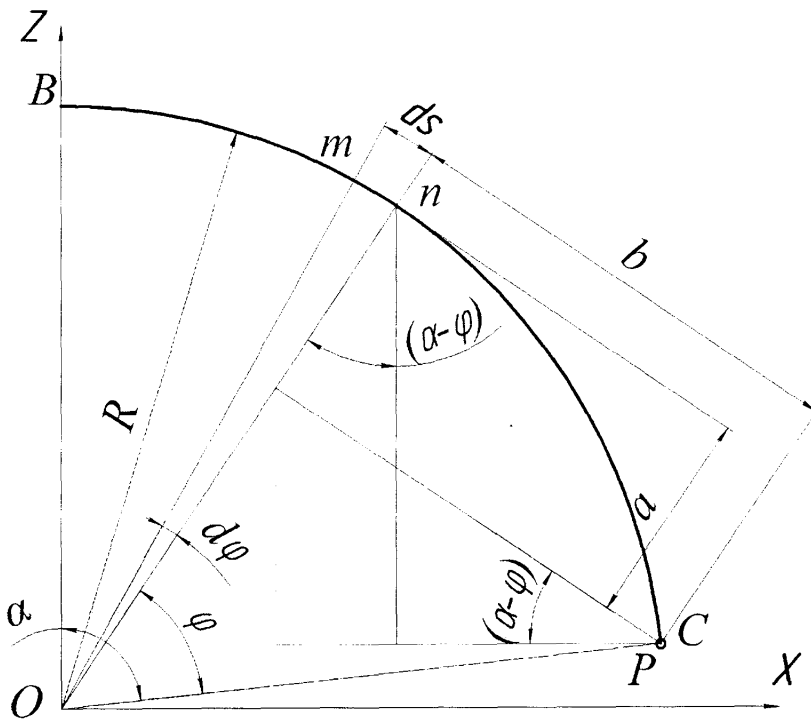


Рис. 2.3. Моменти, які діють на ремонтній ділянці трубопроводу від сили P

Розглянемо напружено-деформований стан ділянки трубопроводу BC . Від дії зовнішньої сили P в поперечних перерізах даної ділянки трубопроводу BC відбувається деформація згину та кручення, внаслідок якої в поперечних перерізах трубопроводу виникають внутрішні силові фактори, а саме поперечна сила Q , згинаючий $M_{зг}$ та крутний $M_{кр}$ моменти. Дані силові фактори діють у двох площинах XY та YZ , оскільки в площині ZX проекція сили P на цю площину рівна 0. У защемленні можуть виникати реакція защемлення, яка протидіє зміщенню поперечного перерізу в точці B та реакція защемлення, яка виключає можливість його зміщення в напрямку осі X , а також реактивний момент, який протидіє повороту поперечного перерізу в точці B навколо осі X . Розглянемо ремонтну ділянку трубопроводу BC , як балку кільцевого поперечного перерізу малої кривизни, вважаючи, що [38]:

$$h < \frac{1}{4}R - \frac{1}{5}R, \quad (2.1)$$

де h - висота поперечного перерізу трубопроводу, під якою розуміється найбільший розмір поперечного перерізу в площині кривизни осі.

Тому величину напружень, які виникають у поперечних перерізах ремонтної ділянки трубопроводу з достатньою для практики точністю можна визначити аналогічно, як і для прямих балок [38].

З рис. 2.3 для елементарної дуги ds , як відомо згинаючий момент $M_{z\epsilon}$ дорівнює:

$$M_{z\epsilon} = Pb = PR \sin \varphi. \quad (2.2)$$

Крутний момент $M_{кр}$ для даної ділянки трубопроводу згідно геометричних розмірів буде визначатись, як:

$$M_{кр} = Pa = PR(1 - \cos \varphi). \quad (2.3)$$

Для розрахунку згинаючих та крутних моментів у площині XU розглянемо проекції цих моментів на площину XU , які дорівнюють:

$$M_{z\epsilon(xu)} = Pb \cos(\alpha - \varphi) = PR \sin \varphi \cos(\alpha - \varphi), \quad (2.4)$$

$$M_{кр(xu)} = Pa \sin(\alpha - \varphi) = PR(1 - \cos \varphi) \sin(\alpha - \varphi). \quad (2.5)$$

Для розрахунку згинаючих та крутних моментів у площині YZ розглянемо проекції цих моментів на площину YZ , які дорівнюють:

$$M_{z\epsilon(yz)} = Pb \sin(\alpha - \varphi) = PR \sin \varphi \sin(\alpha - \varphi), \quad (2.6)$$

$$M_{кр(yz)} = Pa \cos(\alpha - \varphi) = PR(1 - \cos \varphi) \cos(\alpha - \varphi). \quad (2.7)$$

Визначаємо сумарні напруження, використовуючи принцип незалежності дії сил [39], по якому необхідно визначити напруження від кожного компонента внутрішніх сил окремо, а потім їх просумувати. Від дії поперечних сил Q_{xy} та Q_{yz} а також крутних моментів $M_{кр(xy)}$ та $M_{кр(yz)}$ у точках поперечного перерізу ремонтної ділянки трубопроводу виникають дотичні напруження τ' . На основі закону парності дотичних напружень вони виникають також і в поздовжніх перерізах та викликають зсуви окремих волокон одних відносно інших. Згинаючі моменти $M_{zz(xy)}$ та $M_{zz(yz)}$ викликають у точках поперечного перерізу даної ділянки трубопроводу нормальні напруження стиску та розтягу поздовжніх волокон матеріалу відносно нейтральної осі перерізу.

Згідно законів технічної механіки поперечні сили Q_{xy} та Q_{yx} знайдемо, як суму спроектованих всіх сил, які діють на даній ділянці трубопроводу відповідно на вісь Y у площині XY та YZ тому:

$$Q_{xy} = Q_{yz} = P. \quad (2.8)$$

Таким чином, величини дотичних напружень τ'_{xy} та τ'_{yz} у поперечних перерізах ремонтної ділянки трубопроводу та в перерізах її площинами паралельними нейтральному шару визначаємо по формулі Журавського [38]:

$$\tau' = \frac{Q \cdot S}{I \cdot b}, \quad (2.9)$$

де S – статичний момент (відносно нейтральної осі) відсіченої частини поперечного перерізу розміщеної по одну сторону від рівня, на якому визначаються дотичні напруження;

I – момент інерції всього поперечного перерізу відносно нейтральної осі;

b – ширина поперечного перерізу криволінійного елемента на тому рівні, на якому визначаються дотичні напруження.

Підставляючи вираз (2.8) в (2.9), отримаємо:

$$\tau_{xy}' = \tau_{yz}' = \frac{P \cdot S}{I \cdot b}. \quad (2.10)$$

Сумарні дотичні напруження від дії поперечних сил дорівнюють:

$$\tau' = \sqrt{(\tau_{xy}')^2 + (\tau_{yz}')^2}. \quad (2.11)$$

Практичні розрахунки, як видно з рис. 2.4, показують, що величина дотичних напружень τ' від дії поперечних сил не значна, в порівнянні з напруженнями, які виникають від дії M_{z2} та M_{kp} . Тому при подальших розрахунках величиною даних дотичних напружень можна нехтувати.

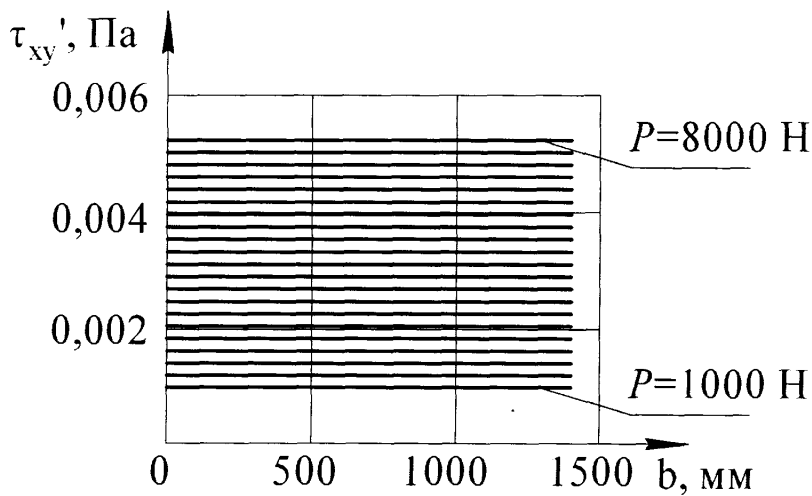


Рис. 2.4. Залежність дотичних напружень від величини дії поперечної сили P

При згині в двох площинах нормальні напруження в довільній точці поперечного перерізу визначаються за формулою [40]:
в площині XU :

$$\sigma_x = \frac{M_{3z(xy)}}{0,5W_\rho}, \quad (2.12)$$

в площині YZ :

$$\sigma_z = \frac{M_{3z(yz)}}{0,5W_\rho}, \quad (2.13)$$

де W_ρ - полярний момент опору кільцевого поперечного перерізу трубопроводу.

$$W_\rho = \frac{\pi}{16D} (D^4 - d^4), \quad (2.14)$$

де D - зовнішній діаметр труби ділянки трубопроводу;

d - внутрішній діаметр труби ділянки трубопроводу.

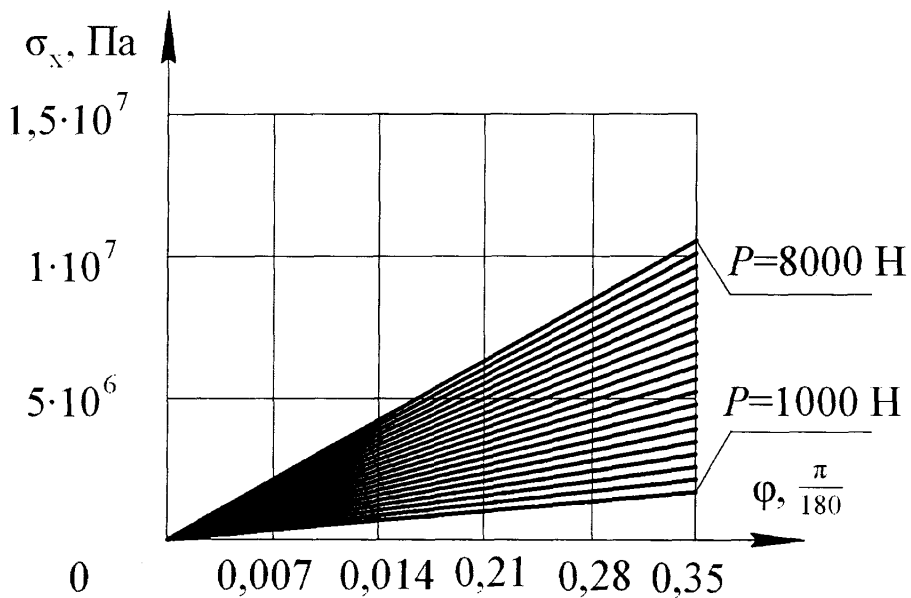


Рис. 2.5. Розподіл нормальних напружень від величини дії прикладеної сили P в площині XY

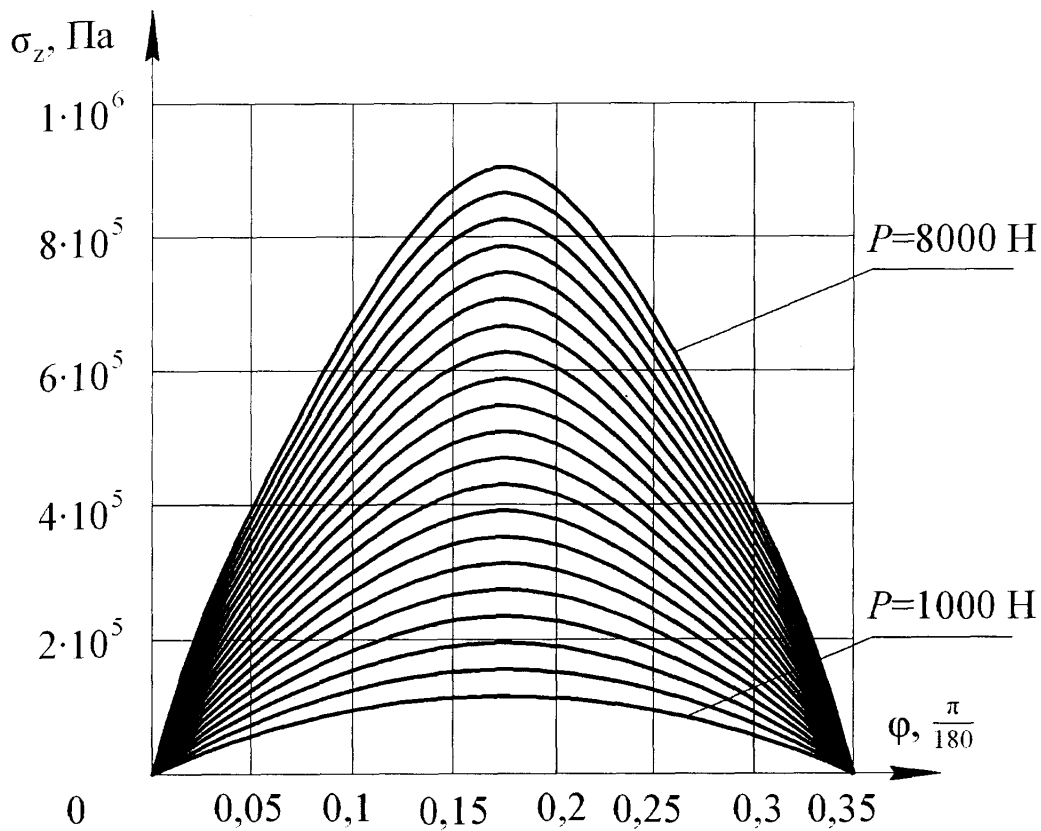


Рис. 2.6. Залежність нормальних напружень від величини дії прикладеної сили P в площині XZ

Сумарні нормальні напруження дорівнюють:

$$\sigma = \frac{\sqrt{M_{z\varphi(xy)}^2 + M_{z\varphi(yz)}^2}}{0,5W_\rho}. \quad (2.15)$$

Дотичні напруження від дії крутного моменту в двох площинах XU та YZ сумуються геометрично. Дотичні напруження в площині XU від дії крутного моменту визначаються за формулою [40]:

$$\tau_{xy} = \frac{M_{кр(xy)}}{W_\rho}. \quad (2.16)$$

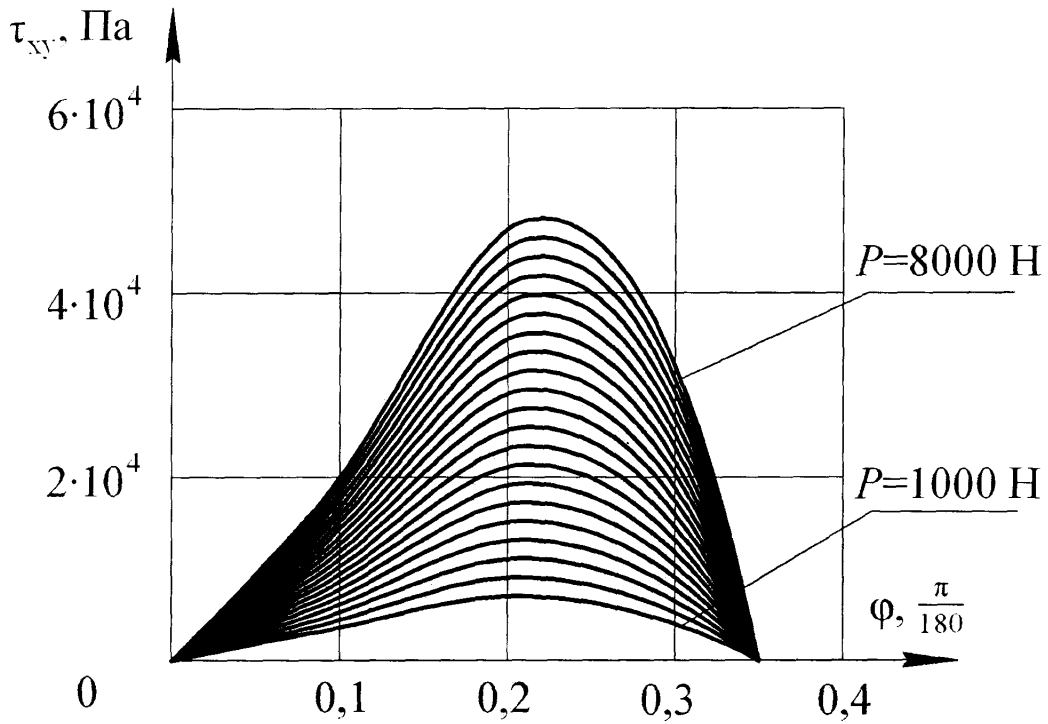


Рис. 2.7. Розподіл дотичних напружень від величини дії прикладеної сили P в площині XU

Дотичні напруження в площині YZ від дії крутного моменту:

$$\tau_{yz} = \frac{M_{кр(yz)}}{W_{\rho}}. \quad (2.17)$$

Сумарні дотичні напруження від дії крутних моментів у площинах XU та YZ :

$$\tau = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2}. \quad (2.18)$$

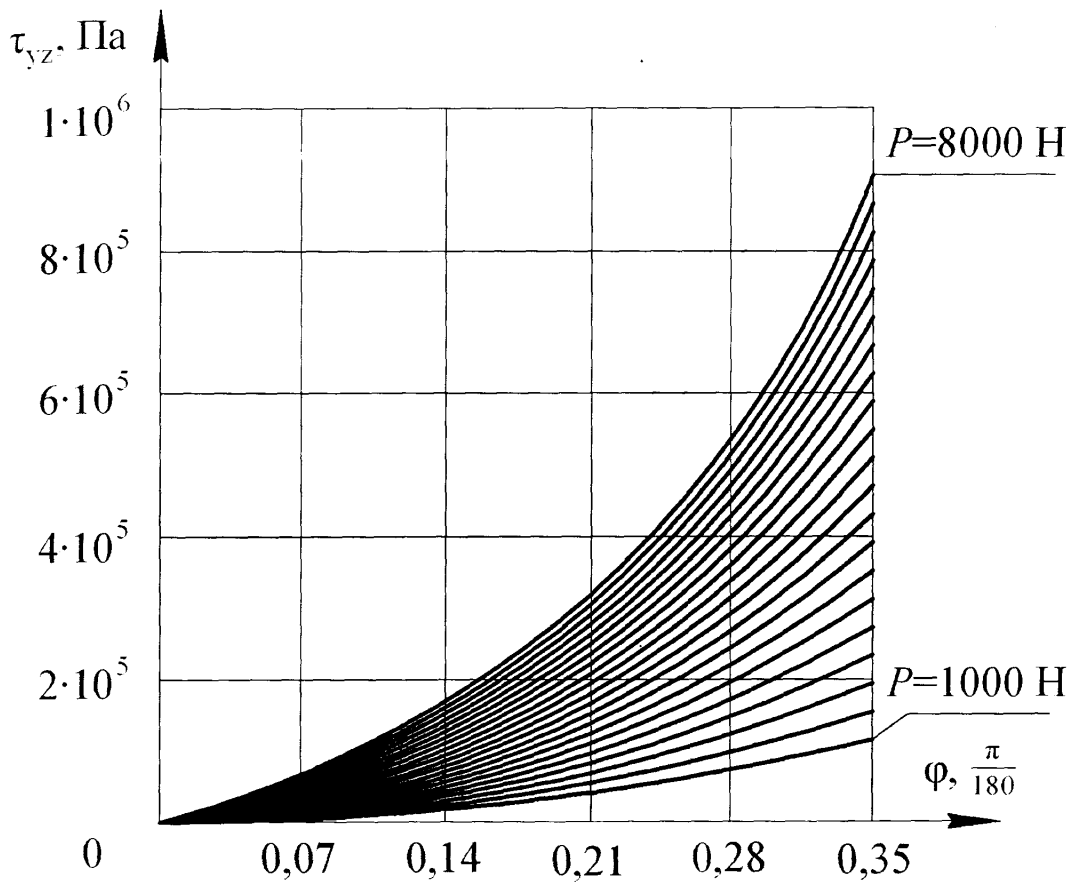


Рис. 2.8. Залежність дотичних напружень від величини дії прикладеної сили P в площині YZ

Розглянемо також напружений стан ремонтної ділянки трубопроводу, яка знаходиться також ще й під дією внутрішнього тиску p , окрім вище згаданих сил. Внутрішній тиск приводить до виникнення напружень, які діють в тангенційному напрямку, тобто кільцевих напружень σ_y , [41]:

$$\sigma_y = \frac{pD_{\text{вн}}}{2\delta}. \quad (2.19)$$

Для оцінки міцності даної ремонтної ділянки трубопроводу необхідно знати розрахункове напруження, яке порівнюється з допустимим значенням напруження. За допустиме значення приймають значення напруження плинності

металу стінки трубопроводу [38, 40, 73]. Використовуючи четверту теорію міцності розрахункове напруження буде рівне:

$$\sigma_{роз} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} \leq \frac{[\sigma]}{n}, \quad (2.20)$$

де σ_1 , σ_2 та σ_3 - головні напруження;

$[\sigma]$ - допустиме напруження плинності металу стінки трубопроводу;

n - коефіцієнт запасу міцності.

Як відомо у випадку об'ємного напруженого стану на гранях елементарного паралелепіпеда виділеного в околі деякої точки і орієнтованого довільним чином в загальному випадку тензор напружень матиме вигляд [41]:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}, \quad (2.21)$$

а у розглядуваній моделі, згідно рис. 2.2 тензор напружень буде мати вигляд:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ 0 & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}. \quad (2.22)$$

Використовуючи методику визначення головних напружень σ_1 , σ_2 та σ_3 [40], визначник системи рівнянь рівноваги дії спроектованих всіх сил на осі X , Y , Z повинен бути рівний 0, тобто:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma & \tau_{yz} \\ 0 & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma \end{vmatrix} = 0. \quad (2.23)$$

Визначивши визначник (2.23), розв'язок зводиться до знаходження коренів кубічного рівняння такого виду:

$$\sigma^3 - I_1\sigma^2 + I_2\sigma - I_3 = 0, \quad (2.24)$$

де $I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$;

$$I_2 = \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{yx}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2;$$

$$I_3 = \sigma_x\sigma_y\sigma_z - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2 + 2\tau_{yx}\tau_{yz}\tau_{xz}.$$

У результаті розв'язку кубічного рівняння (2.24) знайдені корені відповідатимуть значенням трьох головних напружень σ_1 , σ_2 та σ_3 . Дані головні напруження згідно теорії напруженого стану остаточно визначаються у вигляді:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3. \quad (2.25)$$

Корені кубічного рівняння (2.24) σ_1 , σ_2 , та σ_3 враховуючи (2.25) вираховані з допомогою [93] та представлені в додатку Б.

2.2.2 Оцінка величини переміщень ремонтних ділянок магістральних трубопроводів

У процесі експлуатації та згодом і при виконанні ремонтних робіт на ділянках трубопроводів метал труб сприймає дію кільцевих та поздовжніх напружень розтягу та стиску, які виникають внаслідок дії тиску продукту транспортування та впливу на ділянки трубопроводів додаткових зовнішніх навантажень.

Напруження, які виникають при цьому, сумуються з залишковими зварювальними напруженнями в зоні зварного з'єднання та можуть досягнути високих значень, викликати деформацію трубопроводу і навіть його руйнування.

Найбільш ймовірними ділянками виявлення напружено-деформованого стану через сезонні температурні деформації (аж до випучування труб) є:

- надземні ділянки магістральних газопроводів з Г-подібними компенсаторами;
- повітряні переходи (в районі опор);
- круті повороти вісі трубопроводу, в тому числі при його пересіченні з іншими трубопроводами (особливо там, де кут повороту менше 90°);
- вузли підключення відводів та ін.

Від дії зовнішнього навантаження P в поперечних перерізах ремонтної ділянки трубопроводу, що показана на рис. 2.2, виникає деформація згину та кручення, внаслідок яких відбувається зміщення розглядуваних ділянок трубопроводу.

Загальне переміщення ремонтної ділянки трубопроводу в напрямку дії сили P згідно [43] дорівнює:

$$\Delta = \frac{1}{E \cdot I} \left[\int_0^\alpha M_{z2} \cdot b ds + 1,3 \cdot \int_0^\alpha M_{кр} \cdot a ds \right] =$$

$$= \frac{P \cdot R^3}{E \cdot I} \int_0^\alpha [\sin^2 \varphi + 1,3 \cdot (1 - \cos \varphi)^2] \cdot d\varphi \quad , \quad (2.27)$$

де E - модуль пружності;

I - осьовий момент інерції.

Для визначення величини прогину зобразимо ремонтну ділянку трубопроводу BC у площині ZY , так як показано на рис. 2.9.

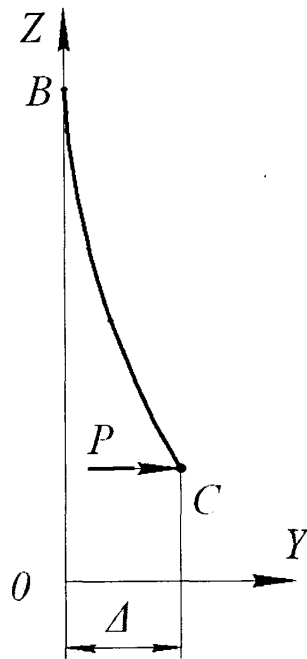


Рис. 2.9. Зображення ремонтної ділянки трубопроводу в площині ZY

Після інтегрування (2.27) в межах від 0 до $\varphi = \alpha$ отримаємо:

$$\Delta = \frac{P \cdot R^3}{E \cdot I} (2,45\alpha + 0,15 \sin \alpha \cos \alpha - 2,6 \sin \alpha). \quad (2.28)$$

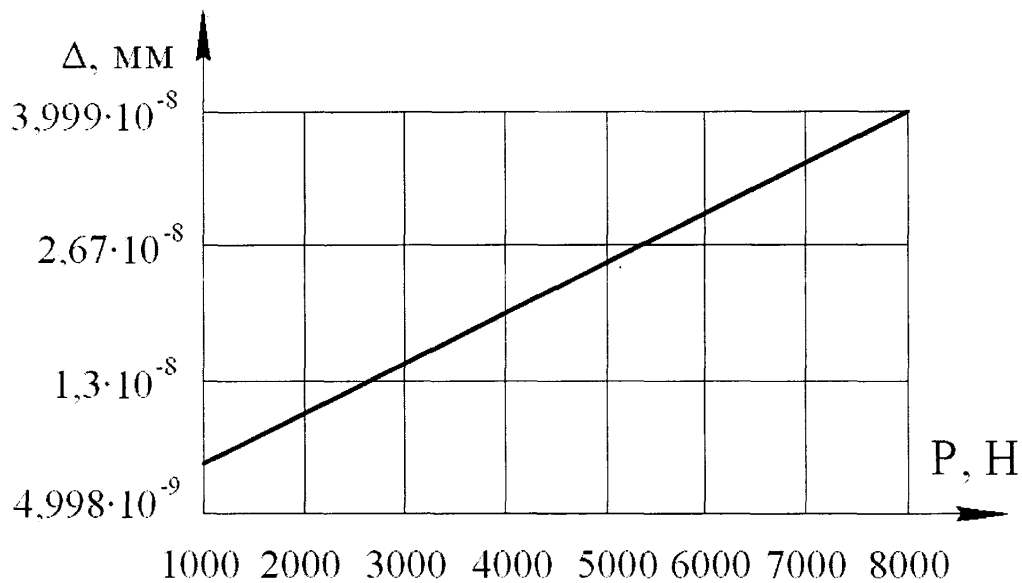


Рис. 2.10. Залежність переміщення ремонтної ділянки трубопроводу від дії прикладеного зусилля

Переміщення ремонтної ділянки трубопроводу в напрямку дії сили P , в залежності від діючих нормальних напружень у площині XU , враховуючи формули (2.28), (2.4), (2.12) буде рівним:

$$\Delta = \frac{0,5 \cdot \sigma_x \cdot W_p \cdot R^2 (2,45\alpha + 0,15 \sin \alpha \cos \alpha - 2,6 \sin \alpha)}{E \cdot I \sin \varphi \cos(\alpha - \varphi)}. \quad (2.29)$$

Переміщення ремонтної ділянки трубопроводу в напрямку дії сили P , в залежності від діючих нормальних напружень у площині YZ , враховуючи формули (2.28), (2.6), (2.13) буде рівним:

$$\Delta = \frac{0,5 \cdot \sigma_z \cdot W_p \cdot R^2 (2,45\alpha + 0,15 \sin \alpha \cos \alpha - 2,6 \sin \alpha)}{E \cdot I \cdot \sin \varphi \sin(\alpha - \varphi)}. \quad (2.30)$$

Переміщення ремонтної ділянки трубопроводу, в залежності від діючих дотичних напружень у площині XU , враховуючи формули (2.28), (2.5), (2.16) буде рівним:

$$\Delta = \frac{\tau_{xy} \cdot W_p \cdot R^2 (2,45\alpha + 0,15 \sin \alpha \cos \alpha - 2,6 \sin \alpha)}{E \cdot I (1 - \cos \varphi) \sin(\alpha - \varphi)}. \quad (2.31)$$

Переміщення ремонтної ділянки трубопроводу, в залежності від діючих дотичних напружень у площині YZ , враховуючи формули (2.28), (2.7), (2.17) буде рівним:

$$\Delta = \frac{\tau_{yz} \cdot W_p \cdot R^2 (2,45\alpha + 0,15 \sin \alpha \cos \alpha - 2,6 \sin \alpha)}{E \cdot I (1 - \cos \varphi) \cos(\alpha - \varphi)}. \quad (2.32)$$

2.3 Розробка методики контролю напружено-деформованого стану трубопроводу на ремонтних ділянках

2.3.1 Обґрунтування вибору типу пружних хвиль

Вибір типу ультразвукових хвиль визначається характером та місцем виникнення напружено-деформованого стану трубопроводів та їх габаритами. В ультразвуковому контролі на даний час широко застосовують об'ємні хвилі, хвилі поверхні розділу та поверхнево-поздовжні хвилі. Однак, необхідно враховувати, що створити в об'єкті контролю направлений пучок тільки одного виду хвилі не можна. Поряд з вибраними хвилями, які поширюються в вибраному напрямі в об'єкті контролю завжди будуть виникати інші види хвиль, які поширюються в тому ж або інших напрямках, внаслідок відбивання та розкладання хвиль на границі вводу ультразвукових коливань та границях об'єкта контролю. Тому під конкретним вибраним видом хвиль треба розуміти комбінацію хвиль, які поширюються в заданому напрямку, в якому переважають або поздовжні, або поперечні, або інші види хвиль.

Ультразвуковий метод неруйнівного контролю базується на збудженні та реєстрації в об'єкті контролю високочастотних механічних коливань. Нижня межа звукових коливань знаходиться на верхній границі зони чутливості, тобто при частоті рівній 20 кГц; в якості верхньої межі приймають 100 МГц. Для більшості ультразвукових методів контролю металів використовують частоти в межах 0,5 - 10 МГц, що пояснюється підготовкою чистоти досліджуваної поверхні і загасанням ультразвукових коливань при високих частотах.

Поширення ультразвукових хвиль описується законами геометричної (променевої) акустики. У геометричній акустиці розглядаються закони поширення ультразвуку в однорідних пружних середовищах на основі уявлень про ультразвук, як про сукупність ультразвукових променів – ліній, вздовж яких поширюється звукова енергія.

Серед об'ємних хвиль виділяють поздовжні та поперечні хвилі. Коливання елементарних частинок у поздовжніх хвилях проходить у поздовжньому напрямі, тобто в напрямку поширення.

Закон руху частинок поздовжньої хвилі в часі u_i в площині можна описати функцією синуса:

$$u_i = A_u \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (2.33)$$

де φ_0 - початкове зміщення по фазі;

t - час;

A_u - амплітуда коливань;

ω - кутова частота.

Вираз (2.33) можна представити у комплексній формі, згідно формули Ейлера, для проведення математичних розрахунків:

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi, \quad (2.34)$$

де φ - зміна фази коливань;

i - уявне число, $i = \sqrt{-1}$.

Отже, рівняння (2.33) можна представити таким чином:

$$u_i = A_u e^{i(\omega t + \varphi_1)} = A_u \cos(\omega t + \varphi_1) = A_u \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (2.35)$$

де $\varphi_1 = \varphi_0 - \frac{\pi}{2}$.

У поперечних хвилях коливання частинок направлено перпендикулярно до напрямку поширення хвилі. Поперечні хвилі можуть мати як вертикальний, так і горизонтальний напрямок поляризації. Для запису поперечних коливань потрібно

розглянути рух елементарних частинок у двох взаємноперпендикулярних напрямках, наприклад x та y :

$$\begin{aligned} u_x &= A_{ux} \sin(\omega t + \varphi_1); \\ u_y &= A_{uy} \sin(\omega t + \varphi_2), \end{aligned} \quad (2.36)$$

де A_{ux} , A_{uy} - амплітуди коливань у напрямках позначених другим індексом;

φ_1 , φ_2 - початкові фази двох коливань.

У будь-якій площині, що перпендикулярна напрямку поширення поперечних коливань, можна знайти траєкторію результуючого руху:

$$\frac{x^2}{A_{ux}^2} + \frac{y^2}{A_{uy}^2} - \frac{2xy}{A_{ux}A_{uy}} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (2.37)$$

де x , y - Декартові координати.

Траєкторія руху має форму еліпса, будь-яка точка, що належить цьому еліпсу, описує його за час, який дорівнює періоду T :

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (2.38)$$

Тому поперечні коливання називають поляризованими у площині, що перпендикулярна напрямку поширення x .

Хвилі поверхні розділу поширюються вздовж поверхні розділу двох середовищ.

Аналіз літературних джерел [28] показав, що сталі з яких виготовляються трубопроводи виробляються кількома різними фірмами протягом десятків років, зокрема труби з сталі марки Х60. При цьому було встановлено зміну хімічного складу сталі за рахунок зміни способів її виплавки та виготовлення труб (додаток

Ж, табл. Ж.4), що привело до зміни властивостей даної сталі навіть в межах виробництва на одному заводі. При дослідженнях труб виготовлених з сталі марки Х60 з резервного запасу поздовжніми та поперечними ультразвуковими хвилями виявлено, що поперечні хвилі змінюють свою швидкість поширення в залежності від вибраних труб. Це дало можливість зробити висновок про меншу ефективність використання поперечних ультразвукових хвиль в порівнянні з поздовжніми при проведенні натурних вимірювань. Тому використання методики контролю технічного стану металу з застосуванням досліджень на лабораторних зразках приводить до збільшення похибки. Використання поздовжніх хвиль дає змогу отримати підвищену чутливість пристрою за рахунок зменшення величини шумів та підвищення коефіцієнта підсилення за допомогою встановлення блоку підсилення безпосередньо на системі первинних давачів.

Порівняно із застосуванням ультразвукових поперечних хвиль, поздовжні мають такі переваги:

- для їх збудження не потрібно застосовувати в якості контактної рідини спеціальні пасти;
- значно менші вимоги, щодо шорсткості поверхні трубопроводу;
- менш трудомістка методика проведення контролю.

Після вибору типу ультразвукових хвиль призначених для контролю необхідно намітити напрям прозвучування поверхні ділянки трубопроводу. Напрямок прозвучування повинен бути вибраний таким, щоб забезпечувались оптимальні умови відбивання хвиль від границі розділу двох середовищ з різною густиною.

2.3.2 Поширення ультразвукових хвиль у тілі циліндричної труби

З механіки твердих тіл та теорії пружності [39] відомо, що нормальне прикладання сили до поверхні середовища викликає в ній не тільки деформації стиску, які поширюються в глибину середовища в напрямку дії сили, але і деформації розтягу на поверхні, які направлені перпендикулярно діючій силі.

Частинки поверхневого шару при цьому переміщуються в напрямку дії сили, передаючи енергію від однієї частинки до іншої, і в середовищі виникає рух частинок у напрямі дії сили. Разом із тим за рахунок сил пружності в поверхневому шарі спостерігається поперечний рух частинок у напрямі, перпендикулярному дії сили (перпендикулярно напрямку поширення поздовжньої хвилі). У наступний момент (момент, коли сила не діє) під дією цих же пружних сил частинки середовища повертаються на своє початкове місце. У результаті середовище приходить в коливальний рух, при якому поздовжні хвилі поширюються в глибину середовища, а на поверхні у всі сторони від випромінювача – поперечні і поверхневі, які затухають з глибиною хвилі.

У твердих тілах акустичне поле характеризується не тільки пружністю об'єму, але і пружністю форми, тобто носить складний характер. Це пов'язано як з нелінійними пружними властивостями матеріалів, так і з характером взаємодії «трубопровід-перетворювач».

Нелінійні пружні властивості трубних сталей виникають як від макроскопічних, так і від мікроскопічних дефектів [44, 45]. Відомо, що макроскопічні нелінійні дефекти впливають на зміну швидкості поширення коливань у попередньо деформованих тілах [46, 47].

Нелінійна пружність металів полягає в перетворенні та передачі енергії від одного коливання до другого, внаслідок перетворення частоти цих коливань в комбінаційну частоту [48, 49]. Такі перетворення коливань у коливання іншої частоти можливі не тільки із-за нелінійної пружності металу, але і із-за неоднорідності структури (дислокації, мікротріщини, точкових дефектів, залишкових напружень). На поширення хвиль у тілі труби впливає геометрична і фізична нелінійність. Геометрична нелінійність проявляється в тому, що тензор деформацій нелінійно виражається через похідні компонент вектора переміщень по координатах [50]. Фізична нелінійність проявляється із-за нелінійної залежності тензора напружень з компонентами тензора деформацій.

2.4 Аналіз та обґрунтування вибору частоти ультразвукових хвиль

При проведенні ультразвукового контролю напружено-деформованого стану металу ділянок трубопроводу, для отримання необхідної чутливості, необхідно зробити правильний вибір частоти коливань. Довжина пружних хвиль в об'єкті контролю зменшується при збільшенні частоти коливань, при цьому досягаються кращі умови залежності величини деформації кристалічної решітки від швидкості поширення ультразвукової хвилі. Разом з тим при збільшенні частоти коливань ультразвукових хвиль збільшується направленість випромінювання та приймання, внаслідок чого зростає відношення прийнятої енергії від загальної енергії, яка була випромінена у об'єкт контролю. Все це також сприяє підвищенню чутливості проведеного контролю.

Однак збільшення частоти коливань до безмежності неможливе, оскільки при цьому спостерігаються небажані явища. Зокрема, із збільшенням частоти коливань підвищується коефіцієнт затухання ультразвуку в об'єкті контролю, збільшується інтенсивність приймання хвиль залежності деформації кристалічної ґратки від швидкості поширення ультразвукових хвиль, а також інтенсивність відбивання від границь зерен та неоднорідностей металу, які не є дефектами.

Основними визначальними характеристиками при виборі частоти коливань пружної хвилі при проведенні ультразвукового контролю є:

- коефіцієнт загасання;
- рівень структурної реверберації матеріалу (розсіювання ультразвуку на структурних неоднорідностях і зернах металу);
- габарити об'єкта контролю.

Отже, знаючи дані характеристики, можна вибрати оптимальну частоту, яка забезпечить найбільшу чутливість контролю, при цьому забезпечивши найменшу втрату ультразвукової енергії на розсіювання та вбирання її зернами металу.

Коефіцієнт загасання може значно відрізнятися не тільки для різних матеріалів однієї групи, але навіть для одного сплаву в різних станах механічної або термічної обробки, а також у різних перерізах одного об'єкта. Внаслідок

цього коефіцієнт загасання необхідно визначати безпосередньо на контрольованому об'єкті в даному перерізі. Визначення коефіцієнта загасання можна проводити імпульсними ультразвуковими дефектоскопами з вмонтованими атенюаторами (каліброваними дільниками напруг).

При вимірюванні загасання в твердих тілах у дослідний зразок вводяться ультразвукові коливання і спостерігаються зміни амплітуди донного сигналу при багаторазовому відбиванні. Луно-сигнали на екрані дефектоскопа розміщуються в порядку спадання їх амплітуд, вимірювання яких проводиться атенюатором. Коефіцієнт загасання визначається за формулою [51]:

$$\delta = \frac{1}{2l} \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}, \quad (2.39)$$

де l - довжина взірця, який піддається прозвучуванню;

A_n, A_{n+1} - амплітуди двох послідовних сигналів.

Виходячи із величини коефіцієнта загасання в трубних сталях найбільш оптимальною частотою поширення ультразвукових коливань, вибираємо 5 МГц.

2.5 Розробка математичної моделі для проведення контролю напружено-деформованого стану металу стінки трубопроводу

Деформація трубопроводу, яка виникає внаслідок впливу зовнішніх або внутрішніх зусиль чи будь-яких факторів впливу, пов'язана з встановленням залежностей між розміщенням кожного елементарного об'єму суцільного середовища в деформованому та в початковому станах. Опишемо математичну модель визначення складових напружень у стінці металу трубопроводу. Дана математична модель дасть можливість характеризувати вплив виду зусиль при використанні ультразвукової хвилі, що поширюється в напружено-деформованому середовищі.

Коливання елементарних частинок середовища, які виникли внаслідок поширення даної хвилі, мають дуже малу величину і не створюють вплив на деформацію середовища в цілому. Середовище поширення ультразвукових хвиль матиме такі стани:

- початковий або недеформований;
- деформований, після прикладання до нього деяких зусиль;
- дійсний, при накладанні поширення пружних коливань у вигляді суперпозиції ультразвукових хвиль на напружено-деформований стан середовища.

Деформація, яка виникає внаслідок впливу зовнішніх або внутрішніх навантажень, пов'язана з встановленням залежностей між розміщенням кожної елементарної частинки суцільного середовища в дійсному та в недеформованому станах. Якщо початкові відносні положення елементарних частинок мало впливають або зовсім не впливають на внутрішні зусилля всередині тіла, які виникають в подальшому, то зручно використовувати дійсні координати для кожної елементарної частинки. Якщо початкові відносні положення елементарних частинок впливають на внутрішні зусилля всюди в тілі в більш пізні проміжки часу, то зручно використовувати початкові координати кожної елементарної частинки. Дані два підходи називаються відповідно ейлеревим та лагранжовим. Пружні середовища відносимо до останньої категорії, тому що додаткові зусилля, які виникають між будь-якими елементарними частинками, залежать від різниці між їх початковою та дійсною відносною віддаллю.

Дана математична модель, полягає у визначенні окремих компонентів тензора напружень, що дає можливість визначити вид, місце та напрям дії зусиль, які діють на ділянку трубопроводу як по околу труби, так і вздовж її вісі, що створюють додатковий напружено-деформований стан на ремонтних ділянках трубопроводів. Визначивши ці вихідні дані, можна характеризувати причини зміни напружено-деформованого стану.

Основне допущення механіки суцільного середовища в тому, що мінімальний із розглядуваних елементів володіє тими ж властивостями, що і тіло, яке складається з великої кількості таких елементів [76].

Характер поширення пружних хвиль у твердих тілах визначається пружними властивостями цих тіл. Відомо, що тверді тіла змінюють свої розміри та форму під дією прикладених зусиль. При цьому можливе виникнення різних деформацій: стиску, розтягу, зсуву, згину, кручення та інші. Однак у теорії пружності доказано, що всі види деформацій можуть бути зведені лиш до двох – до розтягу (стиску) та зсуву [52, 53]. Узагальнений Закон Гука в теорії пружності має вигляд:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu \cdot (\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu \cdot (\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu \cdot (\sigma_x + \sigma_y)] \end{cases} \quad (2.40)$$

де σ_x , σ_y , σ_z - нормальні напруження, які діють по боковим граням елементарного паралелепіпеда;

ε_x , ε_y , ε_z - відносні деформації його ребер.

Напруження може діяти на елемент поверхні (одичну площадку) всередині твердого тіла, в загальному не по нормалі до цієї поверхні, а має складові, як по нормалі до площадки, так і по дотичній до неї. В декартових координатах X , Y , Z , якщо розглянути напруження, які діють на три площини перпендикулярно до цих осей, які проходять через елементарний об'єм, що розглядається на рис. 2.11, отримаємо дев'ять компонент напружень.

Дані дев'ять компонент напружень складають собою тензор напружень. Перший індекс визначає напрям прикладеного напруження, другий – площину, яка перпендикулярна тій, на яку воно діє.

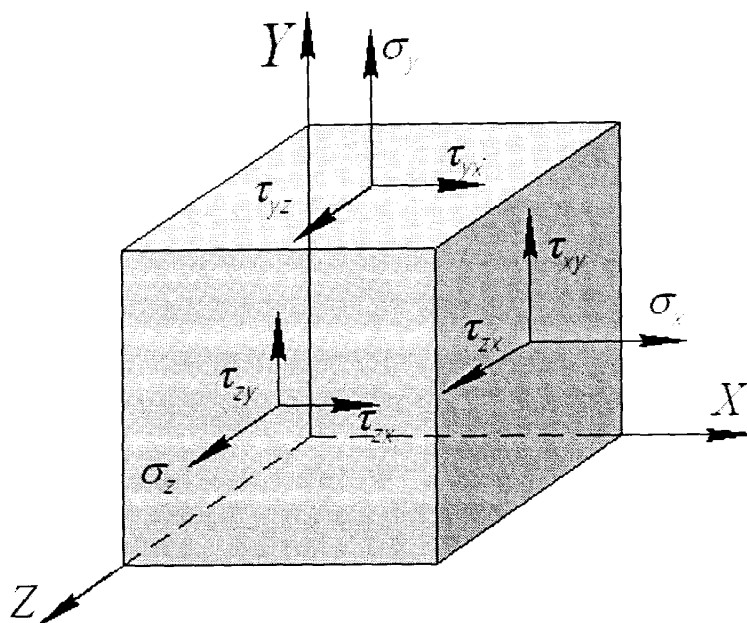


Рис. 2.11. Напруження, які діють в елементарному об'ємі

Розглядаючи елементарний об'єм середовища з гранями, перпендикулярними осям X , Y , Z , можна переконатись, що для рівноваги необхідно, щоб задовольнялись рівності [38]:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xy} &= \sigma_{yx}; \\
 \sigma_{xz} &= \sigma_{zx}; \\
 \sigma_{yz} &= \sigma_{zy}.
 \end{aligned}
 \tag{2.41}$$

Таким чином, незалежними залишаються тільки шість компонент тензора напружень. Через ці шість компонент можна виразити напруження, яке діє на будь-який елемент поверхні, тобто повністю визначити напружений стан в будь-якій точці твердого тіла.

Деформації, які виникають під дією напружень, утворюють тензор деформації. Коли тіло деформується, відстань між його точками змінюється. Відстань між двома близькими точками і її зміна в процесі деформування служить характеристикою деформованого стану.

Так, як при рівновазі, внутрішні сили, які діють на кожен елемент об'єму твердого тіла, повинні бути рівними нулю, то рівняння рівноваги деформованого тіла можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = 0, \quad (2.42)$$

де i, k - осі Декартових координат X, Y, Z .

Якщо поверхня вільна, тобто якщо зовнішня сила, яка діє на одиницю поверхні, рівна нулю, то

$$\sigma_{ik} \cdot n_k = 0, \quad (2.43)$$

де n_k - зовнішня нормаль до поверхні.

Дане рівняння являє собою граничні умови на вільній поверхні. Якщо до твердого тіла прикладені об'ємні сили F , то граничні умови на поверхні будуть мати вигляд:

$$\sigma_{ik} \cdot n_k = F_i. \quad (2.44)$$

Зміна напружень у просторі викликає прискорення елемента об'єму (частинки) твердого тіла, таким чином для виведення рівняння руху елементарних частинок твердого тіла з врахуванням, що умови рівноваги вже не виконуються, необхідно в рівнянні рівноваги (2.42) праву частину прирівняти до $\rho \frac{\partial^2 a}{\partial t^2}$, тобто до добутку маси одиниці об'єму тіла на похідну від прискорення за часом:

$$\rho \frac{\partial^2 a}{\partial t^2} = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}. \quad (2.45)$$

Отже, при наявності зовнішніх об'ємних сил, рівняння руху пружного середовища буде мати вигляд [55]:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} + \rho F. \quad (2.46)$$

При деформації металу стінки трубопроводу відстань між його точками змінюється. Позначимо початкові координати будь-якого елементарного об'єму твердого тіла M^{noch} через x_i та відповідно його координати в дійсному стані M^{def} через x_i^* , де $i = 1, 2, 3$. В якості початкових координат приймаємо просторові координати точки в деякий момент часу $t = t_0$, тобто $x_i = x_i^*|_{t=t_0}$. Тоді рівняння руху матеріальних точок тіла в просторі буде мати вигляд:

$$x_i^* = x_i^*(x_i; t), \quad (2.47)$$

де $i = 1, 2, 3$.

Диференціювання виразу (2.47) по координатам x_i приводять до зв'язку між диференціалами дійсних та початкових координат

$$dx_i^* = \frac{\partial x_i^*}{\partial x_i} dx_i, \quad (2.48)$$

Згідно зображення руху матеріальної точки M на рис. 2.12 показано R та R^* - відповідно радіуси-вектори матеріальної точки M^{noch} , що рухається в початковий момент часу та M^{def} у дійсний момент часу.

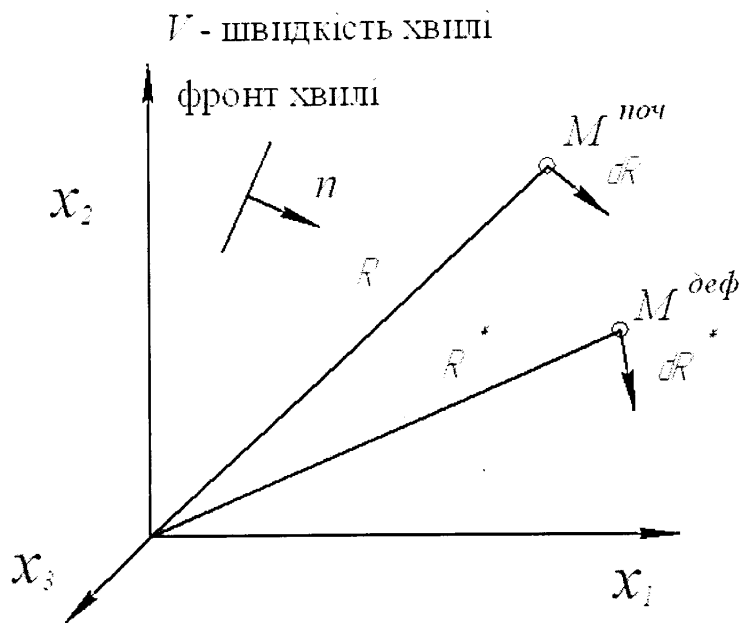


Рис. 2.12. Схема поширення ультразвукової хвилі в деформованому середовищі

Тоді dR та dR^* - вектори, які визначають положення довільної точки елементарного об'єму твердого тіла відносно його центру в початковий та дійсний момент часу.

З іншої сторони рівняння (2.48) за допомогою залежностей виведених у [53] можна представити в наступному виді:

$$dR^* = F \cdot dR, \quad (2.49)$$

де F - градієнт руху.

Отже, можна зробити висновок, що градієнт руху F визначає локальний рух (відносно свого центру) точок матеріальної частинки.

Градієнт руху F може бути полярно розкладеним так [54]:

$$F_{ij} = R_{ik} \cdot U_{kj}, \quad (2.50)$$

де R_{ik} - ортогональний тензор, що описує поворот точки;

U_{kj} - тензор кратних видовжень;

$i, j, k - 1, 2, 3$.

З виразу (2.50) видно, що тензор U_{kj} визначає зміну віддалі між точками матеріальної частинки, тобто деформацію. Таким чином, головні значення тензора U_{kj} є кратними для видовжень матеріальних волокон, які співпадають з головними напрямками тензора [55].

Якобіан J матиме вигляд:

$$J = \det F_{ij} > 0 \quad (2.51)$$

Згідно [54] та враховуючи (2.50) та (2.51) тензор деформацій середовища Лагранжа можна записати в наступному виді:

$$2E_{ij} = \left(\frac{\partial x_i^*}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial x_i^*}{\partial x_j} - \delta_{ij} \right), \quad (2.52)$$

де δ_{ij} - символ Кронекера.

Оскільки густина елемента визначається, як відношення елементарної маси до його об'єму, та при деформації маса залишається постійною, тому густина є обернено пропорційна об'єму елемента:

$$\frac{\rho_0}{\rho} = J \left(\frac{x^*}{x} \right), \quad (2.53)$$

де ρ - дійсна густина;

ρ_0 - початкова густина;

J - Якобіан $J(x_1^* x_2^* x_3^* / x_1 x_2 x_3)$.

Враховуючи рівняння (2.46) та (2.53) задача полягає в знаходженні такого симетричного тензора напружень другого порядку σ_{ij} при якому зусилля, яке діє на елемент площі dS , нормаль до якої має направляючі косинуси n_i визначається так:

$$P_i = \sigma_{ij} n_j dS . \quad (2.54)$$

Виразимо зусилля P_i через координати в початковому стані, використовуючи тензор Піюли-Кірхгофа S_{ij} [53]:

$$S_{ij} = J \left(\frac{x_i^*}{x_i} \right) \frac{\partial x_i}{\partial x_i^*} \sigma_{ij} = \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial x_i}{\partial x_i^*} \sigma_{ij} . \quad (2.55)$$

Отримаємо тензор напружень Коші:

$$\sigma_{ij} = \frac{\rho}{\rho_0} x_{i,j}^* S_{ij} . \quad (2.56)$$

Відобразимо координати точки M^{def} у деформованому середовищі до координат x_i^* накладаючи нескінченно малі переміщення U_i ультразвукового хвильового руху на кінцеві деформації тіла, враховуючи час, як:

$$x_i^{xs} = x_i^* + U(x_j, t) , \quad (2.57)$$

де x_i^{xs} - координати точки M^{def} у деформованому середовищі при поширенні через нього пружної хвилі;

$U(x_j, t)$ - рівняння коливань елементарного об'єму пружного середовища, які викликані поширенням ультразвукової хвилі;
 t - час.

Гradient деформації, враховуючи збурення пружної хвилі, матиме вигляд:

$$F_{ij}^{xs} = F_{ij} \left(\delta_{ij} + \frac{\partial U_{ij}}{\partial x_i} \right). \quad (2.58)$$

Аналогічно враховуючи рівняння (2.58), знайшовши тензор деформацій Лагранжа [56] в кінцевому результаті тензор напружень Коші можна записати в наступному виді:

$$\sigma_{ij}^{xs} = \sigma_{ij} \left(1 - \frac{\partial U_{mn}}{\partial x_m} \right) + \sigma_{il} \frac{\partial U_{jl}}{\partial x_l} + \sigma_{kj} \frac{\partial U_{ik}}{\partial x_k} + K_{ijkl} \frac{\partial U_{kl}}{\partial x_l}, \quad (2.59)$$

де K_{ijkl} - тензор коефіцієнтів пружної деформації четвертого порядку.

Для спрощення вирішення поставленої задачі вважаємо, що деформоване середовище знаходиться в стані рівноваги, тому:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0. \quad (2.60)$$

Враховуючи рівняння (2.46) та (2.59), яке було лінеаризоване по U_i , рівняння руху в дійсному стані буде мати наступний вигляд [56]:

$$\frac{\partial \left[(K_{ijkl} + \sigma_{ij} \delta_{jk}) \frac{\partial U_{kl}}{\partial x_l} \right]}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial U_i}{\partial t^2}. \quad (2.61)$$

Вважаємо, що ультразвукові коливання поширюються за гармонійним законом:

$$U_i = A_i \exp(jk(n_m x_m - vt)) , \quad (2.62)$$

де A_i - амплітуда хвилі;

k - хвильове число;

v - швидкість поширення ультразвукової хвилі;

n_m - вектор напрямку поширення хвилі;

$$j = \sqrt{-1} .$$

Отже, за допомогою підстановки рівняння (2.62) в (2.61) рівняння руху пружного середовища прийме такий вид:

$$[K_{ijkl} n_i n_l + (\sigma_{il} n_i n_l - \rho v^2) \delta_{ij}] U_i = 0 . \quad (2.63)$$

Для розв'язку рівняння (2.63) необхідно визначити вектор напрямку поширення пружної хвилі n та тензор коефіцієнтів пружної деформації четвертого порядку K_{ijkl} , які присутні в функції потенціальної енергії деформації. Рівняння (2.63) допускає не тривіальний розв'язок для власних векторів U_i , тільки тоді, коли визначник члена в квадратних дужках перетворюється в нуль. Таким чином, власні значення $\rho v^2 - \sigma_{il} n_i n_l$ та власні вектори є вектори зміщення матеріальної точки U_i . Враховуючи це, густина потенціальної енергії деформації Φ може бути виражена так [56]:

$$\rho_0 \Phi = \frac{1}{2} C_{ABCD} E_{AB} E_{CD} + \frac{1}{6} C_{ABCDMN} E_{AB} E_{CD} E_{MN} , \quad (2.64)$$

де C_{ABCD} - тензор компонент пружних констант другого порядку;

C_{ABCDMN} - тензор компонент пружних констант третього порядку.

Лінеаризувавши рівняння (2.59) по U_i , шляхом використання функції енергії деформації виражену в рядах Тейлора [57], двічі відносно параметра, який описує деформацію, можна помітити, що тензор коефіцієнтів пружної деформації четвертого порядку K_{ijkl} перебуває в лінійній залежності від параметрів, які описують деформацію. Також K_{ijkl} та тензор напружень σ_{ij} з'являються в рівнянні власних значень матриці рівняння (2.63). Після виконання всіх вище згаданих дій отримаємо:

$$\sigma_{ij} = \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial x_i^*}{\partial x_i} \frac{\partial x_i^*}{\partial x_j} C_{ABCD} E_{CD} . \quad (2.65)$$

Рівняння (2.63) – (2.65) є достатніми для опису поширення пружної хвилі.

Розглянемо на рис. 2.13 поширення поздовжньої ультразвукової хвилі в пластині в напрямку вісі x_3 . Вектор напрямку поширення n поздовжньої хвилі буде мати такі компоненти $\{0, 0, 1\}$. Нехай до середовища прикладене зусилля, що співвісне з однією з осей. В такому середовищі відсутні зсувні деформації $E_{13} = E_{23} = 0$. компоненти тензора коефіцієнтів пружних деформацій K_{ijkl} , що не матимуть індексу 3 дорівнюватимуть 0, оскільки вони створені поширенням поздовжньої хвилі, яка створює тільки деформацію чистого розтягу чи стиску у напрямку вісі x_3 .

З рівняння (2.63) рівняння руху елементарного об'єму буде мати наступний вигляд:

$$\rho v^2 = \sigma_{33} + K_{3333} . \quad (2.66)$$

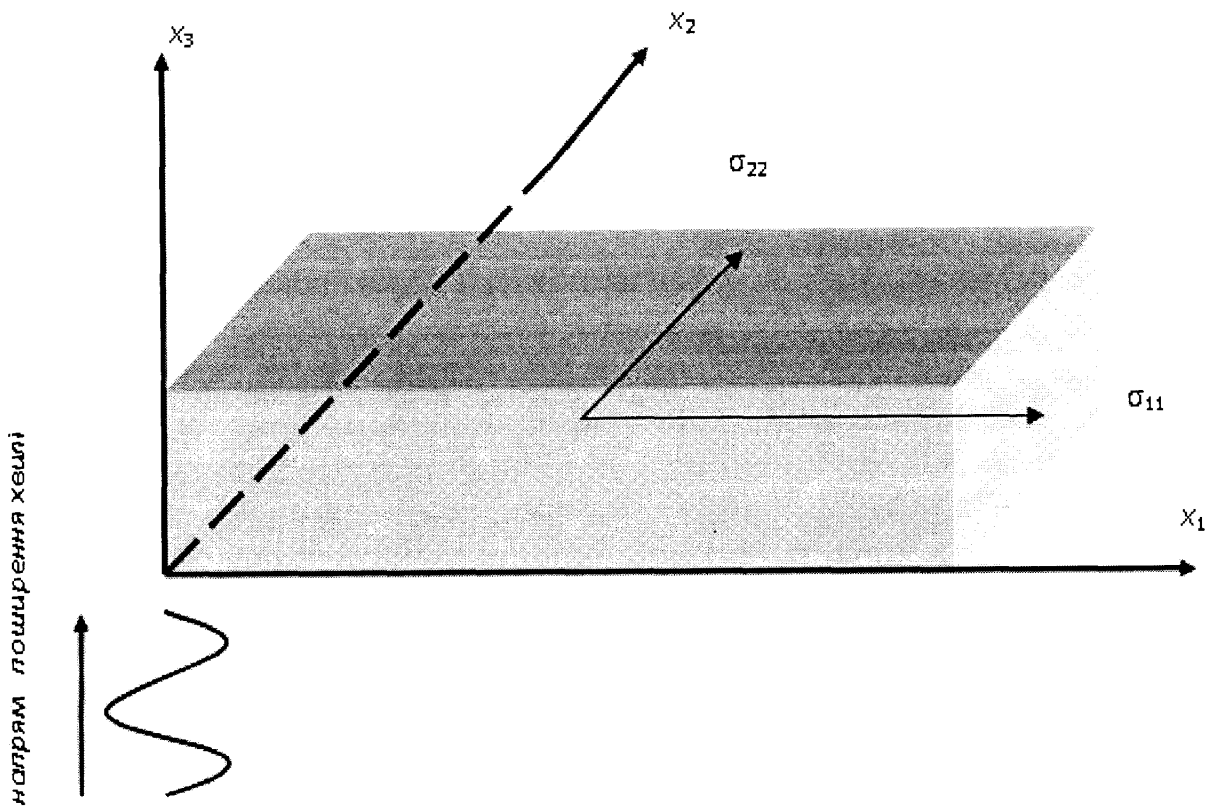


Рис. 2.13. Поширення поздовжньої ультразвукової хвилі в пластині

Доказано, що при $j=1$ і $j=2$, $K_{3133} = K_{3233} = 0$ [53], тоді як K_{3333} можна визначити з [56], та в кінцевому результаті отримаємо рівняння:

$$\rho_0 v^2 = \frac{\rho_0}{\rho} \sigma_{33} + C_{33}(1 + 4E_{33}) + C_{331}E_{11} + C_{332}E_{22} + C_{333}E_{33}. \quad (2.67)$$

Оскільки площина напружень співпадає з площиною X_1X_2 , то компоненти напружень $\sigma_{33} = 0$. Рівняння (2.67) повністю описує залежність швидкості поширення поздовжньої ультразвукової хвилі від деформацій середовища. Для отримання схожого виразу в параметрах напруження інвертуємо закон "напруження-деформація" $\sigma_{ij} = C_{ijkl}E_{kl}$ через тензор компонент податливості, а саме $\sigma_{ij}S_{ijkl} = E_{kl}$ [57]. Враховуючи даний вираз (2.67), представимо наступним чином:

$$\rho_0 v^2 = C_{33}(1 + 4(S_{31}\sigma_{11} + S_{32}\sigma_{22})) + C_{331}(S_{11}\sigma_{11} + S_{12}\sigma_{22}) + C_{332}(S_{21}\sigma_{11} + S_{22}\sigma_{22}) + C_{333}(S_{31}\sigma_{11} + S_{32}\sigma_{22}) . \quad (2.68)$$

Спростивши рівняння (2.68), отримаємо:

$$\rho_0 v^2 = C_{33} + A_1\sigma_{11} + A_2\sigma_{22} , \quad (2.69)$$

де A_1 та A_2 – складні функції від пружних констант другого та третього порядків.

Рівняння (2.69) визначає швидкість поширення поздовжньої ультразвукової хвилі, яка поширюється в напрямку вісі x_3 (рис. 2.13) пружного середовища, при умові існування плоского напруженого стану в площині X_1X_2 . Також рівняння (2.69) виражає абсолютну швидкість поздовжньої ультразвукової хвилі, як функцію від напружень, якщо відомі пружні константи другого та третього порядків. Співвідношення акустопружності зручно виражати у вигляді відносної зміни швидкості поширення поздовжньої ультразвукової хвилі, як функцію від напружень. Це пов'язано з тим, що простіше виміряти зміну в швидкості, ніж абсолютну величину швидкості поширення ультразвукової хвилі.

При відсутності напружень у середовищі поширення поздовжньої ультразвукової хвилі з рівняння (2.69) отримаємо:

$$\rho_0 v^2 = C_{33} . \quad (2.70)$$

Різниця швидкостей поширення поздовжньої ультразвукової хвилі у середовищі із присутніми напруженнями та без них, враховуючи (2.69) та (2.70) буде такою:

$$\frac{v - v_0}{v_0} = A_1\sigma_{11} + A_2\sigma_{22} , \quad (2.71)$$

де v - швидкість поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в напружено-деформованому середовищі;

v_0 - швидкість поширення ультразвукової хвилі в середовищі без прикладених зовнішніх зусиль;

A_1 та A_2 – акустопружні константи, які є складними функціями від пружних констант другого та третього порядків.

Особливістю акустопружних констант є те, що їх можна визначити експериментально з результатів одноосних випробувань на розтяг за допомогою розривної машини.

Іншою формою рівняння (2.71) є представлення відносної зміни швидкості поширення поздовжньої ультразвукової хвилі, як суми та різниці головних напружень, а саме:

$$\frac{v - v_0}{v_0} = A(\sigma_{11} + \sigma_{22}) + B(\sigma_{11} - \sigma_{22}), \quad (2.72)$$

де $A = \frac{A_1 + A_2}{2}$, $B = \frac{A_1 - A_2}{2}$ - константи акустопружності.

Рівняння (2.69) – (2.72) є достатньою базою для проведення досліджень напружено-деформованого стану за допомогою вимірювання відносної зміни швидкості поширення поздовжньої ультразвукової хвилі.

В результаті проведених розрахунків можна стверджувати, що отримано рівняння акустопружності для проведення контролю напружено-деформованого стану металу стінки трубопроводу наступного виду:

$$\left. \frac{\Delta v_{вим}}{v_0} \right|_{\perp ij} = A_i \sigma_{ii} + A_j \sigma_{jj}, \quad (2.73)$$

де $\Delta v_{вим}$ - виміряна зміна швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в напружено-деформованому середовищі відносно швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в ненапруженому середовищі;

v_0 - швидкість поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в ненапруженому середовищі;

σ_{ii}, σ_{jj} - величини напружень;

A_i, A_j - акустопружні коефіцієнти, які визначаються експериментально для конкретної марки сталі методом одноосних випробувань на розтяг;

i, j - індекси координатних осей X, Y, Z .

Рівняння (2.73) може бути застосоване до визначення акустопружності при одноосному напруженому стані. Для визначення напружень у трьох взаємоперпендикулярних напрямках розглянуто трьохосний напружений стан. Враховано, що осі Декартової системи координат співпадають з головними осями симетрії трубопроводу (рис. 2.14). Використовуючи методи тензорного числення [58] до (2.73) отримано аналітичну залежність, яка пов'язує величину напружень в середовищі поширення ультразвукових поздовжніх хвиль в трьох напрямках із зміною величини їх швидкості:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\Delta v_{вим}}{v_0} \right|_{\perp xz} &= A_x \sigma_{xx} + A_z \sigma_{zz}, \\ \left. \frac{\Delta v_{вим}^*}{v_0^*} \right|_{\angle yx} &= 1,4142 (A_{x_1} \sigma_{xx} + A_{z_1} \sigma_{zz}), \\ \left. \frac{\Delta v_{вим}^*}{v_0^*} \right|_{\angle yz} &= 1,4142 (A_{y_2} \sigma_{yy} + A_{z_2} \sigma_{zz}). \end{aligned} \quad (2.74)$$

де $\Delta v_{вим}$ - виміряна зміна швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в середовищі з прикладеним навантаженням у відповідних напрямках;

v_0^*, v_0 - відповідно швидкість поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в середовищі в ненапруженому стані у відповідних напрямках;

$A_x, A_z, A_{x1}, A_{z1}, A_{y2}, A_{z2}$ – акустопружні коефіцієнти, що визначаються відповідно у нормальній площині XZ до напрямку прикладання зусилля та під кутом α до площин YX та YZ .

При виведенні системи рівнянь враховано, як видно з рис. 2.14, що перше рівняння описує поширення ультразвукової хвилі нормально до площини XZ , два наступні описують поширення хвилі під однаковими кутами до площин YX та YZ , які рівні $\alpha=45^\circ$.

Отже, отримана математична модель визначення компонентів напружень у трьох взаємноперпендикулярних напрямках.

На рис. 2.15 показано визначення акустопружних коефіцієнтів A_i в лабораторних умовах, методом навантаження на розтяг зразків за допомогою розривної машини. При цьому акустопружні коефіцієнти визначаються у нормальній площині до напрямку прикладання зусилля та під кутом α до відповідних площин.

Акустопружні коефіцієнти визначаються за формулою [59]:

$$A_i = \frac{1}{k \cdot v_0} \sum_{k=1}^k \left[\frac{\Delta v_{вим}}{\sigma_{ij}} \right]_k, \quad (2.75)$$

де k - кількість кроків навантажень;

$\Delta v_{вим}$ - виміряна зміна швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в середовищі з прикладеним навантаженням.

При визначенні даних коефіцієнтів орієнтація зразків вибирається згідно рис. 2.14. Для зразків із трубної сталі у випадку 1 визначаються коефіцієнти акустопружності $A_x = A_y$, а у випадку 2 - коефіцієнт акустопружності A_z .

Отже, пропонується метод визначення напружень у трьох взаємноперпендикулярних напрямках, які співпадають з напрямками осей симетрії ділянки трубопроводу за допомогою системи первинних перетворювачів, які схематично зображені в додатку В. Дана система первинних перетворювачів

складається з п'яти п'єзоелектричних перетворювачів, які встановлені в обоймах, що кріпляться до рами під певними кутами. Дві пари п'єзоперетворювачів рухомо встановлені під кутом $18,7^{\circ}$ у взаємоперпендикулярних площинах. У кожній парі один п'єзоперетворювач служить випромінювачем, а другий - приймачем ультразвукових коливань.

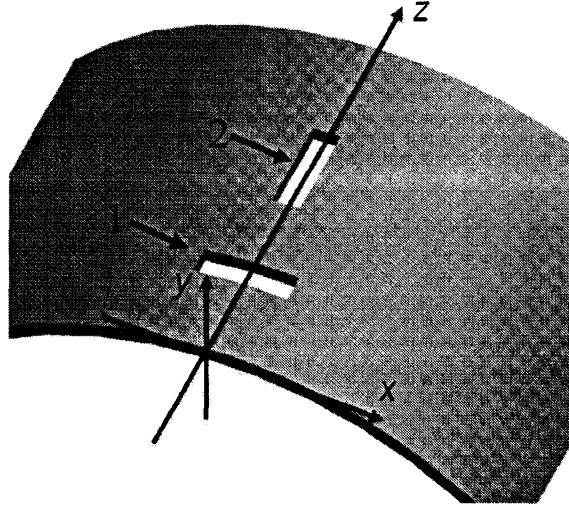


Рис. 2.14. Розміщення взірців на циліндричній поверхні труби

1 – поперечний взірець;

2 – поздовжній взірець.

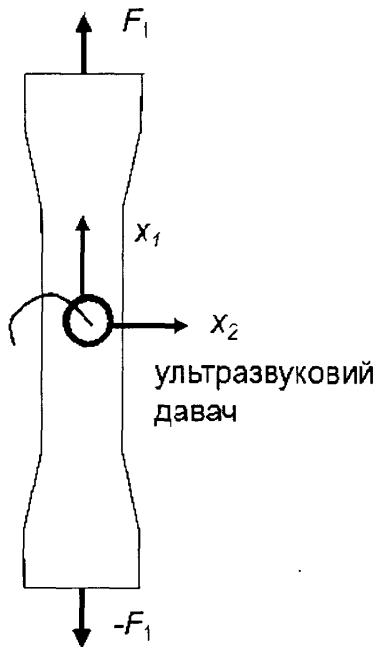


Рис. 2.15. Схема визначення акустопружних коефіцієнтів для трубної сталі

F_1 - навантаження;

X_i - осі Декартових координат.

Один п'єзоперетворювач розміщений у центральній частині системи перетворювачів і встановлений перпендикулярно до досліджуваної поверхні. Таким чином, системою перетворювачів визначається швидкість поширення ультразвукових коливань у трьох напрямках, що в свою чергу дає можливість визначати величину напружень відносно трьох осей.

В площині XZ контроль проводиться за допомогою центрального перетворювача за схемою, яка показана на рис. 2.16. Перше рівняння системи рівнянь (2.74) описує схему контролю стінки металу трубопроводу в площині XZ .

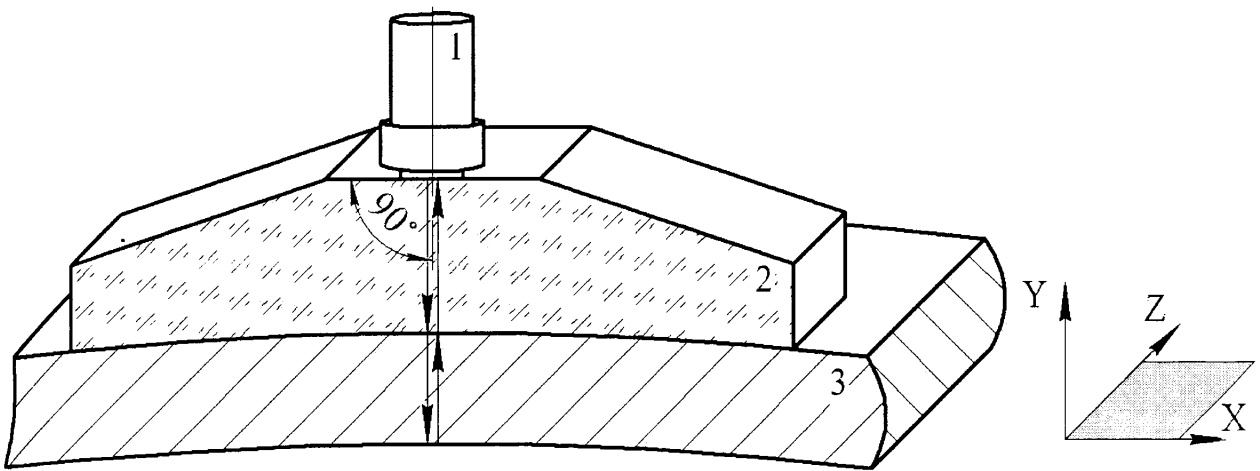


Рис. 2.16. Схема контролю металу стінки трубопроводу при поширенні ультразвукової хвилі в площині XZ

- 1 – п'єзоелектричний перетворювач;
- 2 – головка (призма) первинного перетворювача;
- 3 – стінка трубопроводу.

Друге рівняння системи рівнянь (2.74) описує схему контролю металу стінки трубопроводу системою п'єзоелектричних перетворювачів, яка показана на рис. 2.17. При цьому контроль проводиться в площині YX , один перетворювач випромінює ультразвукові хвилі, а інший приймає.

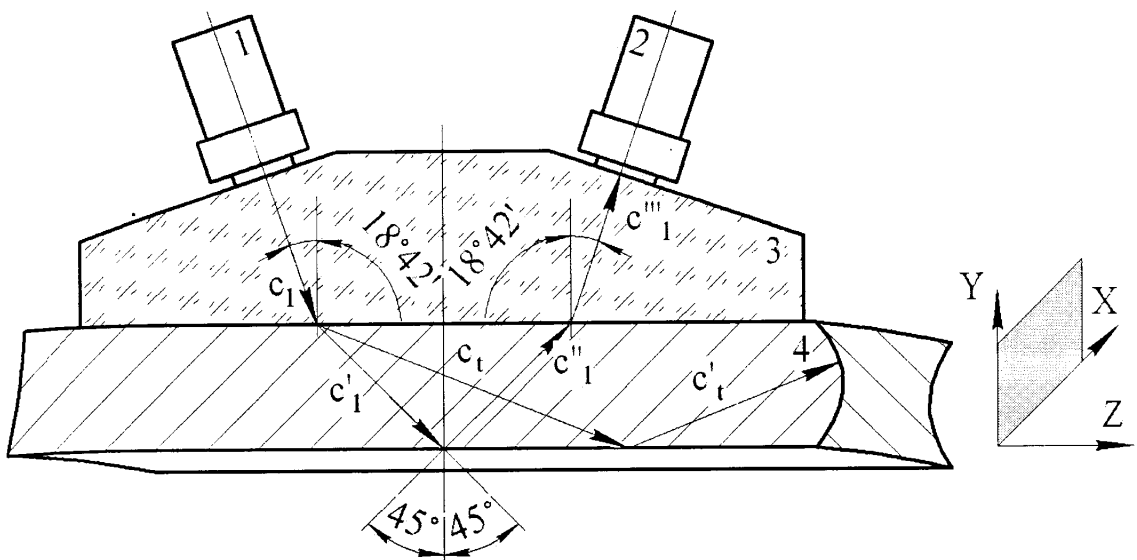


Рис. 2.17. Схема контролю металу стінки трубопроводу при поширенні ультразвукової хвилі в площині YX

- 1 – п'єзоелектричний перетворювач, який випромінює ультразвукові хвилі;
- 2 – п'єзоелектричний перетворювач, який приймає ультразвукові хвилі;
- 3 – головка (призма) первинного перетворювача;
- 4 – стінка трубопроводу.

Третє рівняння системи рівнянь (2.74) описує схему контролю металу стінки трубопроводу системою п'єзоелектричних перетворювачів, яка показана на рис. 2.18. При цьому контроль проводиться в площині YZ , один перетворювач випромінює ультразвукові хвилі, а інший приймає.

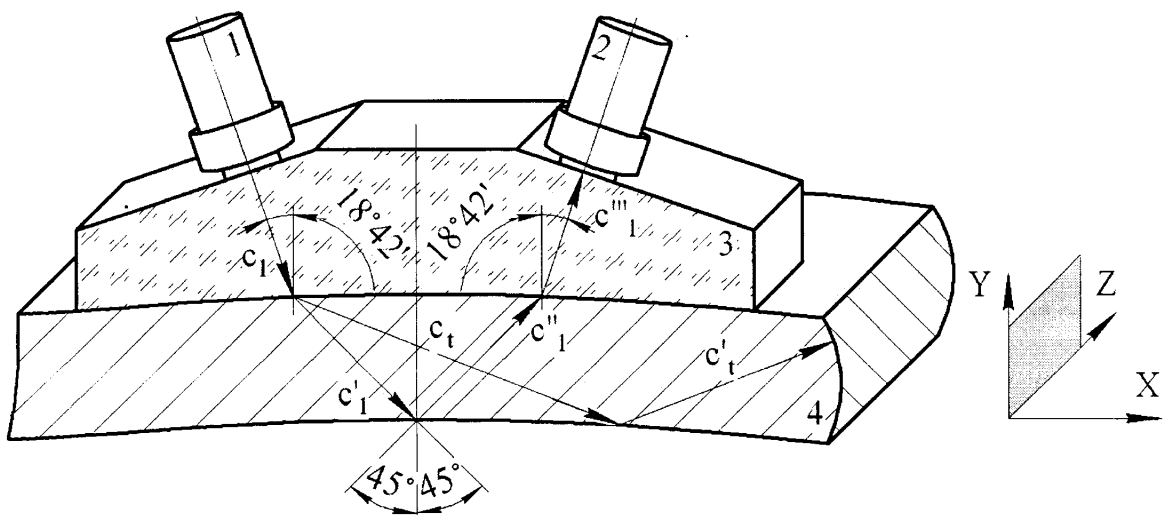


Рис. 2.18. Схема контролю металу стінки трубопроводу при поширенні ультразвукової хвилі в площині YZ

- 1 – п'єзоелектричний перетворювач, який випромінює ультразвукові хвилі;
- 2 – п'єзоелектричний перетворювач, який приймає ультразвукові хвилі;
- 3 – головка (призма) первинного перетворювача;
- 4 – стінка трубопроводу.

Напруження, які діють у трубопроводах, визначаються сукупністю факторів таких, як внутрішній тиск продукту транспортування, поздовжній згин трубопроводу в вертикальній та горизонтальній площинах, поперечний згин стінки труби (овальність, гофри, вм'ятини), температурні деформації, залишкові напруження в зоні зварних з'єднань, вплив концентраторів напружень (недосконалість форми зварних з'єднань, технологічні дефекти, пошкодження, які сформувалися під час експлуатації). В залежності від знаку діючих від кожного фактора напружень, вони можуть компенсуватися або сумуватися. В останньому випадку можливе утворення зон локального перенапруження та протікання значних пластичних деформацій (хоч тиск продукту, що транспортується відповідає нормативному або нижче нормативного), що є основною причиною аварій на магістральних трубопроводах.

Необхідно мати на увазі, що осьові напруження від згину мають максимальну величину тільки в периферійних волокнах труби, які лежать в площині згину (з однієї сторони – напруження розтягу, з протилежного - стиску), та пропорційно віддалі від вісі труби. Таким чином, в описаному випадку зниження напружень у результаті пластичної деформації буде мати місце тільки в найбільш віддалених від вісі труби волокнах, в той час як напруження, які діють поблизу лежачих до нейтральної площини волокнах, не будуть досягати границі текучості.

Слід враховувати, що при згині трубопроводу внутрішній тиск викликає появу поперечно-розподіленого зусилля і впливає на згин, еквівалентний стиску в осьовому напрямку.

Використовуючи методи комп'ютерного моделювання проведемо аналіз навантаження лінійних частин магістральних трубопроводів за типовими

схемами, які показано в додатках З, К, Л, та відповідного цим навантаженням розподілу напружень у їх стінці, шляхом порівняння комбінацій змін швидкостей поширення поздовжніх ультразвукових коливань в стінках трубопроводу в трьох взаємоперпендикулярних напрямках.

Напруження розтягу відповідає зменшенню швидкості поширення ультразвукової хвилі в середовищі, а напруження стиску – збільшенню. Числові значення відповідних змін швидкостей поширення поздовжньої ультразвукової хвилі від величини напружень можна отримати із розрахункового графіка (рис. 2.19). В залежності від виду навантаження: внутрішній тиск, зусилля розтягу чи згину, а також їх поєднання, як бачимо з додатків З, К, Л можна зробити висновок про зміни комбінацій величин напружень в трьох взаємоперпендикулярних напрямках по осях симетрії труби (X , Y , Z) та відповідно спостерігаються при цьому і зміни комбінацій швидкості поширення ультразвукових хвиль відносно даних осей симетрії ділянки трубопроводу.

З отриманих результатів видно, що охарактеризувати дійсний напружено-деформований стан стінок трубопроводів на розглядуваних ділянках, можна за допомогою зміни швидкості поширення ультразвукових хвиль вздовж осей симетрії труби X , Y та Z . Найбільш інформативним параметром за допомогою якого можна зробити висновок про напружений стан труби при розгляді даних видів деформації є зміна швидкості поширення в металі стінки трубопроводу поздовжньої ультразвукової хвилі в напрямку вісі Z . Внаслідок навантаження труби внутрішнім тиском та зусиллям розтягу, додаток К, величина зміни швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в напружено-деформованому середовищі в напрямку вісі Z відносно швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в ненапруженому середовищі є найбільша, $\Delta v_{\text{вим}Z} = 39$ м/с в порівнянні з відповідною величиною, при навантаженні, яке показано в додатку Л $\Delta v_{\text{вим}Z} \approx 0$.

Розглядаючи комбінацію змін швидкостей поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в стінці труби при навантаженні, показаному в додатку Л, зміна швидкості поширення хвилі вздовж вісі X набагато більша зміни швидкості

поширення хвилі вздовж вісі Z : $\Delta v_{вимX} \gg \Delta v_{вимZ}$, в порівнянні з відповідною комбінацією змін швидкостей поширення хвилі при навантаженні труби, яке показано в додатку 3, тобто $\Delta v_{вимX} > \Delta v_{вимZ}$.

По мірі накопичення в базі даних комбінацій змін швидкості поширення ультразвукових поздовжніх хвиль відносно осей симетрії трубопроводу X , Y , Z на ремонтних ділянках можна визначати вплив виду зусиль на напружено-деформований стан цих ділянок трубопроводу з метою мінімізації їх дії.

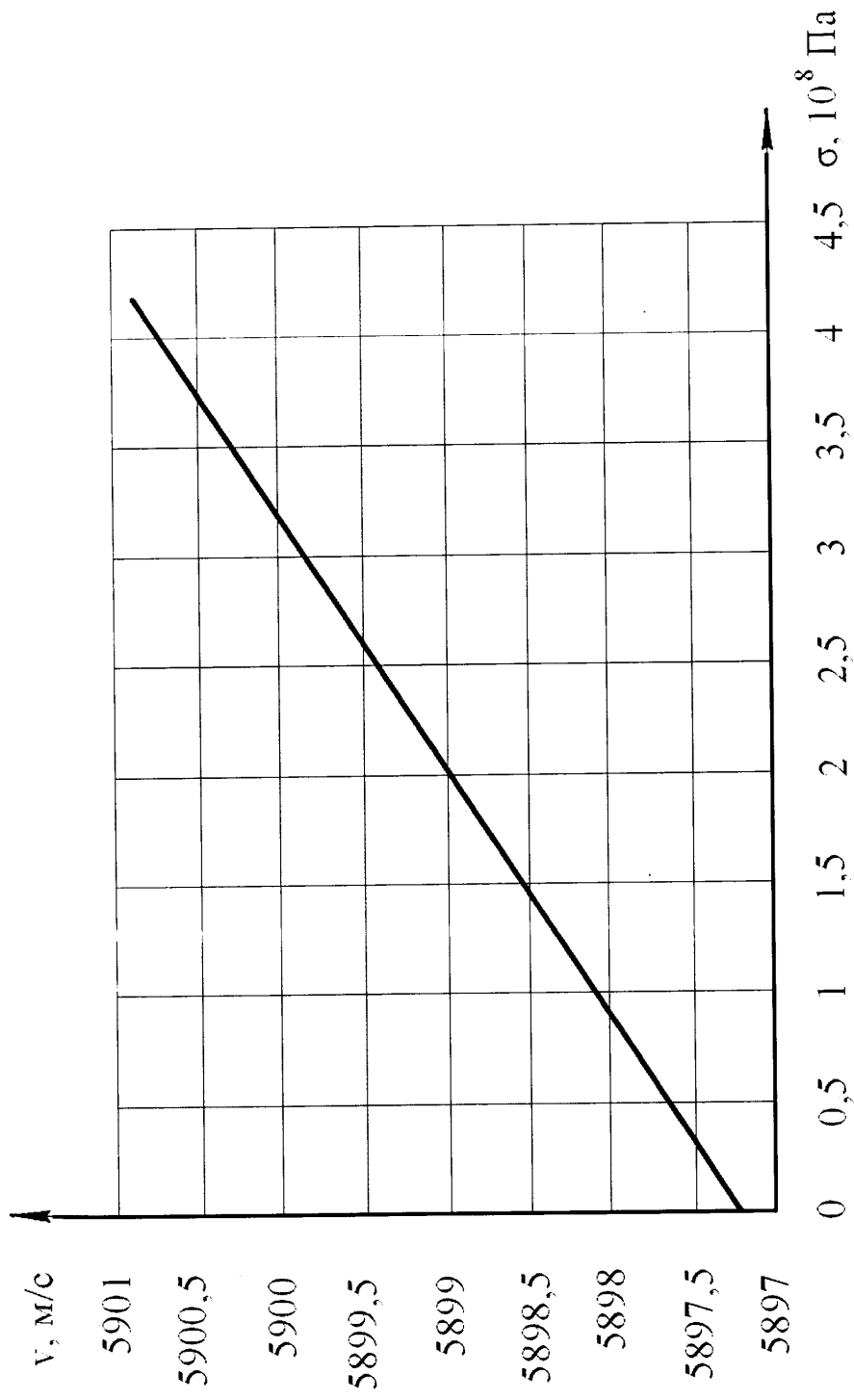


Рис. 2.19. Залежність зміни швидкості поширення ультразвукових поздовжніх хвиль від величини напружень стиску

2.6 Визначення місця прикладання зусиль на ділянці трубопроводу

Для визначення місця прикладання зусилля по околу труби так і вздовж неї, а також інтенсивність зусилля одного вимірювання є недостатньо. З цією метою необхідно збільшити кількість точок по колу труби і по довжині. Збільшення кількості точок повинно бути обґрунтованим, оскільки кожне додаткове вимірювання збільшує час проведення контролю.

Кількість точок контролю як по околу труби, так і вздовж неї визначаємо із рівняння опису розподілу напружень. Слід зауважити, що подальший алгоритм визначення місця прикладання зусиль на ділянці трубопроводу є аналогічним, як при розгляді по околу труби, так і вздовж ділянки трубопроводу. Дві точки контролю описують лінійний закон розподілу напружень. Незважаючи на те, що цей закон дозволяє мінімізувати кількість точок по околу труби, лінійний опис напружень не дозволяє визначити місце максимального напруження, що відповідає місцю прикладання зусилля. Це місце можна визначити мінімумом із трьох точок, де в крайніх точках повинні бути напруження меншої величини ніж в центральній. Розподіл напружень за трьома точками описується параболічним рівнянням:

$$\sigma(x) = ax^2 + bx + c, \quad (2.76)$$

де $\sigma(x)$ – функція, що описує розподіл напружень по околу труби;

x – координата по околу труби;

a, b, c – коефіцієнти.

Коефіцієнти, що використовуються в (2.76) знайдемо на основі матричного числення:

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \end{pmatrix}^{-1}, \quad (2.77)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – значення еквівалентних напружень у точках контролю;

x_1, x_2, x_3 – координати точок контролю по околу труби.

Рівняння (2.76) не може точно екстраполювати величину напружень на значній віддалі від точок контролю. Ми вважаємо, що ефективна довжина відрізка екстраполяції складає:

$$x_3 - x_1 \pm (x_3 - x_1)/2 . \quad (2.78)$$

Екстраполяцію на дальших відстанях ефективніше оцінювати за результатами аналізу швидкості зніми напружень на відрізку контролю. Цього можна досягти визначивши похідну із апроксимаційного рівняння (2.76):

$$\frac{d\sigma(x)}{dx} = 2ax + b . \quad (2.79)$$

У (2.79) швидкість зміни напружень визначається коефіцієнтом $2a$. Чим більше значення цього коефіцієнту, тим ближче місце концентрації напружень до відрізка проведення контролю по околу труби.

Точність визначення місця максимальних напружень по околу труби залежатиме від довжини ділянки контролю. Очевидно, що максимальної точності досягається у випадку, коли довжина відрізка (2.78) дорівнює довжині околу труби. Проте, таку умову не практично реалізувати в натурних умовах проведення ремонтних робіт чи експлуатації трубопроводів. Для вирішення умови точного визначення місця максимальних напружень необхідно вирішити задачу оптимізації:

$$\begin{cases} \Delta\sigma \rightarrow \min, \\ L_e/L_{omp} \rightarrow \max, \end{cases} \quad (2.80)$$

де $\Delta\sigma$ - різниця між екстрапольованими напруженнями та дійсними;

L_6 – довжина відрізка контролю;

L_{omp} – довжина околу труби.

Розв'язок (2.80) необхідно проводити для кожного окремого випадку, враховуючи умови доступу до труби.

З аналізу (2.79) приходимо до трьох випадків розподілу напружень:

а) якщо $a \approx 0$, то напруження є рівномірними по околу труби, місця їх концентрації не має;

б) якщо $2a \gg 0$, то максимальні напруження є в напрямку від x_1 до x_3 ;

в) якщо $2a \ll 0$, то максимальні напруження є в напрямку від x_3 до x_1 .

Для оцінки віддалі максимального напруження від відрізка контролю введемо коефіцієнт віддалі k_6 :

$$k_6 = \frac{L_{вим}}{2aL_{omp}}, \quad a \neq 0. \quad (2.81)$$

Аналізуючи (2.81) приходимо до висновку, що при однаковій довжині відрізка контролю із збільшенням швидкості наростання величини напружень, k_6 буде прямувати до мінімального значення.

Враховуючи (2.74) та (2.76) – (2.81) отримаємо математичну модель визначення місця прикладання зусиль по околу труби:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\Delta v_{вим}}{v_0} \right|_{\perp xz} &= A_x \sigma_{xx} + A_z \sigma_{zz}, \\ \left. \frac{\Delta v_{вим}^*}{v_0} \right|_{\angle yx} &= 1,4142 \left(A_{x_1} \sigma_{xx} + A_{z_1} \sigma_{zz} \right), \\ \left. \frac{\Delta v_{вим}^*}{v_0} \right|_{\angle yz} &= 1,4142 \left(A_{y_2} \sigma_{yy} + A_{z_2} \sigma_{zz} \right), \\ \sigma_i(x_i) &= ax_i^2 + bx_i + c; \end{aligned} \quad (2.82)$$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \end{pmatrix}^{-1}.$$

Якщо $a \approx 0$, то $\sigma_i = const$;

якщо $2a \gg 0$, то $\sigma = F(k_e)$ в напрямку $x_1 \rightarrow x_3$;

якщо $2a \ll 0$, то $\sigma = F(k_e)$ в напрямку $x_3 \rightarrow x_1$.

Розглянемо ділянку трубопроводу навантажену внутрішнім тиском та згинним зусиллям, додаток Л.

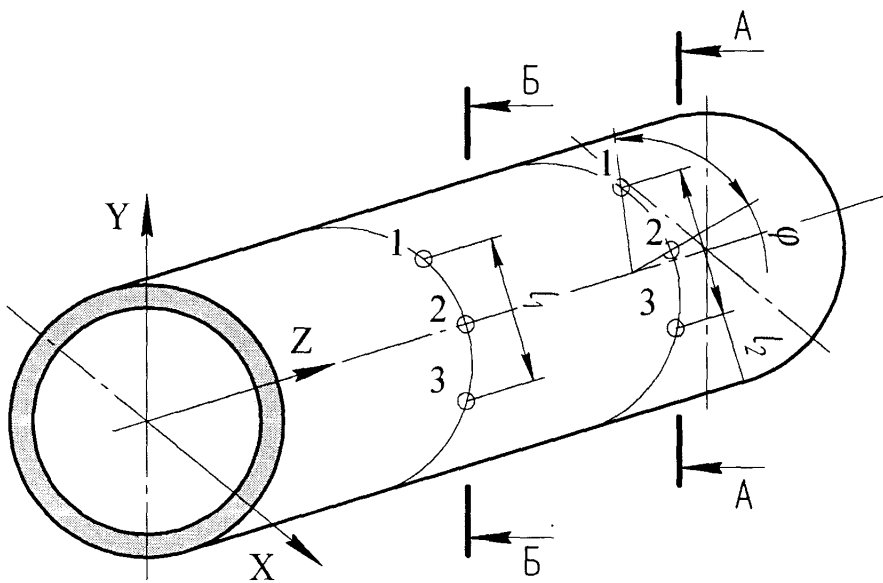


Рис. 2.20. Вибір точок контролю напружень

1, 2, 3 – відповідно точки контролю напружень у перерізах А-А та Б-Б;

l_1, l_2 – відрізки контролю;

φ – кут між двома сусідніми точками контролю в напрямку по околу труби;

переріз А-А на відстані 5 м від місця защемлення;

переріз Б-Б на відстані 10 м від місця защемлення.

Отже, виявити дійсний розподіл діючих у стінці трубопроводу напружень на ремонтній ділянці, можна провівши відповідні заміри, як по околу труби так і вздовж її вісі у певних перерізах, при цьому звільнивши від ґрунту верхню твірну труби, шляхом шурфування.

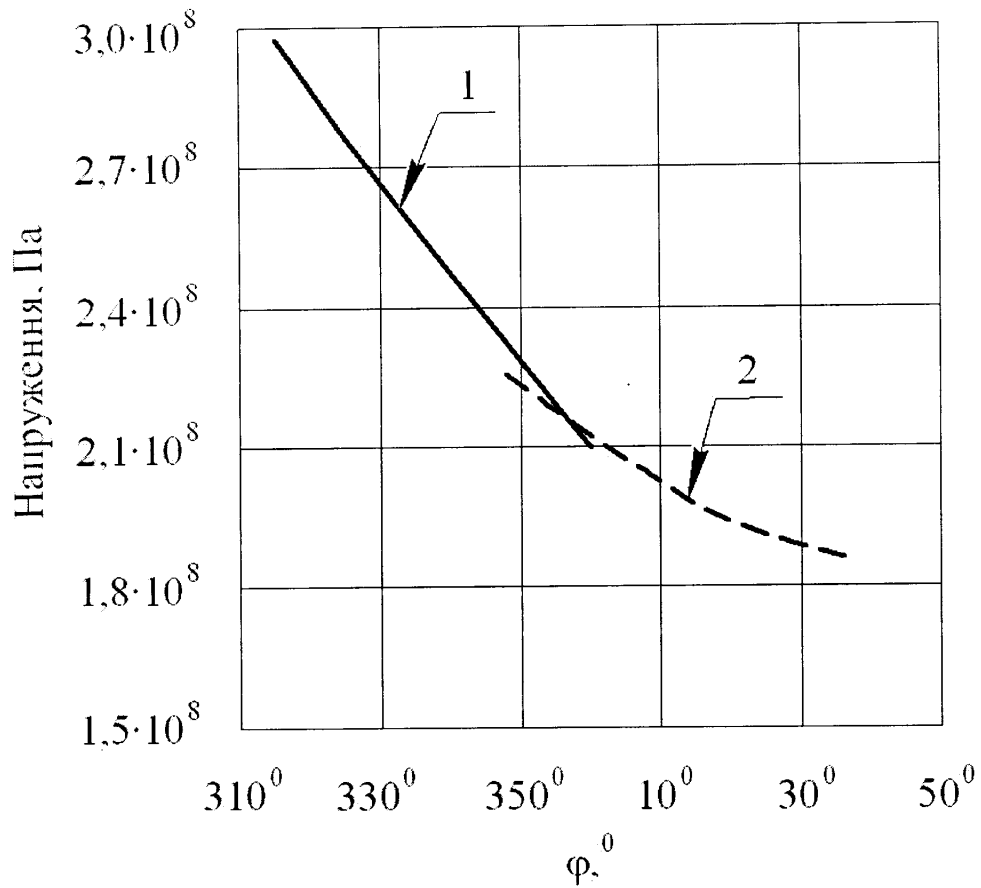


Рис. 2.21. Розподіл напружень вздовж вісі X по околу труби

1 – в перерізі $A-A$;

2 – в перерізі $B-B$.

В результаті отримаємо просторовий графік розподілу напружень ремонтної ділянки магістрального трубопроводу (рис. 2.22), аналізуючи який можна визначити місце дії зусилля P .

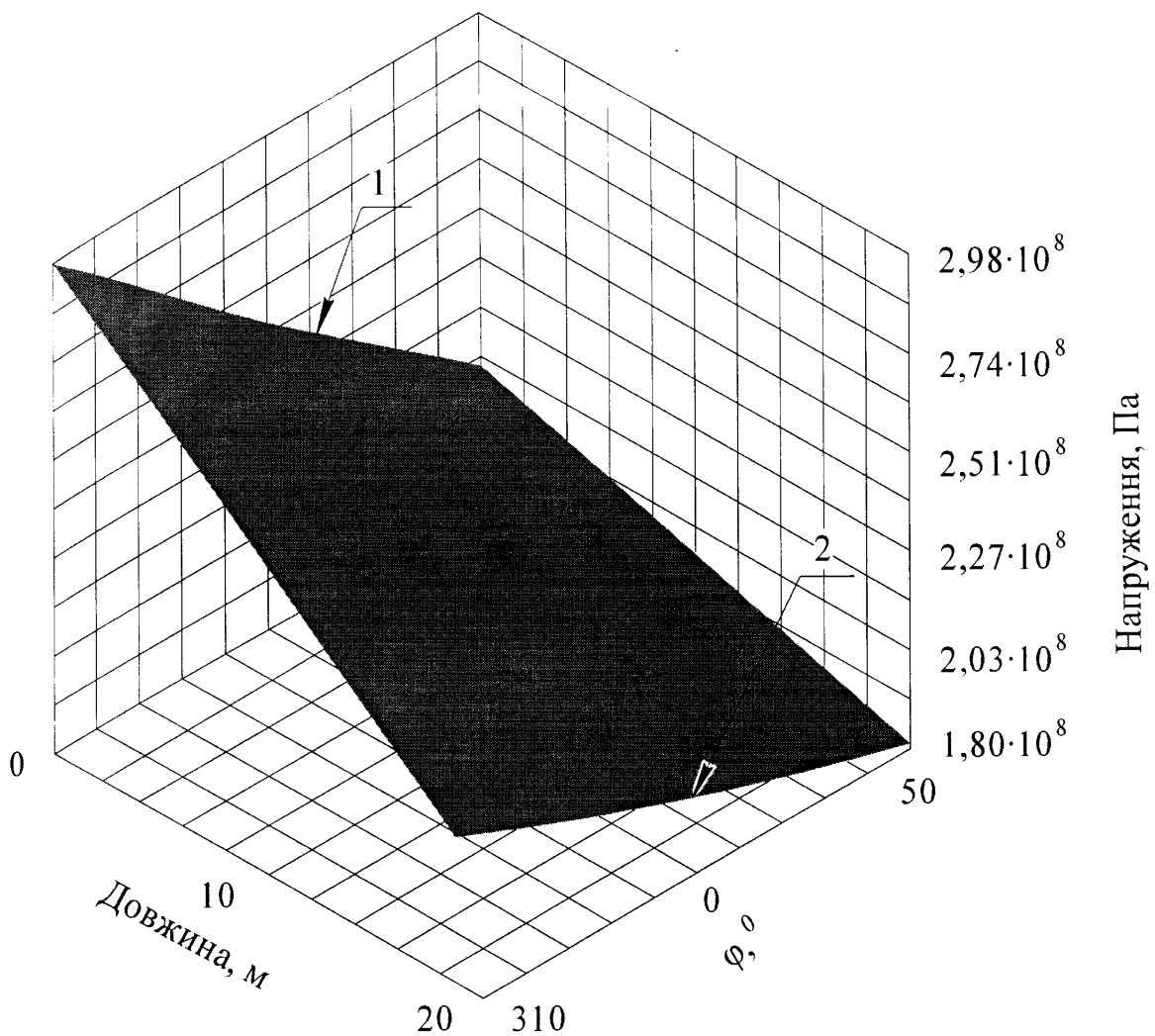


Рис. 2.22. Розподіл напружень вздовж поверхні ділянки трубопроводу між двома перерізами

1, 2 – поперечні перерізи ділянки трубопроводу, відповідно А-А та Б-Б.

В стінках трубопроводу діють напруження різної величини та напрямку. Використовуючи четверту теорію міцності, рівень напруженого стану для оцінки міцності ремонтної ділянки трубопроводу характеризується величиною розрахункових напружень (2.20), при цьому вони порівнюються з допустимими значеннями напруження плинності [73].

На основі другої частини розділу та додатків З, К, Л виразимо напруження, які діють в трьох взаємоперпендикулярних напрямках через зміну швидкості

поширення ультразвукових хвиль у металі трубопроводу, використовуючи математичні методи розв'язку рівняння (2.74):

$$\sigma_{xx} = \frac{1,4142A_{z_1} \frac{\Delta v_{\text{БУМ}}}{v_0} \Big|_{\perp xz} - A_z \frac{\Delta v_{\text{БУМ}}}{v_0^*} \Big|_{\angle yz}}{1,4142(A_x A_{z_1} - A_{x_1} A_z)}, \quad (2.83)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{A_x \left(A_{z_1} \frac{\Delta v_{\text{БУМ}}}{v_0^*} \Big|_{\angle yz} - A_{z_2} \frac{\Delta v_{\text{БУМ}}}{v_0^*} \Big|_{\angle yx} \right) + A_{x_1} \left(1,4142A_{z_2} \frac{\Delta v_{\text{БУМ}}}{v_0} \Big|_{\perp xz} - A_z \frac{\Delta v_{\text{БУМ}}}{v_0^*} \Big|_{\angle yz} \right)}{1,4142A_{y_2}}, \quad (2.84)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{A_x \frac{\Delta v_{\text{БУМ}}}{v_0^*} \Big|_{\angle yx} - 1,4142A_{x_1} \frac{\Delta v_{\text{БУМ}}}{v_0} \Big|_{\perp zx}}{1,4142(A_x A_{z_1} - A_{x_1} A_z)}. \quad (2.85)$$

Таким чином, четверту теорію міцності можна показати в наступному виді:

$$\sigma_{\text{роз}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\left(a \frac{\Delta v_{\text{БУМ}}}{v_0} \Big|_{\perp xz} - b \frac{\Delta v_{\text{БУМ}}}{v_0^*} \Big|_{\angle yx} \right)^2 + \left(c \frac{\Delta v_{\text{БУМ}}}{v_0^*} \Big|_{\angle yz} + d \frac{\Delta v_{\text{БУМ}}}{v_0^*} \Big|_{\angle yz} + e \frac{\Delta v_{\text{БУМ}}}{v_0} \Big|_{\perp xz} \right)^2 + \left(f \frac{\Delta v_{\text{БУМ}}}{v_0^*} \Big|_{\angle yx} + g \frac{\Delta v_{\text{БУМ}}}{v_0^*} \Big|_{\angle yz} - h \frac{\Delta v_{\text{БУМ}}}{v_0} \Big|_{\perp xz} \right)^2 \right]} \leq \frac{[\sigma]}{n}, \quad (2.86)$$

де a, b, c, d, e, f, g, h – коефіцієнти, які залежать від акустопружних коефіцієнтів A_i .

Висновки до розділу

1. Проведено аналіз навантажень ремонтних ділянок магістральних трубопроводів, які спричиняють зміну їх напружено-деформованого стану, що

дало можливість встановити вид найбільш небезпечних напружень, які виникають в стінках трубопроводу.

2. Встановлено, що для контролю напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу найбільш прийнятними є застосування поздовжніх ультразвукових хвиль, оскільки на їх поширення впливають в основному механічні параметри, що дає можливість отримати більш достовірні результати.

3. Розроблена і описана математична модель визначення складових напружень в стінці металу трубопроводу в трьох взаємоперпендикулярних напрямках, що дає можливість знайти найбільш небезпечні перерізи ремонтної ділянки трубопроводу.

4. В результаті аналізу комбінацій змін швидкостей поширення ультразвукових хвиль у трьох взаємоперпендикулярних напрямках у стінці трубопроводу встановлено, що найбільш інформативним параметром за допомогою якого можна зробити висновок про вид деформації є зміна швидкості поширення в металі трубопроводу поздовжньої ультразвукової хвилі в напрямку вісі Z.

5. Отримано аналітичну залежність, яка пов'язує величину напружень у середовищі поширення ультразвукових поздовжніх хвиль із зміною величини їх швидкості, що дозволяє врахувати пружні властивості матеріалу при поширенні цих хвиль, оптимізуючи процес контролю напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів на ремонтних ділянках.

РОЗДІЛ 3

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДІВ

3.1 Загальні положення

На даний час ультразвукові пристрої неруйнівного контролю, які визначають фізико-механічні параметри магістральних трубопроводів з метою забезпечення їх надійної експлуатації, використовуються в багатьох галузях народного господарства: нафтогазовій, хімічній, видобувній тощо. Експлуатація обладнання в кожному конкретному технологічному процесі має свої режими та особливості роботи, які впливають на зміну властивостей металу і відповідно на отримані результати при проведенні ультразвукових вимірювань. Тому при обґрунтуванні вибору та використанні ультразвукових пристроїв приділяється велика увага аналізу режимів експлуатації досліджуваних об'єктів контролю, таких як рівень вібрації, фізичні властивості матеріалу, якості поверхні та ін. Особливу увагу приділяється вибору первинного перетворювача. Такі параметри чутливого елемента первинного перетворювача як: температура, час старіння його матеріалу поряд із робочими параметрами, такими, як амплітудно-частотна характеристика акустичного тракту, відношення сигнал/шум суттєво впливають на результати вимірювань.

Наступним кроком проектування ультразвукового пристрою є розробка блоку вторинної обробки сигналу, що отримується первинним перетворювачем.

Цей блок повинен задовольняти таким вимогам, як:

- точність обробки сигналу;
- простота використання;
- зручне представлення результатів вимірювання;
- малі габарити;
- автономність живлення;

- сумісність із стандартними первинними перетворювачами, або із розповсюдженими імпортованими;
- невелика вартість.

Перераховані вимоги вимагають нових інженерних та наукових підходів як до розробки способу обробки інформації, так і до проектування вторинних блоків обробки сигналів на сучасній технічній елементній базі.

3.2 Аналіз матеріалів чутливого елемента

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

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

П'єзоелектричні матеріали можна класифікувати на полярні та неполярні п'єзоелектрики. До основних акустичних характеристик полярних матеріалів відносять наявність власної електричної поляризації, що існує при відсутності зовнішнього механічного зусилля чи електричного поля. Дана властивість

визначає їх високі п'єзоелектричні властивості. Поряд з їх перевагою відносно неполярних п'єзоелектриків, полярні мають деякі недоліки, що обмежують їх використання при проведенні контролю технічного стану трубопроводів, зокрема нерівномірна залежність їх п'єзоелектричних властивостей від температури, нестабільність п'єзоелектричних параметрів, великі діелектричні та механічні втрати, що обмежує їх використання для високоточних вимірювань швидкості ультразвуку. Дані недоліки відсутні у неполярних п'єзоелектриків. Недоліком п'єзонапівпровідникових матеріалів, які відносяться до групи неполярних, є їх фоточутливість, тобто властивість при зміні освітлення змінюються п'єзоелектричні характеристики, наявність вільних носіїв заряду стає причиною виникнення додаткового електричного поля, що є причиною додаткової деформації.

Особливості експлуатації та умови роботи трубопроводів, такі як шум та вібрація обмежують застосування вище згаданих матеріалів. Використання кварцу, в залежності від напрямку зрізу кристалу, дозволяє випромінювати відповідно поздовжню та поперечну хвилі. Його успішно можна використовувати для збудження пружних хвиль при нормальному положенні перетворювача до об'єкту контролю, незважаючи на низьку чутливість кварцу.

Матеріал металічного електроду, який покриває поверхню п'єзоелемента вибирається з врахуванням як акустичних, так і фізичних характеристик матеріалу п'єзоелемента. До нього ставляться наступні вимоги: міцність припаювання, стабільність роботи в заданих умовах проведення контролю, адгезії з матеріалом п'єзоелемента та ін. Найкраще, як даний матеріал, що задовольняє згадані вимоги, для п'єзоелемента виготовленого з кварцу підходить срібло.

3.3 Дослідження імпульсного режиму роботи перетворювача

П'єзоелектричний перетворювач є основним вузлом при дослідженні фізико-механічних характеристик матеріалів ультразвуковим методом. Необхідні

параметри вторинних приладів, в основному, визначаються параметрами перетворювача [85].

При дослідженні п'єзоелектричного перетворювача вхідними даними є механічні, електромеханічні й електричні характеристики використаних матеріалів при заданих умовах застосування перетворювача. Необхідно також знати ресурс роботи і зміну характеристик матеріалів у процесі експлуатації п'єзоперетворювачів. У багатьох випадках потрібно проводити коригування параметрів вторинних приладів у процесі експлуатації системи контролю, відповідно до зміни характеристик перетворювача. Тому необхідно досліджувати режим роботи п'єзоперетворювача.

При роботі в імпульсному режимі, застосування відомої теорії роботи п'єзоелектричного перетворювача при збудженні його неперервним імпульсом вимагає коригування окремих його параметрів, зокрема це відноситься до амплітудно-частотної характеристики [86].

Розглянемо роботу чутливого елемента первинного перетворювача, що генерує поздовжні коливання (рис. 3.1).

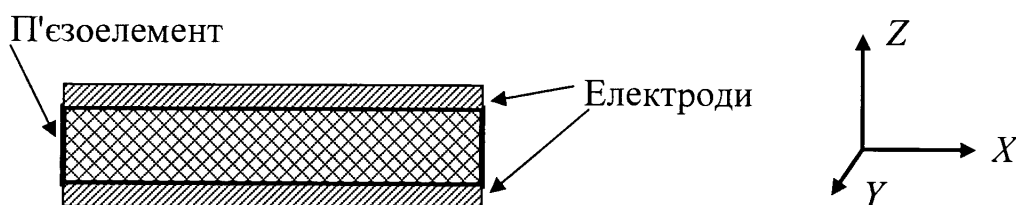


Рис. 3.1. Чутливий елемент ультразвукового первинного перетворювача

При подаванні на електроди напруги у вигляді пікового імпульсу, внаслідок п'єзоєфекту пластина починає коливатись. В залежності від того, як виготовлено п'єзопластину коливання можуть бути поздовжніми, поперечними або згинними. У нашому випадку розглянемо поздовжні коливання, при яких п'єзопластина починає витягуватись у напрямку вісі Z . В цьому випадку чутливий елемент можна представити як електричну схему-аналог у вигляді шестиполюсника у

якому одному входу відповідає електрична складова, а двом іншим – дві поверхні п'єзопластини (рис. 3.2).

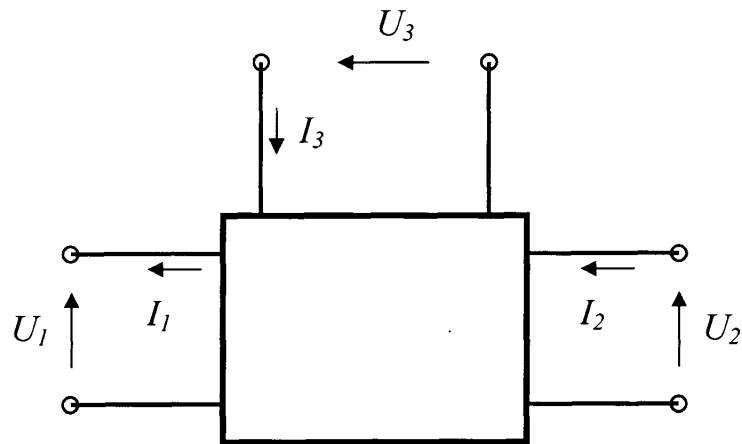


Рис.3.2. Еквівалентна схема роботи чутливого елемента первинного перетворювача у вигляді шестиполюсника

U_1 , U_2 – напруги шестиполюсника, що відповідають силі деформації чутливого елемента; I_1 , I_2 – струми шестиполюсника, які відповідають швидкості руху поверхні чутливого елемента; U_3 , I_3 – напруга та струм на електродах чутливого елемента.

Розкриття електричної схеми-аналога чутливого елемента здійснено Мезоном [87]. У якій процес утворення коливання чутливого елемента внаслідок подавання електричного імпульсу на електроди представляється коливальним контуром паралельно з'єднаних конденсатора та котушки індуктивності.

Більш удосконалену схему-аналог роботи чутливого елемента представлено в [69, 85], де враховано навантаження проміжного шару, демпфера та об'єкта в якій вводяться ультразвукові коливання [85].

Недоліком представленої в [69, 85] електричної схеми-аналогу є те, що в ній коливання чутливого елемента є ідеалізованими і продовжуються в часі без зменшення амплітуди. У реальному чутливому елементі коливання, що утворюються піковим електричним імпульсом, загасають в часі.

Для удосконалення схеми-аналогу пропонуємо ввести в резонансний контур додатково резистор, що буде моделювати загасання коливань чутливого елемента, для зменшення добротності коливального контура і відповідно зменшення тривалості його коливального процесу (рис. 3.3).

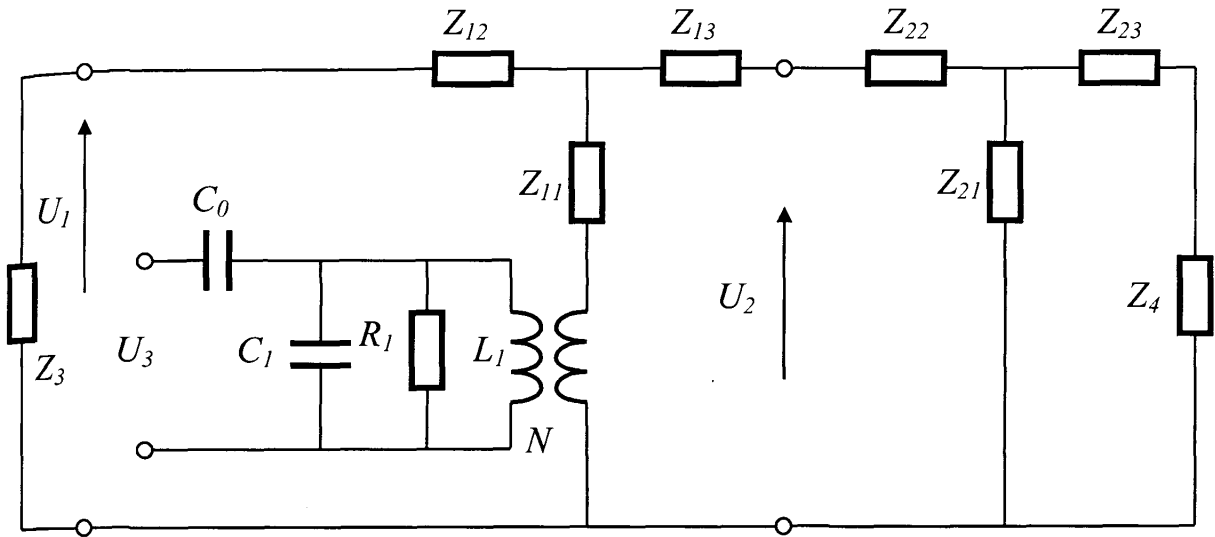


Рис. 3.3. Електрична схема-аналог чутливого елемента ультразвукового первинного перетворювача

Z_{11} , Z_{12} , Z_{13} – опори, що відповідають затримці сигналу внаслідок поляризації чутливого елемента; Z_{21} , Z_{22} , Z_{23} – опори, що відповідають затримці сигналу в проміжному шарі; Z_3 – опір демпфера; Z_4 – опір об'єкта в який вводиться ультразвукова хвиля; C_1 , L_1 , R_1 – електричні елементи, що утворюють коливання чутливого елемента; N – коефіцієнт трансформації ідеального трансформатора, що відповідає електромеханічному перетворенню в чутливому елементі; C_0 – ємність чутливого елемента.

Ємність чутливого елемента обчислюється так [88]:

$$C_0 = \frac{\varepsilon^s A}{L}, \quad (3.1)$$

де A – площа поверхні чутливого елемента;

L – товщина чутливого елемента;

ε^s – діелектрична проникність чутливого елемента.

Електричні параметри паралельного резонансного контура визначаються так [88]:

$$C_1 = \frac{C_0}{k_T^2}, \quad L_1 = \frac{k_T^2}{\omega^2 C_0}, \quad (3.2)$$

де k_T – коефіцієнт п'єзоелектричного зв'язку;

ω – частота коливань чутливого елемента.

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

$$N = \frac{eA}{L}, \quad (3.3)$$

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

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

Опори поверхні чутливого елемента обчислюються так:

$$Z_{12} = Z_{13} = jZ_c \tan\left(\frac{\beta_a L}{2}\right), \quad Z_{11} = jZ_c \operatorname{cosec}(\beta_a L), \quad \beta_a = \omega \sqrt{\frac{\rho}{c^D}}, \quad Z_c = A\sqrt{\rho c^D}, \quad (3.4)$$

де Z_c – акустичний імпеданс п'єзопластини;

β_a – константа поширення акустичної хвилі в п'єзоматеріалі;

ρ – густина п'єзоматеріалу;

c^D – пружна константа п'єзоматеріалу при відсутності прикладеного електричного поля.

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

$$Z_{22} = Z_{23} = jZ_{csh} \tan\left(\frac{\beta_{ash} L_{sh}}{2}\right), \quad Z_{21} = jZ_{csh} \operatorname{cosec}(\beta_{ash} L_{sh}), \quad (3.5)$$

$$\beta_{ash} = \frac{\omega}{c_{lsh}}, \quad Z_{csh} = A\rho_{sh}c_{lsh},$$

де Z_{csh} – акустичний імпеданс проміжного шару;

β_{ash} – константа поширення акустичної хвилі в проміжному шарі;

ρ_{sh} – густина проміжного шару;

c_{lsh} – швидкість поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в проміжному шарі;

L_{sh} – товщина проміжного шару.

Як матеріал для проведення розрахунків було використано чутливий елемент ЦТС-5А. Вхідні дані для проведення розрахунку приведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Вхідні параметри проведення розрахунку чутливого елемента

Назва параметра	Значення
L , м	$7.6 \cdot 10^{-4}$
Радіус п'єзопластини, м	$2.5 \cdot 10^{-3}$
Частота, МГц	2.5
ρ , кг/м ³	7.75
e , Кл/м ²	15.8
c^D , Н/м ²	$14.7 \cdot 10^{10}$
k_T	0.49
ρ_{sh} , кг/м ³	1190
c_{lsh} , м/с	2700

продовження табл. 3.1

Назва параметра	Значення
L_{sh} , м	$6.802 \cdot 10^{-3}$
Густина сталі, кг/м ³	7.85
Швидкість поздовжньої ультразвукової хвилі в сталі, м/с	5900

Схема-аналог розраховувалась виходячи з того, що струм I , який протікає через конденсатор ємністю C та котушку індуктивності L рівний:

$$I = C \frac{dU}{dt}, \quad I = L \frac{dU}{dt}, \quad (3.6)$$

де U – напруга;

t – час.

Для проведення розрахунків імпульс генератора моделювався [93] у вигляді пікового сигналу великої амплітуди (рис. 3.4).

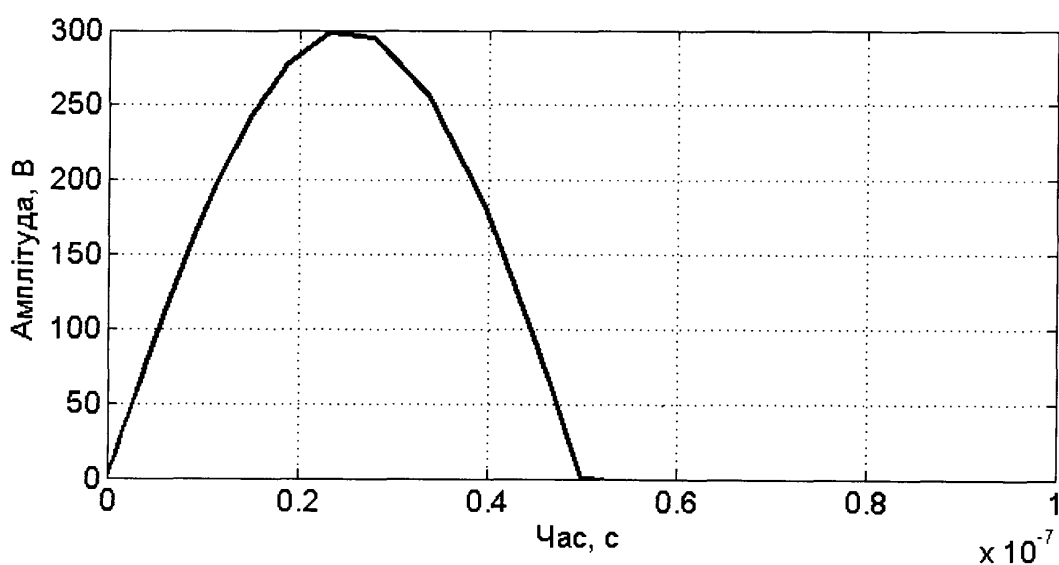


Рис. 3.4. Збуджуючий імпульс генератора напруги чутливого елемента

Результуючі коливання в залежності від величини опору R_1 показані на рис. 3.5. Напряга визначалась на виході проміжного шару та на вході в матеріал досліджуваного об'єкта (Z_4).

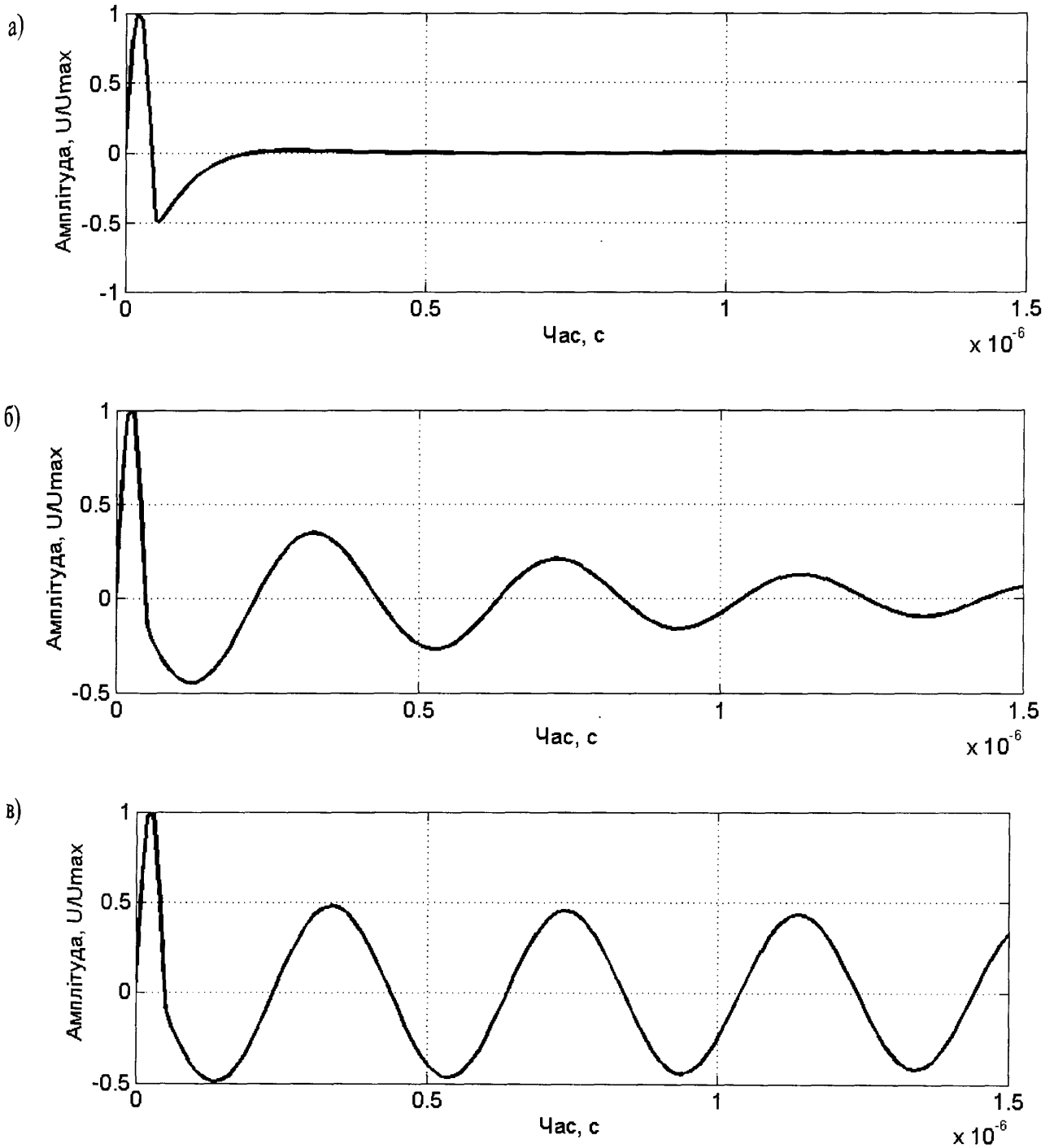


Рис. 3.5. Форма ультразвукового сигналу на виході із чутливого елемента
 а) $R_1 = 25$ Ом; б) $R_1 = 250$ Ом; в) $R_1 = 2500$ Ом.

Як можна побачити із рис. 3.5 опір R_l вносить зміни у робочу частоту коливання чутливого елемента. При малому значенні опору R_l (рис. 5 (а)), коливання мають різкий загасаючий характер. Це вказує на значні механічні втрати чутливого елемента. Протилежний випадок роботи чутливого елемента показаний на рис. 5 (в), де механічні втрати при перетворенні електричного імпульсу є незначними, що відповідає роботі в ненавантаженому режимі. На рис. 5 (б) зображено роботу чутливого елемента у режимі проведення неруйнівного контролю. У цьому режимі чутливий елемент збуджується електричним імпульсом, при якому проходить декілька коливань п'єзoeлемента, що відповідає експериментальним даним.

В реальному чутливому елементі, як правило, поряд із основною частотою коливання є присутні і додаткові частоти (рис. 3.6).

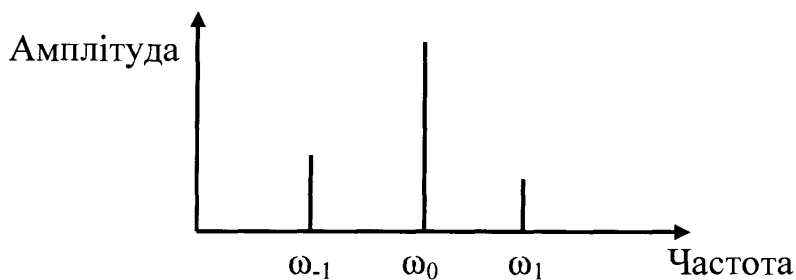


Рис. 3.6. Спектральні характеристики чутливого елемента

Ці додаткові частоти можуть вносити завади як в зондуєчий сигнал акустичної частини чутливого елемента в режимі випромінювання, так і в режимі приймання акустичного сигналу. З метою проведення аналізу роботи чутливого елемента із присутніми бічними додатковими частотами удосконалимо електричну схему-аналог роботи чутливого елемента (рис.3.7).

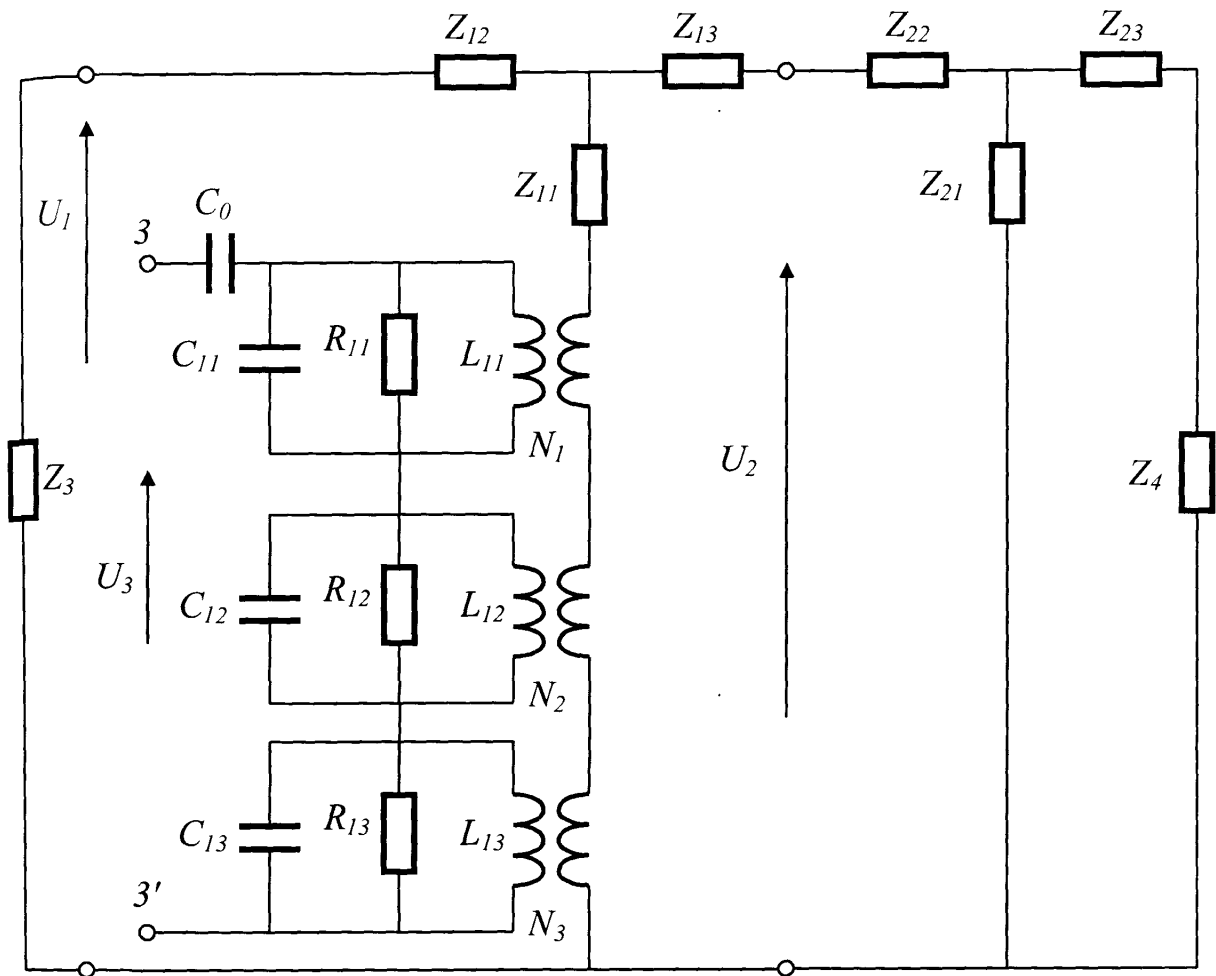


Рис. 3.7. Електрична схема-аналог чутливого елемента ультразвукового первинного перетворювача

Результуючий сигнал на виході перехідного шару чутливого елемента представлений на рис. 3.8. Як можна побачити із рис.3.8, вплив бічних гармонік змінює амплітуду вихідного сигналу, перерозподіляючи його енергію між періодами коливань. Це дозволяє проводити більш точний аналіз луно-сингалу.

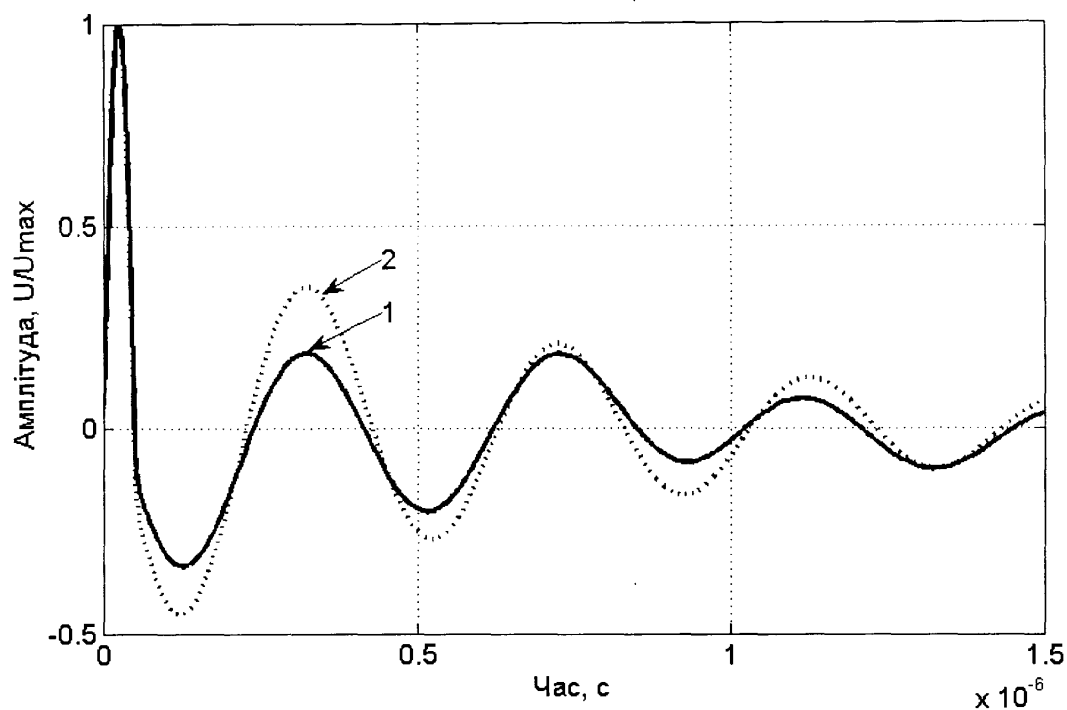


Рис. 3.8. Форма ультразвукового сигналу на виході із чутливого елемента
 1 – вихідний сигнал сформований трьома резонансними контурами;
 2 – одним контуром.

Вхідний опір на клеммах 3-3' з рис. 3.7, [89]:

$$Z_3 = \frac{1}{j\omega C_0} \left[1 - \sum_n k_{eff,n}^2 + \sum_n \frac{j\omega k_{eff,n}^2}{(\omega_{0n}^2 - \omega^2)C_0} \right] = \frac{1 - k_T^2}{j\omega C_0} + \sum_n \frac{j\omega k_{eff,n}^2}{(\omega_{0n}^2 - \omega^2)C_0}, \quad (3.7)$$

Для спрощення можна записати опір Z_3 так:

$$Z_3 \approx \frac{1 - k_T^2}{j\omega C_0} + \frac{8}{\pi^2} \frac{j\omega k_T^2 / C_0}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (3.8)$$

Відношення частот для їх порівняння є такими:

$$\frac{\omega_1}{\omega_0} = \left(1 + \frac{8}{\pi^2} \frac{k_T^2}{(1-k_T^2)} \right)^{-\frac{1}{2}} = \left(1 + \frac{8K^2}{\pi} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

Для другого порядку k_T наближення може бути таким:

$$\frac{\omega_1}{\omega_0} \approx \left(1 - \frac{8k_T^2}{\pi^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

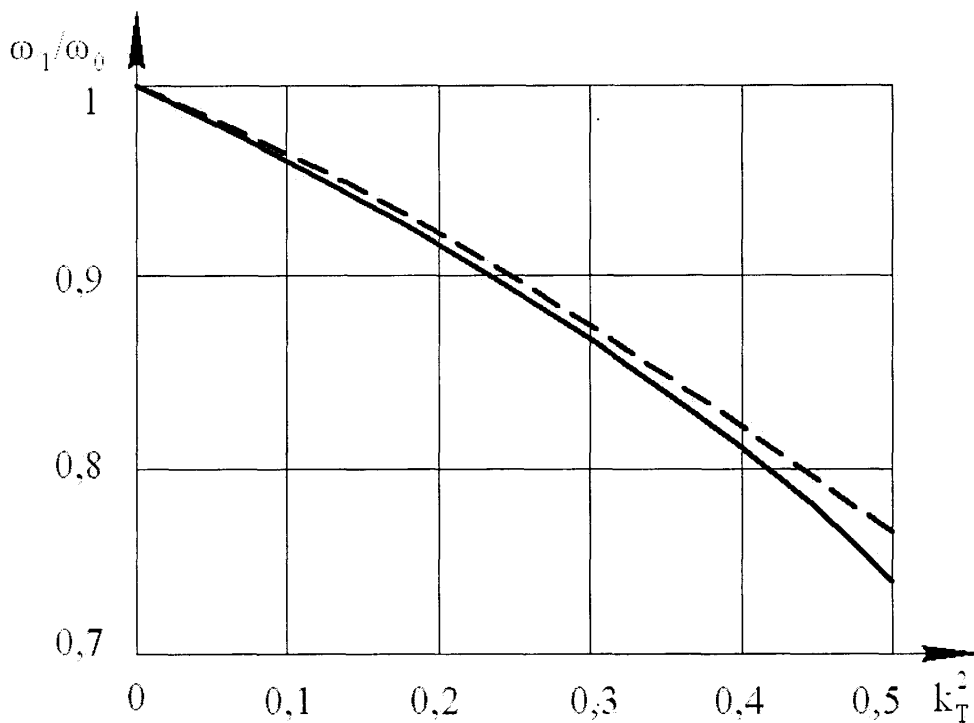


Рис. 3.9. Залежність відношення частот чутливого елемента від коефіцієнта п'єзоелектричного зв'язку

вираз (3.9) – відповідає суцільній лінії;

вираз (3.10) – відповідає штриховій лінії.

3.4 Розробка схеми ультразвукового пристрою для визначення швидкості поширення ультразвукових коливань

Пристрій для вимірювання первинного інформативного сигналу - швидкості поширення ультразвукової хвилі є основою для визначення фізико-механічних параметрів трубопроводів та перевірки результатів теоретичних досліджень.

Структурна схема та часові діаграми розробленого пристрою представлені відповідно на рис. 3.10 та 3.11.

Пристрій для вимірювання швидкості ультразвуку працює наступним чином. При подачі живлення генератор синхронізуючих імпульсів 2 видає сигнали синусоїдальної форми в вигляді безперервних коливань (рис. 3.11 (а)), які поступають на схему керування 1 і синхронізують роботу всієї схеми. Коливання (рис. 3.11 (а)), запускають через схему «і» генератор зондуючих імпульсів 4, який збуджує імпульсом (рис. 3.11 (б)), випромінюючу частину роздільно-суміщеного перетворювача 7. Одночасно коливання високої частоти попадають на схему співпадання 11. Ультразвукові коливання збуджені перетворювачем 7 поступають в досліджуваний зразок 9 і в вигляді донних сигналів з приймальної частини роздільно-суміщеного перетворювача 8 поступають на підсилювач 5, де підсилюються до певної амплітуди (рис. 3.11 (в)). Виділені донні сигнали (рис. 3.11 (в)), в вигляді багатократних відбиттів поступають на детектор 6 для детектування з наступним підрахунком лічильником 10. Оскільки частота коливань генератора синхронізуючих імпульсів набагато вища від частоти коливань донних сигналів, то похибка від неспівпадання фронтів донного сигналу і синхронізуючих імпульсів буде в стільки разів меншою, в стільки разів буде різниця між частотами цих порівнювальних сигналів. Донний сигнал у межах одного півперіоду може випереджувати дійсний додатний півперіод або відставати від дійсного додатного півперіоду синусоїдальних коливань (рис. 3.11 (а)), генератора синхронізуючих імпульсів і відповідно його тривалість буде меншою від півперіоду синусоїдального коливання, що фіксує схема співпадання 11. Випередження або відставання сигналу може проходити в межах

півперіоду. Схемою вимірювання часу поширення ультразвуку 12 вимірюється час поширення донного сигналу в зразку з моменту подачі зонduючого імпульсу (рис. 3.11 (б)), до моменту приходу донного сигналу (рис. 3.11 (г)), який рівний $T_{\text{вим}}$ (рис. 3.11 (д)). Детектовані і пораховані донні сигнали через перемикач «П» задають вимірювальний інтервал між першим донним та другим або другим та третім і т. д.

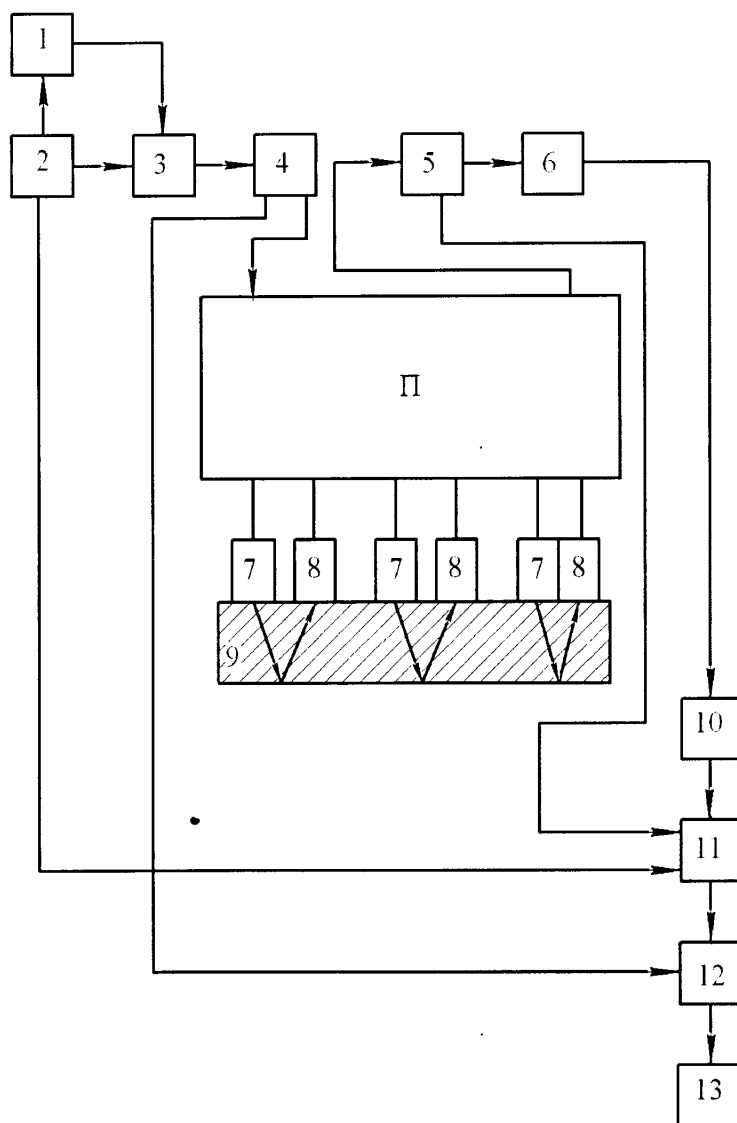


Рис. 3.10. Структурна схема ультразвукового пристрою

1 – схема керування; 2 – генератор синхронізуючих імпульсів; 3 – схема співпадання «і»; 4 – генератор зонduючих імпульсів; 5 – підсилювач; 6 – детектор; 7 – випромінююча частина п'єзоперетворювача;

8 – приймальна частина п'єзоперетворювача; 9 – об'єкт контролю; 10 – лічильник сигналів; П – перемикач; 11 – схема співпадання; 12 – вимірювач часу поширення ультразвуку; 13 – відеоблок.

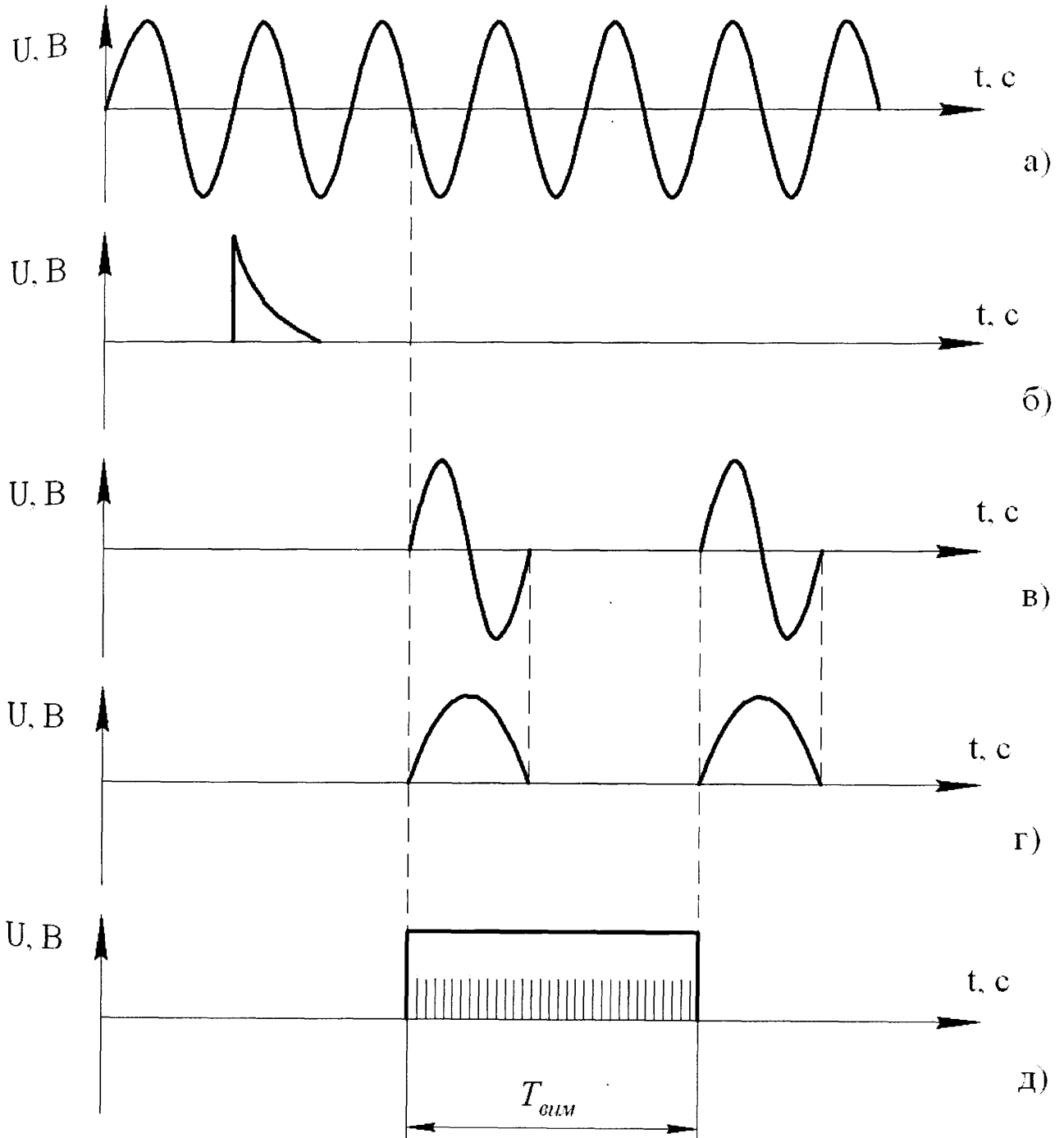


Рис. 3.11. Часові діаграми роботи пристрою вимірювання швидкості ультразвуку

Схемою вимірювання часу вимірюється тривалість синусоїдальних коливань (рис. 3.11 (а)), з моменту подачі зондуєчого імпульсу (рис. 3.11 (б)), до моменту співпадання донного сигналу (рис. 3.11 (г)), який рівний $T_{вим}$ (рис. 3.11 (д)), і враховує затримку донного сигналу (рис. 3.11 (г)).

Такий метод обробки сигналу дає можливість визначати швидкість поширення ультразвукових коливань, в яких зміна амплітуди та форма наростання фронтів не впливає на результат вимірювань [61].

3.5 Оцінка похибки розробленого пристрою і результатів контролю

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

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

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

Розрахунок похибки будемо проводити згідно структурної схеми пристрою, яка зображена на рис. 3.10. Згідно із [62] існує три види з'єднання окремих блоків: послідовне, паралельне та зустрічно-паралельне.

Враховуючи структурну схему ультразвукового пристрою (рис. 3.10), представимо схему накопичення сумарної похибки розробленого пристрою, на рис. 3.12.

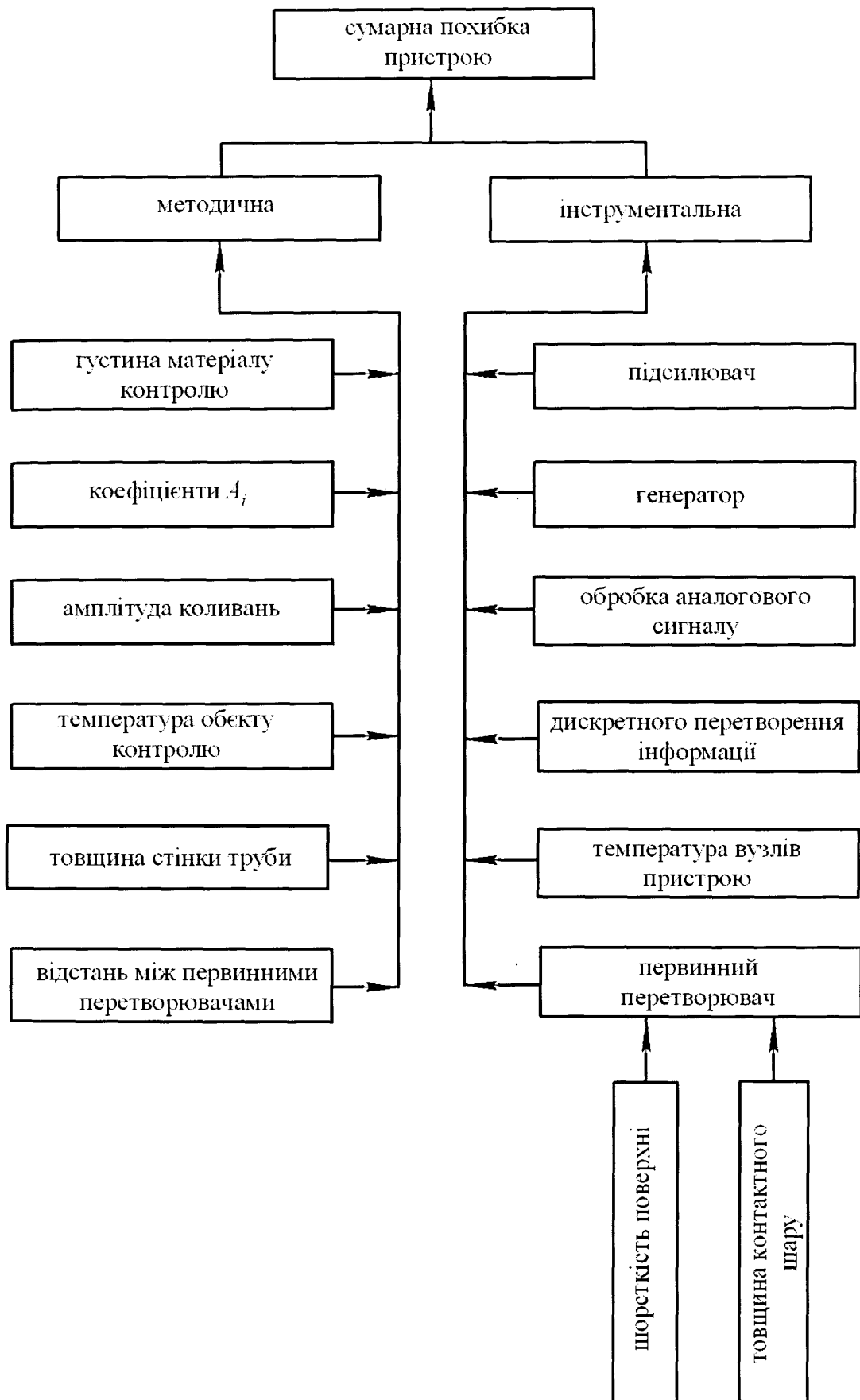


Рис. 3.12. Схема накопичення сумарної похибки пристрою

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

3.5.1 Аналіз інструментальних похибок розробленого пристрою

Визначення сумарної інструментальної похибки проведемо за правилами розрахунку похибок згідно структурної схеми, зображеної на рис. 3.12. З цією метою спершу розрахуємо сумарні похибки послідовно з'єднаних блоків. Перша група послідовно з'єднаних блоків є така: підсилювач, генератор, первинний перетворювач, похибка від товщини контактної шари та шорсткості поверхні об'єкту контролю. До другої групи послідовно з'єднаних блоків входять: блок обробки аналогового сигналу, температурна похибка, блок дискретного перетворення інформації.

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

$$\delta_{inc} = \frac{\delta_1 \cdot \delta_2}{\delta_1 + \delta_2}, \quad (3.11)$$

де δ_1 - сумарна похибка першої групи;

δ_2 - сумарна похибка другої групи.

Загальна похибка блоку підсилювача визначається на основі теорії ймовірності, яка враховує долю випадковості в розподілі похибок вхідних параметрів в межах допуску, та ймовірність взаємного впливу елементів на монтажній платі [62].

В загальному випадку інструментальну похибку Δ_{in} можна визначити за допомогою залежностей [62]:

$$\Delta_{in} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial y(x)}{\partial x_i} \Delta x_i, \quad (3.12)$$

де ∂x_i - і-тий аргумент залежностей вимірювальної величини;

Δx_i - абсолютне значення похибки вимірювального параметра;

$y(x)$ - аналітична залежність вихідного сигналу пристрою від всіх параметрів, які впливають на інструментальну похибку.

Отже, похибку підсилювача визначаємо за допомогою рівняння [62]:

$$K_n = \frac{K_0}{1 + \beta \cdot K_0}, \quad (3.13)$$

де K_0 - коефіцієнт підсилення;

β - коефіцієнт зворотного зв'язку.

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

$$\Delta K_n = \frac{\partial K_n}{\partial \beta} \Delta \beta + \frac{\partial K_n}{\partial K_0} \Delta K_0 = \frac{-K_0^2}{(1 + \beta \cdot K_0)^2} \Delta \beta + \frac{1}{(1 + \beta \cdot K_0)^2} \Delta K_0. \quad (3.14)$$

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

Похибка генератора буде [62]:

$$K_z = \frac{K_{z0}}{1 - \beta_z \cdot K_0}, \quad (3.15)$$

де K_{z0} - коефіцієнт підсилення;

β_z - коефіцієнт зворотного зв'язку.

$$\Delta K_z = \frac{\partial K_z}{\partial \beta_z} \Delta \beta_z + \frac{\partial K_z}{\partial K_{z0}} \Delta K_{z0} = \frac{-K_{z0}^2}{(1 - \beta_z \cdot K_{z0})^2} \Delta \beta_z + \frac{1}{(1 - \beta_z \cdot K_{z0})^2} \Delta K_{z0}. \quad (3.16)$$

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

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

$$\Delta Y_\delta(t) = Y(t) - Y^*(t), \quad (3.17)$$

де t - час.

На інтервалі дискретизації ΔT похибка оцінюється за такими параметрами:

- найбільшим відхиленням;
- середнім квадратичним відхиленням σ_{sam} :

$$\sigma_{sam} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} (\Delta Y_\delta(t))^2 dt}, \quad (3.18)$$

- інтегральною похибкою ε_Σ :

$$\varepsilon_{\Sigma} = \int_0^{\Delta T} (\Delta Y_{\delta}(t)) dt . \quad (3.19)$$

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

$$Y^*(t) \equiv [Y_1 \dots Y_m] \equiv \sum_{i=1}^{m/2} M_i \cdot \cos(2\pi \cdot Y_i / m + \theta_i) = \sum_{i=1}^{m/2} fn_{base} , \quad (3.20)$$

де $Y_1 \dots Y_m$ - множина точок дискретного перетворення;

M_i - амплітуда гармонік;

θ_i - фаза гармонік.

Відносна похибка дискретизації вимірюваного сигналу буде рівною [63]:

$$\delta t_{\delta} = \sqrt{\frac{3 \sum_{i=0}^{m/2} \|fn_{base}\|^2}{\Delta T (2^k - 1)^2}} , \quad (3.21)$$

де k - розрядність квантування.

Сумарна відносна похибка дискретного перетворення інформації буде визначатись:

$$\delta_{\Sigma\delta} = \sqrt{\frac{\sigma_{sam}^2}{\varepsilon_{\Sigma}} + \delta t_{\delta}} . \quad (3.22)$$

Сумарна похибка $\delta_{\Sigma\delta}$ дискретного перетворення сигналу із частотою, що дорівнює частоті основної ультразвукової хвилі 100 кГц, здійсненого аналого-

цифровим перетворювачем із частотою дискретизації 3 МГц та розрядністю квантування 14 складає 0,15%.

Для визначення похибок контролю від мікронерівностей на поверхні об'єкту контролю розглянемо та проаналізуємо їх вплив на границі розділу поверхні п'єзоперетворювача та об'єкта контролю. При проведенні контролю матеріалів акустичним методом нерівності на їх поверхні впливають на точність контролю та його чутливість. Ультразвукові хвилі, які генеруються п'єзоелектричним перетворювачем, починають поширюватися з вершин мікронерівностей поверхні об'єкта контролю в область впадин мікронерівностей з більшою швидкістю, ніж через контактний шар. Ця умова визначається різницею в швидкостях поширення ультразвукових коливань у контактному шарі та в об'єкті контролю. Швидкість поширення ультразвукових коливань у металі завжди більша, ніж в контактному шарі, так як основу його становить рідина. Якщо між даними ультразвуковими хвилями утворюється зсув фаз рівний 180° або кратний 180° , то після поширення хвиль у тілі об'єкта контролю проходить процес максимального загасання коливань. Рефракція, дифракція, яка приводить до різниці фаз сигналу на поверхні об'єкта контролю змінюють його форму та діють на його модель у межах поширення через об'єкт контролю.

Ультразвукова хвиля, яка поширюється через середовище металу, буде втрачати свою енергію внаслідок різних факторів. Найбільший вплив на загасання сигналу дає поширення ультразвуку через границю розділу поверхні п'єзоперетворювача та досліджуваної поверхні трубопроводу. Така поверхня може впливати на зменшення амплітуди коливання, що в свою чергу приведе до змін параметрів ультразвукової хвилі. Внаслідок різних методів виробництва або виплавки сталі, змінюється їх хімічні та фізико-механічні характеристики, які впливають на втрату енергії ультразвукової хвилі при поширенні через їх середовище. Ці втрати відображаються на трьох основних етапах, а саме при поширенні ультразвукової хвилі через дане середовище, адсорбуючий вплив середовища поширення та розсіювання коливної енергії. Дані втрати достатньо повно описані в роботах [64, 65].

Зосередимо увагу на загасанні ультразвукових хвиль, при їх поширенні в металах з різними степенями мікронерівностей [66]. У загальному випадку загасання можна показати в наступній формі [67]:

$$F = F_0 e^{-\alpha L}, \quad (3.23)$$

де F - тиск ультразвукової хвилі в місці вимірювання;

L - відстань, яку проходить ультразвукова хвиля;

F_0 - тиск ультразвукової хвилі, яка пройшла відстань L без врахування загасання;

α - коефіцієнт загасання.

Рівень відносного звукового тиску ультразвукової хвилі, яка поширюється становить:

$$P = 20 \lg \left(\frac{F_0}{F} \right). \quad (3.24)$$

На рис. 3.13 (а) та 3.13 (б) зображено нерівності на поверхні трубної сталі в стані поставки, а також на рис. 3.13 (в) та 3.13 (г) відповідно зображено поверхневі мікронерівності після їх механічної обробки. Як видно з рисунків, мікрогеометрія поверхонь металу є різною.

Розглянемо поширення ультразвукової хвилі між точками A та B об'єкта контролю, що зображено на рис. 3.13 (а). Втрата рівня звукового тиску для хвилі, яка поширюється між даними двома точками становить:

$$P_1 - P_2 = 20 \lg \left(\frac{F_1}{F_2} \right), \quad (3.25)$$

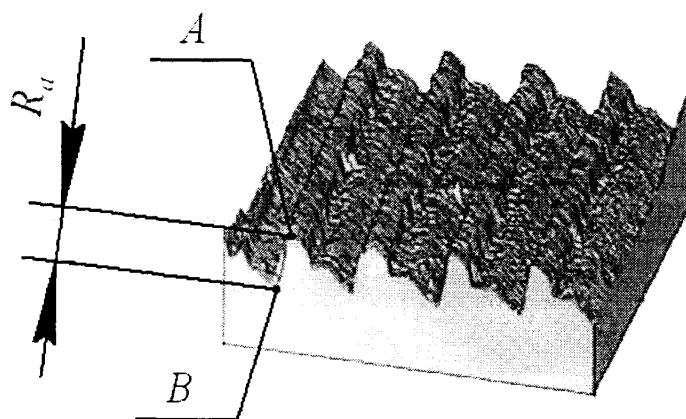
де P_1 - рівень відносного звукового тиску ультразвукової хвилі, яка поширюється в точці A ;

P_2 - рівень відносного звукового тиску ультразвукової хвилі, яка поширюється в точці B ;

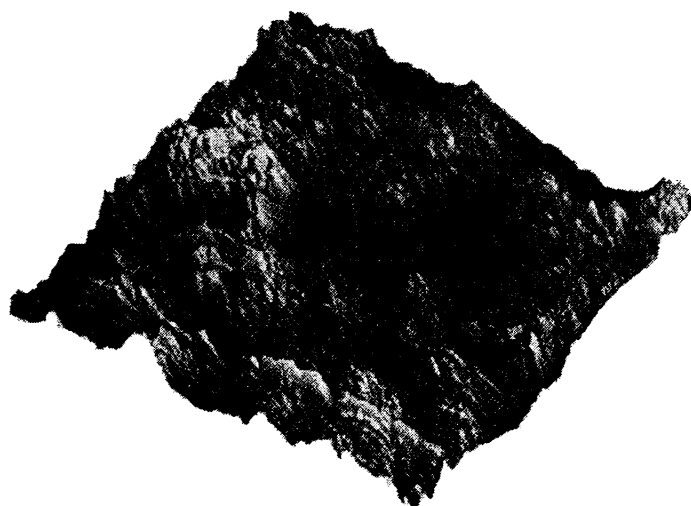
F_1 - тиск ультразвукової хвилі в точці A ;

F_2 - тиск ультразвукової хвилі в точці B .

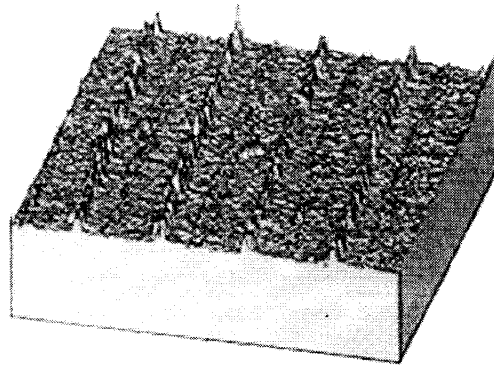
Дані точки A та B знаходяться на контактній поверхні. Точка A знаходиться на вершині мікронерівностей поверхні; та точка B – вхід ультразвукової хвилі в об'єкт контролю, яка знаходиться на впадині мікронерівності поверхні. Відстань між даними точками A та B і буде рівна висоті мікронерівностей поверхні об'єкта контролю, R_a .



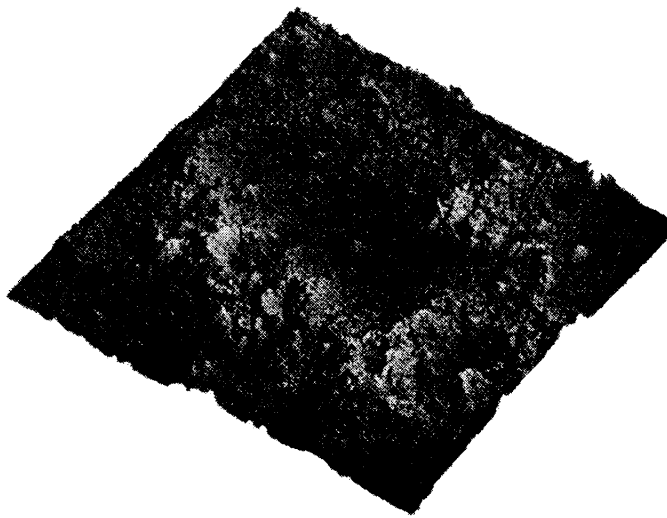
a)



б)



в)



г)

Рис. 3.13. Поверхневі нерівності об'єкта контролю

- а) схематичне зображення мікронерівностей на поверхні трубної сталі;
- б) фактичне зображення мікронерівностей на поверхні трубної сталі;
- в) схематичне зображення мікронерівностей на поверхні трубної сталі після механічної обробки;
- г) фактичне зображення мікронерівностей на поверхні трубної сталі після механічної обробки.

Виходячи з рівнянь (3.23) та (3.25) враховуючи, що загасання вимірюється в дБ, можна записати:

$$\alpha L = 20 \lg \left(\frac{F_1}{F_2} \right). \quad (3.26)$$

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

$$\alpha = \frac{20 \lg \left(\frac{F_1}{F_2} \right)}{2L} = \frac{10 \lg \left(\frac{F_1}{F_2} \right)}{L}. \quad (3.27)$$

Дану форму рівняння (3.27) використовуємо при експериментальних дослідженнях коефіцієнта загасання по відношенню до величини мікронерівностей поверхні об'єкта контролю, вважаючи всі інші фактори впливу на коефіцієнт загасання незмінними.

Для проведення експериментальних досліджень були вибрані зразки в кількості 3 шт довжиною 120 мм, з різною висотою поверхневих нерівностей (рис. 3.14).

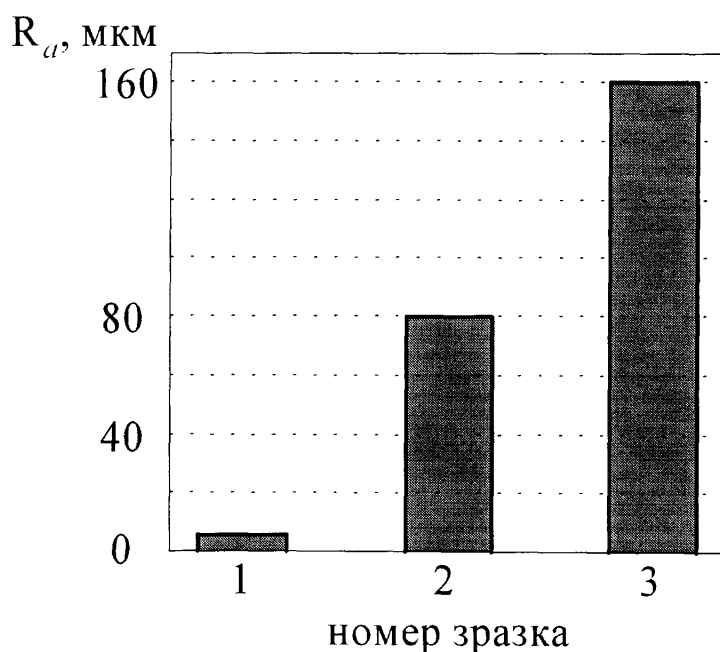
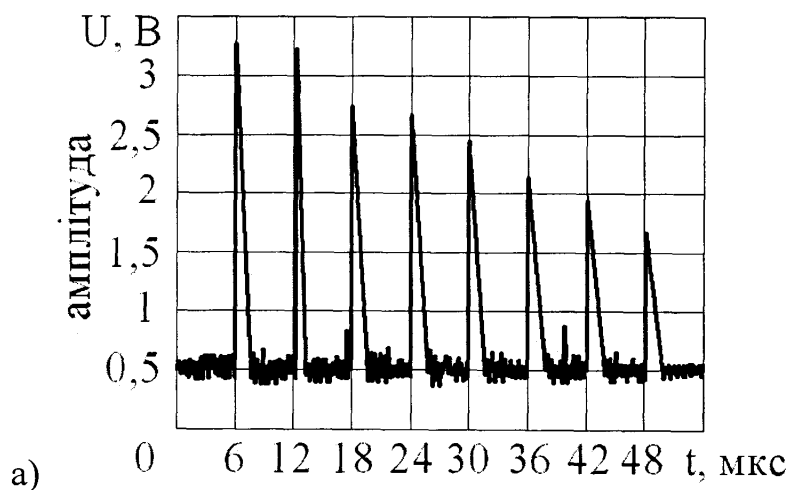


Рис.3.14. Зразки для експериментальних досліджень

Дані зразки виготовлені з сталі Х60, яка використовується для виробництва прямошовних труб діаметром 1420 мм з товщиною стінки 20 мм. Шляхом механічної обробки зразкам надавалась різна висота мікронерівностей на поверхні, яка буде використовуватись для досліджень, а саме 5 мкм, 80 мкм та 160 мкм. На поверхнях зразків визначались параметри мікронерівностей за допомогою профілографа-профілометра мод. 252. Основний параметр, який визначався, це висота вершин мікронерівностей відносно впадин на поверхнях зразків. Ультразвукове дослідження проводилось луно-імпульсним методом з використанням поздовжніх ультразвукових хвиль з п'єзоелектричним перетворювачем частотою 2,5 МГц (середній діаметр 10 мм), за допомогою ультразвукового пристрою [68].

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

Числові значення параметрів поверхневих нерівностей об'єкта контролю використовуються, як незалежні змінні, від яких буде залежати акустичний ультразвуковий коефіцієнт загасання. Рис. 3.15 ілюструє форму луно-сигналу, яка зареєстрована для різних станів поверхні.



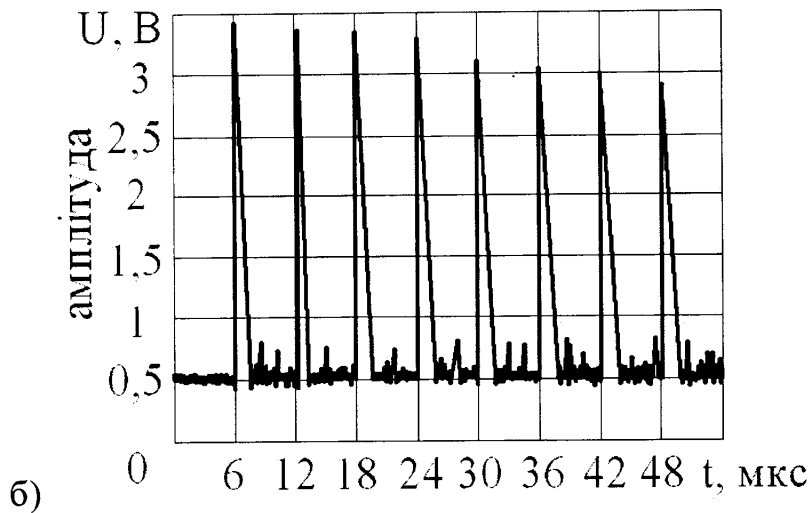


Рис. 3.15. Форма луно-сигналів ультразвукових хвиль

- а) форма луно-сигналів ультразвукових хвиль при дослідженні поверхневих нерівностей висотою 160 мкм;
 б) форма луно-сигналів ультразвукових хвиль при дослідженні поверхневих нерівностей висотою 5 мкм.

Як видно із рис. 3.15, швидкість загасання амплітуди сигналу є більшою при більшій величині нерівностей досліджуваної поверхні. При проведенні експериментальних досліджень брався 4-й луно-сигнал оскільки сусідні луно-сигнали мають малу величину різниці амплітуд і є велика похибка їх визначення.

$$\alpha = \frac{10 \left[\lg \left(\frac{F_1}{F_2} \right) - \lg(N) \right]}{L}, \quad (3.28)$$

де N - номер луно-сигналу.

Використовуючи результати механічної обробки (висоту мікронерівностей на поверхні взірців) та розрахункові коефіцієнти загасання α визначені за допомогою рівняння (3.28), отримаємо графік залежностей $\alpha = f(R_a)$, який показано на рис. 3.16.

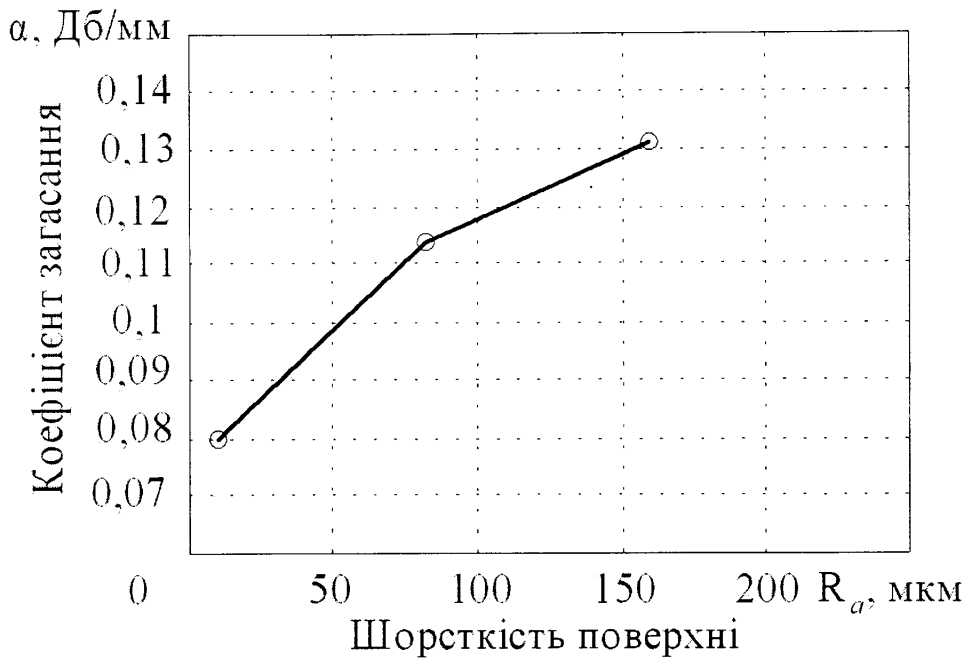


Рис. 3.16. Залежність коефіцієнта загасання ультразвукових хвиль від величини поверхневих мікронерівностей

Рис. 3.16 показує, що збільшення величини поверхневих мікронерівностей приводить до помітного збільшення коефіцієнта загасання ультразвукових хвиль. Таке явище може привести до великої втрати коливної енергії ультразвукової хвилі при передачі її через границю розділу поверхні п'єзоперетворювача та досліджуваної поверхні об'єкта контролю. Крім того, товщина контактного шару, який заповнює проміжок між поверхнею давача та поверхнею об'єкта контролю, збільшується при більшій величині нерівностей поверхні об'єкта контролю і навпаки. Внаслідок цього такий проміжок, як границя розділу поверхонь двох середовищ, є причиною додаткової втрати енергії звукової хвилі, яка передана до об'єкта контролю, що в свою чергу також збільшує коефіцієнт загасання.

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

Розглянемо похибку ультразвукового первинного перетворювача. Похибка первинного перетворювача обумовлюється різними причинами, основними із яких є згідно [63]:

- неточність схемно-конструктивної реалізації перетворення електричного сигналу у механічний та навпаки $\Delta Y_{скр}$;
- відхилення коефіцієнта перетворення від заданого значення за рахунок похибок параметрів використаних конструктивних елементів $\Delta Y_{кн}$;
- похибка операційного перетворення інформаційного сигналу $\Delta Y_{оп}$;
- дія зовнішніх факторів безпосередньо на інформаційний сигнал чи на параметри конструктивних елементів $\Delta Y_{зф}$.

Похибка від неточності схемно-конструктивної реалізації визначається технічною документацією на функціональний перетворювач та схемою вторинного пристрою, яка враховує вихідні параметри перетворювача, та забезпечує можливість настроювання під відмінності окремих перетворювачів і зменшує значення похибки зазначеної в документації. Для ультразвукового первинного перетворювача із номінальною частотою 100 кГц похибка $\Delta Y_{скр}$ дорівнює 0,05 %.

Похибка $\Delta Y_{кн}$ визначається, як математичне очікування від суми первинних похибок параметрів використаних конструктивних елементів:

$$\Delta Y_{кн} = M \left[\sum_{i=1}^n \Delta x_i \right], \quad (3.29)$$

де Δx_i - первинні похибки використаних конструктивних елементів;

n - кількість похибок конструктивних елементів;

M - математичне очікування.

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

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

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

Залежність швидкості ультразвуку в металах можна обчислити із такої рівності [12]:

$$\Delta c \equiv \alpha T + \frac{\omega^2}{2 \cdot \rho \cdot v^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \xi + k + \Delta f_p \right], \quad (3.30)$$

де α - коефіцієнт теплового розширення;

T - температура;

ω - частота акустичної хвилі;

ρ - густина;

v - коефіцієнт зміни швидкості акустичної хвилі, спричинений процесами релаксації термодинамічної системи;

η - коефіцієнт зсувної в'язкості;

ξ - коефіцієнт об'ємної в'язкості;

k - коефіцієнт теплопровідності;

Δf_p - зміна частоти релаксації термодинамічної системи.

Похибка $\Delta Y_{зф}$, із врахуванням (3.30) дорівнює 0,9 %.

Сумарна похибка первинного перетворювача дорівнює 1,65 %.

Похибка від товщини контактного шару обчислена в праці [69] і дорівнює 0,004%.

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

Розглянемо похибку від зміни температури. Температурна похибка відноситься до додаткових похибок і є одним із основних чинників, що визначає похибку засобу вимірювання [62]. Зміна температури впливає практично на характеристику всіх конструктивних вузлів. Найбільший вплив зміна температури вносить на швидкість ультразвукових коливань та роботу первинного перетворювача. Похибка зміни швидкості ультразвуку в об'єкті контролю від зміни температури визначена в (3.30).

Із блоків вторинного пристрою, температурна залежність не врахована тільки для блоків обробки аналогового сигналу та дискретного перетворення інформації. Температурна похибка для цих блоків визначалась шляхом вимірювання зміни вхідного сигналу частотою 100 кГц на виході блоків із кроком зміни температури 10 °С в діапазоні 0...50 °С.

Визначена відносна похибка температури для блоку обробки аналогового сигналу складає 0,6%, а для блоку дискретизації 0,3%. Сумарна температурна похибка дорівнює 0,9%.

Отже, сумарна похибка першої групи блоків δ_1 рівна 2,054 %. Сумарна похибка другої групи блоків δ_2 рівна 1,15 %. Згідно (3.11) сумарна інструментальна похибка $\delta_{ин}$ двох груп рівна 0,74 %.

3.5.2 Аналіз методичних похибок контролю

Методичну похибку визначення величини напружено-деформованого стану трубопроводів за розробленою методикою обрахуємо за схемою накопичення (рис. 3.12)

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

При визначенні величини напружень акустопружні коефіцієнти A_i (2.77) визначаються експериментальним методом з допомогою розривної машини за допомогою ультразвукових вимірювань. При такому методі вносяться похибки від ультразвукового пристрою, що становлять 0,12 %.

Похибка вимірювання температури газу складає 0,5 °C. При визначенні температури потрібно вважати, що температура газу не є сталою по довжині ділянки трубопроводу, якою поширюється ультразвукова хвиля, зміна її складає 0,2 °C на 1 м. Методична похибка від варіації температури дорівнюватиме 1,1 %.

Для визначення навантажень розробленою методикою проводиться користування даними про товщину стінки трубопроводу. Товщину стінки труби визначаємо приладом з похибкою 0,4%. Похибка від товщини стінки труби складає $\delta_m = 0,4 \%$.

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

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

Висновки до розділу

1. Удосконалено ультразвуковий пристрій для визначення швидкості поширення ультразвукових коливань, що дало можливість підвищити точність вимірювання швидкості поширення ультразвукових коливань.
2. Досліджено та проаналізовано вплив границі розділу двох середовищ, зокрема поверхні п'єзоперетворювача та поверхні об'єкта контролю по відношенню до коефіцієнта загасання ультразвукових хвиль, що впливає на чутливість проведення контролю.
3. Набула подальшого розвитку модель чутливого елемента ультразвукового первинного перетворювача представлена у вигляді електричної схеми-аналога, що полягає у врахуванні демпфувальних параметрів коливання п'єзопластини та наявності серії бічних резонансних частот, що дало можливість більш точно врахувати вплив амплітудно-частотної характеристики акустичного тракту на ультразвуковий сигнал, збільшити точність визначення його параметрів.
4. Проведені лабораторні дослідження впливу поверхневих нерівностей на коефіцієнт загасання ультразвукової хвилі і встановлено, що ці параметри знаходяться в прямопропорційній залежності один відносно іншого, що дає можливість за допомогою коефіцієнта загасання ультразвукових хвиль описувати та оцінювати рівень мікронерівностей на поверхні об'єкта контролю, а також представлені експериментальні результати, які подані у вигляді графічної залежності акустичного коефіцієнта загасання ультразвукових хвиль, які поширюються в металі, поверхня якого має різні степені мікронерівностей.
5. Проведено аналіз складових загальної похибки розробленого пристрою за допомогою якого, виконується запропонований метод контролю, та розроблена методика її визначення.
6. Встановлено, що методична похибка становить 4,62 %, інструментальна похибка 0,74 %. Сумарна похибка становить 5,36 %.

РОЗДІЛ 4

ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ КОНТРОЛЮ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ

4.1 Підготовка та проведення лабораторних досліджень напружено-деформованого стану металу трубопроводу

4.1.1 Обладнання та засоби контролю

Для навантаження зразків при проведенні випробування на одноосний розтяг використовується стандартна випробувальна машина моделі РМ-50 з захватами, які призначені для плоских зразків, що мають дві головки з отворами діаметром 25 мм. Машина повинна бути оснащена додатковою системою, яка дозволяє реєструвати навантаження на зразку в процесі його деформування. Розривна дослідна машина РМ-50 з допустимим навантаженням 50 т призначена для статичних випробувань на розтяг зразків металів та сплавів, а також виробів з них. Машина може працювати в діапазоні температур 15...35,5 °С, при відносній вологості 40...80%. Машина має три діапазони робочих навантажень. Швидкість руху рухомого захвату без навантаження змінюється в межах 0...200 мм/хв. Машина являє собою установку, яка складається з навантажувального пристрою та пульта керування. Навантажувальний пристрій призначений для деформування та руйнування дослідного зразка. Пульт керування служить для керування процесом навантаження зразка, а також для контролю за величинами навантаження та деформації в процесі навантаження. Пульт керування включає насосну установку з системою керування, вимірювач сили та діаграмний апарат для запису діаграми «навантаження - деформація». Живлення машини електроенергією проводиться від трифазної мережі змінного струму напругою 380 В.

Для вимірювання поздовжньої та поперечної деформації під час навантаження стандартних зразків при випробуваннях на одноосний статичний розтяг можуть використовуватись тензometri різних типів. Зокрема, для вимірювання поздовжньої деформації на зразках використовуємо тензомер з базою, яка рівна 80...100 мм та ніжками голкового типу, які оснащені тензодавачами з базою 15...20 мм. Тензомер встановлюється на робочій поверхні зразка після його розмітки.

4.1.2 Вибір зразків для контролю напружено-деформованого стану металу трубопроводу

Використовуючи метод випробування на розтяг зразків з метою визначення їх механічних властивостей, при виборі зразків будемо керуватися вимогами стандарту [71]. Основні вимоги даного стандарту наступні:

- вимоги, щодо вибору зразків, зокрема: місця вирізання заготовок для зразків, їх кількість, напрям поздовжньої осі зразків по відношенню до заготовки; рекомендації, щодо методів виготовлення зразків, їх якості, точності та габаритних розмірів;
- вимоги, щодо основного та допоміжного обладнання. Випробувальні машини повинні відповідати вимогам стандарту;
- вимірювальні інструменти повинні відповідати вимогам стандарту;
- вимоги, щодо підготовки до проведення випробувань;
- регламентують та описують порядок проведення випробувань та обробку отриманих результатів.

Тому, керуючись вимогами даного стандарту, обрано плоский зразок з голівкою (тип 1), який показаний на рис. 4.1.

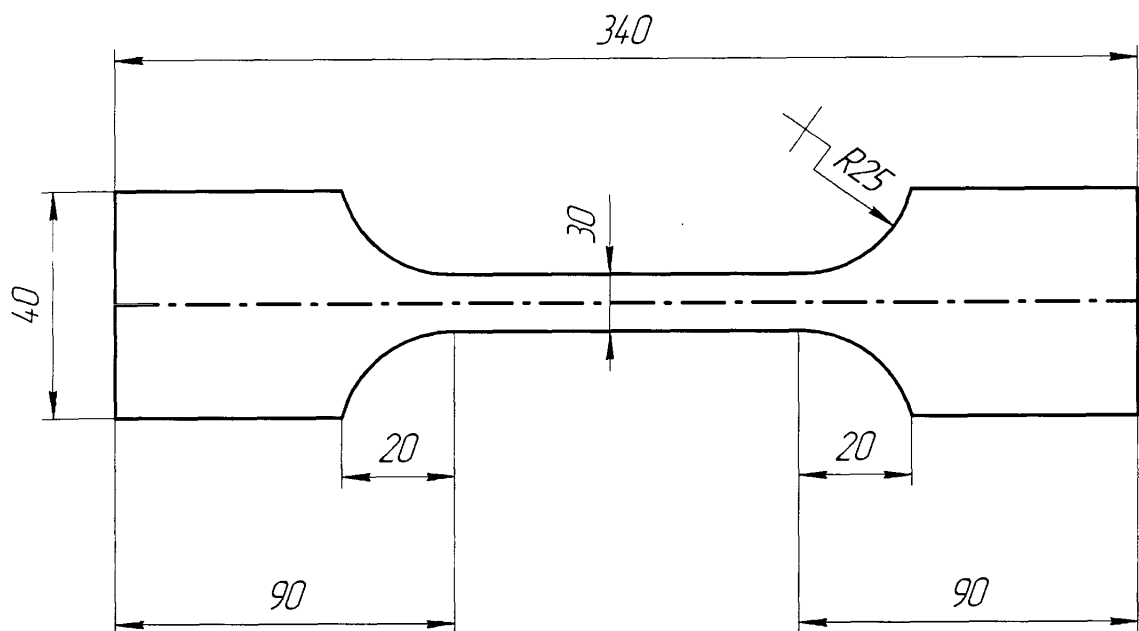


Рис. 4.1. Ескіз зразка для випробування на розтяг

Заготовка для виготовлення зразків вирізається з частини труби, яка орієнтована вздовж її осі, труба не знаходилась під впливом будь-яких навантажень, тобто стан труби не напружений, матеріал – сталь Х60. Дана сталь, виробником якої є фірма METAL INDUSTRIES LTD KASHIMA STEEL WORKS використана для будівництва магістральних газопроводів, які на сьогоднішній день експлуатуються в Україні. При виготовленні зразків застосовують міри, які виключають можливість зміни властивостей металу при нагріванні або наклепі, які можуть виникнути в результаті механічної обробки (охолодження, відповідні режими обробки, глибина різання при останньому проході не повинна перевищувати 0,3 мм). Зразки вирізаються з частини труби товщиною 20 мм, місце розташування та напрямок поздовжньої осі зразка показані на рис. 4.2.

Для визначення достовірності результатів досліджень ультразвуковим методом використовуємо теоретичний розрахунок напружень, тензометричний та магнітний методи визначення напружень.

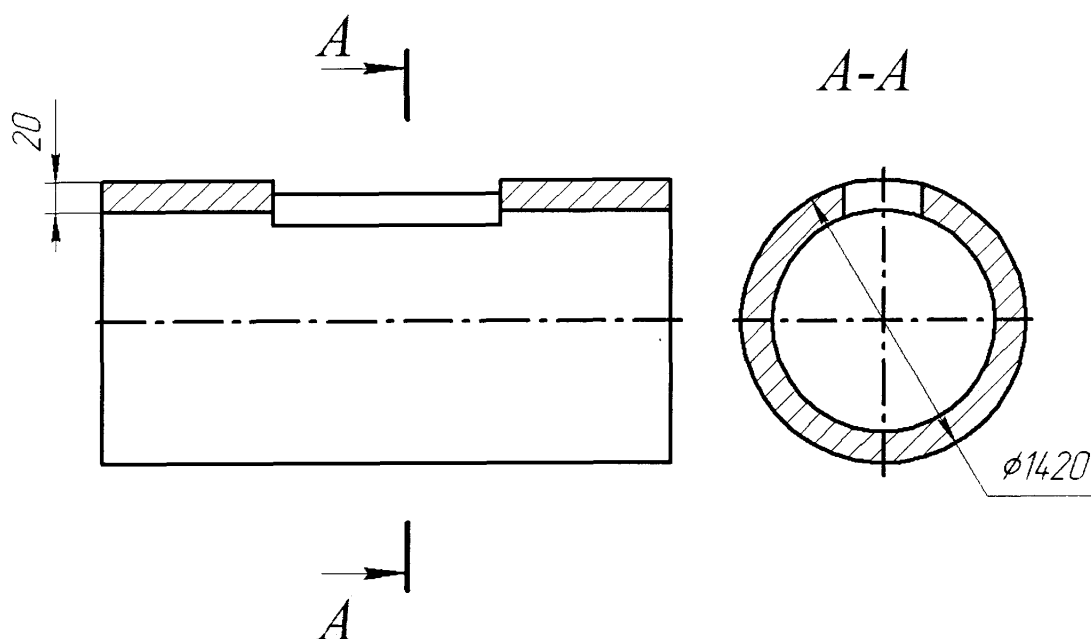


Рис. 4.2. Ескіз місця вирізання заготовки для зразка

4.1.3 Аналіз характеристик тензодавачів, які використовуються для проведення контролю

Тензометричним методом за допомогою мостової схеми вимірювались величини деформацій зразків використовуючи спеціальні фольгові тензодавачі марки КФ5П1. Тензодавачі марки КФ5П1 виготовляються із різними габаритними розмірами від 1,5 мм до 4,7x29,5 мм. Основні характеристики даних тензометричних здавачів показано в табл. 4.1:

Таблиця 4.1

Характеристики тензодавачів типу КФ5П1

Назва характеристики	Значення
Номінальний електричний опір, Ом	100
Температурний коефіцієнт лінійного розширення 1/°C	$12 \cdot 10^{-6}$
Габаритні розміри, мм	8,3x4,7

продовження табл.4.1

Назва характеристики	Значення
Граничне відносне відхилення значення опору в партії від номінального, %	0,35
Середнє значення чутливості при нормальних умовах	2,1
Середнє квадратичне відхилення значення чутливості при нормальних умовах	0,02
Середнє значення температурного коефіцієнта чутливості від температури	0,9
Середнє квадратичне відхилення значення коефіцієнта чутливості від температури	0,02
Мінімальне значення опору ізоляції в робочій зоні температур, МОм	500
Матеріал підкладки	бакелітова плівка
Максимальне значення струму живлення, мА	25
Діапазон робочих температур, °С	-50 ...+70
Матеріал	константанова фольга

Для компенсації температурних впливів було використано два підходи, з'єднання тензодавачів у різні плечі моста та зміною напруги живлення.

4.2 Послідовність проведення досліджень величини напружено-деформованого стану зразків у лабораторних умовах

Випробування зразків виготовлених із сталі марки Х 60 проводилось за допомогою розривної машини моделі РМ-50 (робоче зусилля 50 т) та згідно рекомендацій державного стандарту [71].

Перш, ніж почати випробування зразків, необхідно переконатись в справності розривної машини, шляхом зовнішнього огляду та опробування. Вибирається робочий діапазон навантажень, виходячи з розмірів дослідних зразків, при цьому необхідно врахувати те, щоб максимальне вимірюване по дослідом зусилля відповідало третій чверті використовуваній при цьому шкалі навантажень.

Перед початком досліджень поверхня зразка була прошліфована, керуючись попередніми вимогами, для забезпечення рівномірного прилягання та контакту протектора ультразвукового перетворювача. Одним з суттєвих факторів, які впливають на якість отриманих результатів, є необхідність дотримання центрування перетворювачів відносно осей зразка, а також контролювати надійність з'єднання ультразвукових перетворювачів з зразком. Після закінчення перевірки та настроювання апаратури приступають до дослідження зразків в такій послідовності:

- встановлюємо зразок в захватах розривної машини та вибираємо за допомогою переміщення нижньої траверси існуючі зазори;
- при проведенні тензометричних вимірювань тензометричні резистори наклеювались на поверхню досліджуваного зразка з допомогою клею типу «Ціакріл» у поздовжньому та поперечному напрямках, відносно дії сили розтягу;
- встановлюємо досліджуваній зразок у розривну машину з допомогою головок;
- встановлюємо первинний ультразвуковий перетворювач для вимірювання величини напружень у трьох взаємоперпендикулярних напрямках;
- з'єднуємо п'єзоелектричні перетворювачі з ультразвуковим пристроєм з допомогою кабелів;
- проводимо тензометричні вимірювання приладом ИДЦ-1 для фіксації первинних показів;
- навантажуюємо зразок з дискретністю 30 кН, з швидкістю 1 мм/хв;
- проводимо послідовно зняття показів;

4.3 Порівняльний аналіз результатів досліджень напружено-деформованого стану металу зразка

Для порівняння результатів досліджень та їх аналізу використовуємо теоретичний, тензометричний та магнітний методи.

Теоретичний розрахунок напружень проводимо згідно [71]:

$$\sigma_m = \frac{F}{S}, \quad (4.2)$$

де F - прикладене зусилля до зразка;

S - площа поперечного перерізу зразка.

Визначаємо напруження, враховуючи величину деформації:

$$\sigma_\sigma = \frac{E \cdot \varepsilon}{\mu}, \quad (4.3)$$

де E - модуль Юнга (модуль пружності 2 роду);

μ - коефіцієнт Пуассона;

ε - рівень деформації.

Для розрахунку напружень ультразвуковим методам використовуємо аналітичні залежності (2.76) та (2.77).

Магнітним методом напруження визначали за допомогою приладу "КРМ-Ц-К2М", який вимірює величину коерцитивної сили під час навантаження зразка. Дефектоскоп УД4-Т використовувався при ультразвуковому контролі, відстань між п'єзоперетворювачами була фіксована та не змінювалась при видовженні зразка під час розтягу (рис 4.3).

Дослідний експеримент проводився на п'яти зразках. Зведені до середнього значення результати випробувань представлені в табл. 4.2.

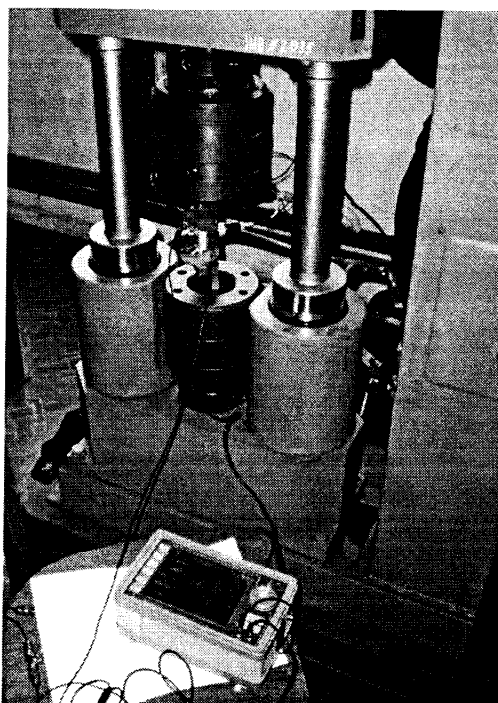


Рис. 4.3. Проведення експериментальних досліджень ультразвуковим методом

Таблиця 4.2

Результати визначення напружень зразка використаними методами

Навантаження, кН	σ_m , МПа	σ_d , МПа	σ_m , МПа	$\sigma_{ультр}$, МПа
0	0	0	0	0
30	50	15,1	11,6	32,7
60	100	47,8	34,8	78,3
90	150	83,2	56,2	122,9
120	200	118,9	119,5	178,8
150	250	171,3	204,3	249,6
180	300	244,2	279,1	299,7
210	350	306,9	335,6	354,5
240	400	375,5	392,4	414,6
270	450	452,3	456,7	459,9
300	500	556,1	488,1	520,1

На основі отриманих результатів побудовані графіки залежностей величини напружень, які виникають у зразку внаслідок його навантаження для різних методів визначення величини напружень (рис. 4.4).

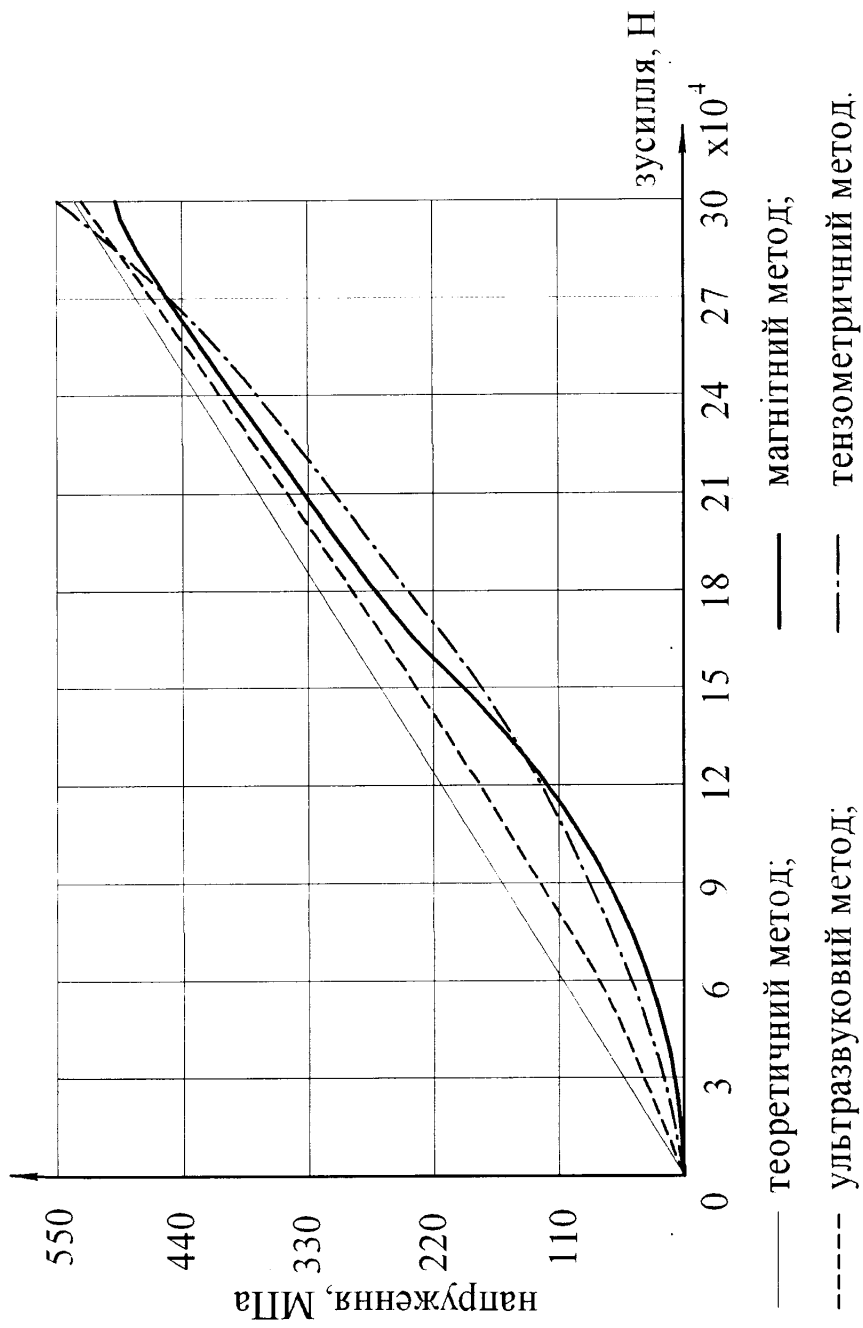


Рис. 4.4. Залежність величини напружень від прикладеного зусилля, визначених різними методами

Також наведемо результати лабораторних досліджень залежності швидкості поширення поздовжньої ультразвукової хвилі з частотою коливання 5 МГц від величини напружено-деформованого стану зразків, виготовлених з даної сталі [95]. На рис. 4.5 та рис. 4.6 показані результати лабораторних досліджень, зміни швидкості поширення ультразвуку від величини напружень, ультразвуковим методом для зразка товщиною 11 мм.

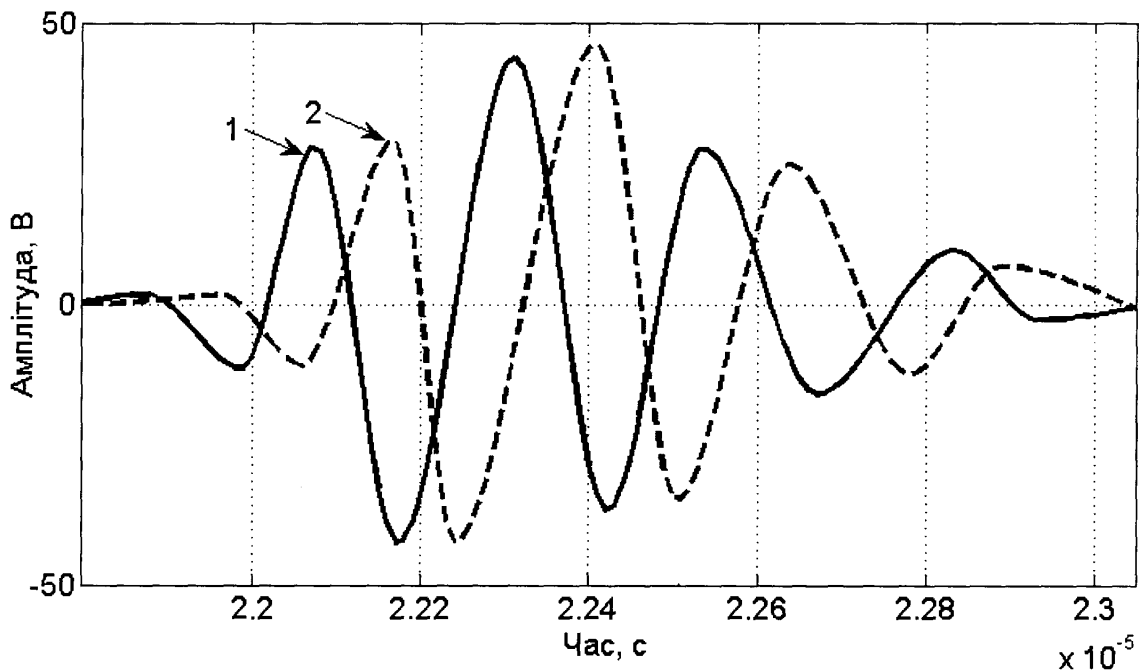


Рис. 4.5. Зміщення в часі сигналу ультразвукової поздовжньої хвилі від величини напружено-деформованого стану

- 1- напруження в зразку відсутні;
- 2- напруження в зразку дорівнюють 376 МПа.

Вимірювання проведені протягом всього процесу розтягу зразка привели до виявлення закономірностей між швидкістю поширення ультразвукових хвиль та величиною напружень, які виникають в зразку.

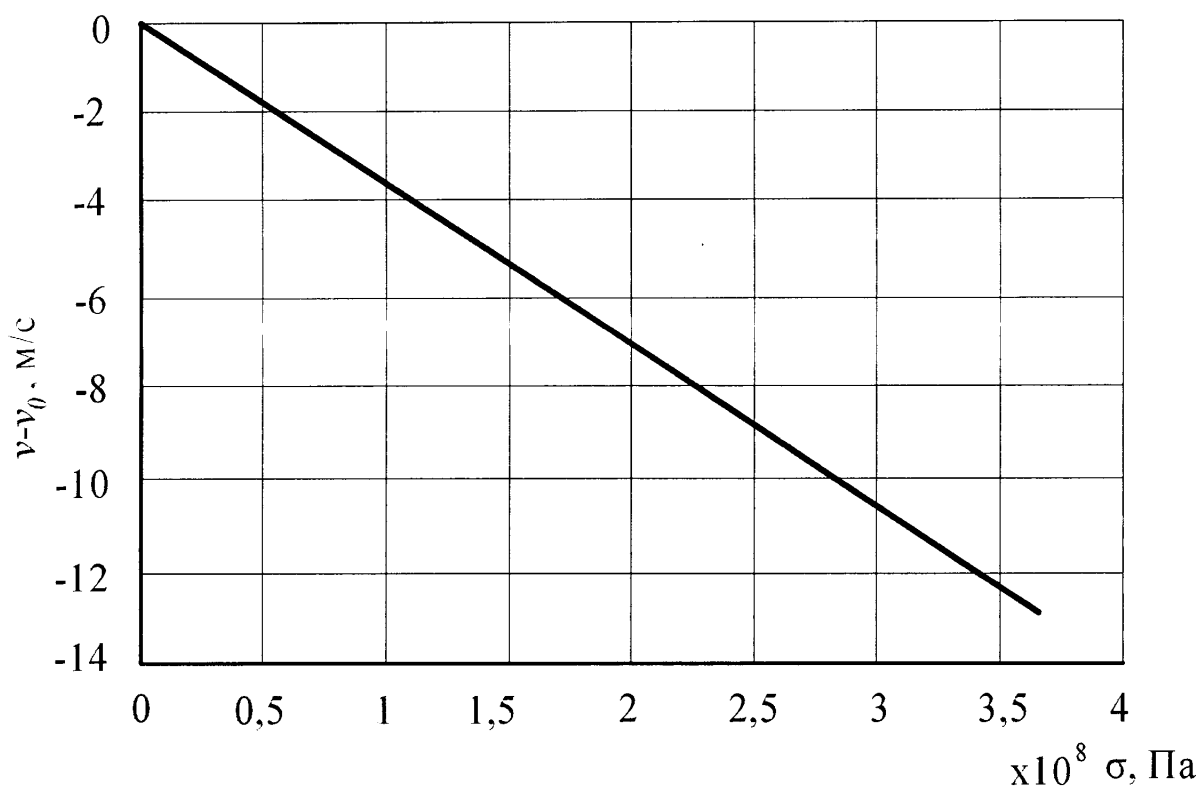


Рис. 4.6. Зміна швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі від величини напружено-деформованого стану

v_0 , v - відповідно швидкість ультразвуку в зразку до та під час збільшення зовнішнього розтягуючого зусилля;

σ - напруження.

Висновки до розділу

1. Проведено дослідження зразків виготовлених із металу магістрального трубопроводу сталі марки Х60 в лабораторних умовах випробуванням на розтяг. Дані експерименти підтвердили висновки про залежність швидкості поширення ультразвуку в металі від його напружено-деформованого стану, основним параметром якого, є величина напружень.
2. Згідно отриманих результатів встановлено, що визначення напружень тензOMETричним методом є менш ефективним у початковий момент навантажень в наслідок не чутливості методу на початку шкали вимірювань, що впливає на похибку вимірювань.

3. Доказано, що магнітний метод також є не чутливий на початку шкали вимірювань, та при досягненні металом напружень зони плинності внаслідок нелінійної залежності, що створює додаткову похибку.
4. Доказано, що ультразвуковим методом з достатньою точністю можна визначити напруження границі плинності металу, на відміну від використаних методів визначення величини напружень.
5. Недоліком використання тензометричних давачів для визначення деформацій є неможливість визначати величини залишкових напружень, які були набуті в процесі експлуатації. Натомість при використанні ультразвукового методу контролю є можливість визначення величини даних напружень.
6. Встановлено, що використання ультразвукового методу визначення напружено-деформованого стану металу труб є точнішим у порівнянні з тензометричним та магнітним, оскільки величини напружень визначені з допомогою ультразвукового методу для сталі Х60, є ближчі до значень величини напружень визначених теоретичним методом; показано, що розроблений ультразвуковий метод контролю технічного стану металу (сталь Х60) є найбільш ефективним.

РОЗДІЛ 5

ПРОВЕДЕННЯ НАТУРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

5.1 Основні положення

Знаючи тип, інтенсивність та допустимі граничні значення діючих напружень, можна робити висновок про цілісність та працездатність конструкції трубопроводу на ремонтній ділянці. Використання відповідних методів для розрахунку критичних напружень дозволяє визначити рівень допустимих навантажень, залишкову міцність та термін експлуатаційної придатності трубопроводу, що працює в області пружних деформацій.

При проведенні аналізу міцності конструкції трубопроводу користуються наступними критеріями:

- сили, які діють на елементи конструкції, створюють напружений стан, який не повинні перевищувати напруження границі плинності для запобігання великих деформацій;
- прикладені навантаження повинні бути нижчими, ніж граничні для запобігання втрати стійкості ділянки трубопроводу;
- об'ємно-пружні зв'язки повинні забезпечувати цілісність окремих елементів та конструкції в цілому.

Внутрішній тиск у трубопроводі є одним із основних навантажень, яке визначає режим його експлуатації. Тому при розрахунку товщини стінки труби виходять, із величини допустимих напружень, які створюються даним чинником. Внутрішній тиск у трубопроводі обумовлює виникнення тангенційних (кільцевих) напружень σ_x . Також внутрішній тиск у трубопроводі створює і поздовжні розтягуючі напруження σ_z . Торці ремонтних ділянок знаходяться під ґрунтом і не можуть при цьому вільно переміщатися у поздовжньому напрямі, що створює

виникнення напруженого стану. Під час тривалої експлуатації на трубопровід може впливати різна комбінація факторів впливу та навантажень, тому в загальному випадку напружений стан можна описати трьома головними напруженнями σ_x , σ_z і σ_y , напрям дії якого перпендикулярний до σ_x та σ_z . Отже в стінках трубопроводу діють об'ємні напруження різної величини та напрямку. Як критерій рівня напруженого стану для оцінки міцності ділянки трубопроводу приймається величини розрахункових напружень $\sigma_{роз}$, при цьому використовується четверта теорія міцності, та порівнюються з допустимим значенням напруження. За допустиме значення приймається допустиме значення напруження плинності матеріалу трубопроводу [73]:

$$\sigma_{роз} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2]} \leq \frac{[\sigma]}{n}, \quad (5.1)$$

де $[\sigma]$ – допустиме напруження плинності матеріалу трубопроводу,

n – коефіцієнт запасу міцності матеріалу трубопроводу.

5.2 Проведення контролю напружено-деформованого стану магістрального трубопроводу на ремонтній ділянці

Перед початком проведення контролю напружено-деформованого стану ремонтної ділянки магістрального трубопроводу, виконується підготовка даної ділянки в залежності від виду ремонтних робіт, використовуваних при цьому технічних засобів, природно-кліматичних та погодних умов, а також у відповідності з вимогами техніки безпеки і пожежної безпеки.

В загальному випадку послідовність проведення контролю напружено-деформованого стану лінійної підземної частини магістрального трубопроводу буде такою:

Виявлення місцезнаходження ділянки трубопроводу за допомогою різних типів трубошукачів, після виявлення місцезнаходження трубопроводу розбивають границі ремонтного котловану.

Проводиться розробка шурфу, при цьому звільняється від ґрунту ділянка трубопроводу за допомогою землерийних механізмів або вручну у відповідності з нормативними документами. Земляні роботи виконуються в два етапи. На першому етапі розробляється ґрунт до верхньої твірної труб. На другому етапі проводиться повне звільнення від ґрунту ремонтної ділянки трубопроводу при необхідності. Звільнення ділянки труби від ґрунту проводиться з двох сторін труби, при цьому необхідно врахувати можливість вільного доступу до трубопроводу обслуговуючого та ремонтного персоналу.

Очистка ремонтної ділянки трубопроводу проводиться також у два етапи: попередня після звільнення трубопроводу від ґрунту і утворення ремонтного котловану та кінцева. Очищення ділянки трубопроводу проводиться пневматичними, електричними з автономним живленням або механічними щітками, скребками, шліфувальними машинками. Перед початком проведення контролю напружено-деформованого стану ремонтної ділянки трубопроводу, необхідно визначити місця концентрації напружень (місце зварювання, заземлення, згинів), а також провести підготовку поверхні до чистоти $Rz=40$ мкм для проведення контролю рис. 5.1., площа зачистки для кожного вимірювання становить 150×150 мм².

Використовуючи відомі методи, необхідно визначити товщину стінки трубопроводу в місцях проведення контролю напружень.

Встановлюємо первинний перетворювач на поверхні труби (рис. 5.2), при цьому для кращого контакту в якості контактної шару використовуємо епоксидну смолу, в'язкість якої при температурі 25° С повинна дорівнювати 12 – 25 кг/м·с та проводимо регулювання положень ультразвукових п'єзоперетворювачів.

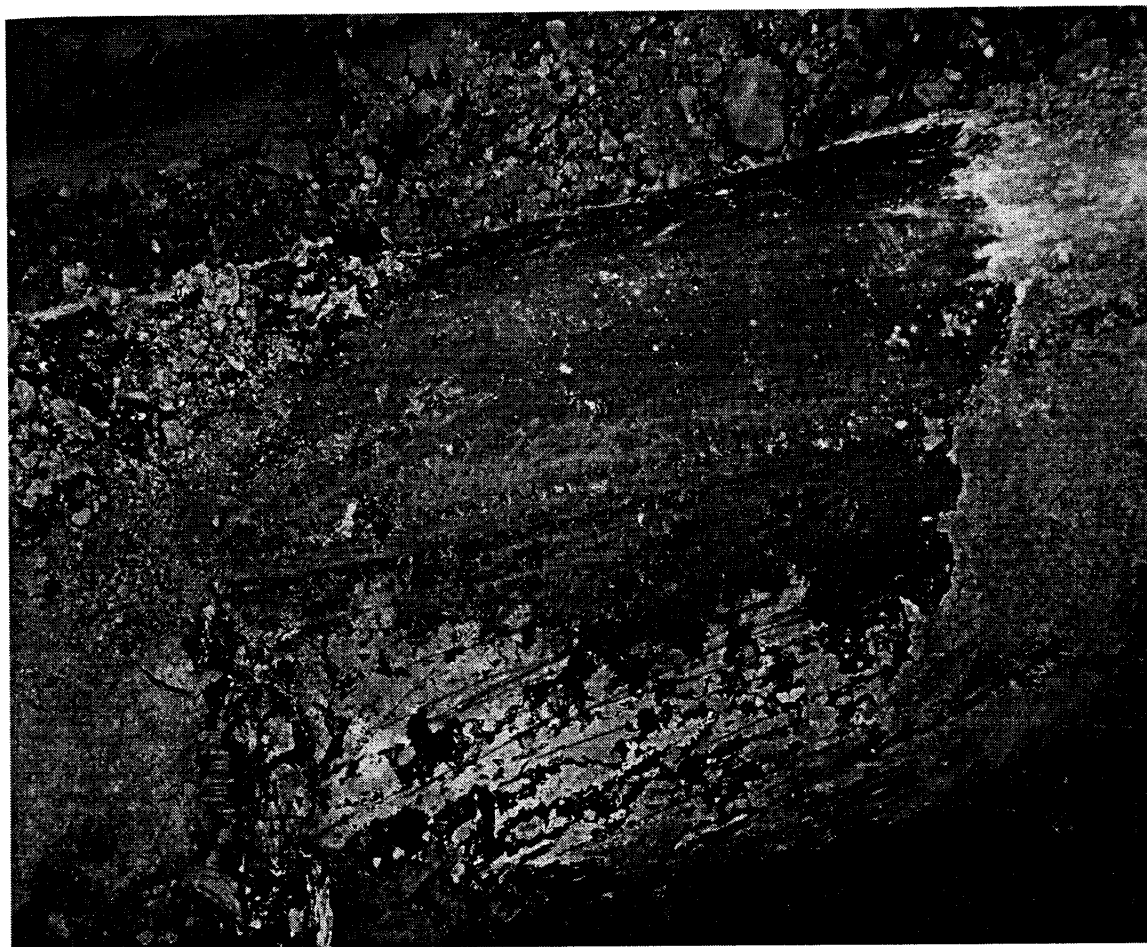


Рис. 5.1. Підготовка поверхні трубопроводу для проведення контролю напружено-деформованого стану

П'єзоелектричні перетворювачі первинного давача з'єднуються з ультразвуковим пристроєм через перемикач, який показаний на рис. 5.3. за допомогою коаксіальних кабелів [74]. Пристрій має нормалізований вихід для зв'язку з персональним комп'ютером.

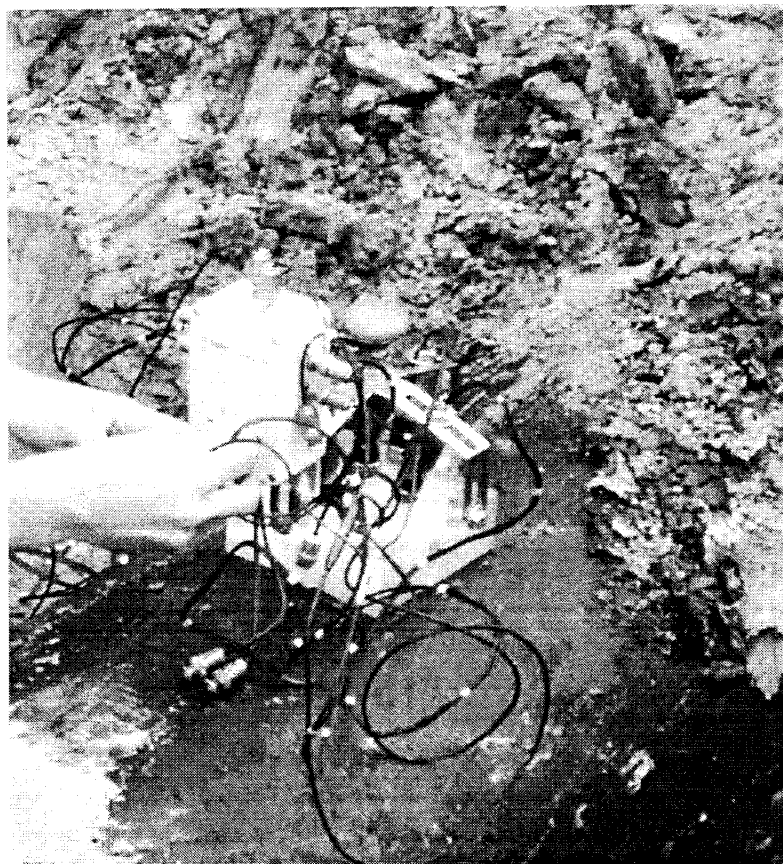


Рис. 5.2. Встановлення первинного перетворювача

- Наступний крок - це проведення налаштування ультразвукового пристрою (рис. 5.4). Ми можемо коректувати форму акустичного поля п'єзоелектричного перетворювача при вимірюванні швидкості проходження ультразвуку, а також вибирати період коливань луно-імпульсу для визначення часу переходу його через нуль.

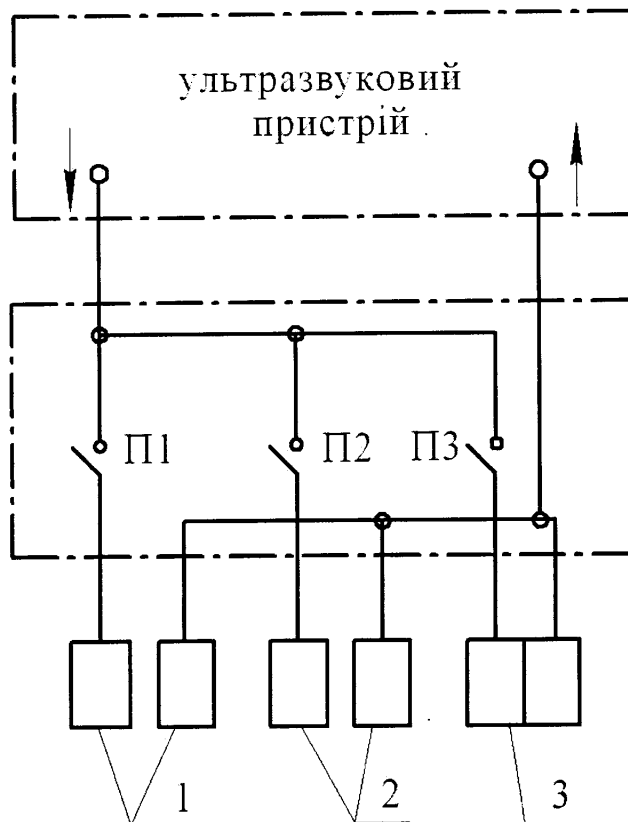


Рис. 5.3. Схема перемикача

П1, П2, П3 – перемикачі;

1, 2, 3 – п'єзоелектричні перетворювачі.

- За допомогою клавіатури вибираємо наступні опції роботи пристрою:
 - 1) ввід акустопружні коефіцієнтів A_i для даного матеріалу труб;
 - 2) ввід команд для обчислення напружень;
 - 3) номерів точок контролю напружено-деформованого стану ремонтної ділянки трубопроводу;
 - 4) запис виміряних і обчислених даних у внутрішню пам'ять пристрою;
 - 5) передача даних на персональний комп'ютер для їх кінцевої обробки та візуалізації;
 - 6) за допомогою розробленого алгоритму знаходимо місце, напрям дії та вид зусиль.

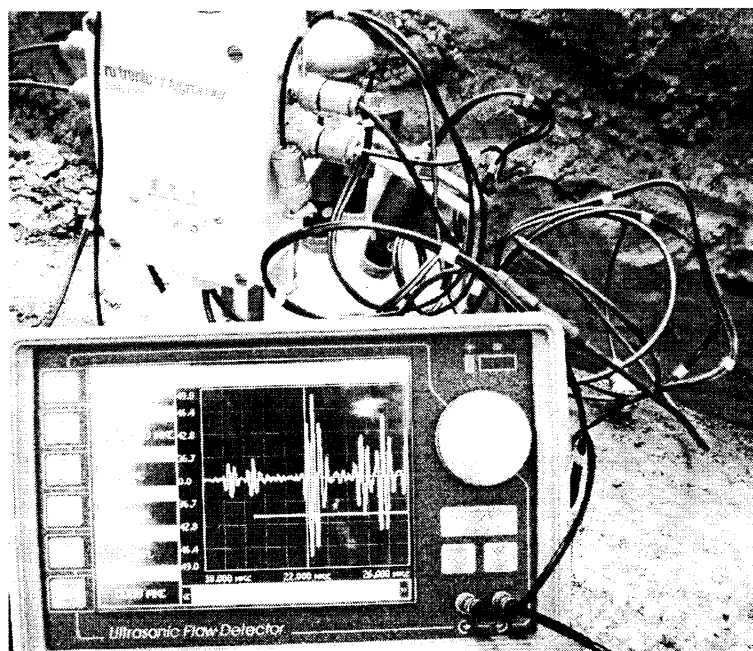


Рис. 5.4. Настроювання ультразвукового пристрою

5.3 Контроль напружено-деформованого стану ремонтної ділянки магістрального трубопроводу в експлуатаційних умовах

Для проведення контролю напружено-деформованого стану ремонтної ділянки лінійної частини магістрального газопроводу «Союз» використовували розроблений первинний перетворювач, ультразвуковий дефектоскоп та персональний комп'ютер. Невеликі розміри та вага приладів, зручність у роботі та можливість автономного живлення дозволили застосувати їх в експлуатаційних умовах.

В процесі проведення робіт вирішувались два завдання, а саме відпрацювання методики, яка дає можливість визначати місце дії, напрям та вид зусиль, що створюють напружено-деформований стан магістрального трубопроводу на його ремонтній ділянці та визначення розподілу напружень вздовж даної ділянки.

Контроль проводився по верхній твірній магістрального трубопроводу в п'яти точках по околу труби, яка була попередньо звільнена від ґрунту шляхом

шурфування в трьох місцях по довжині ремонтної ділянки (рис. 5.5). Крок точок контролю по околу становив $\varphi = 25^\circ$, віддаль між шурфами рівна 20 м. В цих точках по перерізу труби визначалась зміна швидкості поширення ультразвукової хвилі. Всі отримані значення занесені в табл. 5.1. Також визначені таким чином напруження в контрольованих перерізах (рис. 5.6, рис. 5.7).

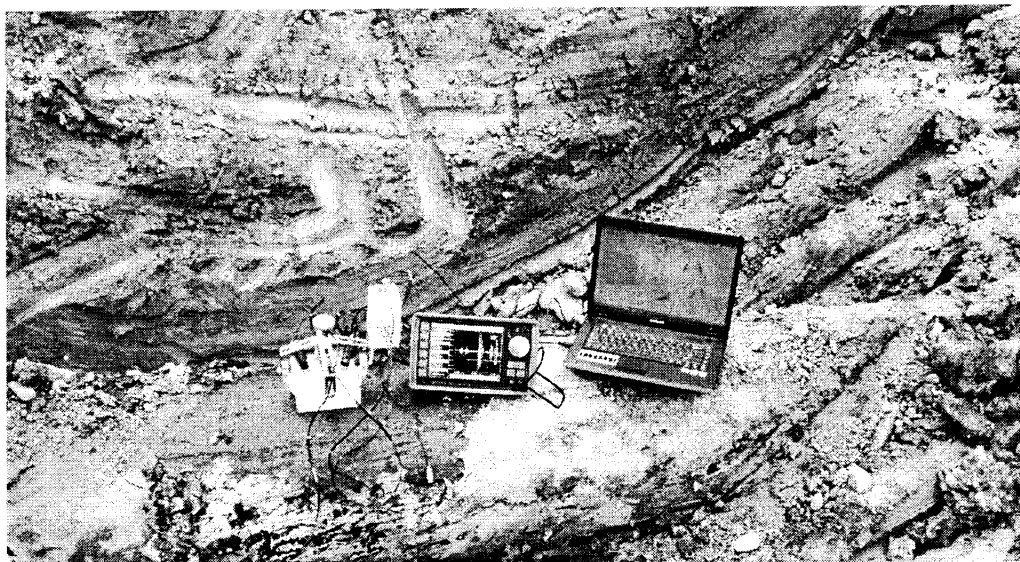


Рис. 5.5. Контроль напружено-деформованого стану ремонтної ділянки магістрального трубопроводу $D = 1420$ мм

Таблиця 5.1

Експериментальні дані зміни швидкості поширення ультразвукової хвилі в стінці металу газопроводу Δv , м/с

φ , $\pi/180$	1 шурф			2 шурф			3 шурф		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
5,41	2,152	0,601	1,213	2,132	0,624	0,184	2,145	0,613	1,132
5,84	2,231	0,633	1,410	2,115	0,645	1,110	2,162	0,608	1,184
0	2,156	0,632	1,346	2,096	0,612	1,091	2,239	0,656	1,341
0,44	2,115	0,621	1,254	2,137	0,601	1,157	2,330	0,625	1,247
0,87	2,132	0,610	1,182	2,148	0,613	1,258	2,241	0,634	1,139

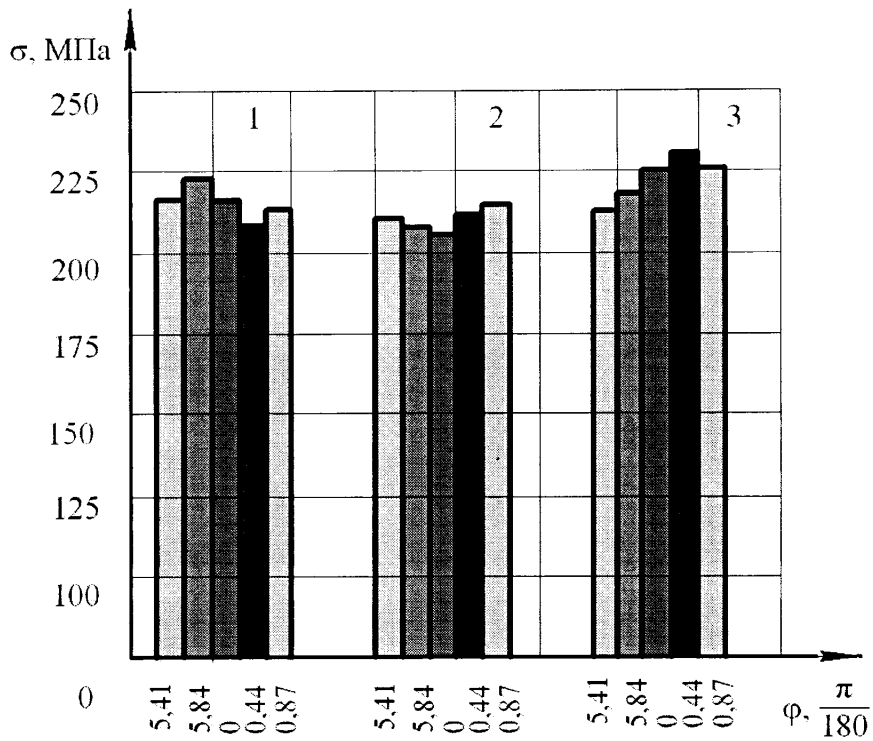


Рис. 5.6. Діаграма розподілу напружень вздовж контрольованої поверхні трубопроводу

1, 2, 3 – шурфи.

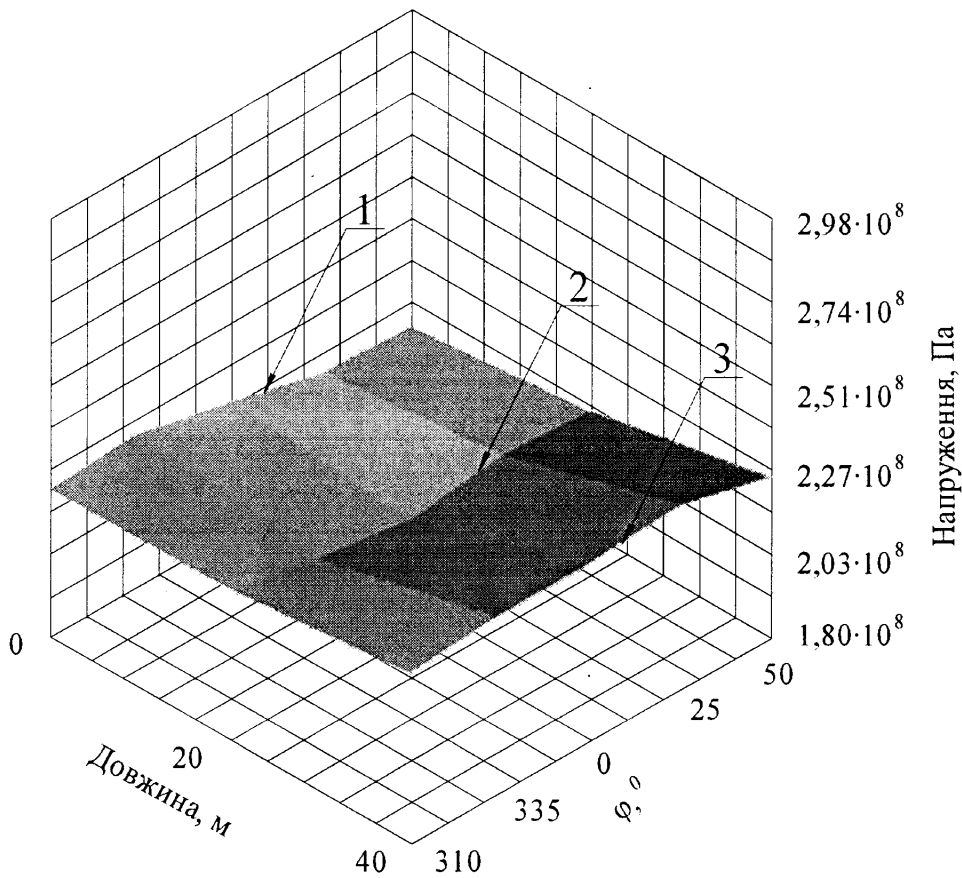


Рис. 5.7. Розподіл напружень вздовж контрольованої поверхні трубопроводу

1, 2, 3 – шурфи.

Порівнюючи таким чином експериментально визначені напруження з паспортними (для сталі Х60), бачимо, що $\sigma_{вим} < [\sigma]/n$. Враховуючи отримані результати проведеного контролю, є можливість зробити висновок про безпечність проведення ремонтних робіт та повного звільнення від ґрунту всієї ремонтної ділянки газопроводу, хоча дана ділянка газопроводу терпить поздовжньо поперечний згин в горизонтальному напрямі в межах допустимого.

Отже, можна зробити висновки:

- напружено-деформований стан ділянки газопроводу на час проведення контролю відповідає діючим нормам [75];
- навантаження на газопровід, які пов'язані з рухом ґрунту, не привели до значного росту напружень. Заходів по зниженню рівня напружень у стінках трубопроводу на момент проведення контролю не потрібно;
- необхідно проводити геодезичний моніторинг положення трубопроводу не менше 1 разу в місяць після інтенсивних опадів;
- швидкий розвиток зсувних процесів ґрунту (при інтенсивних опадах) може привести до виникнення небезпечної ситуації та руйнування трубопроводу в зв'язку з цим рекомендується провести реконструкцію ділянки газопроводу.

Висновки до розділу

1. Розроблено та розрахунково-експериментально обґрунтовано метод контролю напружено-деформованого стану ремонтної ділянки трубопроводу з врахуванням наявності характерних зон дії напружень та експлуатаційних режимів навантажень, який дає змогу визначати напрям та вид дії зусиль на дану ділянку.

2. Розроблена послідовність проведення контролю напружено-деформованого стану ремонтної ділянки трубопроводу, яку можна використовувати в експлуатаційних умовах.
3. Проведено контроль технічного стану трубопроводу та проаналізовано в експлуатаційних умовах вплив основних чинників на напружено-деформований стан ремонтної ділянки трубопроводу «Союз», $D=1420$ мм, Богородчанського ЛВУМГ. Виявлено нерівномірний характер розподілу напружень по околу та довжині ділянки трубопроводу внаслідок його згину зумовленого рельєфом місцевості, найбільші напруження 231 МПа виявлені при контролі трубопроводу в 3 шурфі. Результати оцінки напружено-деформованого стану і розроблені рекомендації представлені в Управління магістральних газопроводів «Прикарпаттрансгаз».

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У роботі на основі проведених теоретичних, лабораторних та натурних досліджень розв'язано актуальну науково-практичну задачу, яка дозволяє визначати вид, місце та напрям дії зусилля, яке формує напружено-деформований стан на ремонтній ділянці магістрального трубопроводу, мінімізувати їх вплив, що дає змогу оптимізувати ремонтно-відновлювані роботи.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз методів і засобів контролю напружено-деформованого стану ділянок магістрального трубопроводу, а також розглянуто фактори впливу та навантаження на них під час експлуатації. Встановлено, що використання існуючих методів неруйнівного контролю дає можливість визначати напружено-деформований стан, але не дає можливості визначати місце, вид та напрям дії зусиль, які діють на ділянку трубопроводу та створюють в ній додаткові напруження. Розглянуто засоби контролю напруженого стану трубопроводів в результаті чого виявлені недоліки, серед яких слід відмітити низьку чутливість електромагнітних приладів, зокрема, коерцитиметрів, що не дають змоги точно визначати дійсний напружено-деформований стан трубопроводів, та проводити оптимізацію ремонтних робіт.

2. Розроблена та описана математична модель визначення напружено-деформованого стану магістрального трубопроводу, що дозволяє підвищити точність обчислення сумарного напруження в його стінках, яка полягає в тому, що за явищем акустопружності розраховується сумарне напруження в околі однієї точки стінки труби від зміни швидкості трьох ультразвукових хвиль, що поширюються у взаємоперпендикулярних напрямках.

3. Удосконалено ультразвуковий метод контролю напружено-деформованого стану металу трубопроводу, що дало можливість визначати вид, місце та напрям дії зусилля, яке діє на ділянку трубопроводу як по околу труби так і вздовж її вісі та полягає у визначенні максимального значення еквівалентного напруження за результатами дискретного контролю.

4. Удосконалена модель електромеханічного перетворення енергії коливання чутливого елемента ультразвукового п'єзоелектричного перетворювача представленого у вигляді електричної схеми-аналога, яка відрізняється від відомих введенням додаткових коливальних контурів і полягає у врахуванні демпфувальних параметрів коливання п'єзопластини та наявності серії бічних резонансних частот, що дало можливість більш точно врахувати вплив амплітудно-частотної характеристики акустичного тракту на ультразвуковий сигнал, підвищити точність визначення його параметрів.

5. Удосконалено пристрій для визначення швидкості поширення ультразвукових коливань, що дало можливість підвищити точність вимірювання швидкості поширення ультразвукових коливань. Розроблена конструкція первинного перетворювача для контролю напружень в стінках магістральних трубопроводів у трьох взаємоперпендикулярних напрямках, яка реалізовує запропонований метод, а також розраховано його параметри.

6. Розроблено проект методики проведення ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів.

7. Проведено метрологічний аналіз складових загальної похибки розробленого методу та пристрою контролю та розроблено методику її визначення. Встановлено, що методична похибка становить 4,62 %, інструментальна похибка 0,74 %. Сумарна похибка становить 5,36 %.

8. Проведені лабораторні дослідження запропонованої методики контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів та промислова апробація результатів роботи на газопроводі «Союз» Ду 1400 мм Богородчанського ЛВУМГ, Управління магістральних газопроводів «Прикарпаттрансгаз», результати яких підтвердили їх ефективність.

9. Доказано, що для визначення величини напружень в стінках трубопроводів на ремонтних ділянках найточнішим є ультразвуковий луно-імпульсний метод контролю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Строительные нормы и правила. Магистральные трубопроводы: СНиП 2.05.06-85. - Минстрой России, 1997.
2. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / А. Я. Недосека. - К.: ИНДПРОМ, 2001. – 815 с. – ISBN 966-95315-1-2.
3. Грудинский В. Н. Ремонт промислових і магістральних газопроводів / В. Н. Грудинський, Є. Є. Зорин, С. А. Єгурцов. – К.: Інтерграфік, 1966. – 192 с.
4. Семеген М. М. Стійкість трубопроводу на ремонтній ділянці / М. М. Семеген // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – №4(21). - С. 51 – 53.
5. Руководство по анализу результатов внутритрубной инспекции и оценке опасности дефектов. ВРД 39-1.10-001-99.
6. Бильгер И. А. Техническая диагностика / И. А. Бильгер. – М.: Машиностроение, 1989. – 239 с.
7. Сандомирский С. Г. Магнитный контроль физико-механических свойств изделий массового производства в движении / С. Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 1996.-№ 7. - С. 24-46.
8. Михеев М. Н. Использование необратимых магнитных характеристик при перемагничивании ферромагнетиков в магнитном структурном анализе сталей и сплавов / М. Н. Михеев, Э. С. Горкунов // Электромагнитные методы измерений и неразрушающий контроль. – ИФМ. - 1982. - С. 3-10.
9. Мельгуй М. А. ДАН БССР / М. А. Мельгуй, В.Д. Пиунов – М.: Наука, 1980. - т. 14.-№ 7.- 598 с.
10. Проектирование магистральных трубопроводов: СНиП П-45-75. -М.: Изд-во стандартов, 1975.-56 с.
11. Гончаров Ю. Г. Неразрушающий контроль труб для магистральных нефтегазопроводов / Ю. Г. Гончаров, С. П. Ефименко; за ред. Г. Н. Сергеева. - М.: Металлургия, 1985.

12. Труэлл Р. Ультразвуковые методы в физике твердого тела / Р. Труэлл, ц. Эльбаум, Б. Чик. – М.: Мир, 1972. – 308 с.

13. Лютак З. П. Векторне визначення напружень ремонтних ділянок магістральних газопроводів / З. П. Лютак, М. М. Семенен // Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці „ІФНТУНГ-40”: Міжнар. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ, 16-20 квіт. 2007р.: тези доп. і повідомл. - Івано-Франківськ, 2007. – С. 27

14. Гузь А. Н. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах/ А.Н. Гузь, Ф.Г. Махорот, О.И. Гуца, В.К. Лебедев – К.: Наукова думка, 1974. - 108 с.

15. Toupin R. Sound waves in deformed perfectly elastic materials. Acoustoelastic effect / R. Toupin, B. Bernstein // J. Acoust. Soc. Am. - 1961. - N2. - P. 216-225.

16. Bergman R. N. Effect of Statically applied stresses on the velocity of propagation of ultrasonic waves / R. N. Bergman, R. A. Shahbender // J. Appl. Phys. - 1958. - N12. - P. 1736 - 1739.

17. Kino G. S. Elastic Waves and Nondestructive Testing of Materials / G. S. Kino // Acoustoelasticity. - Ed. Y.-H Pao. – New York: American Society of Mechanical Engineers. - 2000. – v. 29. – P. 129 - 139.

18. Johnson G. S. Acoustoelastic Response of Polycrystalline Aggregate with Orthotropic Texture / G. S. Johnson // Trans. ASME: J. Appl. Mech. - 2000. – v. 52. -P. 659 - 664.

19. Allen D. R. The Measurement of Residual Stress in Textured Steel Using an Ultrasonic Velocity Combination Technique / D. R. Allen, C. M. Sayers // Ultrasonic. – 2006. – v.22. – N2. – P. 179-188.

20. Andreazi M. Ultrasonic Velocity and Attenuation Measurements on Creeped Specimens / M. Andreazi, R. F. Denis // Eur. Conf. NDT Proc. Techn. Sess. -Florence. - 2001. - v.4. - P. 305 - 308.

21. Murao M. Measurement of Acoustoelastic Effect by Spectrum Analysis of Ultrasonic Waves / M. Murao, Y. Iwashimizu // Journal Society Material Sci. Jap. – 2001. – v.34 – N387 – P. 1472 - 1477.

22. Hirao M. Nonlinear Resonance Interaction of Ultrasonic Waves under Applied Stress / M. Hirao, A. Tomizava, H. Fukuoka // Journ. Appl. Phys. – 2001. – v.56 – N1 – P. 235 - 237.

23. Schnieder E. Non-destructive Detection and Analysis of Stress States with Polarized Ultrasonic Waves / E. Schnieder, H. Pitsch, S. Hirsekork // Rev. Progr. Quant. NDE. – 2004. – v.4B – P. 1079 -1 088.

24. А.с 402734 СССР, МКИ² G 01 B 17/00. Устройство для измерений скорости ультразвуковых колебаний в образцах / Т. С. Лебедев, В. Т. Лахтанов, Д. В. Корниец. - №1621188/18-10; заявл. 16.11.71; опубл. 19.10.73, Бюл. №42.

25. А.с. 446824 СССР, МКИ¹ G 01 N 29/00. Цифровое устройство для измерения скорости распространения ультразвуковых колебаний / В. М. Мусонов, В. И. Чижиков. - №1776893/18-10; заявл. 24.04.72; опубл. 15.10.74, Бюл. №38.

26. Васильев Ю. Н. Вибрационный контроль технического состояния газотурбинных газоперекачивающих агрегатов / Ю. Н. Васильев, М. Е. Бесклетный, Е. А. Игуменцев. – М.: Недра, 1987. - 197 с.

27. Методические рекомендации по количественной оценке состояния магистральных газопроводов с коррозионными дефектами, их ранжирования по степени опасности и определению остаточного ресурса. РД 39-1.10-004-99.

28. R. Hubo VDI progress report series 18, book 80, VDI, Düsseldorf (Germany), 1990.

29. NDT инжиниринг. – режим доступа <http://www.ndt.by/catalog>

30. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / А. Я. Недосека.- К.: ИНДПРОМ, 2008. – 814 с. – ISBN 978-966-96813-5-5.

31. Аварийно-восстановительный ремонт магистральных нефтепроводов / А. Г. Гумеров, Х. А. Азметов, Р. С. Гумеров, М. Г. Векштейн; за ред. А.Г. Гумерова – М.: Недра, 1998. - 271 с. – ISBN 5-247-038193.

32. Каталог компанії Solartron Schlumberger.–Великобританія.-2000. - 142 с.
33. Власенко В.А. Анализ погрешностей в процессорах Фурье и Хартли с фиксированной и плавающими запятыми / В. А. Власенко, Ю. М. Лампа, А. Н. Шабля // Акустика и ультразвуковая техника. – 1993. - №28. – С. 39 – 43.
34. Гречинский Д.А. Современное состояние и перспективы развития аппаратуры для формирования и анализа случайных вибраций / Д. А. Гречинський, В. Г. Рыгалин, Н. И. Шашкин – М.: Недра, 1994. – 40 с.
35. Семеген М. М. Визначення напружено-деформованого стану дугових елементів в просторових системах трубопроводів на ремонтних ділянках / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2007. - №2(16). – С. 170 - 178. – ISSN 1993-9965.
36. Методика оцінки технічного стану металу діючого газопроводу з тривалим строком експлуатації (більше 10 років) та залишкового ресурсу його безпечної роботи. – К.: УкрНДІгаз, 2001. – 106 с.
37. Черний В. П. Сплющивание сечений цилиндрической оболочки при изгибе / В. П. Черний // Исследование надежности магистральных трубопроводов: сборник научных трудов. – ВНИИСТ, 1985. - С. 48 - 53.
38. Дарков А.В. Сопротивление материалов / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро. - М.: Высшая школа, 1969.- 734 с.
39. Новацький В. Теорія упругості / В. Новацький.-М.: Мир, 1975.–872 с.
40. Смирнов А. Ф. Сопротивление материалов / А. Ф. Смирнов, А. В. Александров. - М.: Высшая школа, 1969.- 600 с.
41. Бородавкин П. П. Прочность магистральных трубопроводов / Бородавкин П. П.- М.: Недра, 1984.- 276 с.
42. Скоморовский Я. З. Определение геометрических и нагрузочных параметров характерного участка изогнутого трубопровода / Я. З. Скоморовский, В. С. Сумароков // Исследование прочности магистральных трубопроводов: сборник научных трудов. – ВНИИСТ, 1984. - С. 123 - 130.

54. Thurston R. N. Third order elastic constants and the velocity of small amplitude elastic waves in homogeneously stressed media / R. N. Thurston, K. Brugger // *Phys. Rev.* – 1964. - v. 133. - P. 1604 - 1610.

55. Черних К. Ф. Нелинейная теория упругости в машиностроительных расчетах. Л.: Машиностроение, 1986. – с. 336.

56. Семеген М. М. Акустичний контроль складних ділянок газопроводу в осесиметричному напруженому стані / М. М. Семеген, З. П. Лютак // *Наукові вісті галицької академії.* - 2007. - №1(11). - С. 152 - 158.

57. Hamilton M. F. *Nonlinear Acoustics* / M. F. Hamilton, D. T. Blackstock. - San Diego: Academic Press, 1998.

58. Димитриенко Ю. И. Тензорное исчисление / Ю. И. Димитриенко. - М.: Высшая школа, 2001. – 575 с. – ISBN 5-06-004155-7.

59. D. J. Jonathon. An acoustoelastic technique using longitudinal waves for the evaluation of residual stresses: Dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of PhD / D. J. Jonathon. – Berkeley, 1989. – 183 p.

60. Лютак З. П. Метод визначення напружено-деформованого стану трубопроводу на ремонтних ділянках / З. П. Лютак, М. М. Семеген, І. М. Скобель // *Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання: Міжн. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ, 2 - 5 грудня 2008 р.: тези доп. і повідомл.* – Івано-Франківськ, 2008. – С. 135 - 137.

61. Пат. 32624. G01H 5/00. Пристрій для вимірювання швидкості ультразвуку / Лютак І. З., Семеген М. М., Померенко А. В., Бедзір А. О. - №u200800077, Заявл. 02.01.2008, Опубл. 26.05.2008, Бюл. №10.

62. Полишко С. П. Точность средств измерений: учебное пособие для вузов / С. П. Полишко, А. Д. Трубенюк. - К.: Вища школа. Головне видавництво, 1988. - 149 с.

63. Орнатський П. П. Автоматические измерения и приборы / П. П. Орнатський. - К.: Вища школа. Головне видавництво, 1980. - 558 с.

64. Russell M. D. Experimental estimation of the longitudinal-wave backscatter coefficients for ultrasonic interrogation of weak scattering materials / M. D. Russell, S. P. Neal, E. J. Boote // J. Acoust. Soc. Am. 93.- 1993. - P. 1267-1276.

65. Nagy B. Surface roughness induced attenuation of reflected and transmitted ultrasonic waves / B. Nagy, L. Adler // J. Acoust. Soc. Am. 82. - 1987. - P. 193-197.

66. Семеген М. М. Дослідження впливу нерівностей поверхні об'єкта контролю на поширення ультразвукових хвиль / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – 2009. - №14. – С. 20-26.

67. Білокур І. П. Акустичний контроль / І. П. Білокур. – К.: ІЗМН, 1997. – 224 с. – ISBN 5-7763-9230-7.

68. Семеген М. М. Визначення напружено-деформованого стану трубопроводів на ремонтних ділянках / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Методи та прилади контролю якості. – 2008. – №21. – С. 43 - 47. – ISSN 1993-9981.

69. Лютак І. З. Розробка методики та пристрою для контролю технічного стану технологічного обладнання автомобільних газонаповнюючих компресорних станцій: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13/ Лютак І. З. - Івано-Франківськ, 2003. - 153 с.

70. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами: ДСТУ – НБ В.2.3-21:2008. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. – 31 с.

71. Металлы. Методы испытания на растяжение: ГОСТ 1497-84. - М.: Изд-во стандартов, 1985. - 111 с.

72. Семеген М. М. Визначення величини переміщень в просторових системах дугових ділянок трубопроводів на ремонтних ділянках / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Нафтогазова енергетика. – 2008. – №2(7). - С. 38 – 42. – ISSN 1993-9868.

73. Сидорин И. И. Основы материаловедения / И. И. Сидорин. - М.: Машиностроение, 1976. – 440 с.

74. Семеген М. М. Дослідження напружено-деформованого стану газопроводів акустичним методом / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Вісник хмельницького національного університету – 2010. - № 2.

75. Відомчі будівельні норми «Будівництво магістральних і промислових трубопроводів. Контроль якості і приймання робіт»: ВБН 012-200. - Київ: Український науково-дослідний інститут з будівництва магістральних трубопроводів, 2000. - 109 с.

76. Демидов С. П. Теория упругости: учебник для вузов / С. П. Демидов. – М.: Высшая школа, 1979. – 432 с.

77. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: справочное пособие / Под ред. Б. С. Касаткина. - К.: Наукова думка, 1981.-584с.

78. Каталог ОАО „Костроматрубинвест – Волгореченский трубный завод”. - Россия. - 2004. - 28 с..

79. Проведення робіт з оцінки залишкової роботоздатності технологічного обладнання нафтопереробних, нафтохімічних і хімічних виробництв. Затверджений „Держнаглядохоронпраці” 19 травня 1993р. м. Київ.

80. Семеген М. М. Контроль напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів через параметри витрати газу / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Вимірювання витрати та кількості газу: Всеукр. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ, 17-20 травня 2005 р.: тези доп. і повідомл. - Івано-Франківськ, 2005. – С. 72.

81. Семеген М. М. Визначення напружень за напрямком поширення ультразвукових хвиль / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Приладобудування 2007: стан і перспективи: наук.-техн. конф., Київ, 24 – 25 квітня 2007 р.: тези доп. і повідомл. – Київ, 2007. - С. 276 - 277.

82. Исакович М. А. Общая акустика / М. А. Исакович. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1973. – 496 с.

83. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент: ГОСТ 10706-76. - М.: Изд-во стандартов, 1985.

84. Трубы стальные электросварные прямошовные. Технические требования: ГОСТ 10706-76. - М.: Изд-во стандартов, 1985.

85. Лютак І. З. Дослідження імпульсного режиму роботи ультразвукового перетворювача / І. З. Лютак, І. С. Кісіль // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. - №1. – С. 42 - 45.

86. Домаркас В. Й. Ультразвуковая эхоскопия / В. Й. Домаркас, Э. Л. Пилецкас. – Л.: Машиностроение, 1972. - №3. – С. 45-52.

87. Физическая акустика: т. 1. / Н. Мезон. – М.: Мир, 1966 – 498 с.

Ч. А: Методы и приборы ультразвуковых исследований. – 1966. – 592 с.

88. Ермолов И. Н. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / И. Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.

89. Семеген М. М. Дослідження імпульсного режиму роботи п'єзоелектричного перетворювача / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Методи та прилади контролю якості. – 2009. – №23. – С. 25 - 29. – ISSN 1993-9981.

90. Гузь А. Н. Введение в акустоупругость / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт, О. И. Гуща. – К.: Наукова думка, 1977. – 284 с.

91. Гузь А. Н. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) деформациями / А. Н. Гузь. – К.: А. С. К., 2004. – 671 с.

92. Алямовский А. А. SolidWorks / CosmosWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов/А.А. Алямовский. –М.: ДНК Пресс, 2004. – 432 с. ISBN 5-94074-218-1.

93. Дяконов В. П. MATLAB 6.5 SP1/7+Simulink 5/6 в математике и моделировании / В. П. Дяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с. ISBN 5-98003-209-6.

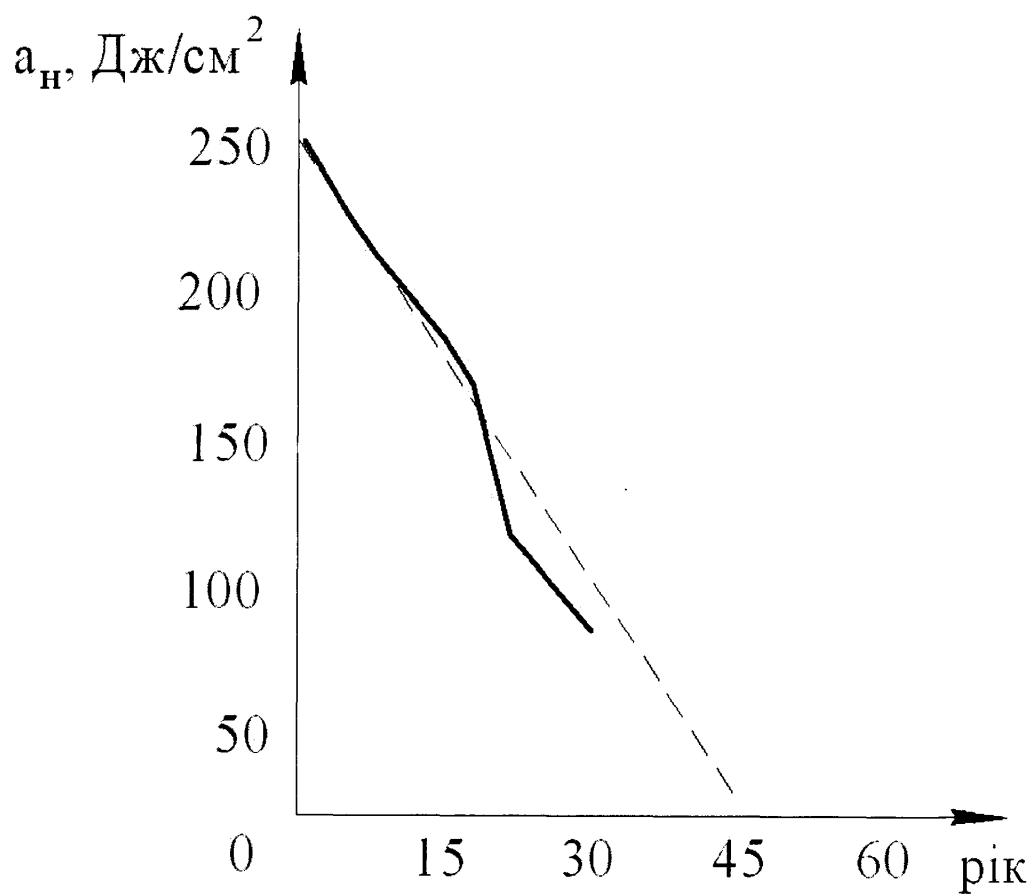
94. Петров П.Н. Акустика. Электроакустические преобразователи: учебн. пособие / П. Н. Петров. – СПб.: СПбГУАП, 2003. – 80 с.

95. Семеген М. М. Метод акустичного контролю напруженого стану ремонтних ділянок трубопроводу / М. М. Семеген // Неруйнівний контроль та технічна діагностика: нац. наук.-техн. конф. і виставка, Київ, 9 - 12 червня 2009 Р.: тези доп. і повідомл. – Київ, 2009. – С. 323 – 326.

ДОДАТКИ

Додаток А

Зміна ударної в'язкості матеріалу труби виготовленої з сталі 17Г з часом



Додаток Б

Корені кубічного рівняння (2.26) σ_1 , σ_2 та σ_3 вираховані з допомогою програми [93]

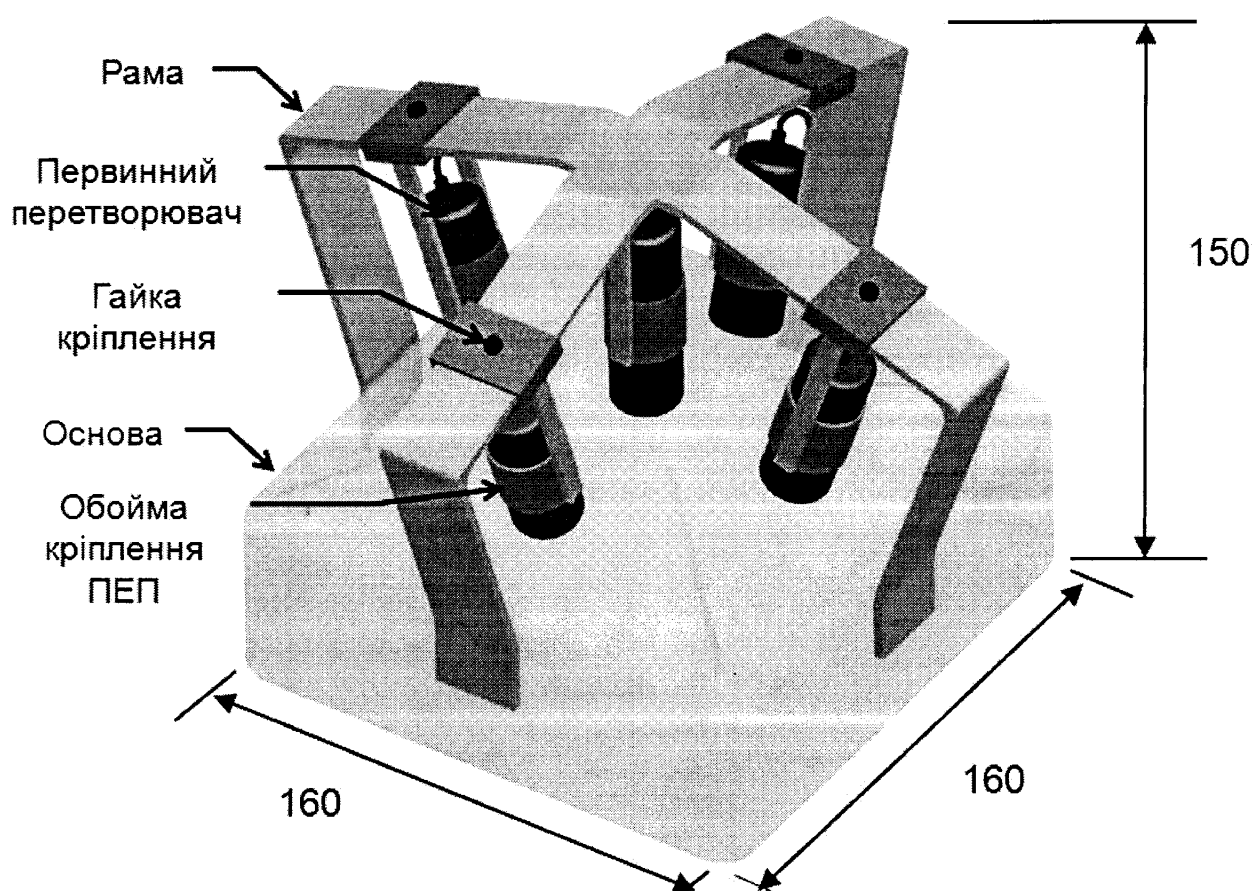
$$\sigma_1 = [1/6 * (-36 * I1 * I2 + 108 * I3 + 8 * I1^3 + 12 * (12 * I2^3 - 3 * I2^2 * I1^2 - 54 * I1 * I2 * I3 + 81 * I3^2 + 12 * I3 * I1^3)^{1/2})^{1/3} - 6 * (1/3 * I2 - 1/9 * I1^2) / (-36 * I1 * I2 + 108 * I3 + 8 * I1^3 + 12 * (12 * I2^3 - 3 * I2^2 * I1^2 - 54 * I1 * I2 * I3 + 81 * I3^2 + 12 * I3 * I1^3)^{1/2})^{1/3} + 1/3 * I1],$$

$$\sigma_2 = [-1/12 * (-36 * I1 * I2 + 108 * I3 + 8 * I1^3 + 12 * (12 * I2^3 - 3 * I2^2 * I1^2 - 54 * I1 * I2 * I3 + 81 * I3^2 + 12 * I3 * I1^3)^{1/2})^{1/3} + 3 * (1/3 * I2 - 1/9 * I1^2) / (-36 * I1 * I2 + 108 * I3 + 8 * I1^3 + 12 * (12 * I2^3 - 3 * I2^2 * I1^2 - 54 * I1 * I2 * I3 + 81 * I3^2 + 12 * I3 * I1^3)^{1/2})^{1/3} + 1/3 * I1 + 1/2 * I^3^{1/2} * (1/6 * (-36 * I1 * I2 + 108 * I3 + 8 * I1^3 + 12 * (12 * I2^3 - 3 * I2^2 * I1^2 - 54 * I1 * I2 * I3 + 81 * I3^2 + 12 * I3 * I1^3)^{1/2})^{1/3} + 6 * (1/3 * I2 - 1/9 * I1^2) / (-36 * I1 * I2 + 108 * I3 + 8 * I1^3 + 12 * (12 * I2^3 - 3 * I2^2 * I1^2 - 54 * I1 * I2 * I3 + 81 * I3^2 + 12 * I3 * I1^3)^{1/2})^{1/3})],$$

$$\sigma_3 = [-1/12 * (-36 * I1 * I2 + 108 * I3 + 8 * I1^3 + 12 * (12 * I2^3 - 3 * I2^2 * I1^2 - 54 * I1 * I2 * I3 + 81 * I3^2 + 12 * I3 * I1^3)^{1/2})^{1/3} + 3 * (1/3 * I2 - 1/9 * I1^2) / (-36 * I1 * I2 + 108 * I3 + 8 * I1^3 + 12 * (12 * I2^3 - 3 * I2^2 * I1^2 - 54 * I1 * I2 * I3 + 81 * I3^2 + 12 * I3 * I1^3)^{1/2})^{1/3} + 1/3 * I1 - 1/2 * I^3^{1/2} * (1/6 * (-36 * I1 * I2 + 108 * I3 + 8 * I1^3 + 12 * (12 * I2^3 - 3 * I2^2 * I1^2 - 54 * I1 * I2 * I3 + 81 * I3^2 + 12 * I3 * I1^3)^{1/2})^{1/3} + 6 * (1/3 * I2 - 1/9 * I1^2) / (-36 * I1 * I2 + 108 * I3 + 8 * I1^3 + 12 * (12 * I2^3 - 3 * I2^2 * I1^2 - 54 * I1 * I2 * I3 + 81 * I3^2 + 12 * I3 * I1^3)^{1/2})^{1/3})]$$

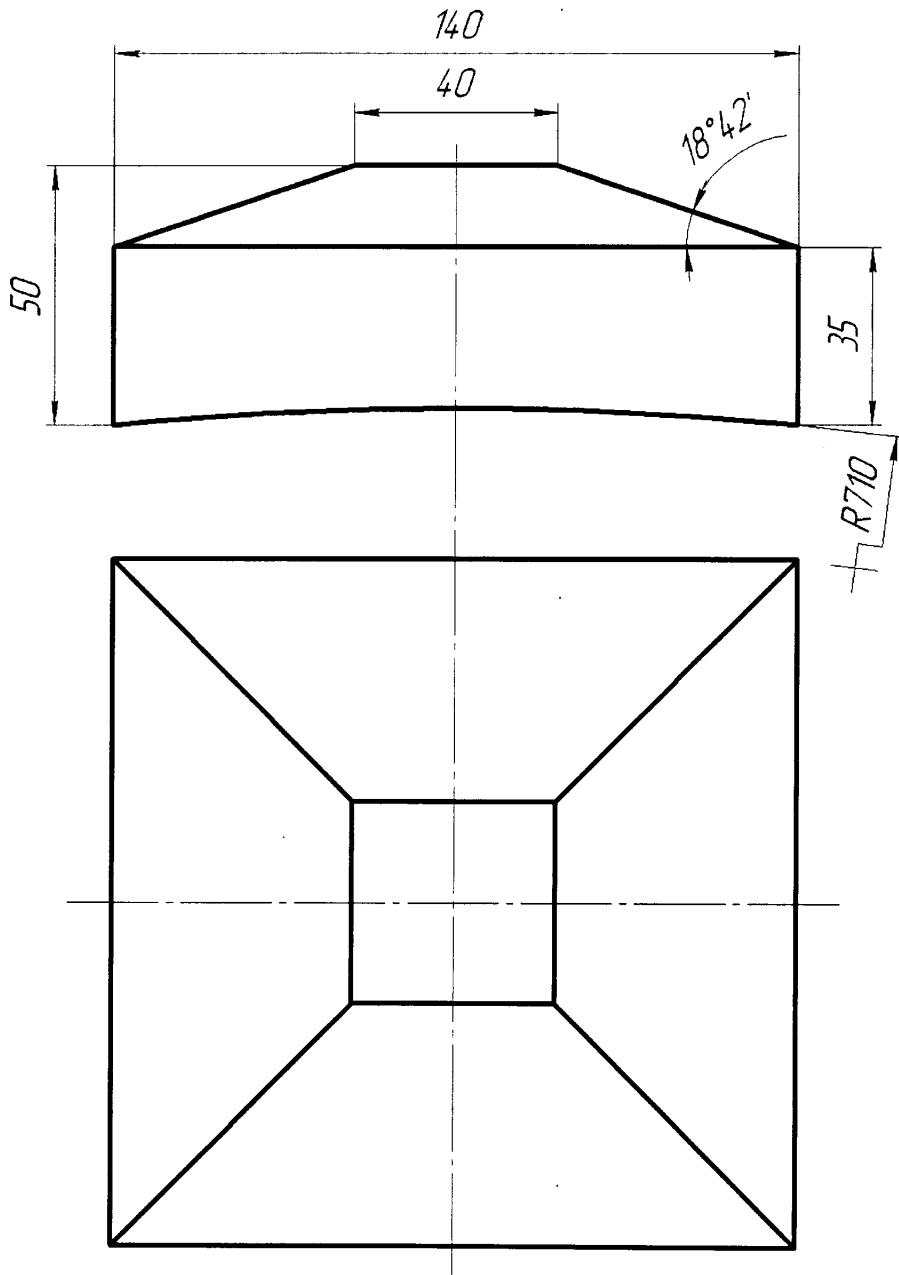
Додаток В

Конструкція системи первинних перетворювачів



Додаток Д

Ескіз головки первинного перетворювача



Додаток Ж

Таблиця Ж.1

Основні характеристики вітчизняних трубопроводів

Марка сталі	Зовнішній діаметр труби, мм	Товщина стінки труби, мм	Шов
Сталь 10	325	7	прямий
Сталь 20	325	8	без шва
Сталь 20	426	10	без шва
17ГС	530	7,5; 8	прямий
17Г2СФ	530	8	прямий
09Г2С	530	7; 9	прямий
10Г2С1	530	7; 8; 9	прямий
17Г1С	720	7,5; 9	прямий
10Г2С1	720	9; 10; 11	прямий
14ХГС	720	10,5	прямий
17ГС	820	8,5; 9; 10; 11	спіральний
17Г1С	820	8; 9; 10	прямий
17ГС	1020	10; 11; 12,5; 14	прямий
17Г1С	1020	10; 11; 12; 14	прямий, спіральний
17Г1С-У	1020	9,5; 14	прямий, спіральний
15ГСТШЮ	1020	10,6	спіральний
10Г2С1	1020	11	прямий
17Г2СФ	1020	9	прямий
17Г2СФ	1020	10	спіральний
16Г2АЮ	1020	10	прямий
09Г2ФБ	1220	14,5; 17,2	прямий
17Г2СФ	1220	10,5	прямий
17Г2СФ	1220	12	спіральний

продовження табл. Ж.1

Марка сталі	Зовнішній діаметр труби, мм	Товщина стінки труби, мм	Шов
17Г1С	1220	12; 12,5; 15,2	прямий
09Г2ФБ	1420	17,5	прямий
08Г2МФБ	1420	20	прямий

Таблиця Ж.2

Фізико-механічні властивості трубних сталей вітчизняного виробництва

Марка сталі	Відносне видовження, %	Межа плинності, МПа	Межа міцності, МПа
Сталь 10	31	220	340
Сталь 20	20	250	420
17Г1С	19	360	520
17ГС	20	350	520
10Г2С1	20	360	500
15ГСТШЮ	21	370	530
09Г2С	20	350	500
14ХГС	20	350	500
09Г2ФБ	20	420	550
17Г2СФ	20	380	540
16Г2САФ	19	410	590

Фізико-механічні властивості трубних сталей іноземного виробництва


Марка сталі	Зовнішній діаметр труби, мм	Товщина стінки труби, мм	Відносне видовження, %	Межа плинності, МПа	Межа міцності, МПа
Типу 17Г1СФ	1420	17; 20	20	420	560
Типу 18Г2	1220	15	18	390	550
Типу 18Г2	1020	14	20	370	530
А	325	7	28	210	330
В	426	10	19	240	420
X70	1420	16,5	17	561	652
X52	1020	11, 14	18	360	460

Таблиця Ж.4

Хімічні і механічні властивості трубних сталей

Рік виготовлення	Марка сталі	Вміст основних хімічних елементів, %					Межа плинності, МПа	Межа міцності, МПа
		С	Mn	V	Nb	P		
1960	X52	0,18	1,4	-	-	0,3	345	438
1975	X52	0,22		-	-		358	455
1970	X60	0,18		0,12	-		470	600
1972	X60	0,18		0,04	0,04		530	640
1975	X60	0,12		0,04	0,04		547	654

Сертифікат якості на трубну сталь X60


CENTRO SINDACALE DI TARANTO
 vic. S. Maria 10, tel. 0833 - 4414812
 Taranto - ITALIA
 tel. 0833 - 4414812 (ufficio) / 4414813 (prod.)

Certificate No. 13073

No of heat 671673

CERTIFICATE OF QUALITY

SPECIFICATION : _____ CUSTOMER : V/D PROMSYKIOIMPORT - MOSCOW (U.A.S.S.R.)
 CUSTOMER ORDER : 5230/1014 DIMENSIONS : 1420 X 16.5 mm
 ITALIDER ORDER : 1691.0193 X 60 TRANS N° : 50647

MATERIAL: Longitudinal welded steel pipes according to TU 56-70-IT specification and manufactured by plates rolled in controlled temperature condition.

CHEMICAL - ANALYSIS											
LADLE ANALYSIS											CHECK
% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Ni	% Cr	% Cu	Nb %	Mo %	Ceq.	% C
0.06	1.60	0.30	0.015	0.007	< 10	< 10	< 20	0.049	0.23	0.39	

MECHANICAL TEST RESULTS							
N° PIPE	BODY OF THE PIPE				WELDED JOINT		
	S y p.	R t s.	A elongation	S/R ratio	R t s.	BEND TEST	
	Kg/mm²	Kg/mm²	%		Kg/mm²	inside	outside
3670	56.5	73.1	20.9	27	73.8	OK	OK

(°)

N° PIPE	TRANSVERSE IMPACT TEST					IMPACT TEST					
	A) Charpy B) Meunager	Specimen Kg/cm²				A) Charpy B) Meunager	Specimen Kg/cm²				
		T °C	1	2	3	X̄	T °C	1	2	3	X̄
3670	A	0	8.2	7.8	8.4	8.1	A				
	A						A				
3670	B	-60	4.8	5.4	5.5	5.2	B	-60	6.0	6.5	6.2
	B						B				

3670 0 90 90 90 BDWTT (°) According to specifications GOST 1497-73 TYPE 3°

LIST OF PIPES SHIPPED								Ship. Vagilly
								Sailed on DEC. 25TH 76
3679								
3670								

UFFICIO CONTROLLO QUALITA'
 ITALIDER S.p.A.
 TARANTO

STEEL INDUSTRIES, LTD.
KASHIWA STEEL WORKS.

REFERENCE TO JIS/JIS/JIS/JIS/JIS

Page
No

1314 KM

TENSILE TEST AND CHEMICAL ANALYSIS

406-3,406-4
419-3

X60 0420
WORK NO. KYY00364,0395

Technical Conditions No. TU-1975/3A.S
O.D. 1,420mm x U.T. 16.5mm
Size

ln V
*1 : Ceq = $C + \frac{Mn}{6} + \frac{S}{5}$

Lot No.	Heat No.	Tensile Test G.L.= 5 Multiple		Elongation (%)	Chemical Analysis (%)										Remarks
		Yield Point (kg/cm ²)	Tensile Strength (kg/cm ²)		C	Si	Mn	P	S	Nb	V	%	Ceq	Band Test	
H356 -1	K633188 13054	Spec Metal	60.2	23.0	8	41	142	20	6	20	7	10	33	Face	GoC
		Weld	61.2	23.5	9	40	143	18	6	23	7	10	35	Root	GoC
-2	13054	Spec Metal	61.3	23.5										Face	
		Weld	61.0											Root	
H357 -1	K612805 13147	Spec Metal	53.2	21.8	10	40	150	18	4	23	7	8	37	Face	GoC
		Weld	65.5	22.1	10	40	149	18	4	26	7	9	37	Root	GoC
-2	13147	Spec Metal	54.2	22.1										Face	
		Weld	65.9											Root	
H358 -1	K612806 13148	Spec Metal	54.7	21.3	10	42	144	18	3	25	7	9	36	Face	GoC
		Weld	65.4	20.5	10	40	145	18	3	24	7	9	35	Root	GoC
-2	13148	Spec Metal	64.1	20.5										Face	
		Weld	65.9											Root	
H359 -1	K613012 13121	Spec Metal	53.1	21.1	10	36	139	16	4	26	7	9	35	Face	GoC
		Weld	65.6	21.3	10	34	142	19	4	23	7	10	35	Root	GoC
-2	13121	Spec Metal	53.3	21.3										Face	
		Weld	66.8											Root	
H360 -1	K613132 13057	Spec Metal	52.2	23.3	9	36	139	18	5	25	6	8	34	Face	GoC
		Weld	60.9	24.6	10	33	131	19	5	19	6	8	33	Root	GoC
-2	13057	Spec Metal	61.2	24.6										Face	
		Weld	61.2											Root	
Standard		Min.	47.0	20.0	12	50	165	20	15	60	8	30	40		
		Max.	—	—	12	50	165	20	15	60	8	30	40		

*2: According to API 5LX Para 4.18

11 77 2810 13153 C.1

Додаток 3

Схема навантаження ремонтної ділянки магістрального трубопроводу
внутрішнім тиском

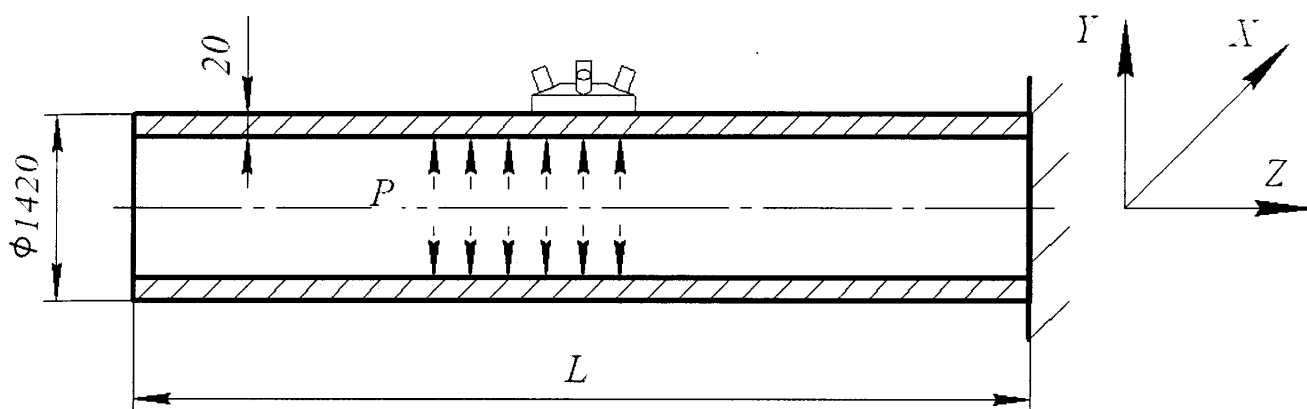


Рис. 3.1. Навантаження трубопроводу внутрішнім тиском $P=7$ МПа, $L=20$ м

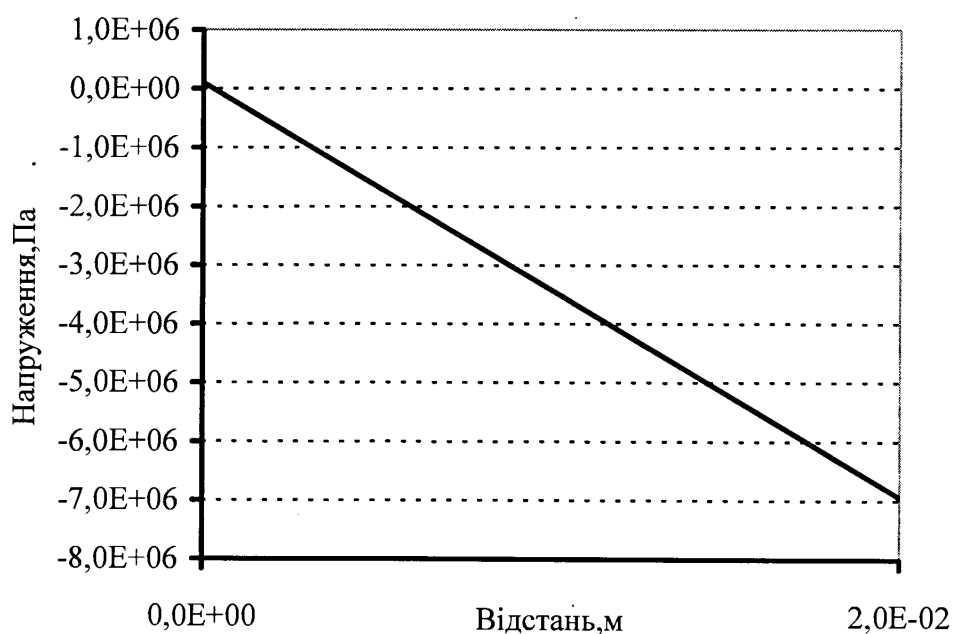


Рис. 3.2. Величина напружень σ_y в стінці труби вздовж вісі Y

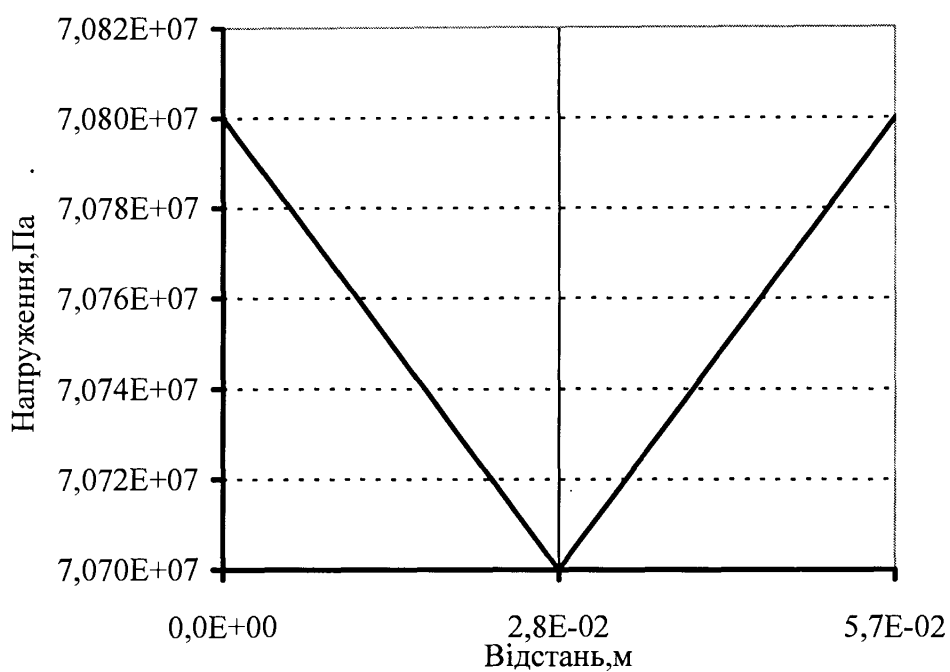


Рис. 3.3. Величина напружень σ_z в стінці труби вздовж вісі Z

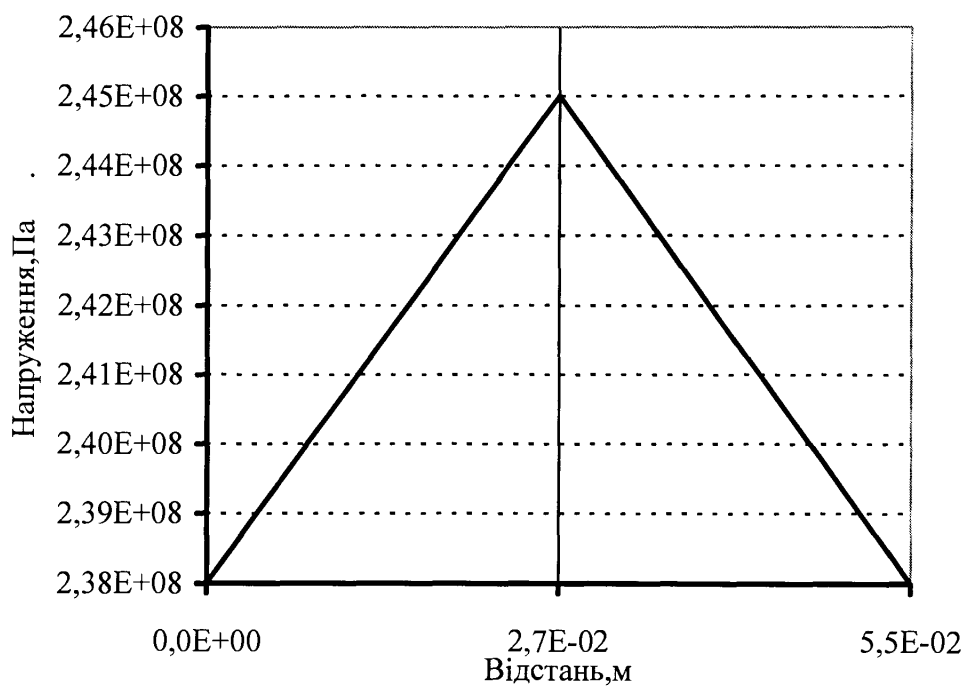


Рис. 3.4. Величина напружень σ_x в стінці труби вздовж вісі X

Додаток К

Схема навантаження ремонтної ділянки магістрального трубопроводу
внутрішнім тиском та зусиллям розтягу

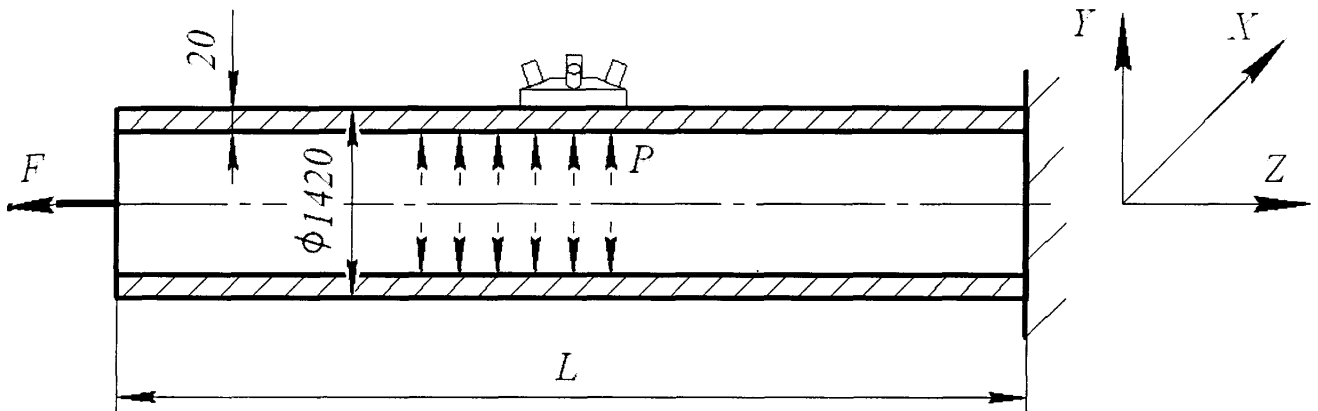


Рис. К.1. Навантаження трубопроводу внутрішнім тиском $P=7$ МПа та зусиллям розтягу F , $L=20$ м

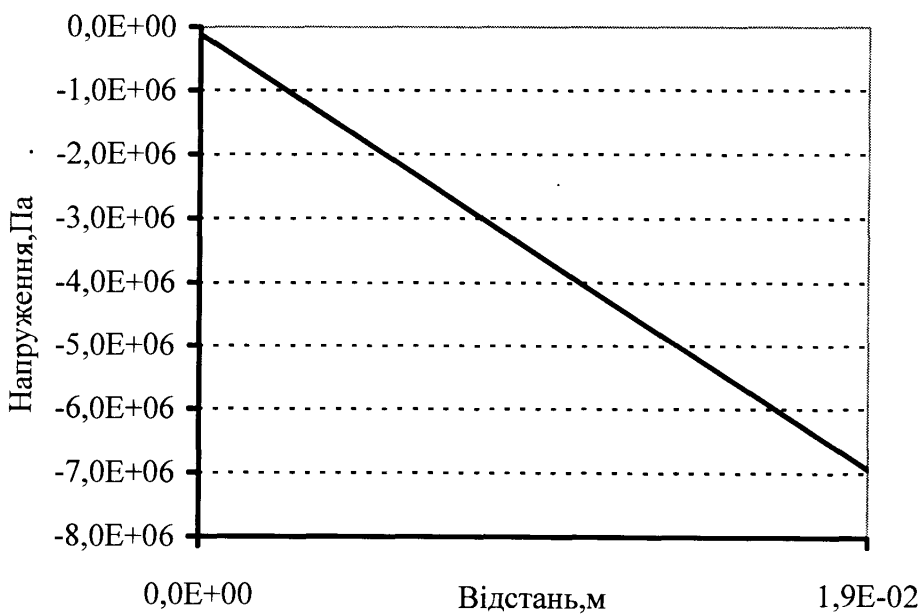


Рис. К.2. Величина напружень σ_y в стінці труби вздовж вісі Y

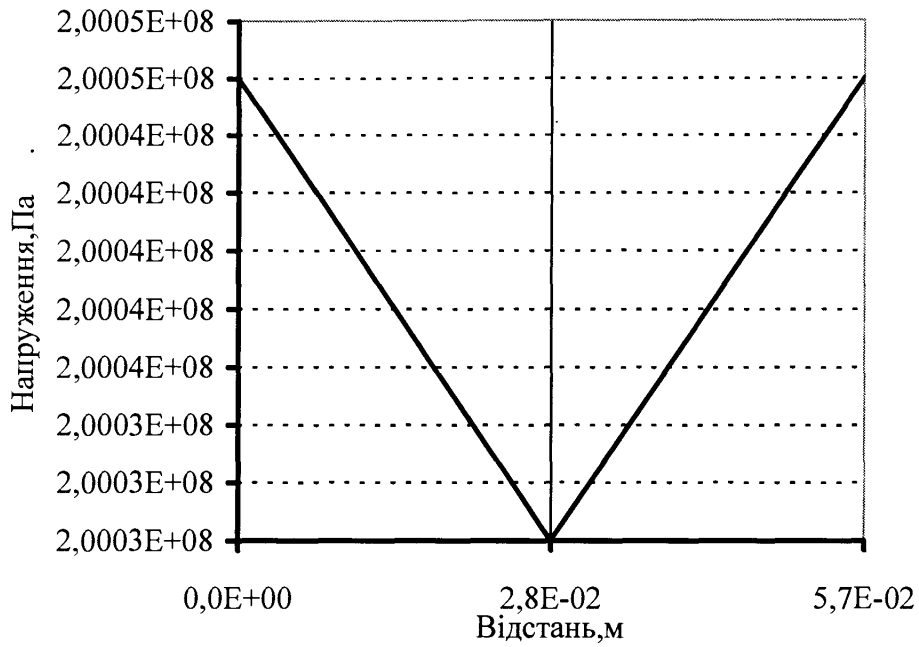


Рис. К.3. Величина напружень σ_z в стінці труби вздовж вісі Z

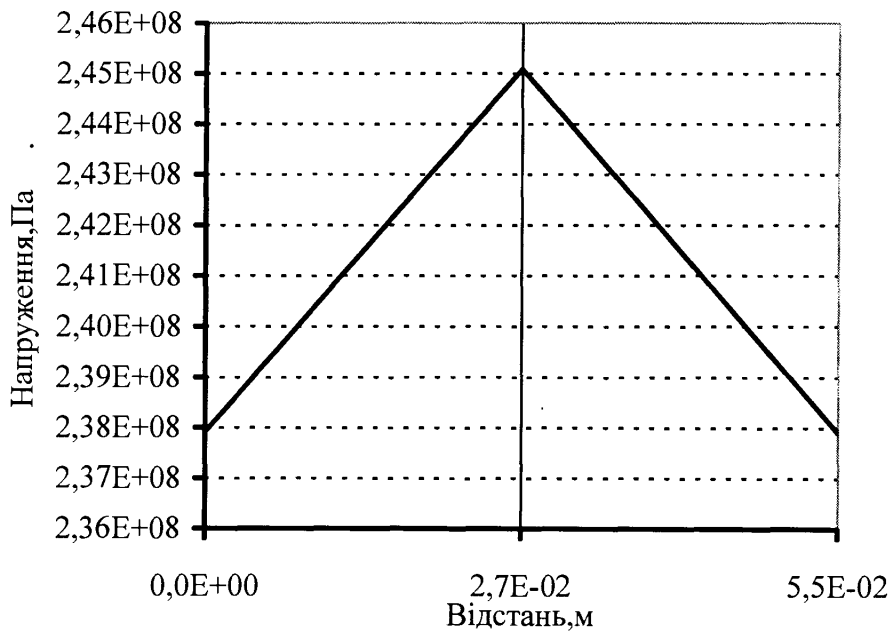


Рис. К.4. Величина напружень σ_x в стінці труби вздовж вісі X

Додаток Л

Схема навантаження ремонтної ділянки магістрального трубопроводу
внутрішнім тиском та зусиллям згину

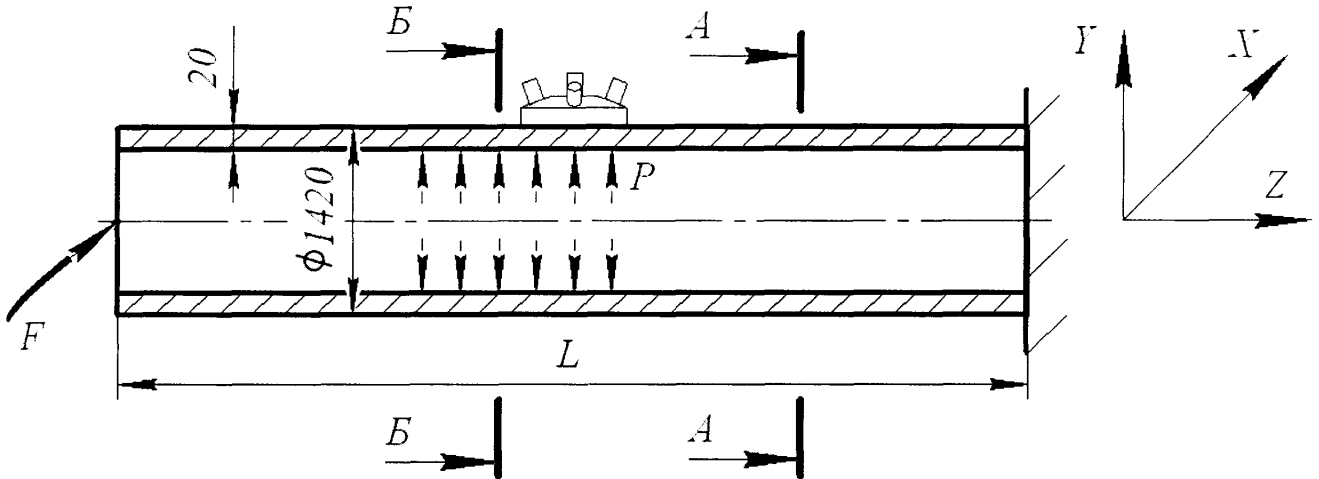


Рис. Л.1. Навантаження трубопроводу внутрішнім тиском $P=7$ МПа та зусиллям згину F , $L=20$ м

переріз А-А на відстані 5 м від місця защемлення; переріз Б-Б на відстані 10 м від місця защемлення.

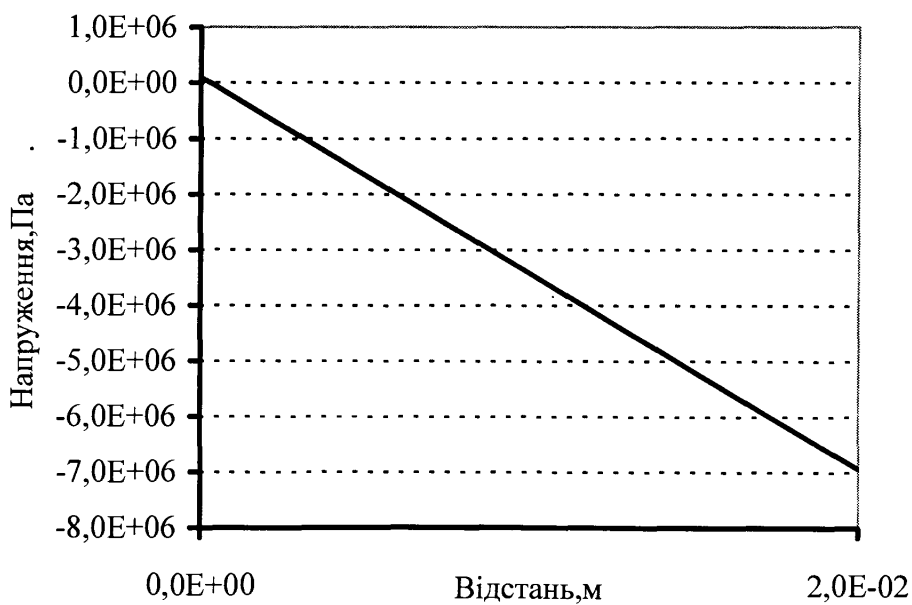


Рис. Л.2. Величина напружень σ_y в стінці труби вздовж вісі Y

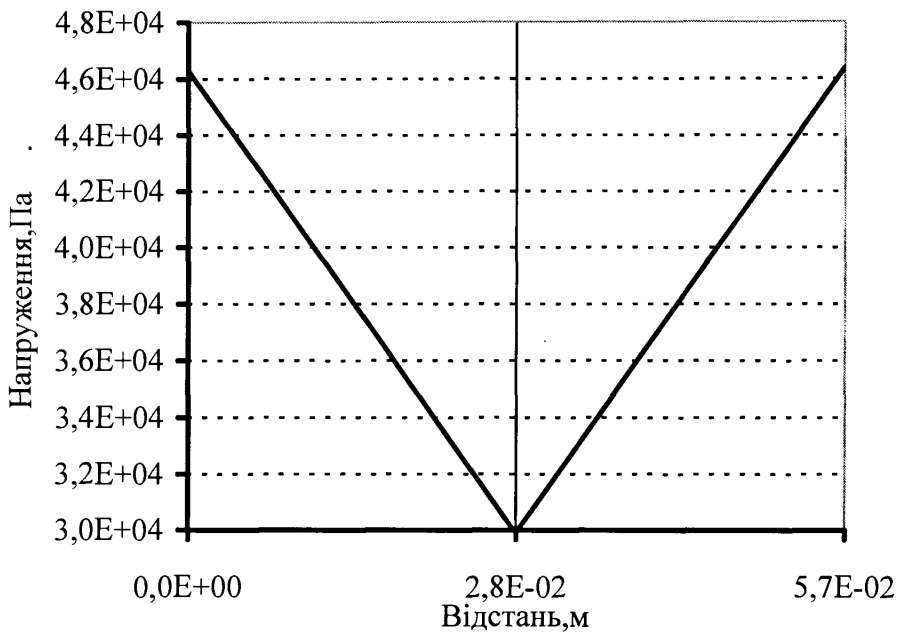


Рис. Л.3. Величина напружень σ_z в стінці труби вздовж вісі Z

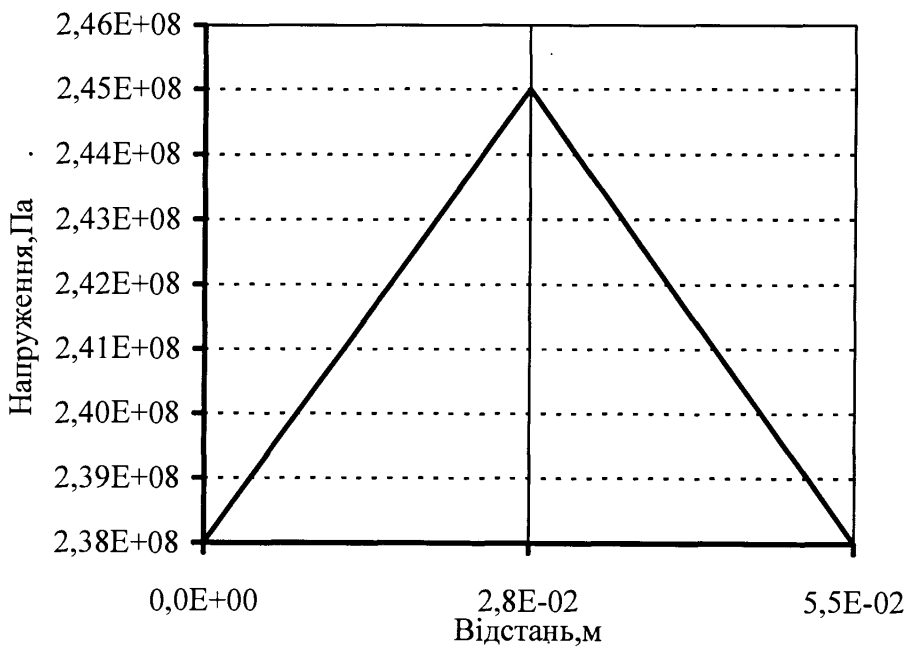
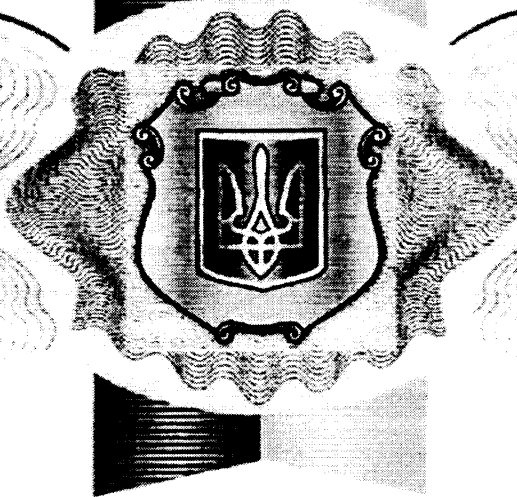


Рис. Л.4. Величина напружень σ_x в стінці труби вздовж вісі X

УКРАЇНА

UKRAINE



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 32624

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 26 травня 2008 р.

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності

М.В. Паладій



№ 15-223

06.08 2009р

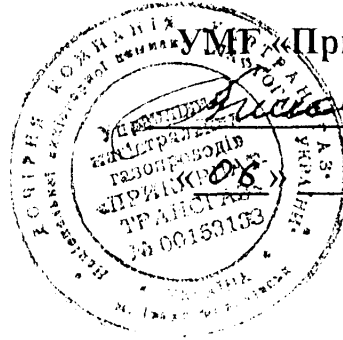
„Затверджую”

Заступник директора

УМГ «Прикарпаттрансгаз»

Михайлів В.І.

08 2009р.



ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи Семегена Михайла Михайловича «Контроль напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів»

Під час виконання робіт з контролю напружено-деформованого стану магістральних газопроводів згідно договору №Ф25/161-2008 на виконання науково-дослідних (технічних) робіт, були використані наступні результати дисертаційної роботи Семегена М. М.:

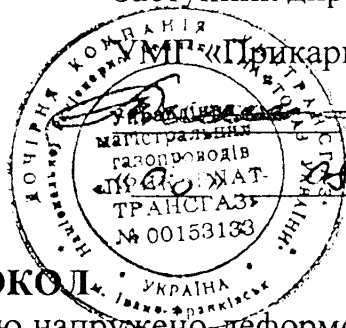
- ультразвуковий метод визначення напружень;
- електричні схеми пристрою для вимірювання швидкості ультразвуку (Пат. 32624. G01N 5/00. - №u200800077, Заявл. 02.01.2008, Опубл. 26.05.2008, Бюл. №10);
- розроблений ультразвуковий пристрій.

Начальник відділу
з експлуатації МГ і ГРС

Сидор М.Д.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник директора



Михайлів В.І.

2009.

ПРОТОКОЛ

проведення ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтної ділянки магістрального газопроводу "Союз"

1. Промислові випробування проводилися 06.08.2009 р. згідно з Методикою виконання ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів» на підземній лінійній частині магістрального газопроводу «Союз» Ду 1400 мм Богородчанського ІВУМГ, УМГ «Прикарпаттрансгаз», за допомогою розроблених в дисертаційній роботі «Удосконалення ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів» пристрою та методики.

2. Відомості про об'єкт контролю:

- матеріал трубопроводу: сталь Х60;
- механічні характеристики матеріалу: межа плинності $\sigma_{0,2} = 522$ МПа, межа міцності $[\sigma] = 638$ МПа;
- зовнішній діаметр трубопроводу $D = 1420$ мм;
- товщина стінки трубопроводу: 16,5 мм.

3. Умови навантаження об'єкта контролю при проведенні контролю:

- внутрішній тиск: 6 МПа;
- температура навколишнього середовища $T = 19^{\circ}\text{C}$;
- температура-поверхні труби $T = 41^{\circ}\text{C}$;
- додаткові навантаження: зсувні процеси ґрунту при інтенсивних опадах.

4. Завдання, які необхідно вирішити:

- відпрацювання методики, яка дає можливість характеризувати вплив факторів, що створюють напружено-деформований стан магістрального трубопроводу на його ремонтній ділянці;
- визначення розподілу напружень вздовж ремонтної ділянки магістрального трубопроводу.

5. Результати контролю. Контроль проводився по верхній твірній магістрального трубопроводу в п'яти точках по околу труби, яка була попередньо звільнена від ґрунту шляхом шурфування в трьох місцях по довжині ремонтної ділянки. Крок точок контролю по околу труби становив $s = 25^{\circ}$, віддаль між шурфами рівна 20 м. В цих точках по перерізу труби

визначалась зміна швидкості поширення ультразвукової хвилі. Всі отримані значення зведені в табл.1. Також визначені таким чином напруження в контрольованих перерізах рис. 1 та рис. 2.

Таблиця 1

Отримані дані зміни швидкості поширення ультразвукової хвилі в стінці металу газопроводу Δv , м/с

φ , $\pi/180$	1 шурф			2 шурф			3 шурф		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
5,41	2,152	0,601	1,213	2,132	0,624	0,184	2,145	0,613	1,132
5,84	2,231	0,633	1,410	2,115	0,645	1,110	2,162	0,608	1,184
0	2,156	0,632	1,346	2,096	0,612	1,091	2,239	0,656	1,341
0,44	2,115	0,621	1,254	2,137	0,601	1,157	2,330	0,625	1,247
0,87	2,132	0,610	1,182	2,148	0,613	1,258	2,241	0,634	1,139

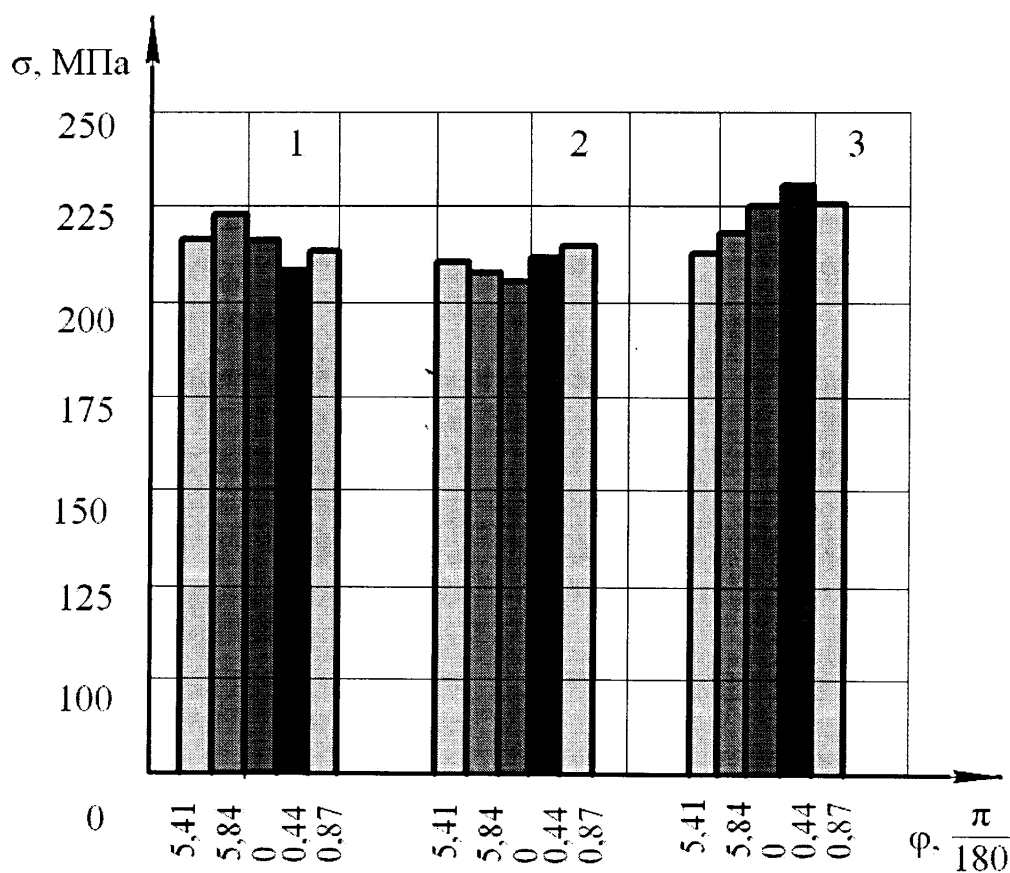


Рис. 1. Діаграма розподілу напружень вздовж контрольованої поверхні трубопроводу

1, 2, 3 – шурфи.

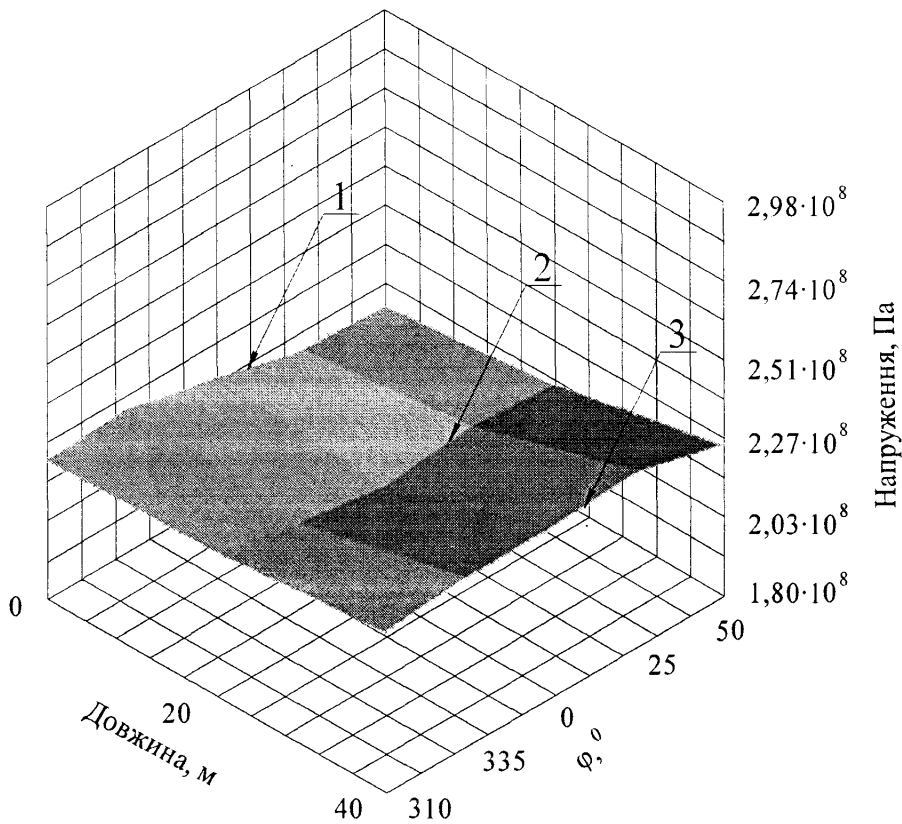


Рис.2. Розподіл напружень вздовж контрольованої поверхні трубопроводу

1, 2, 3 – шурфи.

Порівнюючи таким чином визначені напруження з паспортними, бачимо, що $\sigma_{\text{вим}} < [\sigma]/n$, де n – коефіцієнт запасу міцності. Враховуючи отримані результати проведеного контролю, є можливість зробити висновок про безпечність проведення ремонтних робіт та повного звільнення від ґрунту всієї ремонтної ділянки газопроводу, хоча дана ділянка газопроводу терпить поздовжньо поперечний згин в горизонтальному напрямі в межах допустимого.

Отже, можна зробити висновки:

- напружено-деформований стан ділянки газопроводу на час проведення контролю відповідає діючим нормам;
- навантаження на газопровід, які пов'язані з рухом ґрунту, не привели до значного росту напружень. Заходів по зниженню рівня напружень у стінках трубопроводу на момент проведення контролю не потрібно;
- необхідно проводити геодезичний моніторинг положення трубопроводу не менше 1 разу в місяць після інтенсивних опадів;
- швидкий розвиток зсувних процесів ґрунту (при інтенсивних опадах) може привести до виникнення небезпечної ситуації та руйнування трубопроводу в зв'язку з цим рекомендується провести реконструкцію ділянки газопроводу.

Проведено контроль технічного стану трубопроводу та проаналізовано в експлуатаційних умовах вплив основних чинників на напружено-деформований стан ремонтної ділянки трубопроводу «Союз», Ду=1400 мм, Богородчанського ЛВУМГ. Виявлено нерівномірний характер розподілу напружень по околу та

довжині ділянки трубопроводу внаслідок його згину зумовленого рельєфом місцевості, найбільші напруження 231 МПа виявлені при контролі трубопроводу в 3 шурфі.

Відповідальний
за виконання робіт

Начальник відділу
експлуатації МГ і ГРС

Головний інженер
Богородчанського ЛВУМГ



Семенген М.М.



Сидор М.Д.



Опацький В.І.


№ 16-222

08.08.2009р.

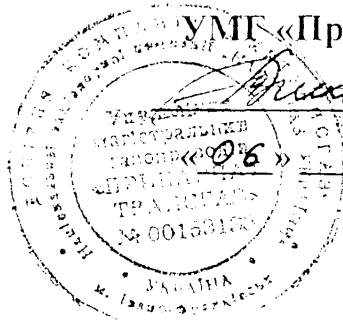
“Затверджую”

Заступник директора

УМГ «Прикарпаттрансгаз»

 Михайлів В.І.

08 2009р.



АКТ

Складений в тому, що науковцями Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу на протязі 2008-2009 рр. проводились роботи з контролю напружено-деформованого стану магістральних газопроводів згідно договору №Ф25/161-2008 на виконання науково-дослідних (технічних) робіт.

Контроль напружено-деформованого стану проводився на газопроводі “Союз” Ду 1400мм Богородчанського ЛВУМГ, УМГ “Прикарпаттрансгаз”.

Відповідальний

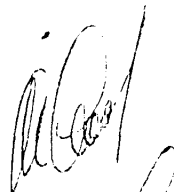
за виконанняробіт:



Семеген М. М.

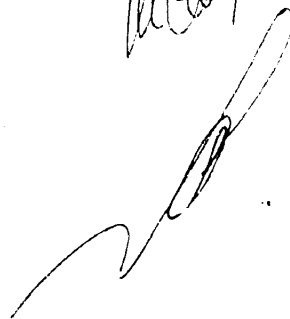
Погоджено:

Начальник відділу
з експлуатації МГ і ГРС



Сидор М.Д.

Головний інженер
Богородчанського ЛВУМГ



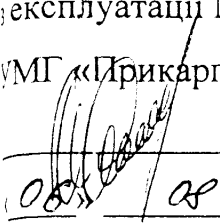
Опацький В.І.

«ПОГОДЖЕНО»

Начальник відділу

експлуатації МГ і ГРС

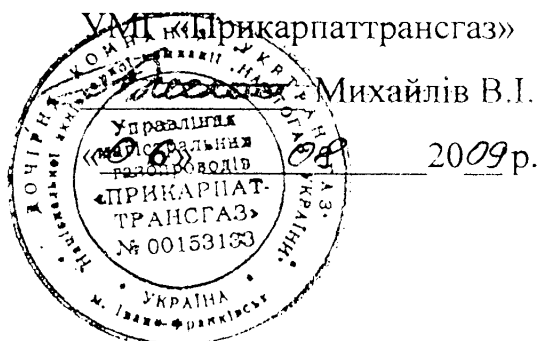
УМГ «Прикарпаттрансгаз»


Сидор М.Д.
2009р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник директора

УМГ «Прикарпаттрансгаз»

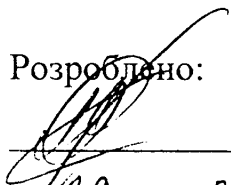


Михайлів В.І.

2009р.

**МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РЕМОНТНИХ ДІЛЯНОК
МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ**

Розроблено:


Семеген М.М.
«29» 07 2009р.

Зміст

1. Область застосування	3
2. Засоби вимірювань, допоміжні інструменти та матеріали	3
3. Метод контролю	3
4. Вимоги безпеки, охорони навколишнього середовища	4
5. Проведення контролю напружено-деформованого стану трубопроводу на ремонтній ділянці	4
Список використаних джерел	6
Додаток А. Визначення коефіцієнтів акустопружності	7
Додаток Б. Визначення виду зусилля	10
Додаток В. Визначення місця прикладання зусиль на ділянці трубопроводу	11

1 Область застосування

1.1 Даний документ встановлює методику виконання контролю напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів ультразвуковим методом, яка дає можливість знайти місце, напрям дії та вид зусиль для прогнозування їх впливу при проведенні ремонтних робіт.

1.2 Об'єктом контролю є безшовні, спіральшовні та прямошовні сталі труби діаметром 1420 мм, виготовлені з конструкційних сталей (ГОСТ 8731-74. Труби сталі безшовні горячдеформовані), (ГОСТ 20295-85. Труби магістральні. Труби сталі зварні для магістральних газо нафтопроводів), (ГОСТ 10706-76. Труби сталі електрозварні прямошовні).

1.3 Область використання: магістральні нафтогазопроводи, трубопровідні об'язки технологічного обладнання компресорних станцій, дожимних компресорних та нафтоперекачувальних станцій, станцій підземного зберігання газу, газорозподільних станцій, вузлів заміру витрати газу.

2 Засоби вимірювань, допоміжні інструменти та матеріали

2.1 Засоби вимірювань, обладнання:

- розроблений пристрій;
- система п'єзоелектричних перетворювачів;
- обчислювальний модуль на базі персонального комп'ютера SAMSUNG R60plus;
- ультразвуковий дефектоскоп УД4-Т;
- випробувальна машина РМ-50.

2.2 Допоміжні пристрої та матеріали:

- шліфувальний інструмент та матеріали для підготовки поверхні згідно ГОСТ 12.2.013.1-91;
- обезжирююча рідина (спирт згідно ГОСТ 17299-78 або ацетон згідно ГОСТ 2768-84) для підготовки поверхні;
- контактна рідина (смола епоксидно-діанова неотвердла згідно ГОСТ 10587-84).

Всі засоби контролю і допоміжні пристрої повинні мати вибухозахищене виконання у відповідності з вимогами техніки безпеки та охорони праці.

3 Метод контролю

3.1 Визначення найбільш небезпечних перерізів ремонтних ділянок магістральних трубопроводів.

3.2 Визначення напружень в перерізах контролю, які співпадають з головними осями трубопроводу [1] виконуються методом акустопружності.

3.3 Суть методу базується на існуванні в межах пружних деформацій залежності швидкостей поширення пружних хвиль, які поширюються в напрямі, перпендикулярному площині дії напружень від величини механічних напружень, що діють в осьовому, тангенційному та радіальному напрямі. [2].

3.4 Для визначення напружень використовуються ультразвукові первинні перетворювачі для збудження ультразвукових хвиль. Система первинних перетворювачів складається з п'яти п'єзоелектричних перетворювачів, які встановлені в обоймах, що кріпляться до рами під певними кутами нахилу до досліджуваної поверхні трубопроводу. Дві пари п'єзоперетворювачів розміщені у взаємоперпендикулярних площинах, у кожній з яких один п'єзоперетворювач служить випромінювачем, а другий - приймачем ультразвукових коливань. Один п'єзоперетворювач розміщений у центральній частині системи перетворювачів і встановлений перпендикулярно до досліджуваної поверхні. Таким чином, системою перетворювачів визначається швидкість ультразвукових коливань у трьох напрямках, що в свою чергу дає можливість визначити величину напружень відносно осей симетрії труби [3, 4].

3.5 Безпосередньо вимірюючими величинами є швидкість поширення ультразвукових хвиль в матеріалі труби [5].

3.6 Знайдені напруження є усереднені по об'єму ультразвукового пучка, який визначається поперечними розмірами п'єзоелектричного перетворювача та товщиною матеріалу. Величини визначених напружень порівнюються із вихідними значеннями, які відповідають початковим значенням акустичних параметрів, визначеними до їх виникнення.

3.7 Коефіцієнти акустопружності, які використовуються для переходу від акустичних параметрів до силових (значення напружень), є характеристиками матеріалу, що визначаються модулями його лінійної та нелінійної пружності. Загальні основи експериментального визначення величини даних коефіцієнтів для певного матеріалу (марки сталі) викладені в додатку А даної методики.

4 Вимоги безпеки, охорони навколишнього середовища

При виконанні контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок трубопроводів ультразвуковим методом необхідно дотримуватись правил та вимог техніки безпеки і охорони праці [6]:

- при роботі з електроустановками необхідно дотримуватись правил електробезпеки по ГОСТ 12.1.019 та 12.1.038;
- загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони згідно ГОСТ 12.1.005;
- при визначенні механічних напружень дотримуватись правил безпеки, згідно інструкцій по роботі з використовуваними при цьому засобами, а також відповідними галузевими «Правилами безпеки».

5 Проведення контролю напружено-деформованого стану трубопроводу на ремонтній ділянці

Перед початком проведення контролю напружено-деформованого стану ремонтної ділянки магістрального трубопроводу, виконується підготовка даної ділянки в залежності від виду ремонтних робіт, використовуваних при цьому

технічних засобів, природно-кліматичних та погодних умов, а також у відповідності з вимогами техніки безпеки і пожежної безпеки.

В загальному випадку послідовність проведення контролю напружено-деформованого стану лінійної підземної частини магістрального трубопроводу буде такою:

- Виявлення місцезнаходження ділянки трубопроводу за допомогою різних типів трубошукачів. Після виявлення місцезнаходження трубопроводу аналізують просторове положення трубопроводу і встановлюють ймовірні найбільш небезпечні перерізи і розбивають границі ремонтного котловану.

- Проводиться розробка шурфів, при цьому звільняється від ґрунту ділянка трубопроводу за допомогою землерийних механізмів або вручну у відповідності з нормативними документами. Земляні роботи виконуються в два етапи. На першому етапі розробляється ґрунт до верхньої твірної труб. На другому етапі при необхідності проводиться повне звільнення від ґрунту ремонтної ділянки трубопроводу. Звільнення ділянки труби від ґрунту проводиться з двох сторін труби, при цьому необхідно врахувати можливість вільного доступу до трубопроводу обслуговуючого та ремонтного персоналу.

- Очистка ремонтної ділянки трубопроводу проводиться також у два етапи: попередня після звільнення трубопроводу від ґрунту і утворення ремонтного котловану та кінцева. Очистка ділянки трубопроводу проводиться пневматичними, електричними з автономним живленням або механічними щітками, скребками, шліфувальними машинками. Перед початком проведення контролю напружено-деформованого стану ремонтної ділянки трубопроводу, необхідно визначити місця концентрації напружень (місце зварювання, заземлення, згинів), а також провести підготовку поверхні до чистоти $Rz=40$ мкм для проведення контролю [7], площа зачистки яких для кожного вимірювання становить $150 \times 150 \text{ мм}^2$.

- Встановлюємо первинний перетворювач на поверхні труби, при цьому для кращого контакту в якості контактного шару використовуємо епоксидну смолу, в'язкість якої при температурі 25^0 C повинна дорівнювати $12 - 25 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$ та проводимо регулювання положень ультразвукових п'єзоперетворювачів.

- П'єзоелектричні перетворювачі з'єднуються з ультразвуковим пристроєм через перемикач за допомогою коаксіальних кабелів. Пристрій має нормалізований вихід для зв'язку з персональним комп'ютером.

- Вмикання приладу, перевірка його роботоздатності, вивід на екран монітора часову розгортку приймаючих сигналів.

- Перевірка відсутності на часовій розгортці додаткових імпульсів зикликаних наявністю в області контролю додаткових відбиваючих поверхонь дефектів і т.д.).

- Наступний крок - це проведення настроювання ультразвукового пристрою. Ми можемо коректувати форму акустичного поля п'єзоелектричного перетворювача при вимірюванні швидкості проходження ультразвуку, а також вибирати період коливань луно-імпульсу для визначення часу переходу його через нуль.

- За допомогою клавіатури вибираємо наступні опції роботи пристрою:

- 1) ввід акустопружні коефіцієнтів A_i для даного матеріалу труб;
- 2) ввід команд для обчислення напружень;
- 3) номерів точок контролю напружено-деформованого стану в перерізі ремонтної ділянки трубопроводу;
- 4) запис вимірних і обчислених даних у внутрішню пам'ять пристрою;
- 5) передача даних на персональний комп'ютер для їх кінцевої обробки та візуалізації;
- 6) за допомогою розробленого алгоритму знаходимо місце, напрям дії та вид зусиль.

Список використаних джерел

- 1 Семенен М. М. Акустичний контроль складних ділянок газопроводу в осесиметричному напруженому стані / М. М. Семенен, З. П. Лютак // Наукові вісті галицької академії. - 2007. - №1(11). - С. 152-158.
- 2 Семенен М. М. Визначення напружено-деформованого стану трубопроводів на ремонтних ділянках / М. М. Семенен, З. П. Лютак // Методи та прилади контролю якості. – 2008. – №21. – С. 43-47.
- 3 Семенен М. М. Метод акустичного контролю напруженого стану ремонтних ділянок трубопроводу / М. М. Семенен // Неруйнівний контроль та технічна діагностика: нац. наук.-техн. конф. і виставка, Київ, 14-17 квітня 2009 р.: тези доп. і повідомл. – Київ, 2009.
- 4 ГОСТ 26266-90. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Общие технические требования.
- 5 Пат. 32624. G01H 5/00. Пристрій для вимірювання швидкості ультразвуку / Лютак І. З., Семенен М. М., Померенко А. В., Бедзір А. О. - №u200800077, Заявл. 02.01.2008, Опубл. 26.05.2008, Бюл. №10.
- 6 Аварийно-восстановительный ремонт магистральных нефтепроводов / А. Г. Гумеров, Х. А. Азметов, Р. С. Гумеров, М. Г. Векштейн; за ред. А.Г. Гумерова – М.: Недра, 1998. - 271 с.
- 7 Семенен М. М. Дослідження впливу нерівностей поверхні об'єкта контролю на поширення ультразвукових хвиль / М. М. Семенен, З. П. Лютак // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – 2009. - №14. – С. 20-26.
- 8 Димитриенко Ю. И. Тензорное исчисление / Ю. И. Димитриенко. - М.: Высшая школа, 2001. – 575 с.

Додаток А

Визначення коефіцієнтів акустопружності

В результаті проведених розрахунків [1] можна стверджувати, що отримано рівняння акустопружності для проведення контролю напружено-деформованого стану металу стінки трубопроводу наступного виду:

$$\left. \frac{\Delta v_{\text{вим}}}{v_0} \right|_{\perp ij} = A_i \sigma_{ii} + A_j \sigma_{jj}, \quad (\text{A1})$$

де $\Delta v_{\text{вим}}$ - виміряна зміна швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в напружено-деформованому середовищі відносно швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в ненапруженому середовищі;

v_0 - швидкість поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в ненапруженому середовищі;

σ_{ii}, σ_{jj} - величини напружень;

A_i, A_j - акустопружні коефіцієнти, які визначаються експериментально для конкретної марки сталі методом одноосних випробувань на розтяг;

i, j - індекси координатних осей X, Y, Z .

Рівняння (A1) може бути застосоване до визначення акустопружності в довільному напрямку поширення ультразвукової хвилі. Для визначення напружень у трьох взаємноперпендикулярних напрямках застосуємо теорію тензорного числення [8] до (A1):

$$\begin{aligned} \left. \frac{\Delta v_{\text{вим}}}{v_0} \right|_{\perp xz} &= A_x \sigma_{xx} + A_z \sigma_{zz}, \\ \left. \frac{\Delta v_{\text{вим}}}{v_0^*} \right|_{\angle yx} &= 1,4142 (A_{x1} \sigma_{xx} + A_{z1} \sigma_{zz}), \\ \left. \frac{\Delta v_{\text{вим}}}{v_0^*} \right|_{\angle yz} &= 1,4142 (A_{y2} \sigma_{yy} + A_{z2} \sigma_{zz}). \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

де $\Delta v_{\text{вим}}$ - виміряна зміна швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в середовищі з прикладеним навантаженням у відповідних напрямках;

v_0^*, v_0 - відповідно швидкість поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в середовищі в ненапруженому стані у відповідних напрямках;

$A_x, A_z, A_{x1}, A_{z1}, A_{y2}, A_{z2}$ - акустопружні коефіцієнти, що визначаються відповідно у нормальній площині XZ до напрямку прикладання зусилля та під кутом α до площин YX та YZ .

При виведенні системи рівнянь враховано, як видно з рис. А1, що перше рівняння описує поширення ультразвукової хвилі нормально до площини XZ ,

два наступні описують поширення хвилі під однаковими кутами до площин UX та YZ , які рівні $\alpha=45^\circ$. У результаті отримаємо аналітичну залежність, яка пов'язує величину напружень в середовищі поширення ультразвукових хвиль у трьох напрямках із зміною величини їх швидкості, що дає можливість характеризувати вплив зусиль.

Згідно, отриманої математичної моделі визначаємо компоненти напружень у трьох взаємноперпендикулярних напрямках.

На рис. А2 показано визначення акустопружних коефіцієнтів A_i в лабораторних умовах, методом навантаження на розтяг зразків за допомогою розривної машини. При цьому акустопружні коефіцієнти визначаються у нормальній площині до напрямку прикладання зусилля та під кутом α до відповідних площин.

Акустопружні коефіцієнти визначаються за формулою:

$$A_i = \frac{1}{k \cdot v_0} \sum_{k=1}^k \left[\frac{\Delta v_{вим}}{\sigma_{ij}} \right]_k, \quad (A3)$$

де k - кількість кроків навантажень;

$\Delta v_{вим}$ - виміряна зміна швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в середовищі з прикладеним навантаженням.

При визначенні даних коефіцієнтів орієнтація зразків вибирається згідно рис. А1. Для зразків із трубної сталі у випадку 1 визначаються коефіцієнти акустопружності $A_x = A_y$, а у випадку 2 - коефіцієнт акустопружності A_z .

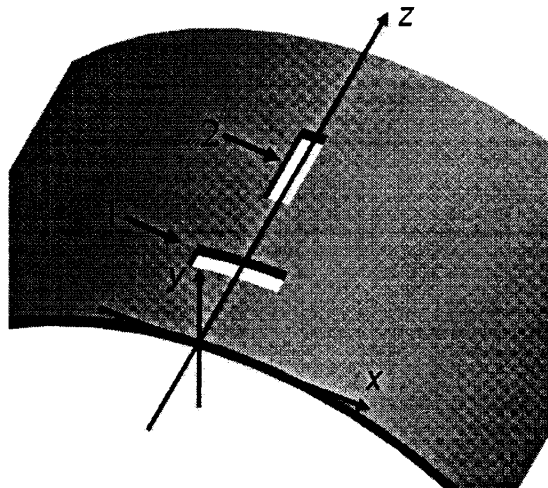


Рис. А1. Розміщення взірців на циліндричній поверхні труби

- 1 – поперечний взірець;
- 2 – поздовжній взірець.

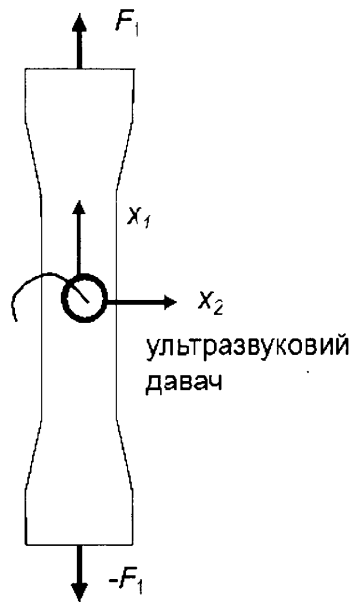


Рис. А2. Схема визначення акустопружних коефіцієнтів для трубної сталі

F_i - навантаження;

X_i - осі Декартових координат.

Експериментальне визначення акустопружних коефіцієнтів включає наступні етапи:

1) Ідентифікація марки сталі та технології обробки матеріалу труби. Визначення механічних характеристик (межа плинності та межа міцності) матеріалу труби методами механічних випробувань.

2) Виготовлення не менше 3-х зразків для випробувань на розтяг. Якщо матеріал є акустично анізотропним (при наявності власної акустичної анізотропії, яка перевищує 1,5%), вирізається – не менше ніж 3-и зразка вздовж та поперек твірної труби, рис. А1.

3) Вимоги до обладнання для проведення механічних випробувань:

- випробувальна (розривна) машина повинна забезпечувати зміну механічного напруження в діапазоні $0 - 0,7 \sigma_{02}$, де σ_{02} – границя плинності матеріалу;

- похибка вимірювання силовимірювального пристрою – не більше 1%;

- відхилення показів сило вимірювального пристрою при постійному навантаженні протягом 10 хвилин – не більше величини похибки вимірювання сили;

- вимірювання швидкості поширення ультразвукових хвиль при випробуваннях на розтяг проводиться при ступеневому навантаженні зразка від початкового навантаження, яке відповідає значенню напружень $\sigma < 0,1 \sigma_{02}$ до максимального навантаження, яке відповідає $\sigma = 0,7 - 0,8 \sigma_{02}$ і далі при ступеневому розвантаженні;

- визначення значень акустопружних коефіцієнтів проводиться за формулою (А3);

- визначаються середні значення величини акустопружних коефіцієнтів за результатами проведених вимірювань на 3-х зразках.

Додаток Б

Визначення виду зусилля

Зміна швидкостей поширення ультразвукової хвилі при різних схемах навантаження ділянки трубопроводу, які показані на рис. Б1:

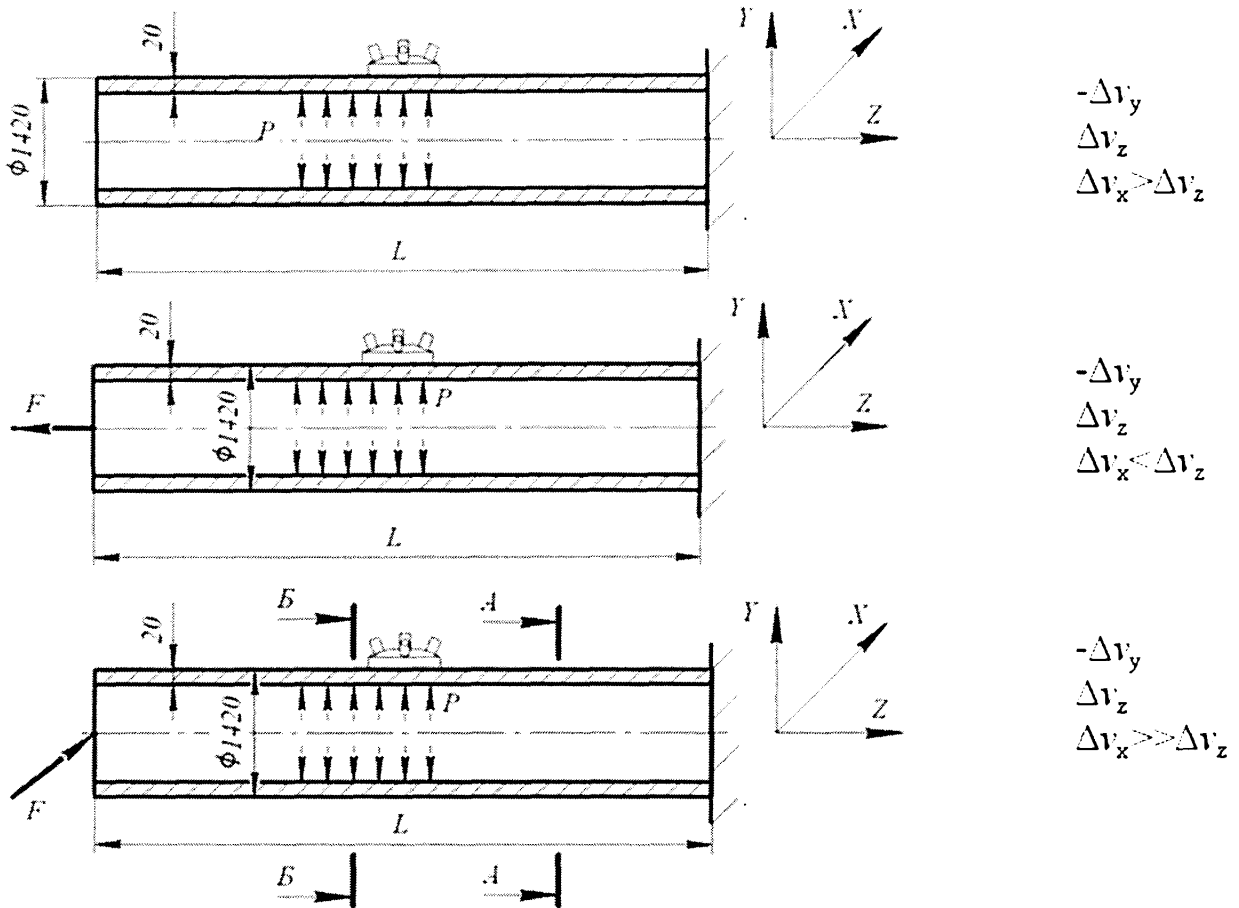


Рис. Б1. Схеми навантаження ділянок трубопроводу

В залежності від виду навантаження (внутрішній тиск, зусилля розтягу чи згину, а також їх поєднання) виходячи із отриманих вище умов, можна зробити висновок про зміни комбінацій величин напружень в трьох взаємоперпендикулярних напрямках по осях симетрії труби (X , Y , Z). Відповідно спостерігаються при цьому і зміни комбінацій швидкості поширення ультразвукових хвиль відносно даних осей симетрії ділянки трубопроводу.

Додаток В

Визначення місця прикладання зусиль на ділянці трубопроводу

Кількість точок контролю, як по околу труби так і вздовж неї визначаємо із рівняння опису розподілу напружень. Слід зауважити, що подальший алгоритм визначення місця прикладання зусиль на ділянці трубопроводу є аналогічними, як при розгляді по околу труби так і вздовж ділянки трубопроводу. Дві точки контролю описують лінійний закон розподілу напружень. Незважаючи на те, що цей закон дозволяє мінімізувати кількість точок по околу труби, лінійний опис напружень не дозволяє визначити місце максимального напруження, що відповідає місцю прикладання зусилля. Це місце можна визначити мінімумом із трьох точок, де в крайніх точках повинні бути напруження меншої величини ніж в центральній. Розподіл напружень за трьома точками описується параболічним рівнянням:

$$\sigma(x) = ax^2 + bx + c, \quad (B1)$$

де $\sigma(x)$ – функція, що описує розподіл напружень по околу труби;

x – координата по околу труби;

a, b, c – коефіцієнти.

Коефіцієнти, що використовуються в (B1) знайдемо на основі матричного іслення:

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \end{pmatrix}^{-1}, \quad (B2)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – значення еквівалентних напружень у точках контролю;

x_1, x_2, x_3 – координати точок контролю по околу труби.

Рівняння (B1) не може точно екстраполювати величину напружень на значній віддалі від точок контролю. Ми вважаємо, що ефективна довжина відрізка екстраполяції складає:

$$x_3 - x_1 \pm (x_3 - x_1)/2. \quad (B3)$$

Екстраполяцію на дальших відстанях ефективніше оцінювати за результатами аналізу швидкості зміни напружень на відріжку контролю. Цього можна досягти визначивши похідну із апроксимаційного рівняння (B1):

$$\frac{d\sigma(x)}{dx} = 2ax + b. \quad (B4)$$

У (B4) швидкість зміни напружень визначається коефіцієнтом $2a$. Чим більше значення цього коефіцієнту, тим ближче місце концентрації напружень до відрізка проведення контролю по околу труби.

Точність визначення місця максимальних напружень по околу труби залежатиме від довжини ділянки контролю. Очевидно, що максимальної точності досягається у випадку, коли довжина відрізка (В3) дорівнює довжині околу труби. Проте, таку умову не практично реалізувати в натурних умовах проведення ремонтних робіт чи експлуатації трубопроводів. Для вирішення умови точного визначення місця максимальних напружень необхідно вирішити задачу оптимізації:

$$\begin{cases} \Delta\sigma \rightarrow \min, \\ L_g/L_{omp} \rightarrow \max, \end{cases} \quad (B5)$$

де $\Delta\sigma$ - різниця між екстрапольованими напруженнями та дійсними;

L_g - довжина відрізка контролю;

L_{omp} - довжина околу труби.

Розв'язок (B5) необхідно проводити для кожного окремого випадку, враховуючи умови доступу до труби.

З аналізу (B4) приходимо до трьох випадків розподілу напружень:

- а) якщо $a \approx 0$, то напруження є рівномірними по околу труби, місця їх концентрації не має;
- б) якщо $2a \gg 0$, то максимальні напруження є в напрямку від x_1 до x_3 ;
- в) якщо $2a \ll 0$, то максимальні напруження є в напрямку від x_3 до x_1 .

Для оцінки віддалі максимального напруження від відрізка контролю введемо коефіцієнт віддалі k_g :

$$k_g = \frac{L_{вим}}{2aL_{omp}}. \quad (B6)$$

Аналізуючи (B6) приходимо до висновку, що при однаковій довжині відрізка контролю із збільшенням швидкості наростання величини напружень, k_g буде прямувати до мінімального значення.

Враховуючи (A1) та (B1) – (B6) отримаємо математичну модель визначення місця прикладання зусиль по околу труби:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\Delta v_{вим}}{v_0} \right|_{\perp xz} &= A_x \sigma_{xx} + A_z \sigma_{zz}, \\ \left. \frac{\Delta v_{вим}}{v_0^*} \right|_{\angle yx} &= 1,4142 (A_{x_1} \sigma_{xx} + A_{z_1} \sigma_{zz}), \\ \left. \frac{\Delta v_{вим}}{v_0^*} \right|_{\angle yz} &= 1,4142 (A_{y_2} \sigma_{yy} + A_{z_2} \sigma_{zz}), \\ \sigma_i(x_i) &= ax_i^2 + bx_i + c; \end{aligned} \quad (B7)$$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \end{pmatrix}^{-1}.$$

Якщо $a \approx 0$, то $\sigma_i = const$;
 якщо $2a \gg 0$, то $\sigma = F(k_a)$ в напрямку $x_1 \rightarrow x_3$;
 якщо $2a \ll 0$, то $\sigma = F(k_a)$ в напрямку $x_3 \rightarrow x_1$.

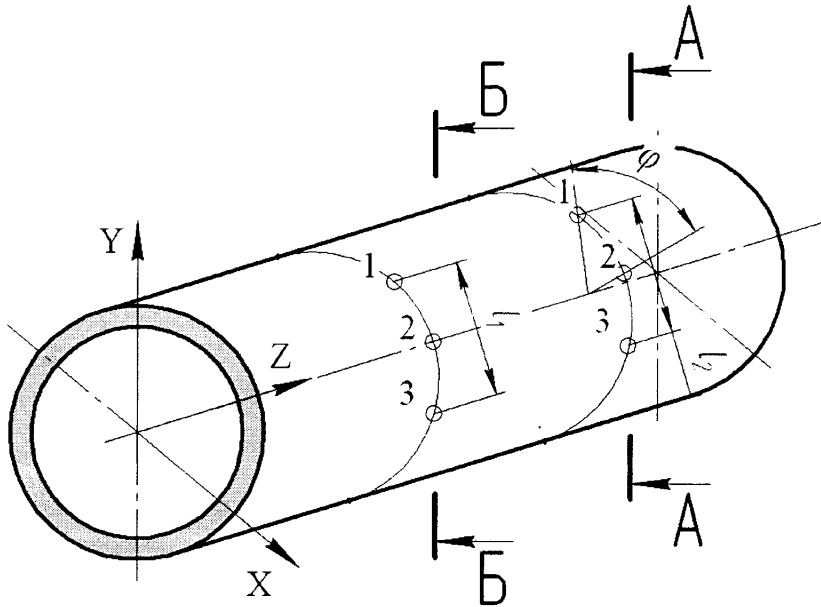


Рис. В1. Вибір точок контролю напружень

1, 2, 3 – відповідно точки контролю напружень у перерізах А-А та Б-Б;
 l_1, l_2 – відрізки контролю;
 переріз А-А на відстані L_2 від місця защемлення;
 переріз Б-Б на відстані L_1 від місця защемлення.

Отже, виявити дійсний розподіл діючих у стінці трубопроводу напружень на ремонтній ділянці, можна провівши відповідні заміри, як по околу труби так і вздовж її вісі у певних перерізах, при цьому звільнивши від ґрунту верхню твірну труби, шляхом шурфування.

В результаті отримаємо просторовий графік розподілу напружень ремонтної ділянки магістрального трубопроводу, аналізуючи який можна визначити місце дії зусилля P .

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Технічний директор

ЗАГ НТЦ "Промтехдіагностика"

Дуля В. І.

2010 р.



Дозвіл № 417.07.30-74.30-0

(Держгірпромнагляд)

ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАННЯ № 1/10

1. Назва виробу (дата відбору зразка, тощо):

- труба Ø 1420x16 мм, Ст. Х60;
- дата відбору зразків 28.12.09р.;
- кількість зразків – 5 шт.;
- заготовки для виготовлення зразків вирізались з частини труби і орієнтовані вздовж її вісі.

2. Місце проведення випробувань:

ЗАГ НТЦ "Промтехдіагностика",
м. Івано-Франківськ, вул. С. Височана, 47

3. Дата поставки зразків: 4 березня 2010 р.

4. Дата випробувань: 4-5 березня 2010 р.

5. Мета випробувань, НД на метод випробувань, ЗВТ та в.о.:

- Проведення методів випробувань на розтяг та згин зразків;
- Метали. Методи випробування на розтяг: ГОСТ 1497-84;

- *Машина випробувальна РМ-50, зав. № 880, свідоцтво про повірку №763 чинне до 16.04.2010р.;*
- *Маснітні прилади - Sigma-210, №91755;*
коерцитиметр КРМ-Ц-К2М, №564;
- *Ультразвукові прилади - SIGMA;*
дефектоскоп УД-4Т;
- *Контактна рідина смола епоксидно-діанова неотвердла ГОСТ 10587-84;*
- *Знежирювальна рідина - спирт етиловий технічний ГОСТ 17299-78 або ацетон технічний ГОСТ 2768-84;*
- *Штангенциркуль ШЦ-250, зав. № 464652, свідоцтво про повірку №694 чинне до 16.04.2010р.;*
- *Штангенциркуль ШЦ-150, зав. № 123159, свідоцтво про повірку №1183 чинне до 16.04.10р.;*
- *Лупа вимірювальна ЛН, зав. №22617, свідоцтво про повірку №1191 від 08.07.09р.*

6. Результати випробувань:

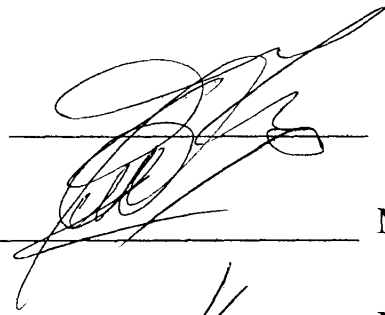
Тип зразків	Площа поперечного перерізу, мм ²	Зусилля, що приводить до виникнення напружень плинності, кН	Межа міцності, МПа	Місце утворення пластичних деформацій (шийки)
1	319,0	150	511,0	На віддалі 58 мм від поперечної вісі зразка

Висновки:

Ультразвуковим методом з достатньою точністю можна визначити напруження межі плинності металу.

Виконавці:

Начальник відділу
технічної діагностики



І. П. Дзінько

М. М. Семенен

Інженер-технолог



М. М. Кород

Інженер-технолог



В. В. Попадюк

Даний протокол стосується тільки зразків, що випробовуються.

№ 15-1015

15.03.2010 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Технічний директор

ЗАТ НТЦ "Промтехдіагностика"

Дуля В. І.

15.03.2010 р.



АКТ

Складений в тому, що науковцями Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу протягом 4-5 березня 2010 р. проводились дослідження фізико-механічних характеристик зразків виготовлених з сталі Х60. Зразки піддавались методам випробування на розтяг та згин в лабораторії ЗАТ НТЦ "Промтехдіагностика".

Відповідальний

за виконання:

М. М. Семенген

Погоджено:

Начальник відділу

технічної діагностики

І. П. Дзінько