

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Фізико-технічний факультет, Інженерно-фізичний факультет  
(повне найменування інституту, факультету)

кафедра Фізичної матеріалознавства  
(повне найменування кафедри)

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

Мастер

(ступінь вищої освіти)

на тему Оптимізація технології виготовлення  
проведення досліджень та удосконалення технології  
атомних станцій в процесі їх експлуатації

Виконав: студент(ка) 5 курсу, групи ІР-299

Спеціальності 132, Матеріалознавство  
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Примісне матеріалознавство

(прізвище та ініціали)

Керівник Витченко В.С.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Валюв Г.П.

(прізвище та ініціали)

## ЗАТВЕРДЖУЮ

« 18 » 12 2014 року

Намьсянникова Світлана Михайлівна  
(прізвище, ім'я, по батькові)

4. Технологічне співв'язування ВЕР з розподілом ВВЕР. 8. Матриця та обліковий  
для вищого температурного тиску. 3. Співвідношення безперервного устаткування  
вимірювань моніторингу. 4. Результати вимірювання системи безперервного  
УЗ-моніторингу. 5. Освітлення мікрофундур, механізмів висловлюється  
мікрофундур. 6. Освітлення мікрофундур, механізмів висловлюється  
мікрофундур.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

| Розділ      | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                            |
|-------------|-------------------------------------------|----------------|----------------------------|
|             |                                           | завдання видав | приймав виконання завдання |
| I           | Величко В.С.                              |                |                            |
| II          | - " - "                                   |                |                            |
| III         | - " - "                                   |                |                            |
| IV          | - " - "                                   |                |                            |
| V           | Кружинева В.В.                            |                |                            |
| VI-VII      | Косаров О.В.                              |                |                            |
| Кормо-погр. | Піт О.В.                                  |                |                            |

7. Дата видачі завдання « 01 » жовтня 2019 року.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проекту (роботи)                                                         | Строк виконання етапів проекту (роботи) | Примітка |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------|
| 1.    | Методичний опис                                                                                  | 01.10.19 -                              |          |
| 2.    | Опис матеріалів та методик дослідження                                                           | 25.10.19<br>29.10.19<br>3.11.19         |          |
| 3.    | Аналіз машинної виконання системи безперервного ультразвукового контролю труб                    | 4.11.19 -<br>10.11.19                   |          |
| 4.    | Проведення ретельного контролю економії металу трубопроводу 8-го корпусу з використанням методик | 11.11.19 -<br>23.11.19                  |          |
| 5.    | Оформлення економічної частини                                                                   | 25.11.19 -<br>29.11.19                  |          |
| 6.    | Опис заходів щодо енергії праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях                              | 1.12.19 -<br>9.12.19                    |          |
| 7.    | Оформлення узагального матеріалу                                                                 | 10.12.19 - 16.12.19                     |          |

Студент(ка)

(підпис)

Кружинева С.М.  
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Величко В.С.  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи містить: 114 с., 33 рис., 23 табл., 60 джерел.

Метою дипломної роботи є визначення та аналіз можливостей підвищення ефективності методів руйнівного та неруйнівного контролю зварних з'єднань і основного металу трубопроводів 2-го контуру атомної електростанції в процесі їх експлуатації та без порушення їх конструкційної цілісності.

Предметом дослідження є використання безперервного неруйнівного контролю для діагностики дефектності зварних з'єднань та застосування методу мікроразків для дослідження впливу старіння на механічні властивості основного металу трубопроводу.

Об'єктом дослідження є трубопровід 2-го контуру атомної станції.

В роботі проаналізовано можливість організації безперервного ультразвукового (УЗ) моніторингу дефектів зварних з'єднань трубопроводів. Обґрунтовано вибір матеріалів та обладнання, запропоновано схему безперервного УЗ контролю для організації на ЗАЕС.

Досліджено можливість використання мікроразків, виготовлених без порушення конструкційної цілісності трубопроводу, для проведення контролю механічних властивостей основного металу. Проведено мікроструктурні, механічні та фрактографічні дослідження металу після  $100 \times 10^3$  год експлуатації. Показано, що метал трубопроводу зазнає істотних змін механічних властивостей, що пов'язано з розвитком процесів малоциклової втоми, термічного і деформаційного старіння.

АТОМНА СТАНЦІЯ, ТРУБОПРОВІД, РУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ, НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ, ДІАГНОСТИКА, ДЕФЕКТОСКОПІЯ, УЛЬТРАЗВУКОВИЙ КОНТРОЛЬ, МІКРОРАЗКИ, УДАРНА В'ЯЗКІСТЬ

## ЗМІСТ

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ЗАВДАННЯ.....                                                                                                | 2  |
| ВСТУП.....                                                                                                   | 7  |
| 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....                                                                                    | 9  |
| 1.1 Огляд та класифікація трубопроводів, що використовуються на атомних станціях.....                        | 9  |
| 1.2 Умови та особливості технічної експлуатації трубопроводів .....                                          | 12 |
| 1.3 Основні методи контролю обладнання на атомній станції.....                                               | 15 |
| 1.4 Методи ультразвукового контролю зварних з'єднань трубопроводів .....                                     | 25 |
| 1.5 Механізми старіння металу трубопроводів АЕС .....                                                        | 32 |
| 1.6 Актуальні проблеми діагностики та дефектоскопії. Можливі способи оптимізації. Постановка задачі .....    | 35 |
| 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....                                                                     | 37 |
| 2.1 Матеріали, використані для досліджень .....                                                              | 37 |
| 2.2 Методика проведення лабораторних випробувань при розробці безперервного УЗ контролю.....                 | 38 |
| 2.3 Методика та обладнання для випробувань мікрорізків.....                                                  | 40 |
| 3. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕРВНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ТРУБОПРОВОДІВ.....          | 44 |
| 3.1 Аналіз матеріалів та обладнання для високотемпературного вимірювального УЗ тракту.....                   | 44 |
| 3.2 Схема безперервного ультразвукового онлайн моніторингу .....                                             | 51 |
| 3.3 Аналіз результатів випробування системи безперервного ультразвукового моніторингу.....                   | 52 |
| 4 ПРОВЕДЕННЯ РУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ОСНОВНОГО МЕТАЛУ ТРУБОПРОВОДУ 2-ГО КОНТУРУ З ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОРІЗКІВ..... | 58 |

|                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1 Дослідження мікроструктури основного металу .....                            | 59  |
| 4.2 Механічні випробування.....                                                  | 60  |
| 4.3 Випробування на ударний згин та фрактографічні дослідження .....             | 62  |
| 5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ<br>ДОСЛІДЖЕННЯ.....       | 66  |
| 5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу.....                                  | 66  |
| 5.2 Планування науково–дослідних робіт .....                                     | 67  |
| 5.3 Розрахунок кошторису витрат на проведення НДР .....                          | 75  |
| 5.3.1 Розрахунок вартості матеріалів.....                                        | 75  |
| 5.3.2 Спеціальне устаткування для науково – технічних робіт.....                 | 76  |
| 5.3.3 Розрахунок вартості палива і енергії.....                                  | 77  |
| 5.3.4 Розрахунок амортизації універсального устаткування.....                    | 80  |
| 5.3.5 Розрахунок заробітної плати, соціальних виплат та накладних<br>витрат..... | 81  |
| 5.3.6 Кошторис витрат.....                                                       | 83  |
| 5.3.7 Бальна оцінка економічної ефективності науково–дослідної роботи.....       | 84  |
| 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....                         | 85  |
| 6.1 Аналіз потенційних небезпек.....                                             | 85  |
| 6.2 Заходи щодо забезпечення безпеки.....                                        | 86  |
| 6.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці.....            | 93  |
| 6.4 Заходи з пожежної безпеки.....                                               | 95  |
| 6.5 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях .....                                | 97  |
| ВИСНОВКИ.....                                                                    | 100 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....                                                            | 102 |
| Додаток А. Перелік графічного матеріалу.....                                     | 109 |

## ВСТУП

В умовах експлуатації протягом тривалого часу трубопроводи піддаються різним зовнішнім і внутрішнім впливам, в результаті чого відбувається деградація матеріалу, корозійні пошкодження, виникають і розвиваються тріщини втоми на поверхнях труб та інші види дефектів. Незважаючи на те, що проектування трубопроводів відбувається за сучасними методами і технологія виготовлення та монтажу повинні забезпечити реалізацію призначеного ресурсу, виключити можливість виникнення дефектів не вдається. Для уникнення наслідків появи дефектів застосовують методи неруйнівного контролю.

Сучасні методи і засоби неруйнівного контролю, що використовуються для діагностики трубопроводів, отримали широкий розвиток і поширення. Найбільшого поширення здобули магнітні методи (магнітної анізотропії, магнітної пам'яті металу, магнітної проникності), акустичні методи (імпульсні ультразвукові, хвиль Лемба, фазові, акустичної емісії), електричні і оптичні методи (візуальні - ендоскопічні, лазерні, голографічні). Такі методи застосовуються для виявлення різних дефектів: порушення герметичності, контролю напруженого стану, контролю якості та стану зварних з'єднань, контролю протікання та інших параметрів, відповідальних за експлуатаційну надійність трубопроводів. При цьому програми, методи і засоби контролю трубопроводів різного призначення (теплопроводів, газопроводів, нафтопроводів, продуктопроводів, водопроводів) незначно відрізняється один від одного.

На атомних станціях використовується значна кількість трубопроводів, пошкодження чи руйнування яких при експлуатації або в процесі виробництва може призводити до серйозних економічних втрат і пагубних впливів на навколишнє середовище. Трубопроводи включають багато сполучних деталей, як металевих, так і неметалевих, що мають складні

геометричні форми (вузли). Доступ до деяких частин може бути обмежений. У таких випадках методи і технічні засоби неруйнівного контролю є оптимальним і максимально зручним рішенням для проведення обстеження певних районів трубопроводів, без виведення об'єкта з експлуатації, а також обстеження важкодоступних ділянок для виявлення дефектів.

Окрім дефектів, важливим є також періодичний контроль механічних властивостей металу трубопроводів прямими методами із застосуванням руйнівного контролю. Метою контролю є виявлення та аналізу змін фізико-механічних властивостей для перевірки їх відповідності: вимогам проекту, стандартам і технічним умовам на метал трубопроводів, чинної нормативно-технічної документації, вихідних значень механічних властивостей металу трубопроводів атомної енергетичної установки. Аналіз механічних властивостей дозволяє робити прогнози щодо залишкового ресурсу обладнання та дозволяє провести його своєчасний ремонт або заміну.

## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Огляд та класифікація трубопроводів, що використовуються на атомних станціях

З'єднання між собою окремих агрегатів АЕС вимагає великої кількості трубопроводів (рис. 1.1) [1]. Розрізняють як головні, так і допоміжні трубопроводи різних діаметрів і призначень. Загальна довжина трубопроводів на атомній станції - кілька кілометрів. Всі трубопроводи розрізняють за призначенням і основними показниками. Наприклад, трубопроводи головного циркуляційного контуру, допоміжні трубопроводи реакторного контуру, трубопроводи активної пульпи, живильні і конденсатні трубопроводи, трубопроводи гострого та добірного пара, дренажні трубопроводи та ін. [2]

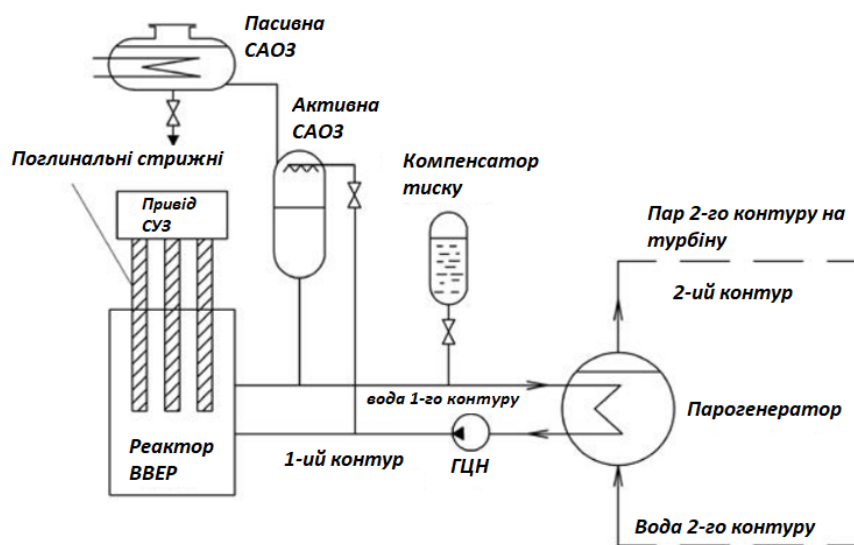


Рисунок 1.1 - Технологічна схема АЕС з реакторами ВВЕР

Класифікують трубопроводи за декількома факторами [1]:

- за параметрами (тиск, температура);
- за середовищем, що в них протікає (вода, пар, пароводяна суміш, повітря та ін.) і за ступенем його радіоактивності;
- за періодичністю роботи (безперервна робота, періодичне включення).

Найбільш відповідальними є трубопроводи головного циркуляційного контуру, що безпосередньо пов'язані з технологічним процесом станції. Через них проходить радіоактивне середовище з найбільшими параметрами та витратами. Проектуванню і контролю параметрів трубопроводів атомної станції необхідно приділятися велику увагу, адже їх вартість досягає 10 % загальної вартості обладнання станції, а від надійності їх експлуатації залежить надійність роботи всієї станції в цілому [3, 4].

На електростанціях в основному використовують безшовні труби (після холодної прокатки та гарячекатані) і лише для циркуляційних водоводів і деяких допоміжних трубопроводів – зварні [5].

Марки сталей для труб, за допомогою яких транспортують корозійно-неагресивні середовища, залежать від температури середовища. Менш відповідальні труби для експлуатації при температурах до 450 °С використовують вуглецеві сталі 10 і 20. В інтервалі температур 450 – 570 °С використовують сталі перлітного класу, леговані хромом 0,5 – 2 %, молібденом 0,3 – 1 % і ванадієм 0,2 – 0,4 %, такі як сталі 12Х1МФ та 15Х1М1Ф. Леговані перлітні сталі можна використовувати і при температурах нижче 450 °С. Наприклад, якщо діаметр трубопроводів великий і доцільно зменшувати товщину стінок (наприклад, паропроводи насиченої пари, що підводяться до турбін). Для більш високих температур (до 620 °С) можна застосовувати нержавіючі мартенситно-феритні сталі з високим вмістом хрому, наприклад ЭИ-756 (11 % Cr; 2 % W; 0,7 % Mo; 0,2 % V) [6]. Остання прийшла на заміну нержавіючій сталі типу Х18Н10Т. Хоча, аустенітні сталі володіють найбільш високою загальною корозійною стійкістю, що важливо для підтримки високої чистоти води реакторного контуру, а також при транспортуванні корозійно-агресивних середовищ, наприклад в системах дезактивації, в експлуатаційних умовах при високих температурах вона виявилася недостатньо надійною через процес старіння. У порівнянні зі сталлю типу Х18Н9Т мартенситно-феритні сталі мають наступні переваги: не містять нікелю, економно леговані хромом, не схильні до корозії під

навантаженням, більш теплопровідні, дешевші. В той же час, порівняно зі сталлю 12Х1МФ вони мають більш високі властивості міцності при однаковій пластичності (табл. 1.1) [7 - 10]. До недавнього часу її єдиним недоліком була низька зварюваність, що в даний час подолана. Також, замість труб із аустенітної сталі, застосовують штампозварні труби із перлітної сталі з плакуванням зсередини нержавіючою аустенітною сталлю товщиною 5 мм. Головне призначення плакування - захист сталі від ерозії, так як при реальній швидкості води в реакторному контурі перлітна сталь схильна до ерозії. При плакуванні зменшується надходження продуктів ерозії і корозії в реакторну воду і можливість їх осадження на твелах [11]. Іншою важливою перевагою перлітних сталей, порівняно зі сталями аустенітного класу, є їх низький коефіцієнт лінійного розширення.

Таблиця 1.1 – Фізико-механічні властивості деяких сталей, що використовуються для виготовлення трубопроводів АЕС

| Клас сталей                 | Твердість, НВ | Границя міцності, МПа | Відносне видовження, % | Температура експлуатації, °С | Коефіцієнт лінійного розширення, мм/(м*°С) | Коефіцієнт теплопровідності, кДж/(м*год*°С) |
|-----------------------------|---------------|-----------------------|------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Вуглецева (сталь 20)        | 167           | 410                   | 25                     | 100 – 450                    | 0,0123 – 0,0145                            | 146 – 184                                   |
| Перлітна (12Х1МФ)           | 179           | 470                   | 17 - 19                | 450 – 580                    | 0,0133 – 0,0147                            | 115 – 142                                   |
| Мартенситно-феритна (ЭИ756) | 255           | 588                   | 17 - 18                | 500 – 700                    | 0,0121 – 0,0126                            | 99 – 100                                    |
| Аустенітна (Х18Н10Т)        | 179           | 549                   | 35                     | 100 – 400                    | 0,0171 – 0,0186                            | 50 – 78,9                                   |
|                             |               |                       |                        | 500 – 700                    | 0,0186 – 0,0195                            | 80,5 – 95                                   |

Сталі різних класів суттєво відрізняються за вартістю. Співвідношення вартостей вуглецевих, перлітних легованих і аустенітних сталей складають приблизно 1: 2,5: 10 (15), тому підвищення температури експлуатації, що

викликає зміну класу сталей, призводить до значного подорожчання трубопроводів.

## 1.2 Умови та особливості технічної експлуатації трубопроводів

Висока якість проектування, виготовлення і монтажу трубопроводів є необхідною умовою безаварійної роботи АЕС. Незважаючи на це, в процесі їх експлуатації неминучим є механічний вплив, вплив термічних напружень та корозійних процесів, що викликають дефекти та структурні зміни в металі. Згодом вони розвиваються і можуть привести до руйнування трубопроводу.

Трубопроводи займають центральне місце при оцінці безпеки і ресурсних характеристик АЕС в зв'язку з тим, що вони [5]:

- мають найбільший вплив на ядерну безпеку АЕС;
- є найбільш численною групою конструкцій енергоблоку;
- мають великі запаси пружної енергії, що становить велику загрозу з точки зору не тільки ядерної, радіаційної, а й техногенної безпеки;
- заміна (або ремонт) вимагає, як правило, великих матеріальних витрат.

На стадії проектно-конструкторських робіт матеріали трубопроводів вибираються таким чином, щоб їх міцність забезпечувалася протягом усього терміну експлуатації. Отже, при аналізі їх технічного стану необхідно враховувати всі дії, що передбачені на етапах проектування, виготовлення, монтажу, приймально-здавальних випробувань, транспортування, пуско-налагоджувальних робіт або експлуатації, що призводять до скорочення ресурсних характеристик.

Під впливом зовнішніх факторів в металі трубопроводів можуть виникати і розвиватися ушкодження, що поділяють на силові, теплові, корозійні та радіаційні. Загальна системне уявлення пошкодження трубопроводів АЕС показано на рис. 1.2 [6].

Елементи трубопроводів знаходяться під впливом внутрішнього тиску робочого середовища, ваги труб, арматури та теплової ізоляції, напружень самокомпенсації, що виникають в результаті теплового розширення. Під дією теплових розширень згинальні і стискаючі зусилля виникають в трубопроводах, розташованих в одній площині, а стиснення, згину і крутіння - в просторових. Під дією внутрішнього тиску і високих температур при тривалій експлуатації може відбуватися поступове збільшення діаметра і зменшення товщини стінки трубопроводів через повзучість металу. Термін служби металу визначається тривалістю усталеної фази повзучості, яка в значній мірі залежить від властивостей металу і умов експлуатації [12].

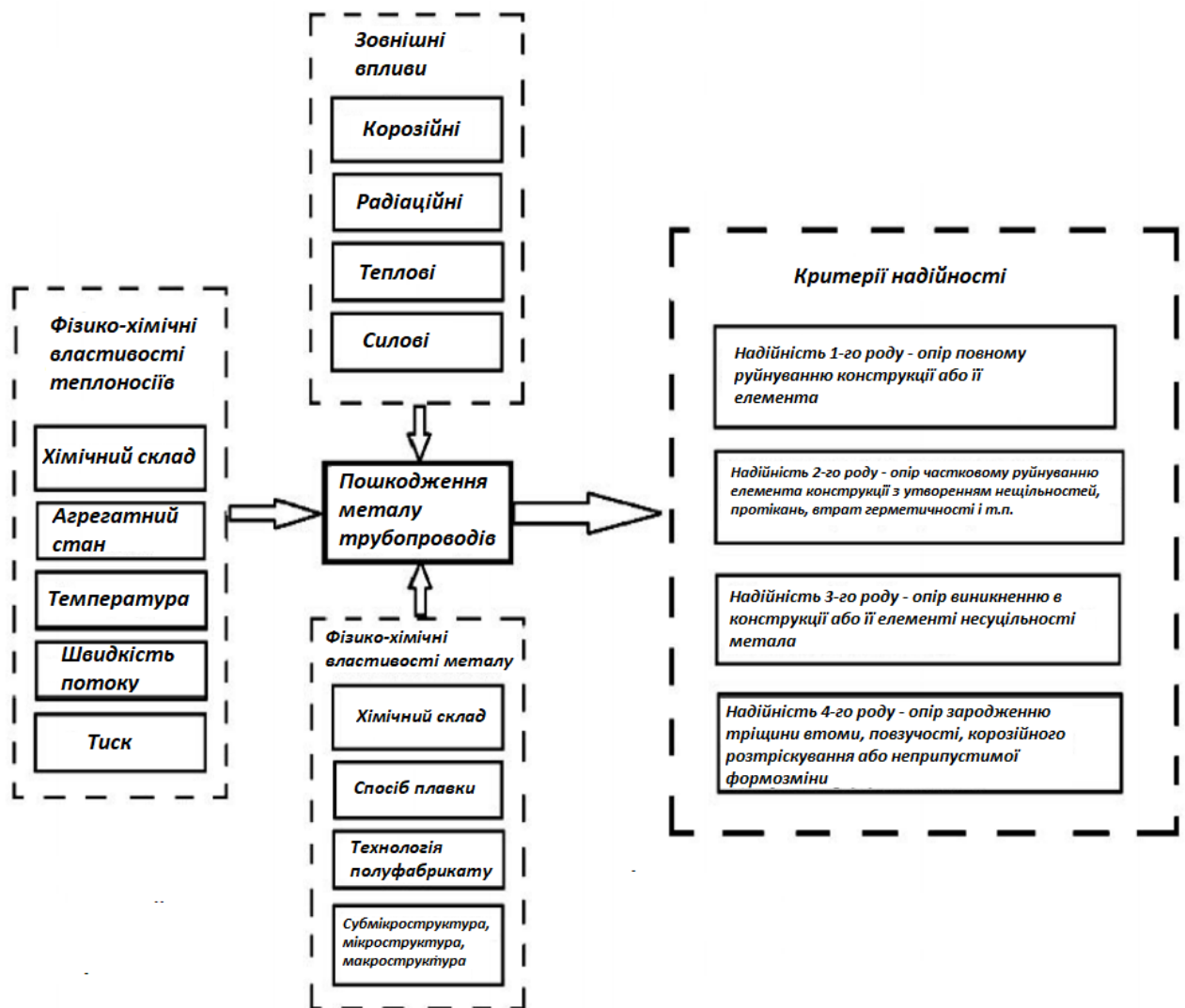


Рисунок 1.2 - Системне уявлення пошкодження трубопроводів АЕС

Основними видами пошкоджень трубопроводів АЕС є корозія, кільцеві тріщини, тріщини на кінцях труб, знос, згин, випучини і розриви (табл. 1.2) [13].

Основні причини виникнення дефектів труб наведено в табл. 1.3 [6].

Таблиця 1.2 – Класифікація дефектів трубопроводів АЕС

| Хронологічна   | Функціональна                                                            | За характерними ознаками        |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Конструктивні  | Дефекти від силового навантаження                                        | Дефекти геометричної форми      |
|                | Дефекти від впливу тільки силового навантаження                          | Зварювальні дефекти (непровари) |
| Технологічні   | Дефекти від впливу силового навантаження у поєднанні з іншими факторами  |                                 |
| Монтажні       | Дефекти від корозійного середовища                                       | Дефекти хімічного складу        |
| Експлуатаційні | Дефекти від впливу тільки корозійного середовища                         | Дефекти мікроструктури          |
|                | Дефекти від впливу корозійного середовища у поєднанні з іншими факторами | Дефекти механічні               |
| Ремонтні       | Дефекти від радіаційного впливу                                          | Дефекти однорідності            |
|                | Дефекти, основною причиною яких є тепловий вплив                         | Дефекти суцільності             |

Таблиця 1.3 – Причини виникнення дефектів трубопроводів

| Причина                                                                                                    | Наслідок                                                                   | Примітка                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                                          | 2                                                                          | 3                                                                                                                                                          |
| Існуюча технологія прокатки металу, технологія неперервної розливки сталі на окремих металургічних заводах | Виготовлення неякісних труб                                                | Деградаційна відмова (є випадки руйнування через розшарування металу)                                                                                      |
| Недосконалий або повністю відсутній вхідний контроль сировини                                              | Дефекти сировини стають дефектами труб                                     | Деградаційна відмова                                                                                                                                       |
| При виготовленні труб доводиться піддавати метал навантаженням, при яких він працює за границею плинності  | Утворення наклепу, мікророзшарувань, надривів та інших прихованих дефектів | Деградаційна відмова (через короткочасність наступних заводських випробувань багато прихованих дефектів проявляються в процесі експлуатації трубопроводів) |

Продовження табл. 1.3

| 1                                                                                                                          | 2                                                                                                              | 3                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| При очищенні трубопроводів виникають дефекти пластичної деформації локальних ділянок поверхні труби – риси, надрізи і т.д. | Концентратори напружень є потенційними джерелами розвитку корозійно-втомних тріщин                             | Деградаційна відмова (очистка трубопроводів за допомогою дротових щіток виключає пошкодження труб у вигляді порізів, але при певних режимах обробки призводить до деформації поверхні металу, що знижує його корозійну стійкість) |
| Корозійні пошкодження труб                                                                                                 |                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                   |
| Низький ступінь контролю геометричної форми труб                                                                           | На трубах діаметром 500...800 мм зміщення кромки може досягати 3 мм (при нормі 0,75...1,2 мм), овальність – 2% | -                                                                                                                                                                                                                                 |
| Механічний вплив при завантажувально-розвантажувальних, транспортних та монтажних операціях                                | Поява на трубах вм'ятин, рисок, подряпин, задирів                                                              | -                                                                                                                                                                                                                                 |

### 1.3 Основні методи контролю обладнання на атомній станції

Для контролю стану основного металу та зварних з'єднань трубопроводів використовують руйнівні та неруйнівні методи контролю. Останні мають велику перевагу через відсутність необхідності вирізання зразків, що порушує структурну цілісність обладнання. Це особливо важливо для таких складних систем як трубопроводи АЕС.

Неруйнівний контроль, в залежності від фізичних явищ, що закладено в його основу, підрозділяється на наступні види [14]:

- 1) оптичний;
- 2) капілярний (або проникаючими речовинами);
- 3) магнітний;

- 4) електричний;
- 5) вихрострумний;
- 6) радіохвильовий;
- 7) тепловий;
- 8) акустичний;
- 9) радіаційний.

Оптичні методи засновані на спостереженні або реєстрації параметрів оптичного випромінювання, що взаємодіє з об'єктом контролю (рис. 1.3) [15].

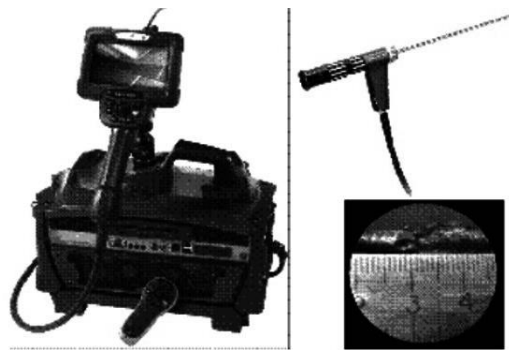


Рисунок 1.3 – Обладнання для оптичного методу

Обладнання, за різновидом приймача променевої енергії, поділяють на:

- візуальні (лупи, мікроскопи, лінійки і т.д.);
- детекторні (хім. реагенти, фотоемульсії і т.д.);
- комбіновані.

За різновидом випромінювання:

- а) власного;
- б) відбитого;
- в) минулого.

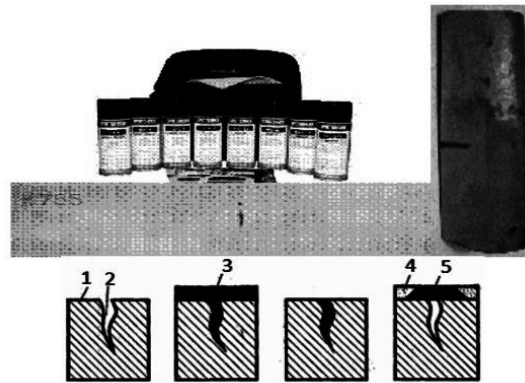
Сутність капілярних методів полягає у спостереженні проникнення спеціальних речовин в порожнини дефектів об'єкта контролю (рис. 1.4) [16].

Залежно від індикаторів, що застосовуються при капілярному методі, розрізняють наступні види дефектоскопії:

- кольорова;

- люмінесцентна;
- люмінесцентно-кольорова.

Як підвид виділяється метод течопошуку (капілярне проходження індикаторної рідини через наскрізний об'єкт).



1 - поверхня; 2 - дефект; 3 - пенетрант; 4 - проявник; 5 - сліди індикації  
(Ознака дефекту)

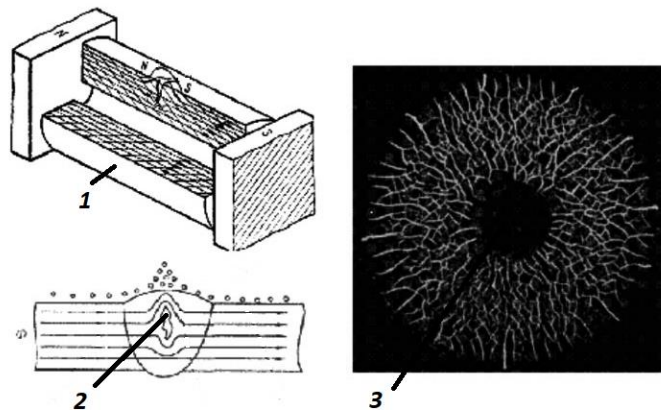
Рисунок 1.4 - Капілярний метод

Магнітні методи засновані на реєстрації магнітних полів розсіювання, що виникають над дефектами, або на визначенні магнітних властивостей виробів, що контролюються (рис. 1.5). Розрізняють методи: магнітопорошковий; магнітографічний; ферозондовий; індукційний [17].

Електричні методи характеризуються реєстрацією параметрів електричного поля, що взаємодіє з об'єктом контролю, або поля, що виникає в об'єкті контролю в результаті зовнішнього впливу.

Розрізняють наступні методи [17]:

- електропотенціальний;
- ємнісний (контроль напівпровідників і діелектриків);
- термоелектричний (контроль хімічного складу матеріалу);
- електронної емісії;
- електроіскровий;
- електростатичного порошку (метод схожий на магнітопорошковий).



1 – деталь, що контролюється; 2 - тріщина; 3 - магнітне поле розсіювання

Рисунок 1.5 - Схема утворення магнітного поля над дефектом

Вихорострумові методи засновані на аналізі взаємодії електромагнітного поля перетворювача з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться в контрольованому об'єкті.

Виділяються основні методи [18]:

- а) проходження;
- б) відбитого випромінювання.

Сутність радіохвильових методів полягає в реєстрації змін параметрів електромагнітних хвиль радіодіапазону, що взаємодіють з об'єктом контролю.

За характером взаємодії об'єкта з хвилею розрізняють такі методи:

- проходження;
- відображення;
- розсіювання;
- резонансний.

Теплові методи засновані на реєстрації змін теплових або температурних полів.

За характером взаємодії поля з об'єктом контролю виділяють:

- активний;
- пасивний.

Акустичні методи мають в своїй основі реєстрацію параметрів пружних хвиль, що виникають або що порушуються в об'єкті (рис. 1.6) [19].



Рисунок 1.6 – Акустичний метод

За частотою, що використовується існують методи:

- ультразвукові (хвилі з частотою коливань  $> 20$  кГц);
- звичайних частот.

За характером взаємодії з об'єктом:

- активні (ехометод, тіньовий, дзеркально-тіньовий, ехоскрізний, ультразвуковий);
- пасивні (вібраційний, акустичної емісії і т.д.).

Принцип дії радіаційних методів ґрунтується на реєстрації і аналізі проникаючого іонізуючого випромінювання після взаємодії його з об'єктом контролю [17].

За характером взаємодії з речовиною розрізняють методи проходження та відображення.

В залежності від природи іонізуючого випромінювання розрізняють:

- рентгенівський;
- гамма;
- бета;
- нейтронні;

- жорстке гальмівне (від прискорювача  $\bar{e}$ -бетатрону, лінійного прискорювача).

За різновидом приймача випромінювання (ПВ), що використовується:

- радіографічний (ПВ-рентгенівська плівка);
- радіометричний (ПВ-скануючий сцинтиляційний лічильник частинок і фотонів);
- радіоскопічний (ПВ-флуоресцентний екран з подальшим перетворенням зображення в телевізійне).

На рис. 1.7 представлені найбільш поширені методи контролю основного обладнання на АЕС.



Рисунок 1.7 - Найбільш поширені методи контролю основного обладнання на АЕС

Переваги неруйнівних методів контролю (НМК) [18]:

1. Випробування проводяться безпосередньо на виробі, що будуть застосовуватися в робочих умовах.
2. Випробування можна проводити на будь-якій деталі, призначеної для роботи в реальних умовах, якщо це економічно обґрунтовано. Ці випробування можна проводити навіть тоді, коли в партії є велика різниця між деталями.
3. Випробування можна проводити на цілій деталі або на всіх її небезпечних ділянках. Багато небезпечних з точки зору експлуатаційної

надійності ділянок деталі можуть бути досліджені одночасно або послідовно, залежно від зручності та доцільності.

4. Можливе проведення випробування багатьма НМК, кожен з яких чутливий до різних властивостей або частин матеріалу або деталі. Таким чином, є можливість виміряти стільки різних властивостей, пов'язаних з робочими умовами, скільки необхідно.

5. Неруйнівні методи контролю не порушують і не змінюють характеристик робочих деталей.

6. Неруйнівні методи контролю дозволяють застосувати повторний контроль деталей протягом будь-якого періоду часу.

7. НМК потребують невеликої (або зовсім не потребують) попередньої обробки зразків. Деякі пристрої для випробувань є портативними, мають високу швидкість, в ряді випадків контроль може бути повністю автоматизованим. Вартість НМК нижче, ніж відповідна вартість руйнівних методів контролю.

8. Більшість НМК короточасні і вимагають меншої затрати людино-годин, ніж типові руйнують методи випробувань. Ці методи можна використовувати для контролю всіх деталей при меншій вартості або вартості, порівнянної з вартістю руйнівних методів випробувань лише невеликого відсотку деталей в цілій партії.

Незважаючи на перераховані вище переваги, існують і недоліки неруйнівних методів контролю [18]:

1. Випробування зазвичай включає непрямі вимірювання властивостей, які не мають безпосереднього значення при експлуатації. Зв'язок між цими вимірами і експлуатаційною надійністю повинна бути доведена іншими способами.

2. Випробування зазвичай якісні і рідко - кількісні. Зазвичай вони не дають можливості вимірювання руйнівних навантажень і терміну служби до руйнування навіть побічно. Вони можуть, однак, виявити дефект або простежити процес руйнування.

3. Зазвичай потрібні дослідження на спеціальних зразках і дослідження робочих умов для інтерпретації результатів випробування. Там, де відповідний зв'язок не була доведено, і в випадках, коли можливості методики обмежені, спостерігачі можуть не погодитися в оцінці результатів випробувань.

Ефективність методів неруйнівного контролю визначається великим числом факторів, головними з яких є: виявлення дефектів, продуктивність, оперативність, безпека і вартість. В залежності від матеріалів, видів виробів і їх призначення, різні методи контролю мають різну ефективність.

У табл. 1.4 представлено ефективність МНК в залежності від їх здатності виявляти дефекти в різних матеріалах. Для кращого візуального сприйняття прийнято наступну систему оцінювання методів: 5 - відмінно; 4 - добре; 3 - задовільно; 0 – незадовільно [17].

Різні МНК характеризується різними значеннями техніко-економічних параметрів: чутливістю, умовами застосування, типами контрольованих об'єктів і т. д.

З точки зору небезпеки для обслуговуючого персоналу виділяються радіаційні методи. Певною токсичністю володіють методи капілярні і течепошуку. Решта методів не мають помітного впливу на здоров'я обслуговуючого персоналу [20].

Для автоматизації контролю найбільш сприятливі методи вихрового струму, магнітні методи, радіаційні і деякі види теплової дефектоскопії [21]. Головні переваги цих методів полягають у відсутності прямого контакту перетворювача з виробом і в наданні інформації про дефекти у вигляді показань приладів. Ультразвуковий метод з цієї точки зору вимагає контакту перетворювача з виробом, наприклад, через шар води. Труднощі автоматизації інших методів контролю полягають в необхідності візуальної обробки інформації про дефекти [19].

Таблиця 1.4 - Ефективність МНК в залежності від їх здатності виявляти дефекти в різних матеріалах

| Об'єкти контролю                 | Різновид МНК |            |               |           |            |          |          |                |
|----------------------------------|--------------|------------|---------------|-----------|------------|----------|----------|----------------|
|                                  | Радіаційний  | Акустичний | Вихрострумний | Магнітний | Капілярний | Тепловий | Оптичний | Радіохвильовий |
| Неферромагнітні матеріали        |              |            |               |           |            |          |          |                |
| Проволока діаметром 1-14 мм      | 4            | 5          | 5             | 0         | 0          | 0        | 4        | 0              |
| Прутки діаметром 30-100 мм       | 5            | 5          | 5             | 0         | 0          | 4        | 4        | 0              |
| Труби діаметром 30-156 мм        | 5            | 5          | 5             | 0         | 0          | 4        | 4        | 0              |
| Листи, плити товщиною 0,1-3,9 мм | 5            | 5          | 5             | 0         | 0          | 4        | 4        | 0              |
| Відливки                         | 5            | 4          | 3             | 0         | 0          | 4        | 4        | 0              |
| Металургічні заготовки           | 5            | 4          | 0             | 0         | 3          | 4        | 4        | 0              |
| Ферромагнітні матеріали          |              |            |               |           |            |          |          |                |
| Прутки діаметром 30-100          | 5            | 5          | 5             | 5         | 0          | 0        | 5        | 0              |
| Труби діаметром 30-156 мм        | 5            | 5          | 5             | 4         | 4          | 0        | 4        | 0              |
| Листи, плити товщиною 0,1-3,9 мм | 5            | 5          | 5             | 4         | 4          | 0        | 4        | 0              |
| Відливки                         | 5            | 4          | 0             | 4         | 4          | 0        | 4        | 0              |
| Діелектрики                      |              |            |               |           |            |          |          |                |
| Гума                             | 5            | 4          | 0             | 0         | 4          | 0        | 4        | 5              |
| Кераміка                         | 5            | 4          | 0             | 0         | 4          | 3        | 4        | 5              |
| Багатошарові матеріали           | 4            | 5          | 0             | 0         | 0          | 3        | 0        | 5              |
| Бетон, залізобетон               | 5            | 3          | 0             | 0         | 4          | 0        | 4        | 5              |
| Склопластики                     | 3            | 4          | 0             | 0         | 5          | 5        | 5        | 5              |
| З'єднання                        |              |            |               |           |            |          |          |                |
| Зварні                           | 5            | 5          | 3             | 5         | 4          | 3        | 0        | 0              |
| Повні                            | 5            | 5          | 3             | 0         | 3          | 3        | 0        | 0              |
| Різьбові                         | 0            | 0          | 3             | 5         | 4          | 0        | 0        | 0              |

За вартістю виконання контролю до найбільш коштовних відносяться радіографічні методи та метод течепошуку [20]. Це пов'язано з тривалістю операцій контролю, а також з необхідністю капітальних витрат на приміщення та обладнання. Якщо порівнювати, наприклад, витрати на проведення радіаційного та ультразвукового контролю зварних з'єднань товщиною 10...20 мм, то для ультразвукового контролю вони будуть в 3 - 5 разів менше, ніж для радіаційного. Ця перевага зростає зі збільшенням товщини зварних з'єднань.

Візуальні та капілярні методи контролю виробів з феромагнітних матеріалів дозволяють виявляти дефекти тільки на поверхні виробу. Магнітними і струмовихровими методами можна виявити як поверхневі, так і підповерхневі дефекти. Радіаційними і акустичними методами можна виявити поверхневі, підповерхневі і внутрішні дефекти [17].

Найбільшого поширення на АЕС отримали візуальний, капілярний, вихрострумовий, ультразвуковий, радіографічний та магнітопорошковий методи контролю [18].

Внаслідок високої важливості надійності енергоукомплектування досить часто виникає необхідність контролю об'єкта дослідження двома або більше методами. Зазвичай поєднують методи, здатні виявляти внутрішні і поверхневі дефекти (акустичний і магнітний контроль; магнітопорошковий метод контролю, акустичний і струмовихровий контроль і т. д.) або плоскі і об'ємні дефекти (наприклад, ультразвуковий контроль і радіографія). Для контролю внутрішніх поверхонь використовуються струмовихровий метод або акустичний контроль і візуальнооптичний огляд [22].

Комплексне використання найбільш чутливих методів не означає, що показники достовірності будуть відповідно найбільшими, а в свою чергу, облік першочерговості технічних показників може призвести до суперечностей з економічними критеріями, такими як трудовитрати, вартість, час контролю і т.д., що, в свою чергу, може привести до того, що обраний комплекс МНК може виявитися з економічної точки зору неефективним. Тому при формуванні комплексу методів неруйнівного контролю різної фізичної природи виникає проблема оптимізації складу комплексу з урахуванням критеріїв їх ефективності і витрат ресурсів.

Для реалізації різних МНК розроблені різні прилади: дефектоскопи, тепловізори для різних дефектів (тріщин, негерметичні), електронне обладнання (для знаходження ослаблення електричних контактів), механічне обладнання, що має різні техніко-економічні характеристики і технології використання для різних типів дефектів та ін [23].

#### 1.4 Методи ультразвукового контролю зварних з'єднань трубопроводів

Неруйнівний контроль в більшості технологічних процесів, а саме в числі зварних швів є незамінною частиною загального технологічного процесу та експлуатації об'єктів і обладнання відповідального призначення. Більшість уваги для неруйнівного контролю достається зварним швам, для яких застосовують різні методи, такі як радіографічний, ультразвуковий, а також методи для визначення поверхневих дефектів [14].

Ультразвуковий контроль відіграє важливу роль при контролі зварних з'єднань, на його частку приходить 32% обсягу контролю всіх виробів . Причиною для цього є висока чутливість методу, точність знаходження дефектів, швидка оперативність та продуктивність, відсутність шкідливих факторів, на відміну від радіографічного методу контролю [24]. Незважаючи на високий рівень автоматизації праці в розвинених країнах, частка ручного ультразвукового контролю залишається найбільшою. Це зв'язано з тим що великі обсяги робіт проводяться на об'єктах, що знаходяться в експлуатації. Характерною рисою таких об'єктів є велика різноманітність конструкцій, і, отже, методик ультразвукового контролю, тому роботи по контролю погано піддаються автоматизації [20].

Сутність ультразвукового контролю полягає в тому, що він дозволяє отримати інформацію про дефекти та несучільності, що розташовані на будь-якій глибині в різних матеріалах, виробах і зварних з'єднаннях.

Дефекти зварних швів трубопроводів поділяють на 6 видів [20, 25]:

- тріщини
- пори
- тверді включення
- несплавлення і непровари
- порушення форми шва
- інші дефекти, що не включені в перераховані вище групи.

Тріщини - вид дефекту, викликаний місцевою зміною шва, що з'являється через охолодження або фізичне втручання. Вони діляться на поздовжні, поперечні, мікротріщини, тріщини в кратері, радіальні, роздільні і розгалужені.

Газові включення - це включення довільної форми, утворені газом, що залишився в розплавленому металі.

Газові пори - це газове включення в основному сферичної форми.

Тверде включення - це чужорідна речовина металевого або неметалевого походження в металі зварного з'єднання. Дефект, що має один гострий кут, називають гострокутними включеннями.

Несплавлення - відсутність металу між звареним швом і крайками основного металу або між окремими валиками зварного шва.

Різновиди несплавлення:

- по бічній стороні;
- між валиками;
- в корені зварного шва.

Непровар - відсутність основного металу по всій ділянці кореня зварного шва або на окремій ділянці, що з'явилася шляхом відсутності можливості металу проникнути в корінь з'єднання.

В основному всі види несучільностей зварювання добре визначаються при ультразвуковому контролі, але і є окремий вид дефекту, що визначається погано. Це вузький непровар в корені зварного шва з погано підігнаними крайками труби. При охолодженні шва основний валик стягує такий непровар, шов крайок змінюється і розкриття дефекту може бути незначної величини, починаючи з якої акустична хвиля помітно проникає через повітряний зазор в металі [26]. Також, погано визначаються неокислені непровари (злипання), що з'являються при зварюванні тиском [27].

Для ультразвукового методу використовуються в основному поперечні і поздовжні акустичні хвилі. Поздовжні хвилі, в основному застосовують, якщо контроль необхідно провести перпендикулярно або під малим кутом до

виробу, поперечні - при використанні похилого п'єзоперетворювача, де кут введення становить приблизно  $35^\circ$ . Це пов'язане зі зручністю збудження акустичної хвилі: поздовжні – прямим або незначний кутом введення, поперечні – похилим п'єзоперетворювачем для кута падіння понад  $35^\circ$  від першого до другого критичного кута [14].

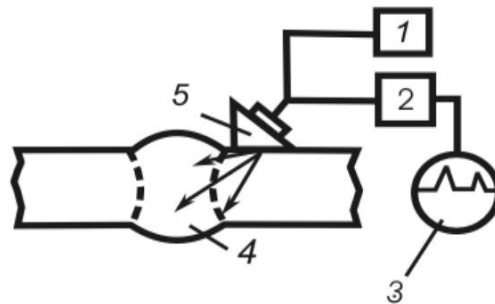
Існує декілька основних методів ультразвукового контролю [28]:

- Ехо-метод
- Тіньовий метод
- Дзеркально-тіньовий метод
- Ехо-дзеркальний метод
- Дельта-метод

Ехо – метод (рис. 1.8) засновано на реєстрації ехоімпульсу, відбитого від дефекту. Для використання цього методу достатні одностороннього доступу до зразка. Він має хорошу чутливість до знаходження внутрішніх дефектів. Так, при використанні ехо – метод можливо з великою точністю показати глибину залягання і розташування дефекту. До мінусів даного методу слід віднести малу завадостійкість до зовнішніх відбивачів та велику залежність ехо-імпульсу сигналу від знайденого дефекту. Даним методом проводиться контроль близько 90% зварних швів товщиною від 4 мм [29].

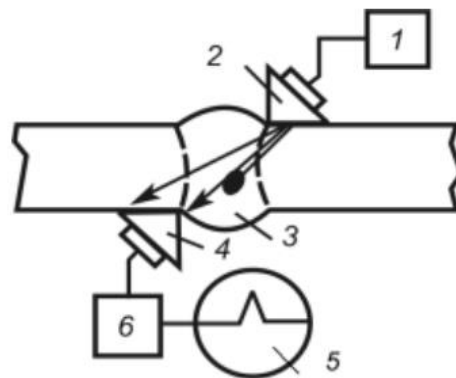
При використанні тіньового методу (рис. 1.9), дефект оцінюють по зменшенню ехо-імпульсу акустичної хвилі, що пройшла від п'єзоперетворювача, що утворив акустичну хвилю до приймального п'єзоперетворювача. Чим більші параметри дефекту, тим менше ехо-сигнал. Тіньовий метод контролю можливий лише при наявності двостороннього доступу до зразка. Для ручного ультразвукового способу даного методу бажано здійснювати контроль зварних з'єднань обмеженого перетину малої товщини виробу. До недоліків цього методу також слід віднести відсутність точної оцінки розташування дефектів і менша чутливість (в 10...20 разів) в порівнянні з ехо – методом [30].

Перевагами тіньового методу є низька залежність ехо-імпульсу від розташування дефекту, хороша завадостійкість і відсутність мертвої зони.



1 - генератор; 2 - підсилювач; 3 - індикатор; 4 - об'єкт контролю (шов); 5 – п'єзоперетворювач

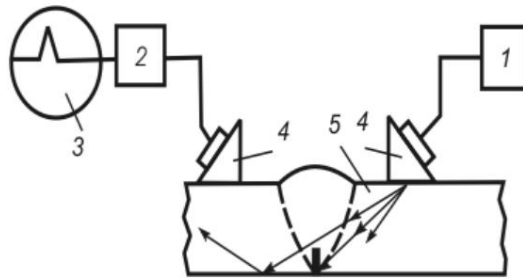
Рисунок 1.8 - Пошук дефектів ехо - методом



1 - генератор; 2,4 - п'єзоперетворювачі; 3 - об'єкт контролю; 5 - індикатор;  
6 - підсилювач

Рисунок 1.9 - Спосіб контролю тіньовим методом

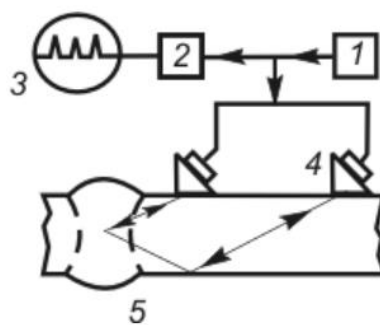
При дзеркально-тіньовому способі контролю (рис. 1.10) ознакою знаходження дефекту є погіршення амплітуди ехо-сигналу, що відбився від донної поверхні виробу. Основною перевагою даного методу в порівнянні з попереднім є односторонній доступ і більша чутливість до дефектів, що знаходяться в корені шва [31].



1 - генератор; 2 - підсилювач; 3 - індикатор; 4 - п'єзоперетворювач;  
5 - об'єкт контролю

Рисунок 1.10 - Спосіб роботи дзеркально-тіньового методу

Ехо - дзеркальний метод (рис. 1.11) найкраще підходить для виявлення площинних вертикально розташованих дефектів. Він використовується при контролі шва двома п'єзоперетворювачами, що рухаються по поверхні основного металу з одного боку зварного шва таким способом, щоб отримувати одним п'єзоперетворювачем сигнал, збуджений іншим п'єзоперетворювачем, що не одноразово відбився від дефекту і донної поверхні труби. Даним способом проводиться дефектоскопія трубопроводу з еквідистантними поверхнями, але при товщині виробу менше 40 мм, потрібні спеціальні п'єзоперетворювачі [30].

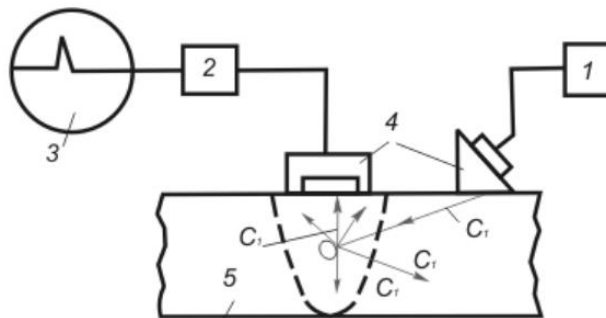


1 - генератор; 2 - підсилювач; 3 - індикатор; 4 - п'єзоперетворювач;  
5 - об'єкт контролю

Рисунок 1.11 - Принцип роботи ехо - дзеркальним методом

Одним з основних плюсів даного методу є оцінка параметрів дефектів розміром від 3 мм і більше, що розташовані у вертикальній осі з кутом менше  $10^\circ$ . Метод найбільше поширений при контролі великої товщини виробів, коли потрібна хороша надійність знаходження вертикально орієнтованих площинних дефектів [31].

В дельта-методі (рис. 1.12) застосовується ультразвукова енергія, що відбилася від дефекту. При потраплянні на дефект поперечної акустичної хвилі частина відбивається дзеркально, а інша частина переходить у повздовжню, а потім і дифраговану хвилю. Частина поздовжньої хвилі йде нормально до донної поверхні виробу, відбивається і потрапляє на прямий п'єзоперетворювач. Цей же п'єзоперетворювач буде отримувати компонент поздовжньої дифрагованої хвилі, що відбилася від верхнього краю тріщини і проходить вертикально вгору. До мінусів даного методу відносять необхідну зачистку навколошовної зони, труднощі ідентифікації сигналів при контролюванні трубопроводу товщиною до 15 мм, складності при калібруванні чутливості і оцінці розмірів дефектів [29, 30].



- 1 - генератор; 2 - підсилювач; 3 - індикатор; 4 - п'єзоперетворювач;  
5 - об'єкт контролю

Рисунок 1.12 - принцип контролю дельта - методом

Використання того чи іншого методу і його принцип дії на практиці, залежить від типу зварювання, а також доступу п'єзоперетворювача до зварного шва і товщини трубопроводу.

Серед переваг ультразвукового методу контролю можна виділити наступні [29-31]:

1. Взаємодія акустичної хвилі безпосередньо на знайдений дефект об'єкта. Всі інші різновиди контролю використовують результати непрямого впливу дефектів на електромагнітне поле. Завдяки цьому ультразвук може знаходити тріщини з розкриттям від  $10^{-5}$  до  $10^{-4}$  мм та знаходити дефекти не тільки газового походження, а й спричинених потраплянням інших речовин.

2. Можливість контролю різних за складом деталей (металевих і неметалевих матеріалів), незалежно від електропровідності деталі.

3. Можливість акустичної хвилі проникати в виріб з однорідною дрібнозернистою структурою на глибину в кілька метрів. Метод має найбільшу товщина об'єкту контролю серед всіх інших.

4. Здатність виявляти не тільки поверхневі, але і внутрішні дефекти. Всі інші методи контролю можуть виявити тільки поверхневі і підповерхневі дефекти.

5. Відсутність шкідливих впливів на робочий персонал і навколишнє середовище в порівнянні з радіографічним методом контролю.

6. Незначні витрати на проведення контролю. Витрати стосуються тільки контактної рідини та дуже довговічних п'єзоперетворювачів.

7. Здатність проводити контроль, на висоті, в різному діапазоні погодних умов. В залежності від дефектоскопа можна проводити контроль при від'ємній температурі.

8. Легкий в експлуатації. За цим параметром ультразвуковий метод поступається тільки капілярному і магнітопорошковому методу.

До недоліків ультразвукового методу контролю слід віднести [30, 31]:

1. Складність або відсутність можливості контролю конструкцій з неоднорідних, крупнозернистих сплавів.

2. Необхідність заданої шорсткості поверхні навколошовної зони.

3. Складність або відсутність можливості контролю конструкцій невеликих розмірів і складної конфігурації.

4. Після проведення контролю не додається документ про хід проведення контролю і звіту про виявлені дефекти, в порівнянні з радіографічним методом на прикладі рентгенівської плівки, що показує всі виявлені дефекти.

5. Складнощі або відсутність можливості визначити тип і дізнатися реальні розміри дефекту.

Зазначені мінуси ультразвукового методу в значній мірі вирішуються завдяки технічному прогресу, а саме сучасним способам отримання, зберігання і передачі інформації.

### 1.5 Механізми старіння металу трубопроводів АЕС

Процес накопичення в часі змін механічних та (або) фізичних характеристик конструкційних матеріалів компонентів, званий фізичним старінням, призводить до зменшення ресурсу. Зокрема, вироблення ресурсу механічних компонентів пов'язане з накопиченням незворотних механічних пошкоджень в металі. Цілком припустимо вважати, що механічне пошкодження є окремим випадком прояву фізичного старіння, розуміючи при цьому, що існують також види старіння, що не пов'язані з накопиченням механічних пошкоджень [32].

Механізми фізичного старіння, що виявляються в процесі експлуатації трубопроводів, можна розділити на три групи [33]:

- 1) власне старіння матеріалу, що ще називають деградацією внаслідок старіння;
- 2) пошкодження, що має механічний характер;
- 3) змішаний процес старіння і пошкодження в результаті фізичного, хімічного і механічного впливів.

До першої групи механізмів фізичного старіння відносяться:

- температурне старіння;
- радіаційне охрупчування;
- радіаційне розпухання.

До другої групи входять:

- втома (циклічна міцність);
- прогресуюча формозміна;
- циклічне зростання тріщини.

У третю групу включаються:

- корозія;
- корозійне статичне зростання тріщини;
- корозійне циклічне зростання тріщини.

Температурне старіння пов'язане зі зміною розчинності вуглецю, фосфору і азоту в  $\alpha$ -залізі, при високій температурі. Механізм цього явища обумовлений процесом утворення карбідів, їх подальшої коагуляцією та сегрегацією на границях зерен. Температурне старіння веде до зміцнення стали і, як наслідок, до її охрупчування [34].

Втомне пошкодження складається з двох стадій: прихованого руйнування, що має місцевий характер та обмеженого невеликою областю, і стадії росту тріщини. До циклічної міцності відноситься приховане руйнування до утворення макротріщини. Розрізняють багатоциклову і малоциклову втому, границя між якими визначається кількістю циклів навантаження до руйнування. Прийнято вважати, що до 104-105 циклів навантаження реалізується малоциклова втома, а при більшій кількості циклів – багатоциклова [35].

Природа прихованого руйнування розглядається у фізиці твердого тіла і не має досить переконливого пояснення. На першій стадії росту тріщина поширюється вздовж площини ковзання, максимально близької до напрямку максимальних дотичних напружень. По мірі зростання тріщини настає умова, коли основний вплив на зростання тріщини вже чинить максимальна напружка розтягу, що визначається як друга стадія розвитку макротріщини [36].

Найбільш розповсюдженими видами корозії, що виникають в процесі експлуатації трубопроводів є [32]:

- суцільна корозія;
- пітінгова корозія;
- міжкристалітна корозія;
- корозійне розтріскування під напругою.

Основним механізмом, відповідальним за пошкодження теплообмінних труб є процес корозійного розтріскування під напругою (КРН) в результаті впливу напружень, що розтягують і концентрованих розчинів корозійноактивних домішок, що утворюються внаслідок глибокого упарювання «котельної» води в відкладеннях. При цьому активатором корозії є хлорид-іони. В якості окислювача виступає кисень. Найбільш повно процес корозійного розтріскування під напругою пояснює електрохімічна теорія [37].

З точки зору корозійних процесів особливий інтерес викликає зварне з'єднання (ЗЗ №111) колекторів теплоносія з корпусом парогенератора. До можливого виникнення тріщини в конструктивній «кишені» в зоні ЗЗ № 111 під відкладеннями мають місце пітінгова і виразкова корозія. Передбачається, що у відкладеннях присутнє лужно-відновлювальне середовище й відбувається корозійний вплив середовища на метал ЗЗ і прилеглого металу. При зупинці можливе утворення виразок за механізмом «підшламової» корозії внаслідок локального зниження рН і наявності у відкладеннях «Твердого» окислювача, що складається з суміші оксидів заліза, міді і нікелю». Також на утворення і зростання тріщини може впливати механізм уповільненого деформаційного корозійного розтріскування [38].

## 1.6 Актуальні проблеми діагностики та дефектоскопії. Можливі способи оптимізації. Постановка задачі

При виконанні всіх вимог на стадіях проектування і виготовлення обладнання та дотримання умов експлуатації, передбачається, що міцність протягом всього проектного терміну забезпечена, а дефекти під час експлуатації не повинні з'являтися. Насправді, при встановлених на етапі розробки трубопроводів АЕС вимогах до процесів контролю, завжди є певна ймовірність пропустити дефект. Отже, після виготовлення, випробувань і виправлення виявлених дефектів в діючому, відновленому обладнанні можуть залишитися невиявлені дефекти (залишкова дефектність), що в кінцевому підсумку і визначають надійність, працездатність і реурсоспроможність обладнання. Також слід приймати до уваги процеси старіння що неминуче протікають протягом всього часу експлуатації. При оцінюванні залишкової дефектності та впливу старіння на трубопроводи АЕС необхідно забезпечувати не тільки високу достовірність неруйнівного контролю, але і вживати дієвих заходів щодо виявлення відмов, обумовлених спадковістю і накопиченням ненадійності на різних етапах життєвого циклу трубопроводів АЕС безпосередньо в процесі їх експлуатації.

Методи ультразвукового контролю найбільш широко застосовуються на атомних станціях для виявлення неприпустимих дефектів у зварних швах трубопроводів. Однак їм притаманні певні недоліки, зокрема, контроль проводиться на зупиненому блоці АЕС в період планових ремонтів. З метою забезпечення можливості контролю цілісності найбільш критичних зон обладнання, необхідним є застосування технології безперервного ультразвукового контролю зародження нових та моніторингу потенційно небезпечних допустимих дефектів.

Контроль структури та механічних властивостей основного металу трубопроводу дозволяє робити прогнози щодо його залишкового ресурсу.

Зараз для цього застосовується руйнівний контроль з вирізанням зразків або контроль за зразками-свідками. Ці методи можливо використовувати тільки при заміні або ремонті обладнання на зупиненому блоці АЕС. Отже, розробка методів контролю структури та властивостей основного металу трубопроводу без порушення його структурної цілісності та необхідності заміни обладнання є актуальним завданням.

Таким чином, метою дипломної роботи є визначення та аналіз можливостей підвищення ефективності методів руйнівного та неруйнівного контролю зварних з'єднань і основного металу трубопроводів 2-го контуру атомної електростанції в процесі їх експлуатації та без порушення їх конструкційної цілісності.

Згідно цьому задачами роботи є:

- проаналізувати можливість організації безперервного ультразвукового моніторингу потенційно небезпечних допустимих дефектів з можливістю дистанційного керування, отримання, передачі та подання даних УЗ контролю;
- запропонувати схему безперервного УЗ контролю зварних швів трубопроводу 2-го контуру;
- дослідити можливість використання мікроразків, виготовлених з основного металу трубопроводу 2-го контуру без порушення конструкційної цілісності для прогнозування залишкового ресурсу трубопроводу;
- дослідити механічні властивості та мікроструктуру мікроразків зі сталі 12Х1МФ після  $100 \times 10^3$  год експлуатації для визначення впливу старіння на експлуатаційні характеристики трубопроводу.

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Матеріали, використані для досліджень

Трубопровід 2-го контуру реактора ВВЕР-1000 виготовлений з конструкційної перлітної сталі 12Х1МФ у вигляді зварених труб. Хімічний склад сталі за ГОСТ 20072-74 [39], а також фактичний хімічний склад за сертифікатом постачальника труб наведені в табл. 2.1. Сталь 12Х1МФ застосовується в термообробленому стані. Термообробка складається з основної термообробки (нормалізація з наступним високим відпуском) і додаткових технологічних відпусків в процесі виготовлення (табл. 2.2) [39].

Таблиця 2.1 - Хімічний склад сталі 12Х1МФ для трубопроводу 2-го контуру

| Склад           | Хімічний склад, мас. % |             |           |       |           |             |            |       |         |
|-----------------|------------------------|-------------|-----------|-------|-----------|-------------|------------|-------|---------|
|                 | C                      | Si          | Mn        | Ni    | Cr        | Mo          | V          | Cu    | домішки |
| За ГОСТ         | 0,08 – 0,15            | 0,17 – 0,37 | 0,4 – 0,7 | < 0,3 | 0,9 – 1,2 | 0,25 – 0,35 | 0,15 – 0,3 | < 0,2 | < 0,055 |
| За сертифікатом | 0,12                   | 0,25        | 0,6       | 0,24  | 1,1       | 0,32        | 0,22       | 0,16  | 0,045   |

Таблиця 2.2 - Хімічний склад сталі 12Х1МФ для трубопроводу 2-го контуру

| Марка сталі | Критичні точки, °C |                 | Режими гартування та відпуску |                     |                        | Механічні властивості |                        |         |         |                         |
|-------------|--------------------|-----------------|-------------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|---------|---------|-------------------------|
|             | Ac <sub>1</sub>    | Ac <sub>3</sub> | T <sub>гарт</sub> , °C        | Гартівне середовище | T <sub>відп</sub> , °C | σ <sub>в</sub> , МПа  | σ <sub>0,2</sub> , МПа | δ, %    | ψ, %    | KCU, Дж/см <sup>2</sup> |
| 12Х1МФ      | 760                | 890             | 960 - 980                     | повітря             | 680 - 760              | 510 - 580             | 320 - 450              | 25 - 33 | 67 - 77 | 147 - 196               |

Випробування розподілу температури по довжині хвильоводу проводили на хвильоводах, виготовлених з наступних матеріалів: сталь Ст3, сплави на основі алюмінію АМг3 та АМг6 (табл. 2.3) [40-41]. Для випробувань при нагріванні одного кінця хвильоводу до температур понад 300 °C виконано

імітацію теплоізоляції поверхні контролю, для чого використані теплоізоляційні мати, що застосовуються на АЕС.

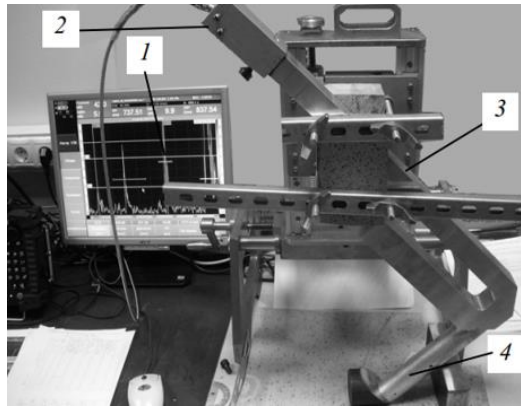
Таблиця 2.3 – Хімічний склад матеріалів хвилеводів

| Матеріал | Хімічний склад, мас. % |        |             |            |            |       |       |           |            |                |          |
|----------|------------------------|--------|-------------|------------|------------|-------|-------|-----------|------------|----------------|----------|
|          | Fe                     | Al     | C           | Si         | Mn         | Ni    | Cr    | Mg        | Ti         | Be             | до-мішки |
| Ст3      | Основа                 | –      | 0,14 – 0,22 | 0,15 – 0,3 | 0,4 – 0,65 | < 0,3 | < 0,3 | –         | –          | –              | < 0,5    |
| АМг3     | < 0,5                  | Основа | –           | 0,5 – 0,8  | 0,3 – 0,6  | –     | –     | 3,2 – 3,8 | < 0,1      | –              | < 0,3    |
| АМг6     | < 0,4                  | Основа | –           | < 0,4      | 0,5 – 0,8  | –     | –     | 5,8 – 6,8 | 0,02 – 0,1 | 0,0002 – 0,005 | < 0,3    |

## 2.2 Методика проведення лабораторних випробувань при розробці безперервного УЗ контролю

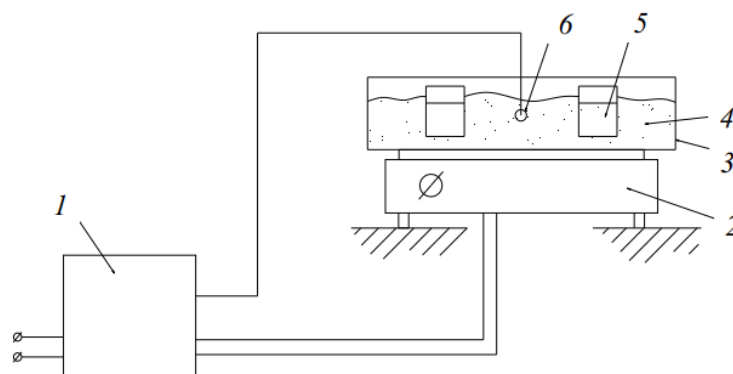
Лабораторні випробування для оцінки чутливості вимірювальних вузлів з різними типами хвилеводів проводились з використанням ультразвукового вимірювального вузла, що складається з високотемпературного перетворювача з кутом введення  $45^\circ$  і робочою частотою 2,25 МГц, різних типів прямокутних хвилеводів з поперечними перетинами  $32 \times 40$  мм і УЗ дефектоскопа. Контроль виконувався з використанням тест-зразків з отвором діаметру 6 мм за допомогою спеціального лабораторного стенду (рис. 2.1) [37].

Для проведення лабораторних випробувань акустичних рідин і ущільнювачів для акустичних ванн, що забезпечують контакт хвилеводу з об'єктом моніторингу, проводили їх тривалий нагрів в діапазоні температур від 280 до 320 °С (рис. 2.2) [37].



1 - А-скан із зображенням ехо-сигналу від отвору  $\varnothing$  6 мм; 2 - ПЕП; 3 - U-подібний хвилевід; 4 - тест-зразок з отвором  $\varnothing$  6 мм

Рисунок 2.1 - Лабораторний стенд для оцінки чутливості вимірювального вузла на прикладі U-подібного хвилеводу з дзеркалом



1 - вимірювач регулятор температури; 2 - електронагрівач; 3 - піддон;  
4 - пісок; 5 - ємність для нагріву зразків; 6 - термопари

Рисунок 2.2 – Схема стенду для температурних випробувань

Для випробувань обрано наступні кремній-органічні високотемпературні рідини і силіконові гуми [42]:

- рідина поліметилфенілсилоксанова Пента®-МФ-2030 (діапазон робочих температур до 300 °С);
- теплоносій Пента®-410 (діапазон робочих температур до 400 °С в замкнутому контурі і до 250 °С у відкритому контурі);
- гуми кремній-органічні листові (діапазон робочих температур до 300 °С).

Для комплексного дослідження поведінки високотемпературних рідин і кремнійорганічних гум при нагріванні (випаровування, закипання, кристалізація і т.д.) випробування проводилось в два етапи. Зразки з рідинами і кремній-органічними гумами піддавались нагріванню і витримці при температурах від 280 до 320 °С протягом 18 діб, що в сумі склало 238 год, і протягом 29 діб, що склало 356 год.

### 2.3 Методика та обладнання для випробувань мікрорізків

Під мікрорізками для випробувань на розтяг відповідно до ГОСТ 1497-84 [43] розуміють зразки, діаметр або товщина яких менше 3 мм, а для випробувань на ударну в'язкість відповідно до ГОСТ 9454-78 - менше 2 мм [44].

В якості архівного металу використовувалася частина трубопроводу 2-го контуру, що знаходиться на складі. З труби був вирізаний темплет, що був розрізаний на заготовки з розмірами 10х10х55 мм, з яких були виготовлені зразки для механічних випробувань та проведені металографічні дослідження.

Для вирізання мікрорізків обрано місце на коліні трубопроводу, на відстані 200 мм вище від зварного шва, з розмірами 60х60 з поглибленням в основний метал не більше 7 мм. Товщина металу в зазначеному місці становить не менше 80 мм при мінімально допустимій товщині 63,1 мм за кресленням.

На обраному місці трубопроводу організовано ділянку для вирізки, підведені комунікації для роботи комплексу "Мікроріз". Малогабаритний пересувний комплекс "Мікроріз" призначений для електроерозійного вирізання проб металу з поверхні обладнання і трубопроводів без порушення цілісності виробів. Для різання використовується іскровий імпульсний розряд

в діелектричній робочій рідині. Тип установки: пересувна блочно-модульна [45].

Установка "Мікроріз" складається з наступного обладнання та устаткування (рис. 2.3): робочої платформи, що закріплюється на трубопроводі за допомогою гнучких захоплень, модуля оконтурювання місця вирізки проби, модуля електроерозійного вирізання проби, блоку живлення модулів, блоку управління модулем електроерозійного вирізання, системи водяного охолодження установки.

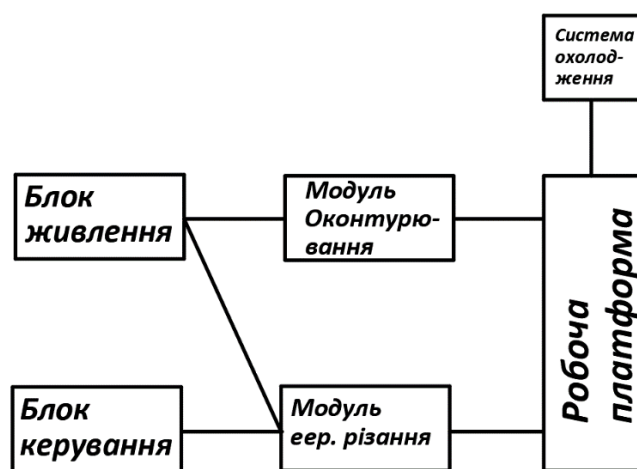


Рисунок 2.3 – Блок-схема установки «Мікроріз»

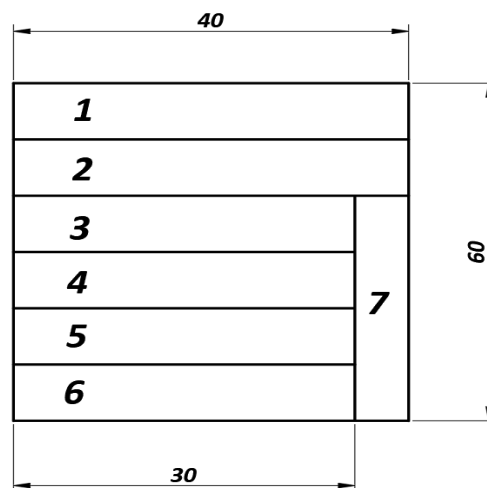
Робоча платформа має стійки для кріплення модулів, сталеві опори для установки на трубі, вікно для виконання різку. Габаритні розміри вирізаних проб металу: довжина 60 мм, ширина 60 мм, товщина від 0,3 до 10 мм. Продуктивність установки - 1 проба зазначених розмірів за 24 год. Напруга живлення: промислова мережа, однофазна 220 В  $\pm$  10% ~ 50 гц. Споживана потужність 2 кВт. Робочий електрод: дріт діаметром 0,15 мм. Робоча рідина - технічна вода.

Геометричні виміри, проведені після вирізки проби і демонтажу установки, показали, що глибина зарізки у всій зоні різання не перевищує 4,5 мм при встановленій границі 7 мм. Розміри вирізаної проби металу склали: довжина 59 мм, ширина 59 мм, товщина 2,5...4,2 мм. По завершенню робіт

проведено механічну зачистку місця вирізки з забезпеченням плавних переходів до основного металу. Було виконано контроль товщини стінки блоку в місці вирізки, що показав, що мінімальна товщина стінки трубопроводу становить 81 мм (по кресленнях повинна бути не менше 63,1 мм). По завершенню робіт була виконана кольорова дефектоскопія [45].

Темплет був прошліфований на плоскошліфувальному верстаті з водяним охолодженням до товщини 2 мм та розрізаний за схемою (рис 2.4).

З метою максимального використання металу розрізання темплету здійснювалася електроерозійним методом. З заготовок були виготовлені зразки: для механічних випробувань з розмірами робочої частини 15х3,5х2 мм; для випробувань на ударний згин тип 14 по ГОСТ 9454-78 2х8х55 мм з V-подібним надрізом.



1, 2 - заготовки під зразки для випробувань на ударний згин;

3-6 – заготовки під зразки для механічних випробувань на розтяг;

7 - заготовка під зразки для металографічних і структурних досліджень

Рисунок 2.4 - Схема розділу темплету

Механічні властивості на розтяг (границя міцності, границя текучості, відносне видовження, відносне звуження) при температурах 20 і 350 °С виконувались за ГОСТ 1497-84 та ГОСТ 9651 - 84 [46].

Випробування зразків на розтяг проводили на універсальній випробувальній машині ЦДМ ПУ-10. Випробування проводили на повітрі, при кімнатній температурі.

Ударна в'язкість при температурі 20 °С визначалась за ГОСТ 9454-78. Для випробувань на ударну в'язкість використовували маятниковий копер ПСВ-30 (виробництво Німеччина). Випробування на ударний згин проводили при кімнатній температурі, так як в технічних умовах і паспорті наведені дані тільки при 20 °С. В атомній енергетиці основним типом зразків для випробувань на ударний вигин є зразок Шарпі тип 11 (V-образний надріз 10x10x55 мм). Разом з цим ГОСТ 9454-78 допускає використання зразків інших розмірів, зокрема, типу 14 (2x8x55 мм з V-подібним надрізом). З огляду на вплив масштабного фактору на випробування на ударний згин, вводили поправочні коефіцієнти, що дозволяють відкоригувати отримані результати.

Комплекс структурно-фазових і металофізичних досліджень для оцінки еволюції мікроструктури в процесі експлуатації проводили на електронному мікроскопі JEMCX за допомогою растрової приставки ASID-4D за прискорюючої напруги 40 кВ.

Металографічні дослідження, оцінку мікроструктури, визначення вмісту домішкових включень проводили відповідно до вимог ГОСТ 5640-68 [47].

Для металографічного дослідження мікроструктури використане хімічне травлення мікрошліфів в реактиві Марбле (100 мл HCl + 20г CuSO<sub>4</sub> + 100мл H<sub>2</sub>O) і електролітичне в реактиві: 9,8 гр сірчаної кислоти, 16 гр повареної солі, 5,4 гр заліза, решта (до 100 гр) вода. Зразки витримували в реактиві, промивали у воді та сушили фільтрувальним папером.

## 3 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕРВНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ТРУБОПРОВОДІВ

Методи ультразвукового контролю широко застосовуються на атомних станціях для виявлення неприпустимих дефектів у металі обладнання і трубопроводів. Однак, такий контроль проводиться на зупиненому блоці АЕС в період планових ремонтів, хоча зародження і розвиток дефектів відбувається на стадії експлуатації на працюючому обладнанні. З метою забезпечення можливості контролю цілісності найбільш критичних зон виникає необхідність розроблення технології безперервного ультразвукового моніторингу потенційно небезпечних допустимих дефектів. Така технологія повинна забезпечити безперервний ультразвуковий контроль обраної несучільності при температурі поверхні обладнання, що контролюється, до 300 °С.

Використання такої технології дасть можливість оцінити кінетику розвитку дефекту в різних режимах експлуатації, здійснити експлуатаційний контроль критичних зон, схильних до експлуатаційного дефектоутворення і спонтанного зростання дефектів від допустимих до неприпустимих розмірів за короткий період часу.

### 3.1 Аналіз матеріалів та обладнання для високотемпературного вимірювального УЗ тракту

При виборі матеріалів та обладнання для високотемпературного УЗ моніторингу основним завданням є забезпеченні живучості (працездатності) УЗ перетворювача з урахуванням необхідності контролю металу з температурою поверхні близько 300 °С, а також з урахуванням довгого

терміну проведення контролю протягом всієї паливної кампанії без значного зниження чутливості.

Основним вузлом вимірювального тракту для високотемпературного УЗ контролю є перетворювач, що випромінює УЗ коливання. Кут падіння УЗ коливань в похилому перетворювачі вибирається таким, щоб в контрольованому матеріалі поширювався тільки один тип коливань - поперечні. Виходячи з цих міркувань досліджень був обраний перетворювач з кутом введення  $45^\circ$ . Передача ультразвукових коливань під кутом  $45^\circ$  до дефекту, що спостережується, виключає трансформацію хвилі в інші типи і появу хибних сигналів. При цьому підвищується перешкодозахищеність системи в цілому [48].

Процес зростання дефекту в зварному з'єднанні (ЗЗ) супроводжується збільшенням його умовних і реальних розмірів, а також збільшенням амплітуди ехо-сигналу від нього. Вимірювання умовних або реальних розмірів дефекту (висоти і довжини) при використанні імпульсного ехо-методу вимагає переміщення ультразвукового перетворювача як поперек, так і вздовж осі ЗЗ, що надзвичайно складно реалізувати на обладнанні, що знаходиться в експлуатації і захищеному товстим шаром теплоізоляції. Тому найбільш простим способом реєстрації зростання дефекту є контроль за збільшенням ехо-сигналу (еквівалентної площі) від дефекту. Обов'язковою умовою для виконання таких вимірювань є формування ультразвукового пучка, розміри якого в рази перевершують реальні розміри (висоту і довжину) дефекту, що спостерігається. Ця умова легко виконується за рахунок природньої розбіжності ультразвукового поля в далекій зоні. При цьому високотемпературний ультразвуковий перетворювач повинен розташовуватися за межами теплової ізоляції, завдяки чому забезпечується його тривала робота за рахунок сприятливих температурних умов в зоні його розташування. З огляду на це, оптимальним буде застосування перетворювача, п'єзоелемент якого зроблений зі спеціальної високотемпературної п'єзокераміки [49].

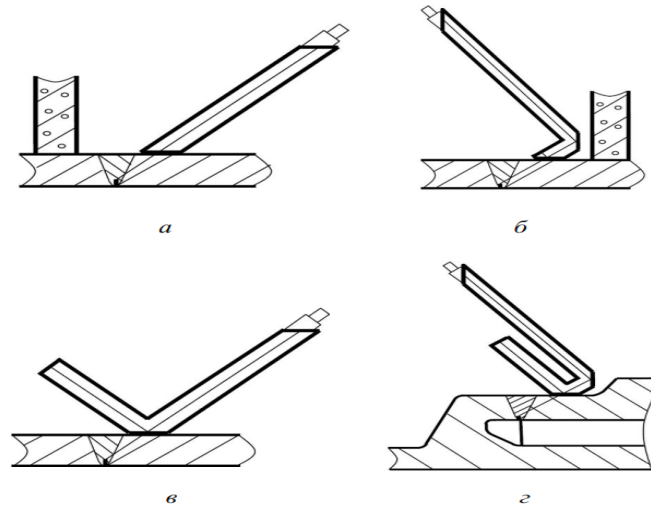
Кращі зразки високотемпературних перетворювачів з діапазоном частот  $2\div 4$  МГц зберігають працездатність при температурах понад  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  не більше 10 хв, тому умова розміщення УЗ перетворювача за тепловою ізоляцією є обов'язковим для забезпечення його працездатності протягом тривалих термінів.

Для усунення впливу температури контрольованого обладнання на елементи конструкції і властивості УЗ перетворювача при контролі використовується локальне охолодження виробів, застосовуються хвилеводи, що забезпечують можливість охолодження перетворювача, зводиться до мінімуму час контакту перетворювача з об'єктом контролю, що призводить лише до незначної зміни властивостей перетворювача. Найбільш перспективним способом вирішення завдання високотемпературного УЗ моніторингу є застосування акустичного хвилеводу з метою зниження температурного впливу на УЗ перетворювач. Хвилевід також забезпечує введення УЗ коливань в контрольований матеріал під заданим кутом.

При виборі конструкції хвилеводу необхідно враховувати специфіку контрольованої зони - геометрію, умови доступу, можливість розміщення вимірювального оснащення, температурні режими роботи та ін. Довжина хвилеводу вибирається з умови забезпечення оптимальної робочої температури УЗ перетворювача при максимальній температурі контрольованої поверхні, а мінімально можливі розміри - з умов мінімуму об'ємних ревербераційних перешкод. При розробці технології високотемпературного УЗ моніторингу [33] випробувано кілька схем контролю з різними типами хвилеводів (рис. 3.1) [50].

Аналіз використання різних схем УЗ моніторингу показав, що найменшу чутливість мають вимірювальні вузли, що складаються з прямого хвилеводу з одностороннім доступом (рис. 3.1, а, б). Причина полягає в наявності високих ревербераційних шумів в зоні контакту з об'єктом моніторингу, пов'язаних з багаторазовими відображеннями від нижньої грані хвилеводу. У хвилеводах двостороннього доступу (рис. 3.1, в, г) застосовано акустичну затримку

відбитих від контактної поверхні УЗ коливань на час, більший, ніж час поширення ехо-сигналів в контрольованому об'єкті. Для затримки використовується додаткова частина хвилеводу за зоною контакту [51].

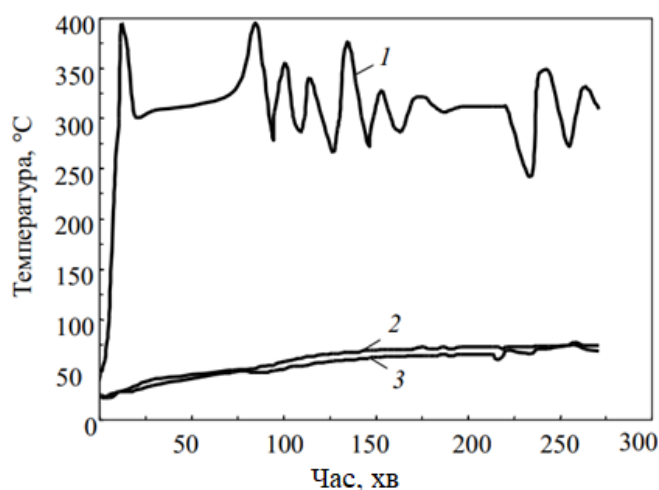


а - односторонній доступ, прямий хвилевід; б - односторонній доступ, прямий хвилевід із дзеркалом; в - двосторонній доступ, V-подібний хвилевід; г - обмежений двосторонній доступ, U-подібний хвилевід із дзеркалом

Рисунок 3.1 - Схеми контролю ЗЗ із застосуванням різних типів хвилеводів

В якості матеріалу для хвилеводу до розгляду представлено наступні: Сталь Ст3 та алюмінієві деформівні сплави АМг3, АМг6. При використанні металевого хвилеводу з Ст3 чутливість контролю нижче, ніж при вимірах з використанням хвилеводів з АМг3 та АМг6. Ослаблення ехо-сигналів в хвилеводі з Ст3 відбувається за рахунок збільшеного розсіювання ультразвукової хвилі на границях зерен металу. Інтенсивність розсіювання ультразвукової хвилі в АМг3 і АМг6 менше, ніж в Ст3, що пов'язано з дрібнодисперсною структурою цих сплавів. Інтенсивність розсіювання різко падає, коли розміри кристалів досягають 0,1 - 0,2 довжини хвилі. Найнижчий рівень акустичних перешкод мав хвилевод, виготовлений з АМг6. Він забезпечував високе співвідношення сигнал/перешкода по всьому діапазоні робочих температур [52].

Підтримка необхідної температури УЗ перетворювача, при якій зберігається його працездатність протягом тривалих термінів, здійснюється шляхом вибору оптимальної довжини хвилеводу - відстані від контрольованої поверхні до УЗ перетворювача. Випробування (рис. 3.2) [53] показують, що при тривалому нагріванні хвилеводу довжиною 600 мм до температури 300 °С, температура хвилеводу в місці установки УЗ перетворювача не піднімається вище 75 °С, що, згідно паспортних даних, допускається умовами роботи обраного УЗ перетворювача та має мінімальний вплив на його тривалу працездатність.

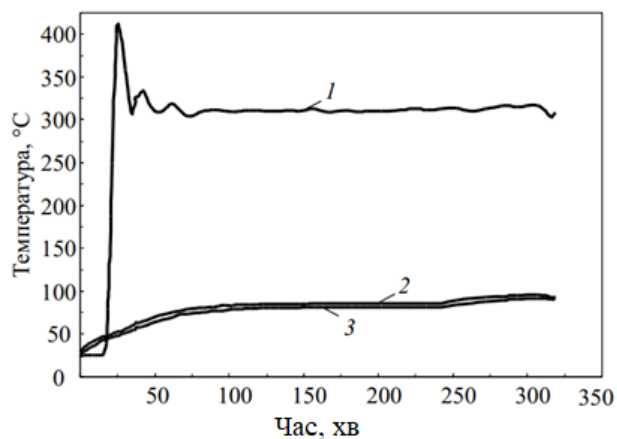


1 - температура поверхні нагрівання; 2, 3 - температура хвилеводу на відстані 400 і 600 мм від поверхні нагрівання відповідно

Рисунок 3.2 - Графік змін температури по довжині хвилеводу при нагріванні понад 300 °С при кімнатній температурі навколишнього повітря

З урахуванням того, що фактична температура навколишнього повітря в герметичних приміщеннях АЕС може досягати 70 °С, були проведені додаткові випробування з нагріванням хвилеводу до температури 300 °С і температурою повітря близько 75 °С. Температуру навколишнього повітря 75 °С навколо хвилеводу підтримували за рахунок кожуха, куди нагнітали гаряче повітря, використовуючи промисловий фен.

Згідно результатів випробувань (рис. 3.3) [53] температура в місці установки УЗ перетворювача на відстані 600 мм від поверхні нагрівання досягає 90 °С, що потребує додаткового зниження температур в зоні установки перетворювача з метою пом'якшення умов його роботи. Для цього було розроблено конструкцію системи охолодження, що складається з радіатора та вентилятора, що його обдуває. Натурні випробування конструкції показали, що для забезпечення необхідної, за паспортом на УЗ перетворювач, температури навколишнього середовища досить встановити радіатор без вентилятора, що дозволило спростити конструкцію (рис. 3.4) [53].



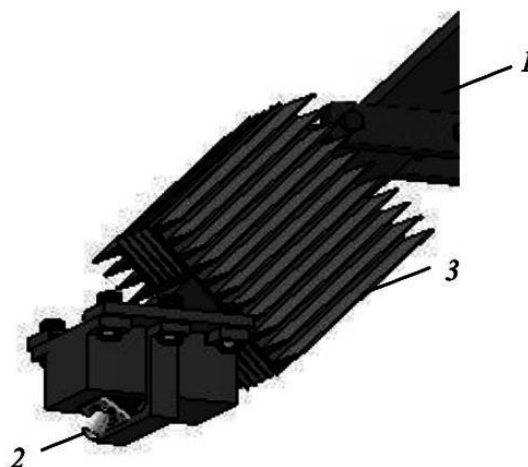
1 - температура поверхні нагрівання; 2, 3 - температура хвилеводу на відстані 400 і 600 мм від поверхні нагрівання відповідно

Рисунок 3.3 - Графік змін температури по довжині хвилеводу при нагріванні понад 300 °С при температурі навколишнього повітря 75 °С

Основні труднощі при тривалому безперервному УЗ моніторингу ЗЗ полягають в необхідності забезпечення надійного акустичного контакту між перетворювачем, хвилеводом і поверхнею об'єкта моніторингу при високих температурах.

Найбільш доцільним способом створення акустичного контакту при робочих температурах близько 300 °С є створення акустичного контакту перетворювача з об'єктом УЗ моніторингу за допомогою високотемпературної кремнійорганічної рідини. Це забезпечує високу і стабільну чутливість, при

цьому не потрібні складні пристрої для створення високого тиску перетворювача на поверхню металу.



1 - хвилевід; 2 - УЗ перетворювач; 3 - радіатор

Рисунок 3.4 - Конструкція радіатора для охолодження УЗ перетворювача та хвилевід в зоні їх контакту

За результатами тривалого нагрівання кремнійорганічних рідин і герметизуючих гум встановлено, що кремнійорганічні масла і гуми зберігають працездатність тривалий період часу при температурах до 320 °С [54]. Слід зазначити, що кремнійорганічні гуми більш тривалий час зберігають герметизуючі властивості при високих температурах при умови відсутності контакту з повітрям. Порівняльний аналіз результатів випробувань показав, що зразки з рідиною Пента®-МФ-2030 показали найкращі результати при тривалому нагріванні в закритому контурі (низький рівень випаровування і втрата маси, слабке утворення плівкових включень). Вони зберігають високі акустичні властивості при високих температурах, забезпечують надійний акустичний контакт. Обрана рідина є найбільш надійною для використання в системі натурального тривалого ультразвукового контролю при високій температурі [53].

Таким чином, для системи високотемпературного УЗ моніторингу ехо-імпульсним методом обрано високотемпературні ПЕП поперечною хвилею з

кутом введення 45 і робочою частотою 2,25 МГц, встановленим на акустичний хвилевід U-подібної форми прямокутного перетину з матеріалу АМгб. Акустичний контакт забезпечувався кремнійорганічною рідиною Пента®-МФ-2030.

### 3.2 Схема безперервного ультразвукового онлайн моніторингу

Для контролю зварних з'єднань трубопроводу 2-го контуру пропонується використання системи онлайн моніторингу дефектності, що має трирівневу систему збору, реєстрації і обробки даних (рис. 3.5).

Перший рівень у системи моніторингу - це п'єзоелектричний перетворювач (ПЕП), виготовлений з високотемпературної п'єзокераміки з похилим перетворювачем, низьким ступенем демпфірування та частотою 2,25 МГц, поєднаний з хвилеводом, що забезпечує з одного боку термоізоляцію ПЕП до прийнятної температури, з іншого боку – стійке пропускання пружних поперечних коливань під заданим кутом.

Другий рівень в системі моніторингу пропонується виконати на базі дефектоскопу УМД-8 та контрольно - вимірювального модулю PXI NATIONAL INSTRUMENTS з можливістю масштабування, синхронізації вимірювань, зберігання даних зі швидкістю 800 Мб/сек і віддаленого управління в режимі реального часу. Контролер реального часу модуля PXI виконаний на базі 4-х ядерного процесора Intel, пропускнуою спроможністю до 8 Гб/сек [55].

Третій рівень системи має складатись з сервера математичної обробки і зберігання даних (АРМ), що здійснює оперативний аналіз поточної ситуації, а також віддаленого оператора системи моніторингу, що виконує функції спостереження за процесом контролю, аналізу даних, управління роботою

системи збору даних, контролю параметрів навколишнього середовища та періодичної перевірки працездатності вимірювальних каналів системи.

Моніторинг зварного з'єднання повинен здійснюватись безперервно, в режимі реального часу протягом всієї паливної кампанії роботи РУ.

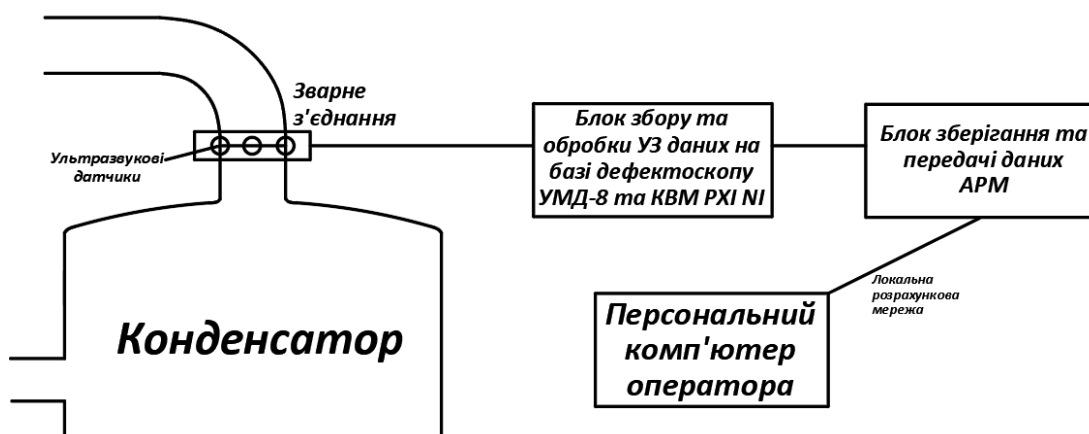
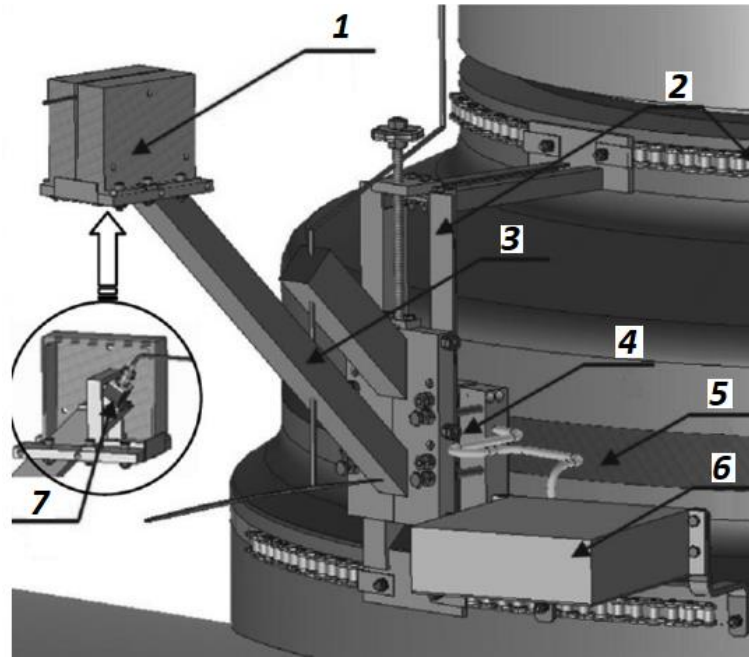


Рисунок 3.5 – Запропонована конфігурація системи онлайн моніторингу дефектності зварного з'єднання

### 3.3 Аналіз результатів випробування системи безперервного ультразвукового моніторингу

Безперервний УЗ моніторинг (рис. 3.6) здійснювався на обладнанні Нововороніжської атомної станції за аналогічною запропонованій схемою [56].

Зону контролю для проведення випробувань нової системи обрано за результатами експертного УЗ контролю, виконаного з метою пошуку вихідного концентратора (дефекту) з розмірами нижче бракувального рівня. Виявлена несуцільність має протяжність 28 мм, висоту 7 мм та еквівалентну площу в 3 мм<sup>2</sup> (рис. 3.7). Передбачалось, що знайдена несуцільність визначає найбільш небезпечну зону 33, через присутність в ній найбільшого вихідного концентратора напружень [57].



1 - акустична ванна для УЗ перетворювача; 2 - елементи кріплення хвилеводу; 3 - акустичний хвилевід; 4 – акустична ванна для хвилеводу; 5 - зварний шов; 6 - компенсаційний бак з контактної рідиною; 7 - УЗ перетворювач

Рисунок 3.6 - Загальний вигляд вимірювальної частини системи УЗ моніторингу

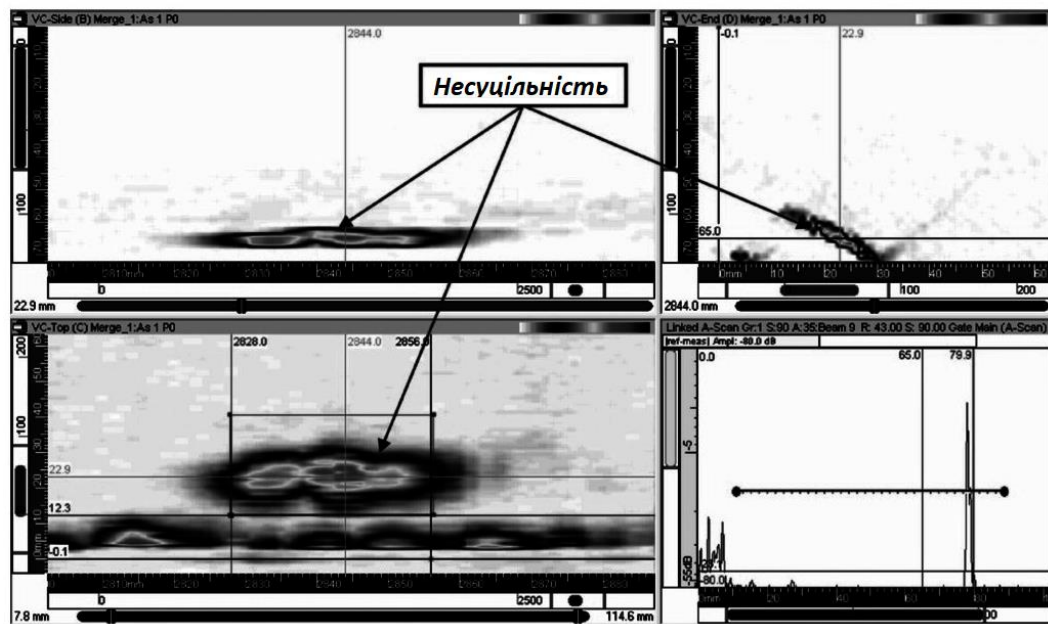


Рисунок 3.7 - Зображення несущальності, виявленої системою OnmiScan

Аналіз результатів безперервного УЗ моніторингу за характеристиками фактичної несущільності, обраної для детального діагностування, проводився шляхом визначення максимальних амплітудних значень величин ехо-сигналів, а також порівняння отриманих А-сканів в різних режимах експлуатації РУ. А-скан являє собою зображення ехо-сигналів, відбитих від дефектів в зварних з'єднаннях або конструктивних елементів зони контролю. На рис. 3.8 показано еталонне вимірювання ехо-сигналів, записане перед початком моніторингу, що відповідає вихідному стану зони контролю після монтажу системи УЗ моніторингу. Надалі цей А-скан використовувався для оцінки кінетики розвитку несущільності в зоні 33 протягом паливної кампанії [56].



Рисунок 3.8 - Еталонний А-скан перед початком УЗ моніторингу

А-скани із зображенням ехо-сигналів в кожному з 3-х вимірювальних стробів в зоні контролю 33, що записані в період виходу енергоблоку на потужність, роботи на потужності та зупинці енергоблоку АЕС зображено на рис. 3.9 - 3.11 [56].



Рисунок 3.9 - А-скан при розігріві РУ

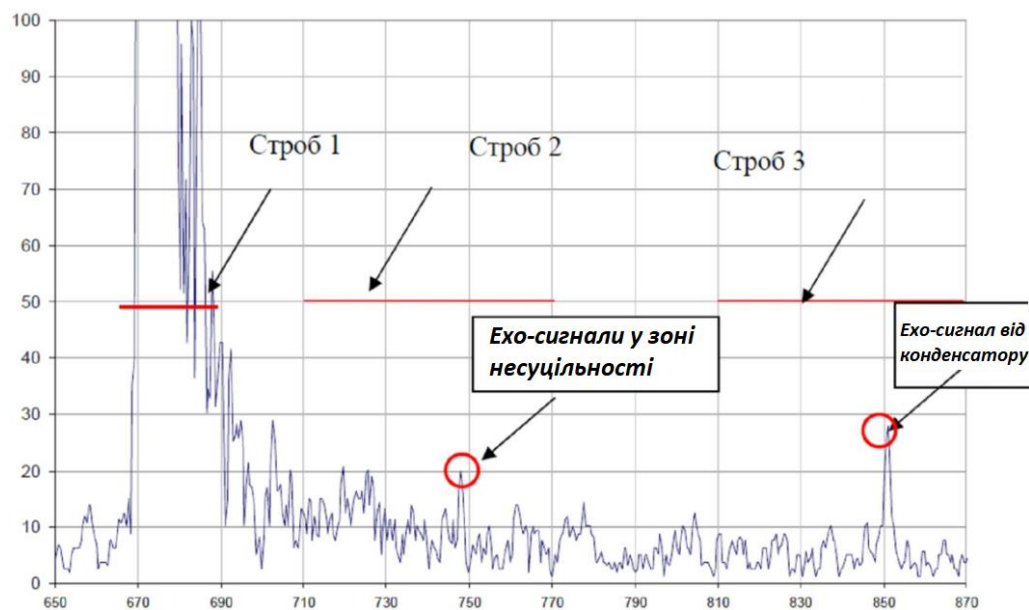


Рисунок 3.10 - А-скан при роботі РУ на потужності

При аналізі даних УЗ моніторингу враховувалися значення температури в місці установки УЗ датчика і в зоні дефектності ЗЗ протягом всіх пускових операцій і роботи енергоблоку на потужності.



Рисунок 3.11 - А-скан при зупинці (розхолоджуванні) РУ

У разі фіксації зміни амплітуди ехо-сигналу від несучільності, прив'язка до експлуатаційних режимів, технологічних операцій, циклів навантаження і т.д. допомагає встановити причинно-наслідкові зв'язки розвитку пошкоджуваності в критичній зоні.

Працездатність вимірювального тракту системи УЗ моніторингу перевіряється по наявності ехо-сигналу в Стробі 3 від зовнішньої поверхні конденсатору (рис. 3.8), що в свою чергу свідчить про наявність акустичного контакту між хвилеводом і об'єктом моніторингу. Як видно з наведеного А-скану при розігріві РУ, амплітуда ехо-сигналів від несучільності, що контролюється (Строб 2, рис. 3.9) є дуже низькою і практично знаходиться на рівні акустичного шуму. Це в основному пов'язано з істотним загасанням УЗ хвилі при проходженні сигналу через хвилевід. Крім того, внаслідок малих розмірів несучільності вона має невелику відбивну здатність. Спеціально розроблена процедура настройки і калібрування системи УЗ моніторингу дозволяє з достатньою точністю встановити місце розташування сигналу від несучільності на ехограмі і згодом вести спостереження за цією зоною.

За результатами аналізу даних УЗ моніторингу контрольованого зварного з'єднання, записаних протягом останньої паливної кампанії, було

встановлено, що в зоні несущільності, що контролювалась, спостерігалися лише незначні зміни амплітуд ехо-сигналів, що за величиною були на одному рівні з акустичними шумами. Слід зазначити, що зміни амплітуд, що спостерігались, за величиною ехо-сигналу і зрушення по розгортці ехограми пов'язані з температурною зміною швидкості і кута введення ультразвукової хвилі, що враховано при аналізі ехо-сигналів. Таким чином, за результатами аналізу даних безперервного УЗ моніторингу протягом однієї паливної кампанії, зроблено висновок про відсутність зростання контрольованої несущільності. Результати експертного УЗ контролю, виконаного після закінчення паливної кампанії, підтвердили відсутність зміни геометричних характеристик розглянутої несущільності і збереження її відбивної здатності.

#### 4 ПРОВЕДЕННЯ РУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ОСНОВНОГО МЕТАЛУ ТРУБОПРОВОДУ 2-ГО КОНТУРУ З ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОЗРАЗКІВ

Здобувачем прийнято участь у випробуваннях з використання комплексу «Мікроріз» для отримання мікроразків з трубопроводу 2-го контуру без шкоди його експлуатаційним властивостям. На отриманих мікроразках проведена серія випробувань, що відповідає стандартній методиці руйнівного контролю [43, 44].

Перед випробуваннями встановлено кореляцію між механічними властивостями стандартних зразків та мікроразків при температурі 20 °С (табл. 4.1) та 350 °С (табл. 4.2). Випробування проводились на трубах аварійного запасу зі сталі 12Х1МФ.

Таблиця 4.1 - Порівняння короточасних механічних властивостей стандартних зразків і мікроразків при 20 °С

| Тип зразка                                              | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | Примітка         |
|---------------------------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|------------------|
| Мікроразки                                              | 497              | 288                  | 19,8         | 52,3       | Середнє значення |
| Зразки за ГОСТ 1497-84                                  | 510              | 294                  | 21           | 55         | Середнє значення |
| Різниця між результатами для мікроразків та стандартних | 2,5 %            | 2 %                  | 6 %          | 5 %        | -                |
| Дані НТД                                                | 450 - 550        | 250 - 400            | > 14         | > 50       | Технічні умови   |

Таблиця 4.2 - Порівняння короточасних механічних властивостей стандартних зразків і мікроразків при 350 °С

| Тип зразка                                              | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | Примітка         |
|---------------------------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|------------------|
| Мікроразки                                              | 450              | 231                  | 11,6         | 45         | Середнє значення |
| Зразки за ГОСТ 1497-84                                  | 474              | 236                  | 12,6         | 50         | Середнє значення |
| Різниця між результатами для мікроразків та стандартних | 5 %              | 2 %                  | 7,5 %        | 10 %       | -                |
| Дані НТД                                                | > 400            | > 200                | > 10         | > 40       | Технічні умови   |

#### 4.1 Дослідження мікроструктури основного металу

Мікроструктура мікрорізків сталі 12Х1МФ типова для перліту ( $\alpha\text{-Fe} + \text{Fe}_3\text{C}$ ) (рис. 4.1). Мікроструктура двофазна, складається з перліту дрібнопластинчатого та зернистого перліту точкового типу в окремих зернах спадкового аустенітного зерна (світлі ділянки на темному тлі). Виходячи з порівняння з еталонами (згідно за шкалою 9 по ГОСТ 8233-56 [58]) зернистий перліт становить приблизно 30 на 70% пластинчастого перліту. За ступенем дисперсності пластинчастий перліт відповідає 4...5 балу за ГОСТ 8233-56 (з міжплощинною відстанню до 1 мм). Поряд з  $\alpha$ -фазою в сплаві присутні спеціальні карбіди хрому, ванадію та молібдену:  $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ ,  $(\text{VMo})\text{C}$ , а також оксиди хрому  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_3\text{O}_4$  та  $\text{CrO}_4$  (рис. 4.2) [59].

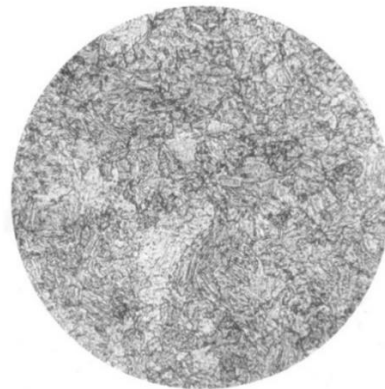


Рисунок 4.1 - Мікроструктура основного металу після  $100 \times 10^3$  год експлуатації,  $\times 500$

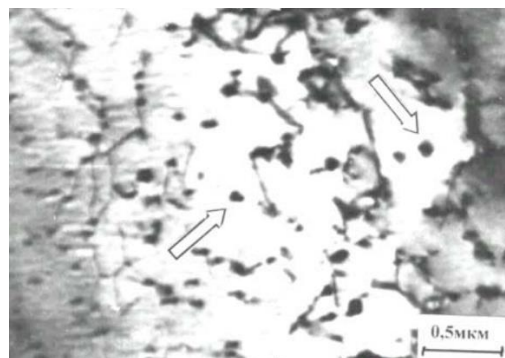


Рисунок 4.2 – Мікроскопічне зображення структури сталі 12Х1МФ

Аналізуючи мікроструктуру металу можна зробити висновок, що тривала експлуатація металу призвела до незначних змін в мікроструктурі, вираженої в збільшенні процентного вмісту пластинчастої складової перліту. Однак ці зміни не повинні призводити до істотної зміни механічних властивостей.

Металографічний аналіз сталі 12Х1МФ після експлуатації показав, що вміст неметалевих включень в металі становить: сульфідів - 1,5 бали, окисульфідів або силікатів - 1...1,5 бали, нітриди, карбонітриди - 2 бали за шкалами нітридів точкових і 1 бал строкових.

#### 4.2 Механічні випробування мікроразків

Діаграма розтягу сталі після  $100 \times 10^3$  год експлуатації характерна для пластичних металів, руйнування яких відбувається з утворенням шийки. Поява шийки визначає перехід від рівномірної деформації всієї робочої частини зразка до зосередженої деформації в певному перетині.

У табл. 4.3 та 4.4 наведено результати механічних випробувань відпрацьованого металу в порівнянні з НТД.

Таблиця 4.3 – Результати механічних випробувань при 20 °С мікроразків з основного металу трубопроводу 2-го контуру після  $100 \times 10^3$  год експлуатації

| Умови                                                                         | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|
| Дані НТД                                                                      | 450 - 550        | 250 - 400            | > 14         | > 50       |
| Аварійний запас                                                               | 508              | 292                  | 20           | 54         |
| Мікроразки після $100 \times 10^3$ год експлуатації                           | 548              | 366                  | 18,6         | 53         |
| Відхилення властивостей мікроразків від властивостей металу аварійного запасу | + 7 %            | +20 %                | - 7 %        | - 2 %      |

Таблиця 4.4 – Результати механічних випробувань при 350 °С мікроразків з основного металу трубопроводу 2-го контуру після  $100 \times 10^3$  год експлуатації

| Умови                                                                         | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|
| Дані НТД                                                                      | > 400            | > 200                | > 10         | > 40       |
| Аварійний запас                                                               | 468              | 226                  | 13           | 49         |
| Мікроразки після $100 \times 10^3$ год експлуатації                           | 496              | 285                  | 11,6         | 48,3       |
| Відхилення властивостей мікроразків від властивостей металу аварійного запасу | + 6 %            | + 26 %               | - 11 %       | - 1,4 %    |

З порівняння результатів випробувань видно, що механічні характеристики зразків, вирізаних із труб аварійного запасу, повністю відповідають стандартним характеристикам НТД. Однак, можна відзначити підвищені значення границь міцності та текучості зразків відпрацьованого металу порівняно зі зразками з аварійного запасу, що можна пояснити протіканням процесів старіння протягом  $100 \times 10^3$  год. Відносне видовження та звуження зменшилися після тривалої експлуатації труб приблизно на 7 - 11 % та 1,4 – 2% відповідно, порівняно з характеристиками пластичності труб з аварійного запасу.

Зміну механічних характеристик можна пояснити тим, що в процесі старіння відбувається сегрегація сірки та фосфору на міжзерених границях, що підвищує крихкість сталі. Домішки молібдену прискорюють процес. Температура експлуатації істотно впливає на дифузійні процеси і при температурі 325 °С коефіцієнт дифузії фосфору в 5 разів більше, ніж при 300 °С [60].

### 4.3 Випробування на ударний згин та фрактографічні дослідження

Найбільш значні зміни властивостей були виявлені при визначенні ударної в'язкості (KCV) сталі після тривалої експлуатації. Зниження спостерігалось протягом всього строку експлуатації і після  $100 \times 10^3$  год досягало 65 % (рис. 4.3).

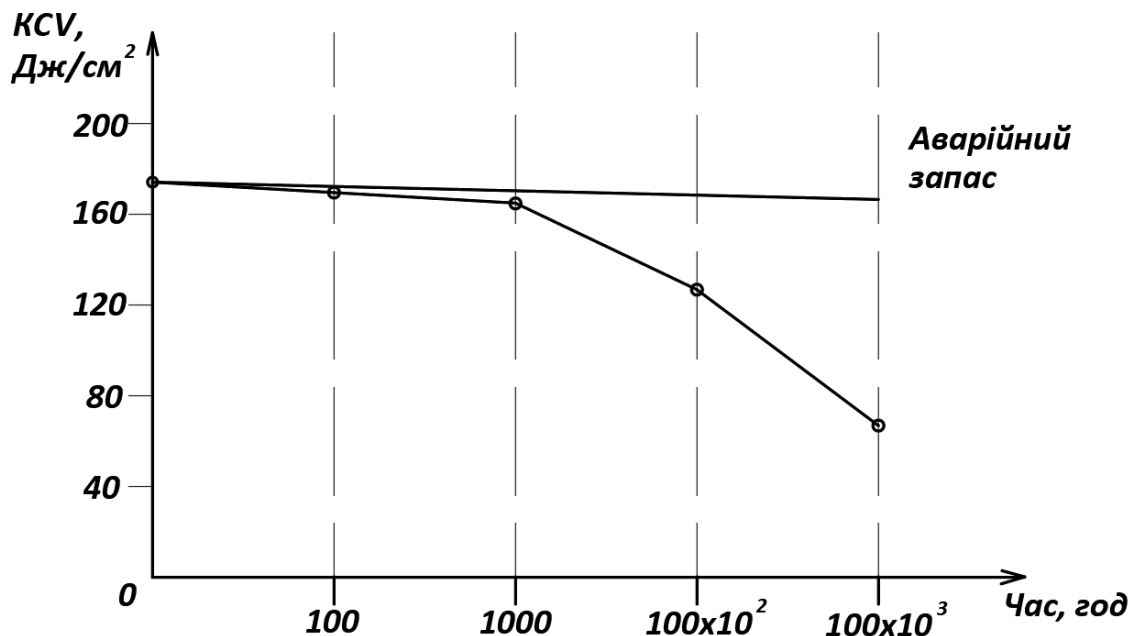


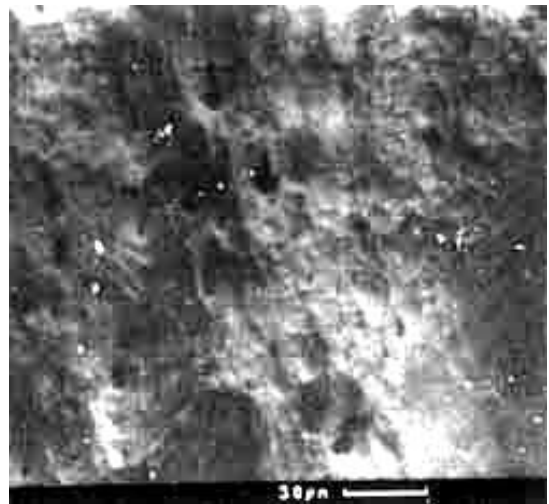
Рисунок 4.3 - Графік зміни ударної в'язкості металу трубопроводу зі сталі 12Х1МФ в залежності від часу експлуатації (середні значення)

На рис. 4.4, а наведена фрактограма поверхні руйнування зразка сталі 12Х1МФ із аварійного запасу при невеликому збільшенні ( $\times 12$ ) після випробування на ударну в'язкість.

Вся поверхня руйнування неоднорідна, має в'язкий характер. На ній спостерігаються поперечні борозни (провали), утворення яких можливо пов'язане з наявністю витягнутих включень сульфідів та фосфоридів. При більших збільшеннях ( $\times 500$ ) видно, що на всій поверхні зламу спостерігається класичне ямочне в'язке руйнування (рис. 4.4, б).



а



б

а – збільшення  $\times 12$ ; б – збільшення  $\times 500$

Рисунок 4.4 - Фрактограма поверхні руйнування після випробування на ударну в'язкість зразка зі сталі 12Х1МФ, вирізаного із труби аварійного запасу

На рис. 4.5 показано вид зламу після випробування на ударну в'язкість зразків сталі 12Х1МФ, які були вирізані із труб після тривалої експлуатації.



Рисунок 4.5 - Фрактограма поверхні руйнування після випробування на ударну в'язкість зразка зі сталі 12Х1МФ, вирізаного із труби після тривалої експлуатації ( $\times 12$ )

Характерно, що в цьому випадку не спостерігається різких поздовжніх борозенок (провалів), що спостерігались на зразках з аварійного запасу. Можна припустити, що це пов'язано з окрихченням всього об'єму металу труб у процесі експлуатації. В результаті такого окрихчення характеристики міцності витягнутих неметалевих включень і основна маса металу вирівнюються, а умови утворення таких борозен (провалів) відсутні. При більших збільшеннях можна бачити (рис. 4.6) типові картини в'язкого ямочного руйнування. Переважають ямки з порівняно невеликими розмірами ( $\sim 20$  мкм).

Таким чином, із проведених фрактографічних досліджень можна зробити висновок про те, що сталь 12Х1МФ у процесі експлуатації піддається окрихченню, що проявляється на зламах ударних зразків у згладжуванні макрорельєфу поверхні руйнування, відсутності яскраво виражених борозен (провалів) на зламі та у зменшенні розмірів в'язких осередків на поверхні руйнування.

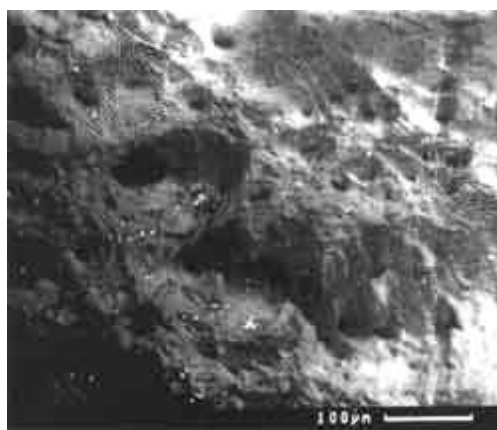


Рисунок 4.6 - Фрактограма поверхні руйнування після випробування на ударну в'язкість зразка зі сталі 12Х1МФ, вирізаного із труби після тривалої експлуатації (x150)

Окрихчення супроводжується зміною мікромеханізму руйнування із в'язкого транскристалітного (шляхом зародження, росту об'єднання мікропор) на крихкий. При цьому основним механізмом крихкого руйнування є

транскристалітний (відкол по тілу  $\alpha$ -фази). Додатково відбуваються процеси деформаційного старіння, що обумовлені наявністю в металі домішок вуглецю та азоту, що взаємодіють із дислокаційною структурою, сприяючи окрихченню сталей, тому що при цьому зменшується можливість релаксації пружних напружень внаслідок пластичної деформації.

Таким чином, аналіз причин руйнування металу показав, що в процесі експлуатації труб у металі відбуваються істотні зміни властивостей, що пов'язано в основному з розвитком процесів малоциклової втоми, термічного і деформаційного старіння.

Ці висновки узгоджуються з характеристиками ударної в'язкості, які у зразків, вирізаних з експлуатованих труб, що після тривалої експлуатації значно нижчі, ніж у зразків, вирізаних з труб аварійного запасу.

## 5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

На стадії експлуатації відповідального обладнання АЕС, зокрема трубопроводів 1-го та 2-го контуру, головним критерієм безпечної експлуатації стає не те, які дефекти є в конструкції, а забезпечення того, що наявні дефекти, новоутворені дефекти або дефекти, що розвиваються від технологічних, не приведуть до порушення працездатності обладнання, щонайменше до чергової перевірки його технічного стану. Таким чином, в цих випадках на стадії експлуатації необхідно і достатньо знайти і проаналізувати ті дефекти, що можуть призвести до відмови. Практика показала, що при тривалій експлуатації число таких небезпечних дефектів збільшується.

Так протягом останніх років, як в зоні зварних з'єднань трубопроводів, регулярно виникають і ростуть, аж до наскрізного рівня, тріщиноподібні (площинні) дефекти, а основний метал трубопроводів схильний до багатьох видів старіння. Швидкість зростання дефектів на тлі неминучого зниження службових властивостей металу внаслідок старіння, може бути дуже великий і, на жаль, зважаючи на складну картину термосилового навантаження і наявності корозійного середовища в зоні пошкодження не піддається розрахунковому обґрунтуванню.

У зв'язку з цим використання традиційних підходів до руйнівних та неруйнівних методів контролю дефектності на основі періодичного контролю, навіть при щорічному експертному контролі, не забезпечує безпечну експлуатацію трубопроводу та реакторної установки в цілому.

У подібних випадках необхідно відходити від традиційних рішень і розробляти нові і більш ефективні підходи діагностики «живучості» обладнання, що дозволяють проводити контроль технічного стану не тільки в період планово-попереджувального ремонту (ППР), але і оцінювати стан

фактичної дефектності безпосередньо в процесі експлуатації.

В роботі досліджується економічна ефективність впровадження нової методики неруйнівного контролю обладнання безпосередньо в процесі експлуатації за допомогою ультразвукового методу контролю, а також методики руйнівного контролю із застосуванням мікрорізків, що виготовляються без порушення конструкційної цілісності обладнання.

## 5.2 Планування науково–дослідних робіт

Планування проведення досліджень проводилося за допомогою сіткового графіку.

Система сіткового планування та управління складається з наступних етапів:

- складання переліку етапів і визначення їх тривалості;
- побудова сіткового графіку;
- розрахунок основних параметрів.

Для початку необхідно визначити послідовність проведення науково–дослідної роботи. Будь–яке наукове дослідження розпочинається з аналізу інформаційних матеріалів з обраної теми. Для цього на початковому етапі необхідно здійснити накопичення наукової інформації: бібліографічний пошук, вивчення документів, основних джерел щодо теми, скласти огляд літератури. По завершенню цього етапу необхідно сформулювати і обґрунтувати предмет дослідження. Після визначення напрямку досліджень необхідно провести оптимізацію методів УЗ контролю та провести випробування на лабораторних стендах для перевірки гіпотез. Після випробувань слід розробити схему безперервного УЗ контролю та провести натурні випробування. Для оптимізацію методів руйнівного контролю слід виготовити дослідні зразки. Після виготовлення зразків необхідно провести

механічну обробку, для того, щоб розміри зразка відповідали нормам стандарту. Далі необхідно провести всі необхідні випробування, дослідити структури зразків та зробити відповідні висновки. Більш детально етапи дослідження описані в попередніх розділах.

Сітковий графік являє собою інформаційно–динамічну модель, в якій зображуються взаємозв'язок і результати всіх робіт, необхідних для досягнення кінцевої мети проектування. При побудові сіткової моделі використовуються два графічних елемента: роботи і події. Робота – це процес, що вимагає витрат часу, наявності виконавців і матеріальних ресурсів. Подіями називаються результати проведених робіт. На графіку подія зображується у вигляді кола з номером. Сітковий графік будується за даними табл. 5.1 і представлений на рис. 5.1.

В таблицях використані наступні позначення:

$t_{ij}$  – час виконання роботи;

$t_{ij}^{pn}$  – ранній термін початку роботи;

$t_{ij}^{nn}$  – пізній термін початку роботи;

$t_{ij}^{po}$  – ранній термін завершення роботи;

$t_{ij}^{no}$  – пізній термін завершення роботи;

$R_{ij}^n$  – повний резерв часу роботи;

$R_{ij}^{ce}$  – вільний резерв часу роботи;

$L_i$  – довжина і–го шляху;

$L'_{кр}$  – спільна частина і–го і критичного шляху;

$K_{ni}$  – коефіцієнт напруженості і–го шляху;

$L_{кр}$  – довжина критичного шляху.

Таблиця 5.1 – Список робіт сіткового графіку

| №  | Код роботи | Робота                                                                                                                                       | Тривалість, дні |
|----|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1  | 2          | 3                                                                                                                                            | 4               |
| 1  | 0 - 1      | Теоретична підготовка до проведення дослідження, опрацювання наукової літератури для визначення основних проблем дефектоскопії трубопроводів | 15              |
| 2  | 1 - 2      | Формування задачі дослідження, вибір методів контролю трубопроводів для подальшої оптимізації                                                | 1               |
| 3  | 2 - 3      | Лабораторні випробування схем УЗ моніторингу з використанням хвильоводів різної форми                                                        | 4               |
| 4  | 3 - 4      | Дослідження впливу матеріалу хвильоводу на показники УЗ контролю                                                                             | 2               |
| 5  | 4 - 5      | Дослідження змін температури по довжині хвильоводу при різних температурах                                                                   | 2               |
| 6  | 5 - 6      | Випробування акустичних рідин і ущільнювачів для акустичних ванн                                                                             | 2               |
| 7  | 6 - 7      | Контрольні довготривалі лабораторні випробування на повномасштабному стенді                                                                  | 7               |
| 8  | 7 - 8      | Розробка схеми безперервного ультразвукового онлайн моніторингу                                                                              | 3               |
| 9  | 8 - 9      | Випробування схеми безперервного ультразвукового онлайн моніторингу                                                                          | 30              |
| 10 | 9 - 14     | Аналіз використання робочої схеми безперервного УЗ моніторингу, складання прогнозів                                                          | 1               |
| 11 | 2 - 10     | Виготовлення дослідних зразків для руйнівних випробувань                                                                                     | 2               |
| 12 | 10 - 11    | Виготовлення мікрозразків для досліджень за експериментальною технологією                                                                    | 2               |

| 1  | 2       | 3                                                                | 4  |
|----|---------|------------------------------------------------------------------|----|
| 13 | 11 - 12 | Механічна обробка дослідних зразків перед випробуваннями         | 1  |
| 14 | 12 - 13 | Проведення випробувань на звичайних зразках та мікрозразках      | 4  |
| 15 | 13 - 14 | Аналіз випробувань мікрозразків, складання прогнозів             | 2  |
| 16 | 14 - 15 | Обробка результатів дослідження, складання пояснювальної записки | 18 |

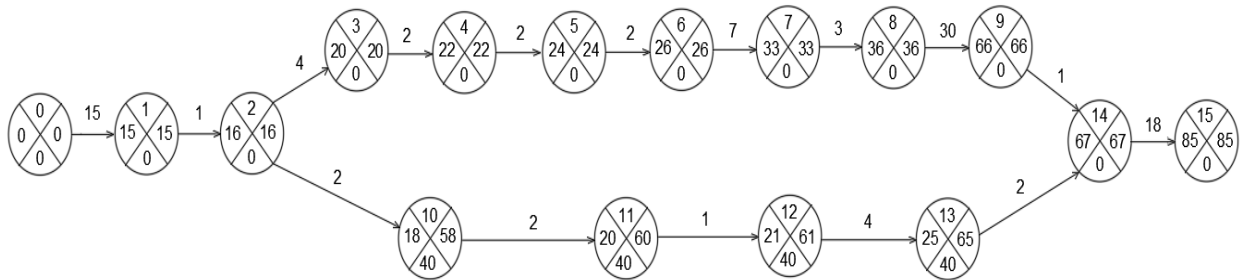


Рисунок 5.1 – Сіткова модель проведення НДР

Над стрілками вказано тривалість виконання етапу у днях. Таке графічне зображення плану виконання процесу показує взаємозв'язок усіх робіт для досягнення кінцевої мети.

Параметри робіт і шляхів представлені в табл. 5.2, 5.3 відповідно.

Таблиця 5.2 – Параметри робіт сіткового графіку

| Код роботи | $t_{ij}$ | $t_{pi}$ | $t_{po}$ | $t_{ni}$ | $t_{no}$ | $R_n$ | $R_{cv}$ |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|----------|
| 1          | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7     | 8        |
| 0 - 1      | 15       | 0        | 15       | 0        | 15       | 0     | 0        |
| 1 - 2      | 1        | 15       | 16       | 15       | 16       | 0     | 0        |

|         |    |    |    |    |    |    |    |
|---------|----|----|----|----|----|----|----|
| 1       | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| 2 - 3   | 4  | 16 | 20 | 16 | 20 | 0  | 0  |
| 3 - 4   | 2  | 20 | 22 | 20 | 22 | 0  | 0  |
| 4 - 5   | 2  | 22 | 24 | 22 | 24 | 0  | 0  |
| 5 - 6   | 2  | 24 | 26 | 24 | 26 | 0  | 0  |
| 6 - 7   | 7  | 26 | 33 | 26 | 33 | 0  | 0  |
| 7 - 8   | 3  | 33 | 36 | 33 | 36 | 0  | 0  |
| 8 - 9   | 30 | 36 | 66 | 36 | 66 | 0  | 0  |
| 9 - 14  | 1  | 66 | 67 | 66 | 67 | 0  | 0  |
| 2 - 10  | 2  | 16 | 18 | 16 | 58 | 40 | 40 |
| 10 - 11 | 2  | 18 | 20 | 58 | 60 | 40 | 40 |
| 11 - 12 | 1  | 20 | 21 | 60 | 61 | 40 | 40 |
| 12 - 13 | 4  | 21 | 25 | 61 | 65 | 40 | 40 |
| 13 - 14 | 2  | 25 | 67 | 65 | 67 | 0  | 0  |
| 14 - 15 | 18 | 67 | 85 | 67 | 85 | 0  | 0  |

Таблиця 5.3 – Параметри шляхів сіткового графіку

| № | № подій                                            | Тривалість                                      | $L_i$ | Резерв | $K_{ni}$ |
|---|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------|--------|----------|
| 1 | 0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 -<br>9 - 14 - 15 | 15 - 1 - 4 - 2 - 2 - 2 - 7 -<br>3 - 30 - 1 - 18 | 85    | 0      | 1        |
| 2 | 0 - 1 - 2 - 10 - 11 - 12 - 13 - 14<br>- 15         | 15 - 1 - 2 - 2 - 1 - 4 - 2 -<br>18              | 85    | 40     | 0,11     |

Коефіцієнт напруженості  $i$ -го шляху визначають за формулою:

$$K_{ni} = \frac{L_i - L'_{кр}}{L_{кр} - L'_{кр}} \quad (5.1)$$

Чим більше коефіцієнт напруженості шляху  $K_{\text{ш}}$  до 1, тим меншим відносним резервом володіє шлях. Для даного випадку на першому шляху, для розробки системи безперервного УЗ контролю, резервних днів немає. На другому шляху спостерігається 40 днів резерву для дослідження мікрорізків руйнівними методами контролю.

У ряді випадків важко установити загальну трудомісткість проведеної НДР. Це пов'язано з елементами невизначеності в процесі виконання більшості робіт. Їхня трудомісткість і тривалість залежить від безлічі факторів, передбачити які неможливо. У таких випадках використовують дві чи три вірогідні оцінки часу, що даються відповідальними виконавцями по кожному етапу робіт. Ці оцінки звичайно виражають в днях і є вихідними для розрахунку очікуваного часу виконання етапу робіт із формули:

$$t_{\text{оч}} = \frac{3 \cdot t_{\text{min}} + 2 \cdot t_{\text{max}}}{5} \quad (5.2)$$

де  $t_{\text{min}}$  – мінімально необхідна кількість днів при найбільш сприятливих умовах, днів;

$t_{\text{max}}$  – максимальні витрати часу на виконання роботи з даного етапу при несприятливих умовах, днів.

Ступінь правильності визначення  $t_{\text{оч}}$  перевіряють розрахунком дисперсії (розкиду між мінімальними та максимальними оцінками часу виконання робіт).

Дисперсія являє собою середнє значення квадрата відхилення тривалості роботи від її очікуваного значення і визначається по формулі:

$$\sigma^2(t) = \left( \frac{t_{\text{max}} - t_{\text{min}}}{5} \right)^2 \quad (5.3)$$

Якщо дисперсія менше або дорівнює 1, то це говорить про малий ступінь невизначеності оцінки часу робіт із даного етапу.

На тих етапах, де дисперсія більше 1 завищений максимальний час на

виконання етапу.

Результати розрахунків наведено в табл. 5.4

Таблиця 5.4 – Тривалість НДР

| № | Етапи НДР                                                                                                                                    | Тимчасові оцінки, днів |            |                 | Дисперсія, $\sigma$ |
|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------|-----------------|---------------------|
|   |                                                                                                                                              | $t_{\min}$             | $t_{\max}$ | $t_{\text{оч}}$ |                     |
| 1 | 2                                                                                                                                            | 3                      | 4          | 5               | 6                   |
| 1 | Теоретична підготовка до проведення дослідження, опрацювання наукової літератури для визначення основних проблем дефектоскопії трубопроводів | 13                     | 17         | 15              | 0,8                 |
| 2 | Формування задачі дослідження, вибір методів контролю трубопроводів для подальшої оптимізації                                                | 0                      | 2          | 1               | 0,4                 |
| 3 | Лабораторні випробування схем УЗ моніторингу з використанням хвильоводів різної форми                                                        | 3                      | 6          | 4               | 0,6                 |
| 4 | Дослідження впливу матеріалу хвильоводу на показники УЗ контролю                                                                             | 1                      | 3          | 2               | 0,4                 |
| 5 | Дослідження змін температури по довжині хвильоводу при різних температурах                                                                   | 1                      | 3          | 2               | 0,4                 |
| 6 | Випробування акустичних рідин і ущільнювачів для акустичних ванн                                                                             | 1                      | 3          | 2               | 0,4                 |
| 7 | Контрольні довготривалі лабораторні випробування на повномасштабному стенді                                                                  | 6                      | 10         | 7               | 0,8                 |
| 8 | Розробка схеми безперервного ультразвукового онлайн моніторингу                                                                              | 2                      | 5          | 3               | 0,6                 |

| 1  | 2                                                                                         | 3  | 4  | 5  | 6   |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|-----|
| 9  | Випробування схеми безперервного<br>ультразвукового онлайн моніторингу                    | 26 | 34 | 30 | 1,6 |
| 10 | Аналіз використання робочої схеми<br>безперервного УЗ моніторингу, складання<br>прогнозів | 0  | 2  | 1  | 0,4 |
| 11 | Виготовлення дослідних зразків для руйнівних<br>випробувань                               | 1  | 3  | 2  | 0,4 |
| 11 | Виготовлення мікрозразків для досліджень за<br>експериментальною технологією              | 1  | 3  | 2  | 0,4 |
| 12 | Механічна обробка дослідних зразків перед<br>випробуваннями                               | 0  | 2  | 1  | 0,4 |
| 13 | Проведення випробувань на звичайних зразках<br>та мікрозразках                            | 2  | 5  | 4  | 0,6 |
| 15 | Аналіз випробувань мікрозразків, складання<br>прогнозів                                   | 1  | 3  | 2  | 0,4 |

Побудовано графік подій, сіткова модель, таблиця списку робіт, знайдено критичний шлях, що має довжину 85 днів.

Майже всі роботи виконувалися послідовно. Високий резерв часу спостерігався на другому шляху.

### 5.3 Розрахунок кошторису витрат на проведення НДР

До складу витрат на проведення НДР входить вартість усіх ресурсів, що необхідні для реалізації комплексу робіт.

Складано кошторис витрат за статтями:

- матеріали та транспортні витрати;
- енергія і паливо;
- спеціальне обладнання і технологічне оснащення;
- амортизація універсального устаткування;
- заробітна плата основна і додаткова;
- відрахування на соціальне страхування;
- накладні витрати.

#### 5.3.1 Розрахунок вартості матеріалів

До цієї статті відносять витрати на придбання основних матеріалів для проведення дослідження (табл. 5.5).

Ціни на матеріальні ресурси визначають за відповідними прайс-листами.

Транспортно-заготівельні витрати складають 2 – 5 % від вартості матеріалів.

Таблиця 5.5 – Розрахунок вартості матеріалів

| Матеріал, стандарт                                    | Марка | Витрати матеріалу, кг | Ціна за одиницю, грн./т | Сума витрат, грн. |
|-------------------------------------------------------|-------|-----------------------|-------------------------|-------------------|
| Сталь звичайної якості, ДСТУ 2651-2005                | Ст3   | 3                     | 13000                   | 39                |
| Сплав на основі алюмінію, ГОСТ 4784 - 97              | АМг3  | 3                     | 60000                   | 180               |
| Сплав на основі алюмінію, ГОСТ 4784 - 97              | АМг6  | 3                     | 90000                   | 270               |
| Реактиви                                              | —     | —                     | —                       | 300               |
| Разом                                                 |       |                       |                         | 789               |
| Транспортно–заготівельні витрати                      |       |                       |                         | 39,45             |
| Всього з урахуванням транспортно–заготівельних витрат |       |                       |                         | 828,45            |

### 5.3.2 Спеціальне устаткування для науково – технічних робіт

В цій статті враховуються витрати на закупівлю, доставку і монтаж лабораторних установок, вимірювальних і регулюючих приладів, пристроїв, випробувальної апаратури і т. п. (табл. 5.6).

Таблиця 5.6 – Витрати на спеціальне устаткування

| Перелік устаткування                                                        | Кіль-<br>кість | Ціна за<br>одиницю,<br>грн. | Собівартість<br>експлуатації,<br>грн. |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Лабораторний стенд для оцінки<br>чутливості вимірювальних вузлів при<br>УЗК | 1              | 15000                       | 1000                                  |
| Стенд для температурних випробувань                                         | 1              | 5000                        | 334                                   |
| Стенд для повномасштабних<br>випробувань                                    | 1              | 16500                       | 1100                                  |
| Установка «Мікроріз»                                                        | 1              | 37265                       | 2484                                  |
| Універсальна випробувальна машина<br>ЦДМ ПУ-10                              | 1              | 396325,69                   | 7926,5                                |
| Маятниковий копер ПСВ-30                                                    | 1              | 152654,5                    | 3053,09                               |
| Електронний мікроскоп JEMCХ                                                 | 1              | 120482                      | 2409,64                               |
| Разом                                                                       |                |                             | 18307,23                              |

### 5.3.3 Розрахунок вартості палива і енергії

Під час проведення дослідів використано наступні енергоспоживаючі ресурси:

- Лабораторний стенд для оцінки чутливості вимірювальних вузлів при УЗК;
- Стенд для температурних випробувань;
- Стенд для повномасштабних випробувань;
- Установка «Мікроріз»;
- Універсальна випробувальна машина ЦДМ ПУ-10;
- Маятниковий копер ПСВ-30;

– Електронний мікроскоп ЛЕМСХ.

Витрати на енергію  $E_c$  визначали за формулою:

$$E_c = \frac{P_y \cdot \Phi_{\text{еф}} \cdot K_v \cdot C_e}{\text{ККД}}, \quad (5.4)$$

де  $P_y$  – установлена потужність енергетичних струмоприймачів устаткування, кВт;

$\Phi_{\text{еф}}$  – ефективний фонд часу роботи даного виду устаткування, годин;

$K_v$  – коефіцієнт використання енергетичних установок по потужності і часу ( $K_v = 0,8$ );

$C_e$  – ціна 1 кВт година електроенергії,  $C_e = 2,68$  грн/кВт\*година;

Для лабораторного стенду для оцінки чутливості вимірювальних вузлів при УЗК:

ККД = 0,8.

$E_c = 2 \times 32 \times 0,8 \times 2,68 / 0,8 = 171,52$  грн.

Для стенду для температурних випробувань:

ККД = 0,8.

$E_c = 6 \times 4 \times 0,8 \times 2,68 / 0,8 = 64,32$  грн.

Для стенду для повномасштабних випробувань:

ККД = 0,7.

$E_c = 10 \times 28 \times 0,8 \times 2,68 / 0,8 = 750,4$  грн.

Для установки «Мікроріз»:

ККД = 0,6.

$E_c = 50 \times 2 \times 0,8 \times 2,68 / 0,6 = 357,3$  грн.

Для універсальної випробувальної машини ЦДМ ПУ-10:

ККД = 0,7.

$E_c = 1 \times 4 \times 0,8 \times 2,68 / 0,7 = 12,25$  грн.

Для маятникового коперу ПСВ-30:

ККД = 0,7.

$E_c = 0,25 \times 1 \times 0,8 \times 2,68 / 0,7 = 0,76$  грн.

Для електронного мікроскопу JEMCX:

ККД = 0,7.

$E_c = 1 \times 10 \times 0,8 \times 2,68 / 0,7 = 30,62$  грн.

Розрахунок витрат на енергію заносимо у табл. 5.7.

Таблиця 5.7 – Розрахунок вартості енергоресурсів

| Устаткування                                                          | Вид енерго-ресурсів | Ефективний фонд часу роботи, год | Вартість, грн | Вартість енерго-ресурсів, грн |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------|-------------------------------|
| 1                                                                     | 2                   | 3                                | 4             | 5                             |
| Лабораторний стенд для оцінки чутливості вимірювальних вузлів при УЗК | Електро-енергія     | 32                               | 2,68          | 171,52                        |
| Стенд для температурних випробувань                                   | Електро-енергія     | 4                                | 2,68          | 64,32                         |
| Стенд для повномасштабних випробувань                                 | Електро-енергія     | 28                               | 2,68          | 750,4                         |
| Установка «Мікроріз»                                                  | Електро-енергія     | 2                                | 2,68          | 357,3                         |
| Універсальна випробувальна машина ЦДМ ПУ-10                           | Електро-енергія     | 4                                | 2,68          | 12,25                         |
| Маятниковий копер ПСВ-30                                              | Електро-енергія     | 1                                | 2,68          | 0,76                          |
| Електронний мікроскоп JEMCX                                           | Електро-енергія     | 10                               | 2,68          | 30,62                         |
| Разом                                                                 |                     |                                  |               | 1387,17                       |

#### 5.3.4 Розрахунок амортизації універсального устаткування

Суму амортизаційних відрахувань від балансової вартості універсального устаткування, що відносяться до основних фондів, розраховується у відповідності їх зайнятості для НДР.

Для лабораторного станду для оцінки чутливості вимірювальних вузлів при УЗК:

$$(15000 / (15 * 8640)) \times 32 = 3,7 \text{ грн.}$$

Для станду для температурних випробувань:

$$(5000 / (15 * 8640)) \times 16 = 0,62 \text{ грн.}$$

Для станду для повномасштабних випробувань:

$$(16500 / (15 * 8640)) \times 48 = 6,1 \text{ грн.}$$

Для установки «Мікроріз»:

$$(37265 / (15 * 8640)) \times 16 = 4,6 \text{ грн.}$$

Для універсальної випробувальної машини ЦДМ ПУ-10:

$$(396325,69 / (15 * 8640)) \times 6 = 18,35 \text{ грн.}$$

Для маятникового коперу ПСВ-30:

$$(152654,5 / (15 * 8640)) \times 6 = 7,07 \text{ грн.}$$

Для електронного мікроскопу ЈЕМСХ:

$$(120482 / (6 * 8640)) \times 24 = 55,78 \text{ грн.}$$

Результати розрахунку наведено у табл. 5.8.

Таблиця 5.8 – Розрахунок суми амортизаційних відрахувань

| Устаткування                                                                | Балансова вартість,<br>грн | Нормативний строк<br>експлуатації, р | Зайнятість<br>устаткування, год | Сума амортизації,<br>грн |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Лабораторний стенд для оцінки<br>чутливості вимірювальних вузлів при<br>УЗК | 15000                      | 15                                   | 32                              | 3,7                      |
| Стенд для температурних<br>випробувань                                      | 5000                       | 15                                   | 16                              | 0,62                     |
| Стенд для повномасштабних<br>випробувань                                    | 16500                      | 15                                   | 48                              | 6,1                      |
| Установка «Мікроріз»                                                        | 37265                      | 15                                   | 16                              | 4,6                      |
| Унів-на випр-на машина ЦДМ ПУ-10                                            | 396325,69                  | 15                                   | 6                               | 18,35                    |
| Маятниковий копер ПСВ-30                                                    | 152654,5                   | 15                                   | 6                               | 7,07                     |
| Електронний мікроскоп JEMCX                                                 | 120482                     | 6                                    | 24                              | 55,78                    |
| Разом                                                                       |                            |                                      |                                 | 96,52                    |

### 5.3.5 Розрахунок заробітної плати, соціальних виплат та накладних витрат

Витрати по цій статті складаються з планового фонду заробітної плати усіх категорій працівників, зайнятих в проведенні наукових досліджень.

Розрахунок заробітної плати робиться на підставі даних про трудомісткість (табл. 5.9).

Таблиця 5.9 – Розрахунок основної заробітної плати

| №     | Посада виконавця               | Кількість, Людей | Місячний оклад, грн | Середньо – денна зарплата, грн | Зайнятість, днів | Сума, грн |
|-------|--------------------------------|------------------|---------------------|--------------------------------|------------------|-----------|
| 1     | Головний науковий співробітник | 1                | 8093                | 404,65                         | 60               | 24279     |
| 2     | Молодший науковий співробітник | 1                | 5565                | 278,25                         | 60               | 16695     |
| 3     | Лаборант                       | 3                | 4548                | 227,4                          | 20               | 13644     |
| 4     | Верстатник                     | 1                | 7500                | 375                            | 5                | 1875      |
| Разом |                                |                  |                     |                                |                  | 56493     |

Кількість місяців роботи науково–дослідної групи задається на підставі терміну виконання дипломної роботи. В даному випадку не більше 10 місяців.

Додаткова заробітна плата складає 10 % від основної заробітної плати.

Основна й додаткова заробітна плата по кошторису не повинна перевищувати 40 % кошторисної вартості.

Відрахування на соціальні заходи визначаються в розмірі 22 % від основної й додаткової заробітної плати:  $(56493 + 5649,3) \times 0,22 = 13671,3$  грн.

Накладні витрати по проведенню науково–дослідницької роботи визначаються у відсотках від основної заробітної плати її виконавців ( у межах 80 – 100 %). До них відносяться витрати, пов'язані з управлінням, утриманням і експлуатацією устаткування й приміщень, створенням необхідних санітарно–гігієнічних умов. Накладні витрати для НДР складають 90 % від суми основної заробітної плати, а саме 50843,7 грн.

### 5.3.6 Кошторис витрат

У складі витрат на проведення НДР враховується вартість всіх ресурсів, необхідних для реалізації комплексу робіт.

З метою визначення витрат на проведення науково–дослідницької роботи слід скласти кошторис витрат (табл. 5.10).

Таблиця 5.10 – Кошторис витрат на виконання НДР

| Статті витрат                                                                           | Сума,<br>грн |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 1                                                                                       | 2            |
| Матеріали, покупні вироби і напівфабрикати (за відрахуванням відходів, що реалізуються) | 828,45       |
| Спеціальне устаткування для наукових (експериментальних) робіт                          | 18307,23     |
| Електроенергія                                                                          | 1387,17      |
| Амортизаційні виплати                                                                   | 96,52        |
| Основна і додаткова заробітна плата виробничого персоналу                               | 62142,3      |
| Відрахування на соціальне страхування                                                   | 13671,3      |
| Накладні витрати                                                                        | 50843,7      |
| Всього витрати на проведення НДР                                                        | 147276,67    |

### 5.3.7 Бальна оцінка економічної ефективності науково–дослідної роботи

Наукові дослідження, прямий підрахунок економічної ефективності по яких не можливий, оцінюють за допомогою бальної системи.

Бальна оцінка проводиться по наступних показниках:

- важливість розробки I;
- результативність розробки R;
- технічна складність розробки T;
- вартість розробки  $V_{\text{ндр}}$ ;
- час, витрачений на розробку  $T_{\text{ндр}}$ .

Економічна ефективність науково–дослідницької роботи визначається за допомогою коефіцієнта ефективності, що характеризує частку загального ефекту від розробки, що приходить на одну грн. витрат за визначений час (собівартості НДР):

$$K_{\text{ндр}} = \frac{I * R * T}{T_{\text{ндр}} * V_{\text{ндр}}} = 124$$

На підставі проведених розрахунків можна стверджувати, що робота є економічно доцільною. Витрачені кошти на наукову розробку дозволять підвищити ефективність діагностики і дефектоскопії трубопроводів АЕС, що призведе до своєчасного виявлення дефектів трубопроводів, як в зварних з'єднаннях, так і в основному металі, попередження виходу їх з ладу та підвищення їх ресурсу роботи.

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В розділі надані основні заходи з охорони праці при випробуваннях елементів високотемпературного вимірювального УЗ тракту та дослідженні впливу старіння на механічні характеристики основного металу трубопроводу.

### 6.1 Аналіз потенційних небезпек

а) небезпеки які пов'язані з порушенням вимог ергономіки стосовно, організації робочих місць дослідів в приміщенні дослідницької лабораторії;

б) можливість ураження електричним струмом, внаслідок порушення правил з електричної безпеки, що може привести до електричних травм або летального наслідку;

в) небезпеки які пов'язані із проведенням випробувань механічних властивостей дослідницьких зразків, зокрема можливості отримання механічних травм;

г) небезпеки які пов'язані із дослідженням мікроструктури на електронному мікроскопі «JEMCХ», зокрема негативний вплив іонізуючих випромінювань, що може привести до розвитку тяжких захворювань.

д) небезпеки які пов'язані із дослідженням структури на оптичному мікроскопі МИМ-8, зокрема пошкодження органів зору внаслідок хибного вибору світлофільтрів;

е) небезпеки які пов'язані із обробкою результатів досліджень із використанням ПК, зокрема ушкодження кістково-м'язового апарату внаслідок довготривалої роботи в однотипній позі;

- є) незадовільні параметри повітряного середовища в приміщенні дослідницької лабораторії, внаслідок неефективної роботи систем опалення та повітря обміну;
- ж) незадовільне освітлення робочих зон, дослідницької лабораторії;
- з) можливість загоряння внаслідок порушень правил пожежної безпеки, що може привести до пожежі;
- к) небезпеки які пов'язані із умовами праці у надзвичайних ситуаціях.

## 6.2 Заходи щодо забезпечення безпеки

а) Згідно ГОСТ 12.2.032-78. «СС. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» конструкція робочого місця повинна забезпечувати оптимальне положення співробітника, що досягається за рахунок регулювання висоти сидіння та підставки для ніг. Підставка для ніг повинна регулюватися по висоті. Ширина повинна бути не менше 300 мм, довжина – не менш 400 мм. Поверхня підставки повинна бути рифленою. По передньому краю слід передбачити борти висотою 10 мм. Важливим фактором є простір під столом, його має бути досить, що можна було зручно згинати та розгинати коліна. Стіл повинен мати криволінійну форму. Крісло повинно забезпечити фізіологічно раціональну робочу позу, при якій порушується циркуляція крові і не було іншого шкідливого впливу. Для цього необхідно, щоб у крісла була пружна спинка анатомічної форми, яка зменшить навантаження на хребет. Також крісло обов'язково повинно бути з підколінниками і мати можливість повороту, зміни висоти і кута нахилу сидіння й спинки. Монітор повинен розташовуватися на робочому столі прямо, і віддаленням від очей мінімум на 50-60 см. Верхня границя екрану повинна бути на рівні очей або не нижче 15 см від рівня очей. Клавіатура повинна розташовуватися в 10-15 см (в залежності від довжини ліктя) від краю

стола. Глибина стола повинна дозволяти повністю положити лікті на стіл, відсунути клавіатуру до монітора.

б) З метою забезпечення електробезпеки, необхідним є знання основних заходів, для попередження уражень електричним струмом.

Організаційні заходи – до виконання робіт допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли навчання, та перевірку знань з електробезпеки. Основним нормативним актом є ПУЄ (правовий устрій з електроустанов). Ремонт обладнання повинен здійснювати тільки спеціальний підготовлений персонал. Для кожного електроспоживного обладнання повинні бути складені експлуатаційні схеми нормальної і аварійної роботи.

Технічні заходи – розташування струмоведучих частин на недоступній висоті (до 1000 В), не менше 3,5 м (більше 1000 В – 6 м). Всі не ізольовані струмопровідні лінії повинні бути надійно огороженні суцільними огорожами. Відкриття яких можливий тальки за допомогою спеціальних пристроїв. Опір ізоляції електричних дротів повинен бути не менше 0,5 Ом. Обов'язковим є захисне заземлення або занурення. Обов'язковим є використання індивідуальних засобів захисту, зокрема гумовий діелектричний килимок, опір якого слід періодично перевіряти. Обов'язковим є встановлення автоматичних блокуючих пристроїв, які запобігають небезпечним діям людини. Блокуючі пристрої розподіляють на механічні, електричні, та електромеханічні.

в) При випробуванні на механічні властивості дослідницьких зразків негативно на стан працездатності людини впливають різні шуми. Шум – сукупність звуків різної частоти та інтенсивності. Негативно впливає на організм людини, викликає психологічні та фізіологічні порушення, знижує працездатність та сприйнятливність зовнішньої інформації. Шум підвищує ступінь ризику травматизму та нещасних випадків пов'язаних з порушенням сприйняття людиною попереджувальних сигналів, змін в роботі обладнання та технологічного процесу. Шум нормується ГОСТом 12.1.003-83 «Шум. Загальні вимоги безпеки», ДСТУ 2325-93 «Шум. Терміни та визначення» та

ДСН 3.3.6-037-99 «Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку». Основою нормування є обмеження звукової енергії, яка діє на людину протягом робочої зміни значеннями, безпечними для її здоров'я і працездатності.

Методи захисту від шуму:

- зниження шуму в джерелі виникнення;
- підвищення якості балансування обертових деталей, класу точності їх виготовлення;
- недопущення перекосів деталей і вузлів, люфтів і зазорів;

Зниження шуму на шляху його поширення досягається будівельно-акустичними заходами, за рахунок застосування звукоізолюючих облицювань.

Акустична обробка приміщень (ефективна в зоні відбитого звуку) передбачає вкривання стелі та верхньої частини стін звукопоглинальними матеріалами. Ефективність методу незначна (зниження шуму на 4-7 дБ) і проводиться в поєднанні з іншими методами.

Звукоізоляція застосовується для захисту від шуму, що проникає зовні. Досягається створенням герметичних перепон, стін, кожухів, екранів. Застосовують матеріали, що мають високий коефіцієнт відбиття, наприклад: метал, скло, залізобетон, бетон та інші. В залежності від герметичності, товщини та властивостей матеріалів звукоізоляція дає можливість зменшити шум на 30-50 дБ.

Звукопоглинання застосовують пористі матеріали з великим коефіцієнтом поглинання, наприклад: поропласт, повсть, базальтове волокно та інші. Для попередження механічних травм, зони випробувань повинні огорожувати спеціальними прозорими екранами з триплексу.

г) Для електронного мікроскопа «JEMCХ» можливі 3 варіанти аварійної ситуації:

- відключення електроживлення;
- відключення води;
- прорив повітря в вакуумну систему.

У таких ситуаціях першочерговим завданням вважається охолодження печі дифузійного насоса і, по можливості, збереження вакууму в системі. У всіх випадках слід спочатку відключити високу напругу, піч дифузійного насоса і вимкнути головний автомат на стінці. При відмові водопостачання обмотати мокрим ганчірками піч дифузійного насоса і включити вентилятор для обдування. Гарячі мокрі ганчірки слід міняти, поки вакуум в системі не почне падати. після охолодження приступити до усунення несправності.

При прориві повітря в колону мікроскопа, як правило, спрацьовує автоматика, відсікаючи дифузійний насос від решти обсягу, і вимикається напруження катода і висока напруга. Треба тільки простежити, щоб форвакуумний насос не працював «на повітря», а переключити його на закритий обсяг, наприклад на відкачку боксу з фотопластинками.

В цьому випадку найнебезпечнішим для мікроскопа випадком може з'явитися тріщина в керамічному ізоляторі високовольтного введення. Тому найкраще буде якомога швидше усунути протікання.

Електронний мікроскоп «JEMCХ», має потужне джерело іонізуючих випромінювань, що як наслідок негативно впливає на організм людини при зовнішньому опромінюванні. Зовнішнє опромінення - це дія на організм іонізуючих випромінювань від зовнішніх відносно нього джерел випромінювання. Під дією іонізуючих випромінювань в організмі людини відбувається іонізація молекул і атомів тканини, порушується хімічна структура сполук, утворюються сполуки, не властиві живій клітині, що в свою чергу призводить до її відмирання. Зміни фізичних і біологічних процесів в організмі залежно від дози опромінювання. Для попередження шкідливої дії іонізуючих випромінювань необхідно усувати всяку можливість опромінювання організму дозами, які перевищують гранично допустимі. Ступінь ураження радіоактивними речовинами організму людини залежить від ряду чинників: виду випромінювання (альфа-, бета-, гамма-промені і т. ін.); кількості ізотопу (активності); його властивостей (енергії частинок в період

піврозпаду та ін.); шляхів попадання в організм людини та його індивідуальної чутливості.

Для захисту від зовнішнього опромінювання, яке має місце при роботі із закритими джерелами випромінювання, основні зусилля необхідно направити на попередження переопромінення персоналу шляхом:

- збільшення відстані між джерелом випромінювання і людиною (захист відстанню);
- скорочення тривалості роботи в зоні випромінювання (захист часом);
- екранування джерела випромінювання (захист екранами).

д) Горизонтальний металографічний мікроскоп МИМ-8 призначений для дослідження мікроструктури металів і інших непрозорих об'єктів в світлому полі при прямому і косому освітленні, а також в темному полі і в поляризованому світлі. Для візуального спостереження об'єктів мікроскоп забезпечений монокулярної і біноккулярної насадками. Власне збільшення біноккулярної насадки - 2,5 х.

Набір ахроматичних і апохроматичних об'єктивів і окулярів забезпечує збільшення мікроскопа при візуальному спостереженні - від 100х до 1350х. Предметний столик мікроскопа забезпечений механізмами для координатного переміщення об'єкта. Освітлення здійснюється від електролампи розжарювання потужністю 170 Вт, 17 В, живиться від освітлювальної мережі 220 В через понижуючий трансформатор, забезпечений секційним перемикачем для регулювання яскравості напруження лампи. Сам мікроскоп і все його частини встановлені на станині, що представляє собою оптичну лаву довжиною 1,8 м. Станина встановлюється на чотири демпфера, призначених для запобігання мікроскопа від вібрації. демпфери вмонтовані в стіл, який має з боків дві тумби з висувними ящиками для зберігання приладдя.

Правильне використання мікроскопа виходить тільки за умови раціональної комбінації об'єктивів, окулярів. При вживанні їх треба пам'ятати, що збільшення повинно знаходитися в межах від 500 до 1000 апертур.

Об'єктиви апохромати в поєднанні з компенсаційними окулярами для візуального спостереження дають збільшення.

Крім правильної комбінації об'єтивів і окулярів, не менш важливе значення має і правильне застосування світлофільтрів. Як правило, при роботі з об'єктивами-ахроматами слід застосовувати світлофільтри, а з апохроматами можна працювати і без них.

Об'єктиви-ахромати мають корекцію тільки для середніх кольорів видимої частини спектра; з цієї причини при білому світлі вони дають зображення з нечіткими контурами, пофарбованими головним чином по краю поля зору. Щоб погасити всі кольори, в яких об'єкт не має корекції, застосовують жовто-зелений світлофільтр. З огляду на те, що об'єктиви-апохромати мають корекцію майже для всіх кольорів видимої частини спектра, жовто-зелені світлофільтри для них зайві.

е) Персонал, що працює на комп'ютері зобов'язаний дотримуватися вимог інструкції, розробленої на підставі Санітарних норм і правил СанПин 2.2.2.542-96 «Гігієнічні вимоги для відео дисплейних терміналах, персональними електророзрахунковими машинами і організації робіт», а також нести особисту відповідальність за дотримання вимог безпеки своєї праці і за створення небезпечного чи шкідливого виробничого фактору для інших працюючих і поломку комп'ютера.

При роботі з комп'ютером шкідливими і небезпечними чинниками є:

- електростатичні поля;
- електромагнітне випромінювання;
- локальне стомлення, загальна втома;

Режими праці та відпочинку при роботі з комп'ютером повинні організовуватися в залежності від виду та категорії трудової діяльності.

Види трудової діяльності поділяються на 3 групи:

Група А – робота із зчитуванням інформації з екрану комп'ютера з попереднім запитом;

Група Б – робота з введенням інформації;

Група В - творча робота в режимі діалогу;

За основну роботу з комп'ютером слід приймати таку, яка займає не менше 50 % роботи протягом часу роботи комп'ютера.

Для видів трудової діяльності встановлюється 3 категорії тяжкості і напруженості роботи з комп'ютером, які визначаються:

- для групи А – по сумарному числу опрацьованих знаків за час роботи з комп'ютером, але не більше 60 000 знаків;
- для групи Б – по сумарному числу зчитуються або вводяться знаків за час роботи з комп'ютером, але не більше 40 000 знаків;
- для групи В – по сумарному часу безпосередньої роботи з комп'ютером, але не більше 6 годин за час роботи з комп'ютером;

Для забезпечення оптимальної працездатності і збереження здоров'я протягом часу роботи необхідно переконатися, що монітори комп'ютера мають антиблокове покриття (окрім групи А) з коефіцієнтом відбиття не більше 0,5. Покриття повинне також забезпечувати зняття електростатичного заряду з поверхні екрана, іскріння і накопичення пилу. Корпус монітора повинен забезпечувати захист від іонізуючих та неіонізуючих випромінювань. Необхідно перевірити робоче положення комп'ютера відстань між стіною з віконними прорізами і столом має бути не менше 0,8 м. При невеликій кількості робочих місць бажано розташувати столи біля протилежної стіни щодо віконних прорізів. Відстань між робочими столами повинно бути не менше 1,2 м. Не допускається знаходження другого робочого місця з боку задньої стінки комп'ютера. Оптимальними параметрами температури в кабінеті є 19-21 °С, допустимі 18-22 °С, відносна вологість повітря 62-55 %.

Тривалість безперервної роботи з комп'ютером без регламентованої перерви не повинна перевищувати 2 годин. Під час регламентованої перерви з метою зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, усунення впливу гіподинамії, запобігання розвитку втоми доцільно виконувати комплекси вправ. Рівень шуму в приміщенні під час роботи комп'ютерів не повинен перевищувати 50 дБ. Конструкція відео

монітора повинна передбачати заходи, що забезпечують хорошу розбірливість зображення, незалежну від зовнішнього освітлення.

### 6.3 Заходи щодо виробничої санітарії та гігієни праці

Розглянемо комплекс заходів щодо забезпечення належних санітарно-гігієнічних умов праці в лабораторії.

Вимоги санітарії до параметрів повітряного середовища виробничих приміщень наводяться у ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны». Для нормальної роботи в лабораторії запроектовано підтримання оптимальних норм температури, відносної вологості і швидкості переміщення повітря, значення яких наведені в табл. 5.1.

Таблиця 6.1 - Оптимальні норми температури, відносної вологості і швидкості переміщення повітря у робочій зоні виробничих приміщень

| Сезон року                        | Категорія робіт | Температура, °C | Відносна вологість, % | Швидкість переміщення повітря, м/с |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|------------------------------------|
| Холодний і перехідний період року | Легка, I        | 20-23           | 60-40                 | 0,2                                |
| Теплий період року                |                 | 22-25           |                       |                                    |

Параметри мікроклімату досягаються за рахунок раціонального планування виробничих приміщень і оптимального розміщення в них устаткування. У замкнутому приміщенні (30×24×4 м) для підтримування температури та вологості повітря на належному рівні пропонується

використовувати систему кондиціонування. Природна вентиляція (провітрювання), що відповідає вимогам СНиП 2.04.85-86 «Отопление, вентиляция, кондиционирование. Нормы проектирования».

Також передбачається проведення вологого прибирання в приміщенні.

Для створення сприятливих умов зорової роботи, без швидкої втомлюваності очей, виникнення професійних захворювань, нещасних випадків і сприятливих для підвищення продуктивності праці та якості продукції, виробниче освітлення має відповідати вимогам ДБН В.2.5-28-2006 "Природне і штучне освітлення" ( $\geq 300$  лк).

Для забезпечення нормованої освітленості пропонується використовувати систему загального рівномірного штучного освітлення з використанням ламп ЛД-60, які встановлені у світильники типу ЛСП. До функцій системи належить створення на робочій поверхні освітлення, що відповідає характеру зорової роботи і не є нижчою за встановлені норми:

- забезпечити достатню рівномірність та постійність рівня освітленості у виробничих приміщеннях, щоб уникнути частоті переадаптації органів зору;
- не створювати засліплювальної дії як від самих джерел освітлення, так і від інших предметів, що знаходяться у полі зору;
- не створювати на робочій поверхні різких та глибоких тіней (особливо рухомих);
- має бути достатній для розрізнення деталей контраст поверхонь, що освітлюються;
- не створювати небезпечних та шкідливих виробничих чинників (шум, теплові випромінювання, небезпека ураження струмом, пожежо- та вибухонебезпека світильників);
- має бути надійним і простим в експлуатації, економічним та естетичним.

#### 6.4 Заходи з пожежної безпеки

Для попередження пожеж передбачається використовувати первинні засоби пожежогасіння. До них відносяться: вогнегасники, пожежний інвентар (покривала з негорючого полотна, ящика з піском, бочки з водою, пожежні відра, совкові лопати, ломи, сокири тощо), системи автоматичного пожежогасіння.

Первинні засоби пожежогасіння, в залежності від категорії приміщень, можуть розташовуватись як окремо, так і в складі пожежних щитів. Також необхідно періодично проводити протипожежні інструктажі, навчання та тренування персоналу.

За вибухо-пожежною небезпекою приміщення й будівлі поділяють на п'ять категорій: А,Б,В,Г,Д.

Встановлення категорії приміщення виконується шляхом послідовної перевірки належності приміщення до категорій від найвищої (А) до найнижчої (Д) з урахуванням характеру технологічних процесів і пожежо-небезпечних властивостей речовин, що в них застосовується, з метою виявлення можливих обставин і причин виникнення вибухів і пожеж та їх наслідків.

Приймаємо категорію Д, так як ця категорія більш підходить по характеристиці речовин і матеріалів, що зберігаються в приміщенні, а саме знаходяться незаймисті речовини і матеріали в холодному стані, а також кабельні електропроводки до устаткування, окремі предмети меблів на місцях.

Залежно від агрегатного стану й особливостей горіння різних горючих речовин й матеріалів пожежі за ДБНВ.1.1.7-2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» поділяються на відповідні класи та підкласи:

- клас А – пожежі твердих речовин, переважно органічного походження, горіння яких супроводжується тлінням (деревина, текстиль, папір);

- клас В – пожежі горючих рідин або твердих речовин, які розтоплюються;

- клас С – пожежі газів;

- клас D – пожежі металів та їх сплавів;

- клас Е (додатковий) – пожежі, пов'язані з горінням електроустановок.

Обираємо клас Е (додатковий) пожежі, пов'язані з горінням електроустановок.

Визначення видів та кількості первинних засобів пожежогасіння слід проводити з урахуванням фізико-хімічних та пожежонебезпечних властивостей горючих речовин, їх взаємодії з вогнегасними речовинами, а також розмірів площ виробничих приміщень, відкритих майданчиків та установок.

Необхідну кількість первинних засобів пожежогасіння визначають окремо для кожного поверху та приміщення, а також для майданчиків та установок.

Нижче описано правила розташування та вибору засобів пожежогасіння для виробничих приміщень.

Пожежний інвентар з пожежним інструментом і вогнегасниками розміщується на спеціальних пожежних щитах (стендах). Такі щити (стенди) відповідно до "Правил пожежної безпеки в Україні" встановлюють на території об'єкта з розрахунку один щит (стенд) на площу 5000 м<sup>2</sup>. До комплекту засобів пожежогасіння, які розміщують на стенді, слід включити: вогнегасники – 3 шт.; ящик із піском – 1 шт.; пожежне покривало розміром 2×2 м – 1 шт.; гаки – 3 шт.; лопати – 2 шт.; лом – 2 шт.; сокири – 2 шт. Ящик із піском, який є елементом конструкції пожежного щита (стенда), повинен мати місткість не менше 0,1 м<sup>3</sup> та виключати потрапляння в нього опадів.

Серед первинних засобів пожежогасіння особливе місце займають вогнегасники, які відзначаються високою ефективністю дії.

Вибір типу та визначення потрібної кількості вогнегасників здійснюється згідно вогнегасної здатності вогнегасників, граничної площі,

класу пожежі горючих речовин та матеріалів у приміщенні, що захищається, або на об'єкті (стандарт ISO 3941–77). Крім перерахованих параметрів береться до уваги також категорія приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

Вибір типу вогнегасника (пересувний чи переносний) зумовлений розмірами можливих осередків пожеж; у разі збільшених їх розмірів рекомендується використовувати пересувні вогнегасники.

Відстань від можливого осередку пожежі до місця розташування вогнегасника не має перевищувати: 20 м – для громадських будівель та споруд; 30 м – для приміщень категорій А, Б, В (горючі гази та рідини); 40 м – для приміщень категорій В, Г; 70 м – для приміщень категорії Д.

Для гасіння великих загорянь у приміщеннях категорій А, Б, В застосовують стаціонарні установки водяного, газового, хімічного та повітрянопінного гасіння.

## 6.5 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

Інженерно-технічні заходи спрямовані на підвищення стійкості виробничих об'єктів до впливу ударної хвилі.

Ударною хвилею називається область різкого стиску середовища, що поширюється у вигляді сферичного шару від місця вибуху з надзвуковою швидкістю. Ударні хвилі класифікуються в залежності від середовища поширення. Ударна хвиля в повітрі виникає за рахунок передачі стиснення і розширення шарів повітря. Зі збільшенням відстані від місця вибуху хвиля слабшає і перетворюється на звичайну акустичну. Хвиля при проходженні через дану точку простору викликає зміни в тиску, що характеризуються наявністю двох фаз: стиснення та розширення. Період стиснення настає відразу і триває порівняно невеликий час в порівнянні з періодом розширення.

Руйнівна дія ударної хвилі характеризують надлишковий тиск у її фронті (передній межі), тиск швидкісного напору, тривалість фази стиснення.

Нищівна дія ударної хвилі характеризується величиною надлишкового тиску. Надмірний тиск – це різниця між максимальним тиском у фронті ударної хвилі і нормальним атмосферним тиском перед ним. При надлишковому тиску 20-40 кПа незахищені люди можуть одержати легкі поразки (легкі забиті місця і контузії). Вплив ударної хвилі з надлишковим тиском 40-60 кПа призводить до поразок середньої важкості: втраті свідомості, ушкодженню органів слуху, сильним вивихів кінцівок, кровотечі з носа і вух. Важкі травми виникають при надлишковому тиску понад 60 кПа. Вкрай важкі поразки спостерігаються при надлишковому тиску понад 100 кПа. Ударна хвиля ядерного вибуху може на значній відстані від центра вибуху завдавати поразки людям, руйнувати споруди і ушкоджувати бойову техніку. Ударна хвиля являє собою область сильного стиснення повітря, що розповсюджується з великою швидкістю у всі сторони від центра вибуху.

Швидкість поширення її залежить від тиску повітря у фронті ударної хвилі; поблизу центра вибуху вона в декілька разів перевищує швидкість звуку, але із збільшенням відстані від місця вибуху різко падає. Нищівна дія ударної хвилі на людей і руйнуючу дію на бойову техніку, інженерні споруди і матеріальні кошти передусім визначаються надмірним тиском і швидкістю рушення повітря в її фронті. Незахищені люди можуть, крім того поранитися осколками скла, що летять з величезною швидкістю і обломками будівель, що руйнуються, падаючими деревами, а також частинами бойової техніки, що розкидаються, камінням і іншими предметами, що приводяться в рушення швидкісним натиском ударної хвилі.

Найбільші непрямі поразки будуть спостерігатися в населених пунктах і в лісі; в цих випадках втрати військ можуть виявитися більшими, ніж від безпосередньої дії ударної хвилі. Удар на хвиля здатна завдавати поразки і в закритих приміщеннях, проникаючи туди через щілини і отвори. Поразки, що наносяться ударною хвилею, поділяються на легкі, середні, важкі і надто

важкі. Легкі поразки характеризуються тимчасовим пошкодженням органів слуху, загальною легкою контузією, ударами і вивихами кінцівок. Важкі поразки характеризуються сильною контузією всього організму; при цьому можуть спостерігатися пошкодження головного мозку і органів черевної порожнини, сильна кровотеча з носа і вух, важкі переломи і вивихи кінцівок.

Механічне вплив ударної хвилі оцінюється за ступенем руйнувань, викликаних дією хвилі (виділяються слабке, середнє, сильне і повне руйнування). Енергетичне, промислове і комунальне обладнання в результаті дії ударної хвилі може отримати пошкодження, також оцінюються за їх тяжкості (слабкі, середні і сильні). Вплив ударної хвилі може призвести також до пошкоджень транспортних засобів, гідровузлів, лісових масивів. Як правило, шкода, яка завдається впливом ударної хвилі, дуже великий, він наноситься як здоров'ю людей, так і різним спорудам, устаткуванню і т. д.

## ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз можливості використання системи безперервного УЗ контролю трубопроводів. Основним критерієм для вибору матеріалів та обладнання системи є забезпечення живучості (працездатності) УЗ перетворювача при контролюванні металу з температурою поверхні близько 300 °С, а також з урахуванням довгого терміну проведення контролю без значного зниження чутливості.

2. П'єзоелемент УЗ перетворювача доцільно виготовляти зі спеціальної високотемпературної п'єзокераміки. Обов'язковою є умова розміщення УЗ перетворювача за тепловою ізоляцією.

3. В якості вимірювального вузла доцільно застосовувати U-подібний хвилевід із дзеркалом, довжиною 600 мм, виготовлений із деформівного сплаву на основі алюмінію АМг6. Він забезпечує високе співвідношення сигнал/перешкода по всьому діапазоні робочих температур.

4. З урахуванням того, що фактична температура навколишнього повітря в герметичних приміщеннях АЕС може досягати 70 °С, на УЗ перетворювач рекомендується встановити радіатор.

5. Для забезпечення надійного акустичного контакту між перетворювачем, хвилеводом і поверхнею об'єкта моніторингу при високих температурах рекомендується використання рідини Пента®-МФ-2030.

6. Запропоновано схему системи онлайн моніторингу дефектності зварних з'єднань трубопроводу 2-го контуру, що має трирівневу систему збору, реєстрації і обробки даних: п'єзоелектричний перетворювач (ПЕП) частотою 2,25 МГц, поєднаний з хвилеводом; дефектоскоп УМД-8 та контрольно - вимірювальний модуль PXI NATIONAL INSTRUMENTS; сервер математичної обробки і зберігання даних (АРМ).

7. Аналогічна система безперервного УЗ моніторингу, що здійснювався на обладнанні Нововороніжської атомної станції показала свою ефективність

при контролюванні зварних з'єднань. Результати експертного УЗ контролю, виконаного після закінчення паливної кампанії, підтвердили результати безперервного УЗ моніторингу

8. З використанням комплексу «Мікроріз» проведено вирізку мікрозразків з трубопроводу без шкоди його експлуатаційним властивостям.

9. Визначено, що тривала експлуатація металу ( $100 \times 10^3$  год) призвела до незначних змін в мікроструктурі, вираженої в збільшенні процентного вмісту пластинчастої складової перліту.

10. Границі міцності та текучості зразків відпрацьованого металу порівняно зі зразками з аварійного запасу підвищились відповідно на 6 – 7 % та 20 – 26 %, а відносне видовження та звуження знизились відповідно на 7 – 11 % та 1,4 – 2%.

11. Найбільш сильно старіння впливало на ударну в'язкість (KCV) сталі. Зниження спостерігалось протягом всього строку експлуатації і після  $100 \times 10^3$  год досягало 65 %.

12. Фрактографічний аналіз показав, що в процесі експлуатації труб у металі відбуваються істотні зміни властивостей, пов'язані з розвитком процесів малоциклової втоми, термічного і деформаційного старіння.

13. Показано економічну доцільність використання удосконалених методів неруйнівного та руйнівного контролю для діагностики та дефектоскопії трубопроводів 2-го контуру АЕС. Коефіцієнт економічної ефективності складає 124 грн на 1 грн витрат.

14. Для збереження життя та здоров'я працівників лабораторії під час проведення досліджень запропоновано заходи щодо забезпечення техніки безпеки, виробничої санітарії та гігієни праці, пожежної безпеки та безпеки у надзвичайних ситуаціях.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Резепов В.К. Реакторы ВВЭР-1000 для атомных электростанций: монография. Москва: Гидропресс, 2004. 333 с.
2. Афанасьев В. Б., Чернова Н. В. Современные методы неразрушающего контроля. *Успехи современного естествознания*. 2011. № 7. с. 73 – 74
3. Воеводин В.Н., Ожигов Л.С., Митрофанов А.С. и др. Эволюция микроструктуры металла главного циркуляционного трубопровода реактора ВВЭР-1000 в процессе его длительной эксплуатации. *Вопросы материаловедения*. 2017. № 4 (92). С. 183-192.
4. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции. Москва: Высшая школа, 1978. 360 с.
5. Шарый Н.В., Семишкин В.П., Пиминов В.А., Драгунов Ю.Г. Прочность основного оборудования и трубопроводов РУ ВВЭР. Москва: ИздАТ, 2004. 496 с.
6. Маловик К.Н., Мирошниченко А.Н. Совершенствование контроля остаточной дефектности трубопроводов. *Вестник Беларусско-Российского университета*. 2015. № 1 (46). С. 79-85
7. Аркадов Г.В., Гетман А.Ф., Родионов А.Н. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла: учебн. пособ. Москва: Энергоатомиздат, 2010. 424 с.
8. ГОСТ 1050 – 88. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия (с Изменениями N 1, 2). [Чинний від 1991-01-01]. Москва: ВНИИСОТ, 1991. 85 с. (Інформація та документація).
9. ГОСТ 5632 – 72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки (с Изменениями N 1, 2, 3,

- 4, 5). [Чинний від 1975-01-01]. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1975. 61 с. (Інформація та документація).
10. ГОСТ 20072-74. Сталь теплоустойчивая. Технические условия. [Чинний від 1976-01-01]. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1975. 61 с. (Інформація та документація).
11. Айдуганов В.М., Волкова Л.И. Опыт строительства и эксплуатации трубопроводов из металлопластмассовых труб. Нефтегазовое дело, 2006. С. 1-6.
12. Аркадов Г. В. Ресурс и надёжность оборудования и трубопроводов АЭС. Севастополь: СКУЭиП, 2012. 348 с.
13. Гетман А. Ф. Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов АЭС. Москва: Энергоатомиздат, 2000. 427 с.
14. Ключев. В.В. Неразрушающий контроль: справочник в 8 т. Т. 1. Кн. 2 Москва, 2008.
15. Зенкін М.А., Назаренко А.С. Сучасні оптичні методи контролю шорсткості відповідальних деталей машин. *Вісник інженерної академії України*. 2014. № 2. С. 220-224
16. Медведєва Н.А., Радько О.В., Білокур І. П. Вибір методів контролю якості деталей вузлів тертя. *Проблеми тертя та зношування*. 2015. № 1 (67). С. 70-75
17. Каневский И.Н., Сальникова Е.Н. Неразрушающие методы контроля. Владивосток, 2007. 170 с.
18. Скидан А.А., Кузнецова Н.И., Серова-Нашева Н.В., Шлай Т.Н. Анализ методов неразрушающего контроля на АЭС. *Теплові та енергетичні установки*. 2013. № 4. С. 29-39
19. Попович О.В., Карпаш М.О. Аналіз акустичних методів ідентифікації та визначення параметрів дефектів металоконструкцій. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2014. № 2 (51). С. 141-148.
20. Ключев. В.В. Неразрушающий контроль: справочник в 8 т. Т. 3. Москва, 2008.

21. Рогов И.В., Жуков Н.П., Майникова Н.Ф., Лунева Н.В. Теоретическое обоснование теплового метода неразрушающего контроля двухслойных изделий. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2009. № 1. С. 20-25.
22. Плаксин А.И., Шлык Ю.К. Современные методы диагностики герметичности стенок магистрального трубопровода. *Вестник тюменского государственного технического университета*. 2009. № 2. С. 17-19.
23. Герасимова А.Г. Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС и АЭС. Минск: «Высшая школа», 2011. 272 с.
24. ПНАЭ Г-7-0.32-91. Правила и нормы по ядерной и радиационной безопасности. Ультразвуковой контроль. Часть IV. [Чинний від 1992-10-01]. Москва: Госпроматомнадзор, 1992. 12 с. (Інформація та документація).
25. Осадчук В.А., Пороховський Ю.В., Іванчук О.О. Діагностування залишкових напружень і оцінка їх впливу на статичну міцність зварних з'єднань різнотовщинних труб з дефектами типу тріщин. *Мат. Методи та фіз.-мех. поля*. 2008. № 2 (51). С. 133-146.
26. Савула Р.С., Харченко Є.В., Кичма А.О. Оцінка міцності ділянок магістральних газопроводів з дефектами. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2012. № 2 (32). С. 7-12.
27. Апасов А.М., Апасов А.А. Механизм зарождения, формирования и диагностика непровара в процессе сварки. Ч.1. *Известия Томского политехнического университета*. 2005. № 1 (308). С. 158-162.
28. Алешин Н.П., Бобров В.Т., Ланге Ю.В., Щербинский В.Г. Ультразвуковой контроль: учебн. пособ. Москва: Спектр, 2011. 223 с.
29. Далин М.А., Генералов А.С., Бойчук А.С., Ложкова Д.С. Основные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля. *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № 5. С. 47-54.

30. Троицкий В.А., Попов В.Ю. Ультразвуковой контроль сварных соединений. Киев: Феникс, 2010. 220 с.
31. Троицкий В.А. Ультразвуковой контроль: дефектоскопы, нормативные документы, стандарты по УЗК. Киев: Феникс, 2006. 224 с.
32. Семишкин В.П., Богачев А.В., Меркун А.В. Механизмы старения компонентов системы теплоносителя реактора РУ с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/documents/mntk2017-153.pdf> (дата звернення: 10.10.2019).
33. Марголин Б.З., Николаев В.А., Юрченко Е.В. и др. Анализ охрупчивания материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации. *Вопросы материаловедения*. 2009. № 4 (60).
34. Шарый Н.В., Семишкин В.П., Пиминов В.А., Драгунов Ю.Г. Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР. Москва: ИздАТ, 2004. 496 с.
35. Иванцова С.Г., Будзуляк Б.В. Оценка напряженно-деформированного состояния трубопровода перед выводом в ремонт. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2018. № 4. С. 5-10.
36. Аніщенко Г.О. Повзучість та руйнування пластин з надрізами в умовах циклічного навантаження. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2013. № 58 (1031). С. 16-23.
37. Гареева О.А. Ямилев М.З. Лягов А.В., Климов П.В. Повышение безопасности эксплуатации трубопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию. *Нефтегазовое дело*. УФА, 2011. Т. 9, № 2. С. 58-61.
38. Харченко С.А., Трунов Н.Б., Коротаев Н.Ф., Лякишев С.Л. Меры по обеспечению надежности сварного соединения коллектора I контура с корпусом парогенератора АЭС с ВВЭР-1000. *Теплоэнергетика*. Подольск, 2011. № 3. С. 27-32.

39. ДСТУ 2651:2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. [Чинний від 2006-09-01]. Киев: УкрНИИМет, 2006. 12 с. (Інформація та документація).
40. ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. [Чинний від 2008-01-01]. Вид. офіц. Москва: Стандартиформ, 2008. 8 с. (Інформація та документація).
41. ГОСТ 4784 – 97 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки (с Изменениями N 1, 2, 3, с Поправками) [Чинний від 2000-07-01]. Вид. офіц. Москва: Стандартиформ, 2000. 32 с. (Інформація та документація).
42. Бакиров М.Б., Левчук В.И., Поваров В.П., Громов А.Ф. Новый подход к исследованию причин повышенной повреждаемости ответственного оборудования АЭС. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2014. № 1. С. 80-86.
43. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. [Чинний від 1986-01-01]. Вид. офіц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1984. 24 с. (Інформація та документація).
44. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах (с Изменениями N 1, 2). [Чинний від 1979-01-01]. Вид. офіц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1979. 10 с. (Інформація та документація).
45. Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М., Ожигов Л.С. и др. Использование микрообразцов для контроля механических свойств и эволюции микроструктуры основного металла главного циркуляционного трубопровода (сталь 10ГН2МФА) энергоблока № 1 ОП ЮУ АЭС после 100 тыс. часов эксплуатации. *Вестник ННЦ ХФТИ*. 2014. № 3. С. 63-75.
46. ГОСТ 9651 – 84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах. [Чинний від 1986-01-01]. Вид. офіц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1984. 41 с. (Інформація та документація).

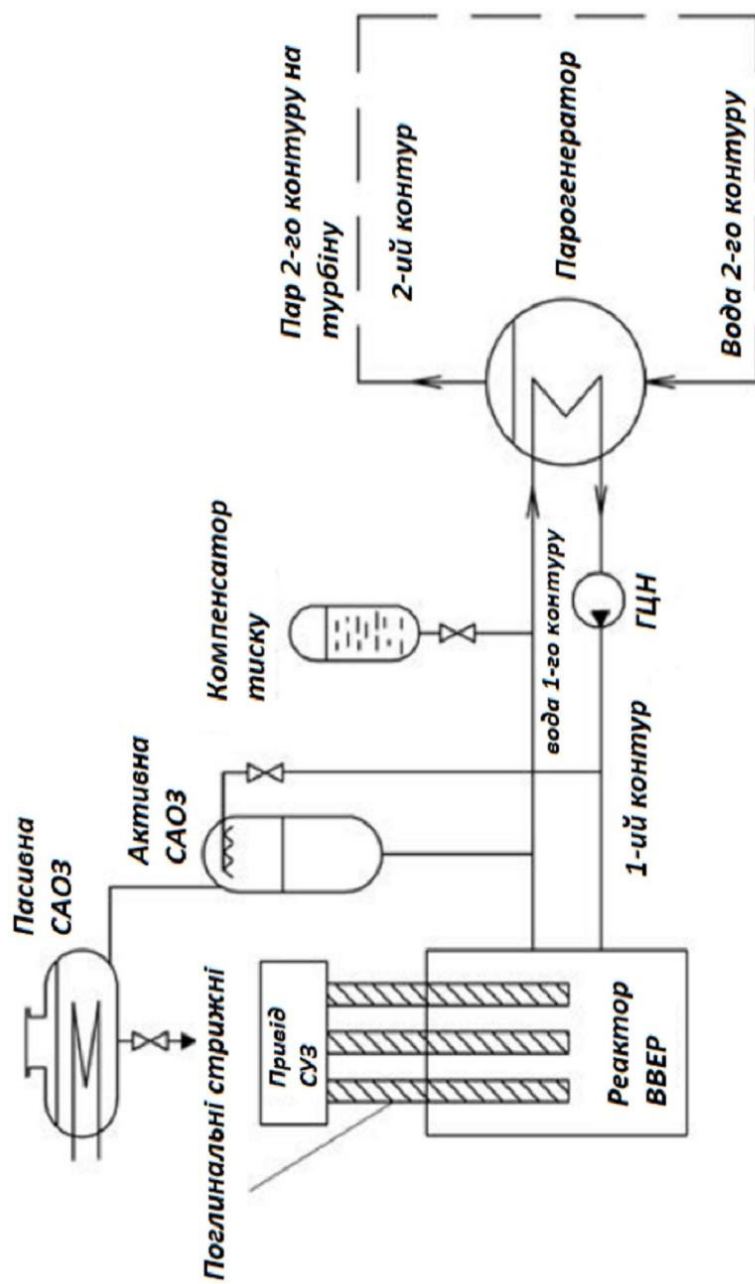
47. ГОСТ 5640-68. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты. [Чинний від 1970-01-01]. Вид. офіц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1970. 19 с. (Інформація та документація).
48. Шарапов В.М. Сотула Ж.В. Пьезокерамические преобразователи. Новые технологии проектирования. *Вестник Черкасского государственного технологического университета*. 2011. № 2. С. 1-11.
49. Скоморохов А.О., Белоусов П.А., Нахабов А.В. и др. Автоматическое выявление дефектов по результатам УЗК сварных соединений трубопроводов АЭС. *Ядерная энергетика*. Обнинск, 2005. № 2. С. 16-26.
50. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. СПб.:Издательство СВЕН, 2011. 296 с.
51. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Волноводный метод контроля трубопроводов. *Компетентность*. Москва, 2005. № 10 (27). С. 24-28.
52. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Ультразвуковой контроль. Москва: Машиностроение, 2004. 864 с.
53. Бакиров М.Б., Еремин А.А., Левчук В.И. и др. Разработка технологии непрерывного контроля целостности металла в критических зонах оборудования АЭС ультразвуковым методом. *Известия вузов. Северо-кавказский регион*. 2014. № 6. С. 60-67.
54. Бакиров М.Б., Левчук В.И., Поваров В.П., Громов А.Ф. Новый подход к исследованию причин повышенной повреждаемости ответственного оборудования АЭС. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2014. № 1. С. 14-21.
55. Модули PXI. Электронный каталог. URL: <http://www.ni.com/ru-ru/shop/select/pxi-modules-category#facet:&productBeginIndex:0&orderBy:&pageView:grid&pageSize:&>
56. Бакиров М.Б., Еремин А.А., Левчук В.И., Николаев Д.А. Опыт работ по использованию системы непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости металла в наиболее критических зонах ответственного

- оборудования АЭС на примере СС №111 энергоблока №5 Нововоронежской АЭС. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2015. №4. С. 58-76
57. Ожигов Л.С., Митрофанов А.С., Толстолуцкая Г.Д., Крайнюк Е.А., Шрамченко С.В. Комплексный диагностический контроль внутренних дефектов в сварного соединении узла приварки коллектора к корпусу парогенератор энергоблока ВВЭР-1000. *Техн. Диагностика и неразруш. контроль*. 2016. №3. С. 25-32.
58. ГОСТ 8233-56. Эталоны микроструктуры. Переиздание [Чинний від 1957-07-01]. Вид. офіц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004. 12 с. (Інформація та документація).
59. Смирнов А.Н. Исследование микроструктуры и фазового состава стали 12Х1МФ после длительной эксплуатации. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2004. № 1. С. 67-72.
60. Бокштейн Б.С., Ходан А.Н., Забусов О.О. и др. Кинетика сегрегации фосфора на границах зерен в низколегированной малоуглеродистой стали. *Физика металлов и металловедение*. 2014. № 2 (115). С. 156-166.

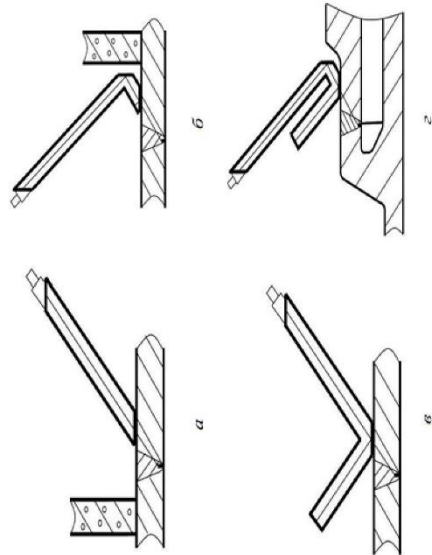
## Додаток А

## Перелік графічного матеріалу

## Технологічна схема АЕС з реакторами ВВЕР

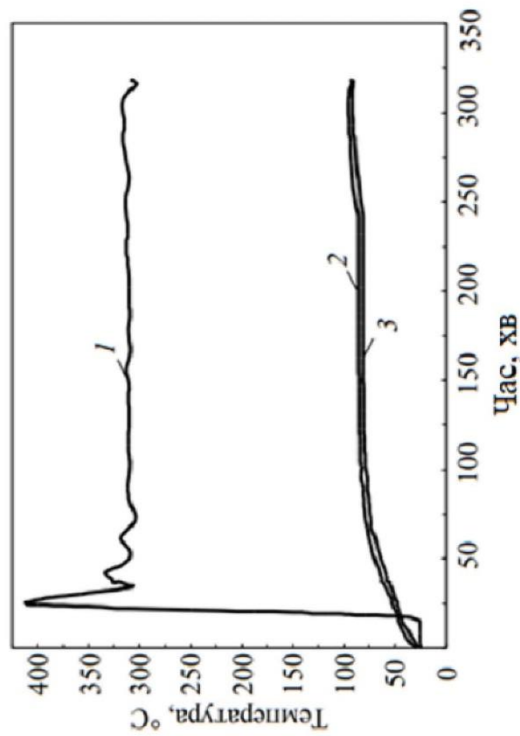


# Матеріали та обладнання для високотемпературного тракту



- а - односторонній доступ, прямий хвилевід;  
 б - односторонній доступ, прямий хвилевід із дзеркалом;  
 в - двосторонній доступ, V-подібний хвилевід;  
 г - обмежений двосторонній доступ, U-подібний хвилевід із дзеркалом

Температура по довжині хвилеводу при температурі навколишнього повітря 75 °С



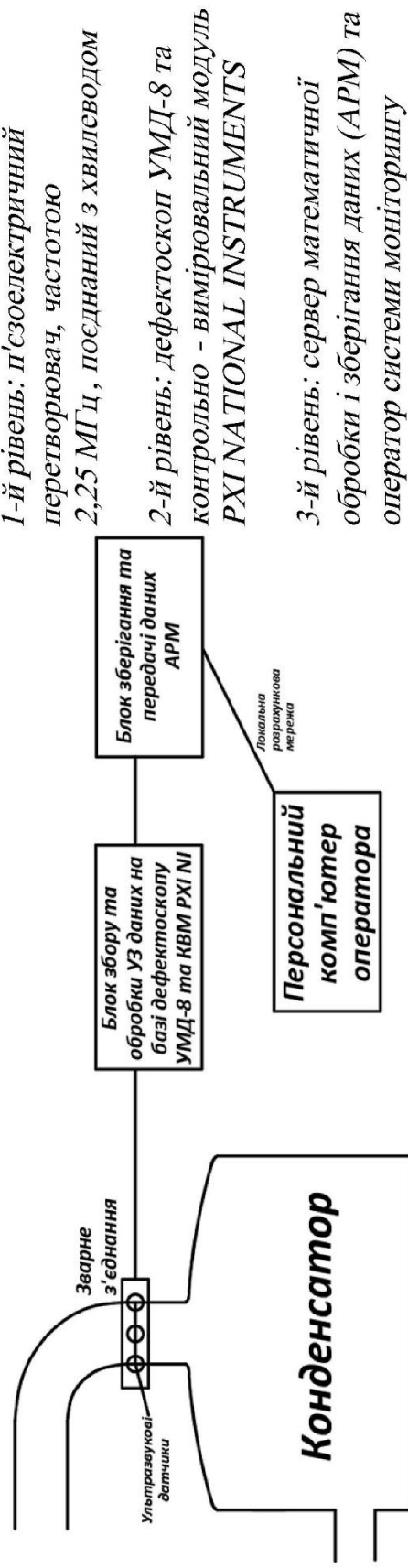
- 1 - температура поверхні нагрівання;  
 2, 3 - температура хвилеводу на відстані 400 і 600 мм від поверхні нагрівання відповідно

Схеми контролю ЗЗ із застосуванням різних типів хвилеводів

## Хімічний склад матеріалів хвилеводів

| Матеріал | Хімічний склад, мас. % |        |             |            |            |       |       |           |            |                 |
|----------|------------------------|--------|-------------|------------|------------|-------|-------|-----------|------------|-----------------|
|          | Fe                     | Al     | C           | Si         | Mn         | Ni    | Cr    | Mg        | Ti         | Be              |
| Ст3      | Основа                 | —      | 0,14 – 0,22 | 0,15 – 0,3 | 0,4 – 0,65 | < 0,3 | < 0,3 | —         | —          | —               |
| АМг3     | <0,5                   | Основа | —           | 0,5 – 0,8  | 0,3 – 0,6  | —     | —     | 3,2 – 3,8 | < 0,1      | —               |
| АМг6     | <0,4                   | Основа | —           | < 0,4      | 0,5 – 0,8  | —     | —     | 5,8 – 6,8 | 0,02 – 0,1 | 0,0002 – 0,0005 |
|          |                        |        |             |            |            |       |       |           |            | до-мішки        |
|          |                        |        |             |            |            |       |       |           |            | < 0,5           |
|          |                        |        |             |            |            |       |       |           |            | < 0,3           |
|          |                        |        |             |            |            |       |       |           |            | < 0,3           |

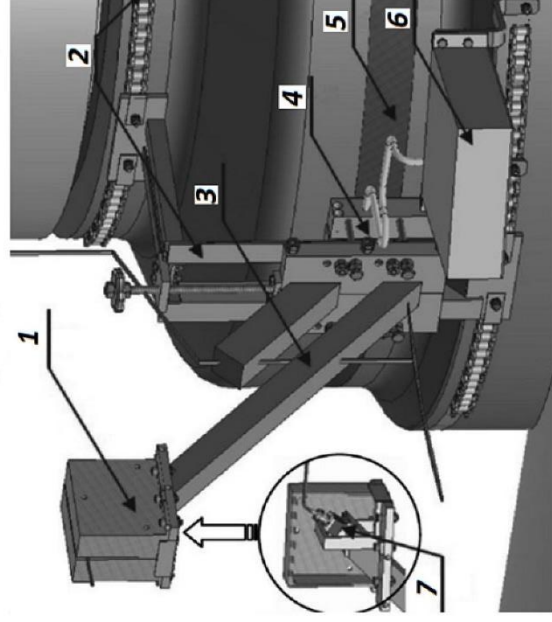
# Схема безперервного ультразвукового онлайн моніторингу



1-й рівень: п'єзоелектричний перетворювач, частотою 2,25 МГц, поєднаний з хвилеводом

2-й рівень: дефектоскоп УМД-8 та контрольно - вимірювальний модуль РХІ NATIONAL INSTRUMENTS

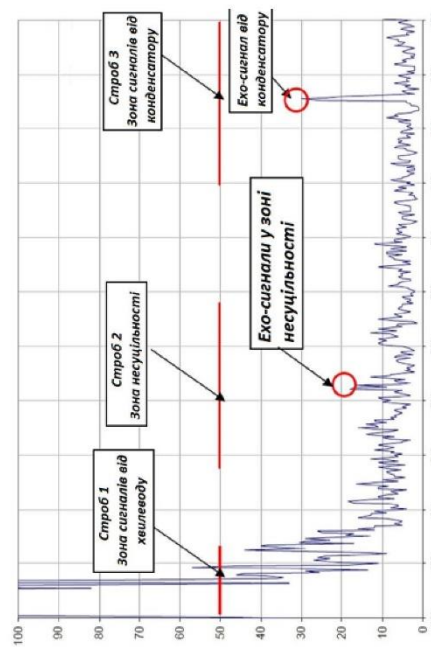
3-й рівень: сервер математичної обробки і зберігання даних (АРМ) та оператор системи моніторингу



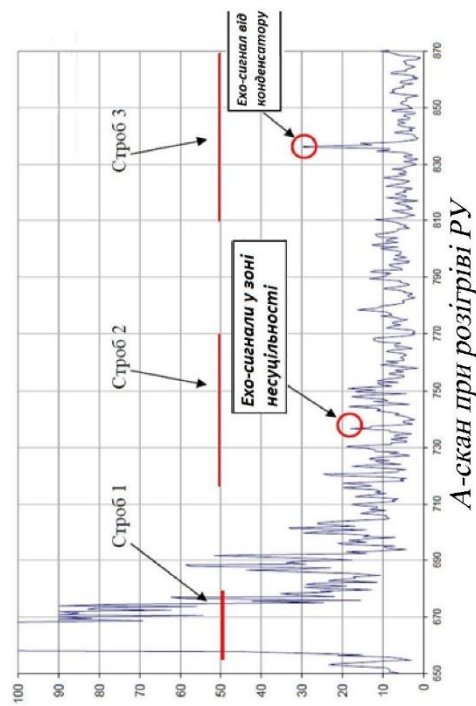
- 1 - акустична ванна для УЗ перетворювача;
- 2 - елементи кріплення хвилеводу;
- 3 - акустичний хвилевід;
- 4 - акустична ванна для хвилеводу;
- 5 - зварний шов;
- 6 - компенсаційний бак з контактної рідиною;
- 7 - УЗ перетворювач

Загальний вигляд вимірювальної частини

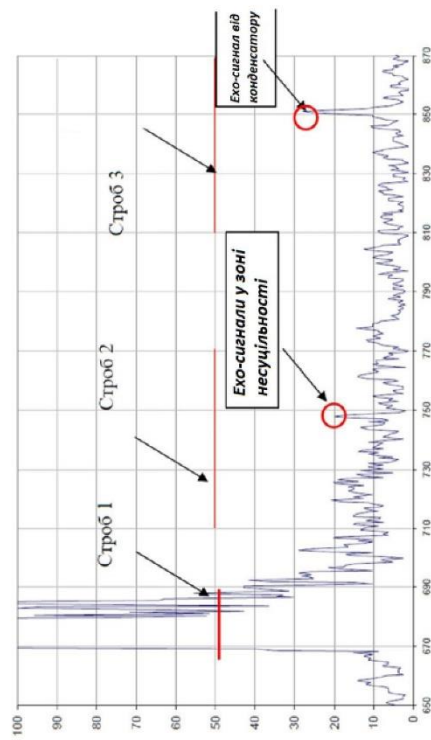
# Результати випробування системи безперервного УЗ моніторингу



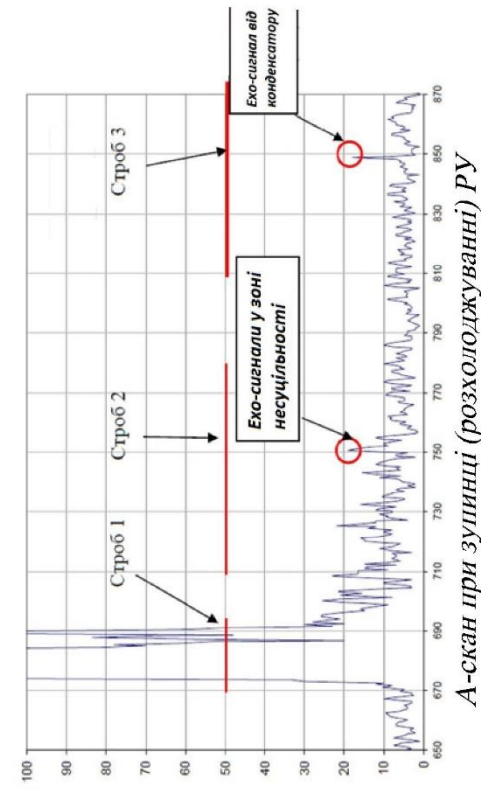
Еталонний А-скан перед початком УЗ моніторингу



А-скан при розігріві РУ



А-скан при роботі РУ на потужності



А-скан при зупинці (розхолоджуванні) РУ

# Дослідження мікроструктури і механічних властивостей мікрорізаків

Механічні властивості стандартних зразків і мікрорізаків при 20 °С

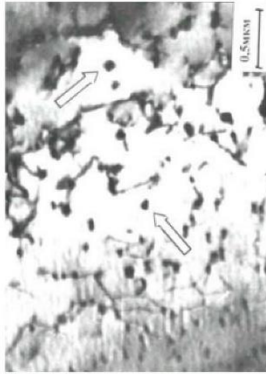
| Тип зразка                                               | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | Примітка         |
|----------------------------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|------------------|
| Мікрорізак                                               | 497              | 288                  | 19,8         | 52,3       | Середнє значення |
| Зразки за ГОСТ 1497-84                                   | 510              | 294                  | 21           | 55         | Середнє значення |
| Різниця між результатами для мікрорізаків та стандартних | 2,5 %            | 2 %                  | 6 %          | 5 %        | -                |
| Дані НТД                                                 | 450 - 550        | 250 - 400            | > 14         | > 50       | Технічні умови   |



Мікроструктура основного металу після  $100 \times 10^3$  год експлуатації,  $\times 500$

Механічні властивості стандартних зразків і мікрорізаків при 350 °С

| Тип зразка                                               | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | Примітка         |
|----------------------------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|------------------|
| Мікрорізак                                               | 450              | 231                  | 11,6         | 45         | Середнє значення |
| Зразки за ГОСТ 1497-84                                   | 474              | 236                  | 12,6         | 50         | Середнє значення |
| Різниця між результатами для мікрорізаків та стандартних | 5 %              | 2 %                  | 7,5 %        | 10 %       | -                |
| Дані НТД                                                 | > 400            | > 200                | > 10         | > 40       | Технічні умови   |

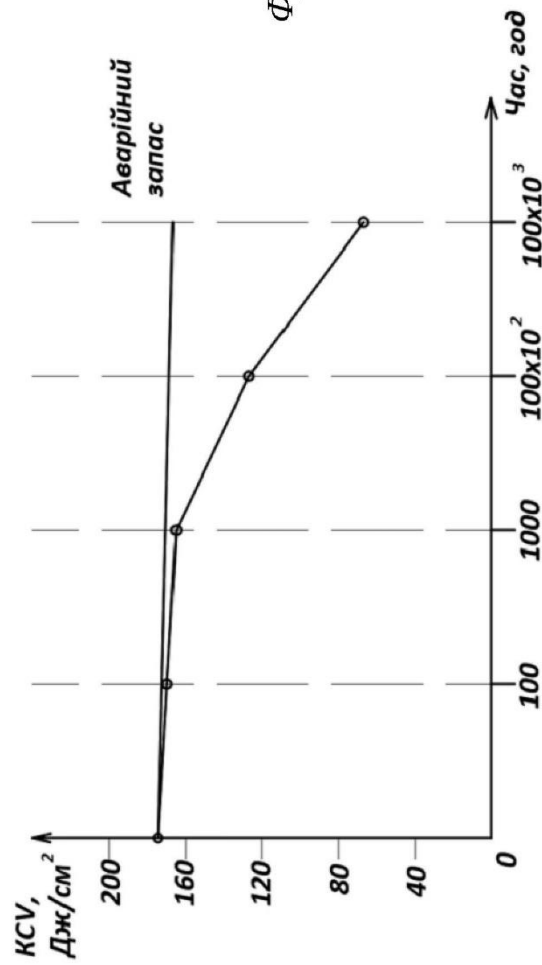


Мікроскопічне зображення структури сталі  $12 \times 10^3$

Результати механічних випробувань мікрорізаків після  $100 \times 10^3$  год експлуатації при різних температурах

| Умови                                                                          | при 20 °С        |                      |              |            | при 350 °С       |                      |              |            |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|------------------|----------------------|--------------|------------|
|                                                                                | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % |
| Дані НТД                                                                       | 450 – 550        | 250 – 400            | > 14         | > 50       | > 400            | > 200                | > 10         | > 40       |
| Аварійний запас                                                                | 508              | 292                  | 20           | 54         | 468              | 226                  | 13           | 49         |
| Мікрорізак після $100 \times 10^3$ год експлуатації                            | 548              | 366                  | 18,6         | 53         | 496              | 285                  | 11,6         | 48,3       |
| Відхилення властивостей мікрорізаків від властивостей металу аварійного запасу | + 7 %            | +20 %                | - 7 %        | - 2 %      | + 6 %            | + 26 %               | - 11 %       | - 1,4 %    |

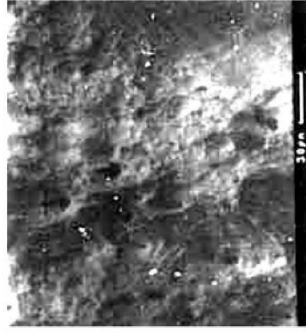
# Дослідження мікроструктури і механічних властивостей мікрозразків



Графік зміни ударної в'язкості металу трубопроводу зі сталі 12Х1МФ в залежності від часу експлуатації (середні значення)

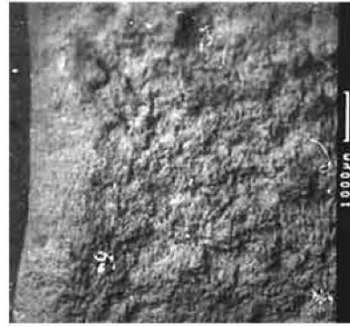


x12

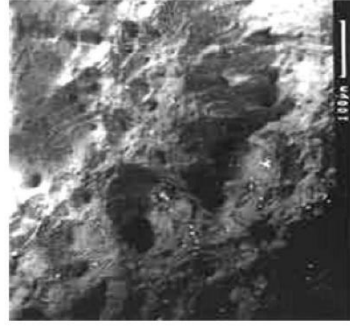


x500

Фрактограми поверхні руйнування мікрозразка, вирізаного з труби аварійного запасу



x12



x150

Фрактограми поверхні руйнування мікрозразка, вирізаного з труби після тривалої експлуатації