

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПОДІЛЛЯ
(м. Хмельницький)

На правах рукопису

ГОРОШКО АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 620.179.1

КОМП'ЮТЕРНА АКУСТИКО-ЕМІСІЙНА ДІАГНОСТИКА
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДЕТАЛЕЙ І КОНСТРУКЦІЙ

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

Дисертація на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник –
Доктор технічних наук, професор
Ройзман В.П.



Хмельницький, 2003

219

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1	
ОГЛЯД МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ І ТЕХНІЧНОЇ	
ДІАГНОСТИКИ ДЕТАЛЕЙ ТА КОНСТРУКЦІЙ.....	
	13
1.1. Неруйнівний контроль і діагностика технічного стану суцільних і зварних деталей та конструкцій.....	13
1.2. Неруйнівний контроль паяних деталей і конструкцій.....	14
1.3. Метод акустичної емісії.....	17
1.4. Параметри сигналів акустичної емісії і їх використання для діагностики технічного стану деталей і конструкцій.....	20
1.5. Аналіз способів визначення координат джерел акустичної емісії.....	24
1.6. Побудова засобів акустико-емісійного контролю.....	26
1.7. Висновки до розділу.....	29
РОЗДІЛ 2	
РОЗРОБКА СПОСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛ	
АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ	
	30
2.1. Лінійна локація джерел акустичної емісії.....	31
2.2. Площинна локація джерел акустичної емісії.....	32
2.3. Просторова локація джерел акустичної емісії.....	36
2.4. Просторова локація джерел акустичної емісії на сфері.....	40
2.5. Точність локації джерел акустичної емісії.....	44
2.5.1. Точність визначення лінійних координат.....	44
2.5.1. Точність визначення площинних координат.....	45
2.5.1. Точність визначення просторових координат.....	47
2.6. Кластеризація джерел акустичної емісії.....	49
2.7. Висновки до розділу.....	50
РОЗДІЛ 3	

СТВОРЕННЯ ШЕСТИКАНАЛЬНОЇ ПРОГРАМНО-АПАРATНОЇ СТАНЦІЇ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ	51
3.1. Прилад акустико-емісійний АФ-15.....	53
3.2. Модифікація субблока лінійних координат СКА-04 приладу АФ-15	55
3.3. Модифікація субблока амплітуд СРА-22 приладу АФ-15.....	58
3.4. Розробка паралельного цифрового інтерфейса введення/виведення для персонального комп'ютера типу ІВМ РС/ХТ/АТ.....	60
3.4.1. Функціональний опис модуля РІО-48.....	61
3.4.2. Установка базової адреси модулів РІО-48.....	62
3.4.3. Програмування модулів РІО-48.....	64
3.4.4. Програмування контролера переривань 8259А.....	66
3.4.5. Призначення контактів зовнішнього роз'єднання.....	69
3.4.6. Технічні характеристики модуля РІО-48.....	69
3.5. Параметри акустичної емісії, що реєструються програмно-апаратною станцією акустичної емісії	70
3.6. Програмне забезпечення збору і обробки параметрів сигналів акустичної емісії.....	71
3.6.1. Програма читання і буферизації даних сигналів акустичної емісії.....	72
3.6.2. Програми обробки даних сигналів акустичної емісії.....	76
3.7. Метрологічна оцінка вимірювальної програмно-апаратної станції акустичної емісії.....	77
3.8. Висновки до розділу.....	78

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДИК ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

ЗВАРНИХ І ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ.....	79
4.1. Діагностика технічного стану зварних з'єднань.....	79
4.1.1. Апаратура і обладнання для випробувань.....	80
4.1.2. Заходи щодо забезпечення зменшення рівня завад при експерименті.....	81
4.1.3. Заходи щодо забезпечення виводу приймальних п'єзоперетворювачів	

з високотемпературної зони.....	81
4.1.4. Хід і результати експерименту.....	86
4.1.5. Лінійна локація дефектів зварних з'єднань під час їх формування....	87
4.1.6. Площинна локація дефектів зварних з'єднань під час їх формування	89
4.1.7. Площинна локація дефектів зварних з'єднань при випробуванні на розтяг.....	90
4.1.8. Методика неруйнівного контролю і діагностування технічного стану зварних швів в процесі тверднення розплаву.....	94
4.2. Неруйнівний контроль і діагностування технічного стану паяних з'єднань друкованих плат електронних систем.....	94
4.2.1. Випробування паяних з'єднань на відрив.....	94
4.2.2. Визначення руйнуючих навантажень та деформацій при розтягу конденсаторів КМ-5В та К-10-9 із застосуванням акустичної емісії.....	97
4.2.3. Випробування паяних з'єднань статичним навантаженням за схемою чистого згину.....	101
4.2.4. Площинна локація дефектів конструкцій, які містять різноманітні матеріали.....	107
4.2.5. Методика діагностування технічного стану паяних з'єднань друкованих плат.....	112
4.2.6. Діагностування технічного стану паяних з'єднань промислових друкованих плат.....	112
4.3. Висновки до розділу.....	114

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА АКУСТИКО-ЕМІСІЙНИХ МЕТОДИК ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ	116
5.1. Діагностика технічного стану і прогнозування міцнісних характеристик важелів S 48.167230.....	116
5.1.1. Експериментальне обладнання для навантаження.....	117
5.1.2. Визначення допустимої величини безпечного навантаження при	

тестуванні важелів.....	119
5.1.3. Акустична емісія важелів під дією неруйнівного навантаження.....	120
5.1.4. Випробування важелів з метою визначення їх механічних характеристик.....	122
5.1.5. Аналіз даних сигналів акустичної емісії.....	123
5.1.6. Методика неруйнівного діагностування і прогнозування руйнуючого напруження важелів.....	130
5.2. Акустико-емісійний контроль технічного стану повітрозбірника В-6,3ГОСТ9028-59.....	131
5.3. Акустико-емісійна діагностика технічного стану ємностей кулеподібних ПАГЗ-2800-32.23.01.000.....	136
5.4. Висновки до розділу.....	143
ВИСНОВКИ.....	145
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	147
Додаток А	
Види дефектів паяних з'єднань.....	159
Додаток Б	
Похибки локації джерел сигналів акустичної емісії.....	160
Додаток В	
Технічні характеристики приладу АФ-15.....	163
Додаток Г	
Пакет прикладних програм збору та обробки сигналів акустичної емісії.....	164
Г.1. Програма збору даних сигналів акустичної емісії Acoust.com	164
Г.2. Програми обробки даних сигналів акустичної емісії.....	169
Г.2.1. Програма первинної обробки даних сигналів акустичної емісії Report.exe.....	169
Г.2.2. Програма лінійної локації Graph.mcd	171
Г.2.3. Програма площинної локації 2Dgraph.mcd	173
Г.2.4. Програма просторової локації 3Dgraph.mcd.....	178

Г.2.5. Програма просторової локації на сферичних об'єктах 3Dgraph_sphere.mcd.....	180
Додаток Д	
Статистична обробка матеріалів експериментів.....	183
Д.1. Статистична обробка результатів випробувань паяних з'єднань на відрив.....	183
Д.2. Статистична обробка результатів випробувань важелів S 48.167230.....	185
Д.3. Статистична обробка результатів випробувань ємностей кулеподібних ПАГЗ-2800-32.23.01.000.....	187
Додаток Е	
Результати механічних випробувань контактних ділянок конденсаторів КМ-5В і К10-9.....	188
Додаток Ж	
Порівняльні акустичні характеристики деяких середовищ.....	190
Додаток З	
Результати досліджень технічного стану важелів S 48.167230.....	191
3.1. Розрахунок найбільшого допустимого неруйнівного навантаження.....	191
3.2. Порівняння руйнуючих навантажень важелів.....	192
3.3. Висновок про результати радіографічного контролю.....	194
3.4. Кореляція між накопиченою енергією сигналів акустичної емісії і руйнуючим напруженням важелів.....	197
Додаток К	
Результати акустико-емісійних випробувань ємностей кулеподібних ПАГЗ-2800-32.23.01.....	199
Додаток Л.....	200

ВСТУП

Актуальність проблеми. Нерідко в процесі виробництва і експлуатації відповідальних деталей і конструкцій в них розвиваються різного роду дефекти (раковини, пори, тріщини, розшарування і т.д.), що призводить до погіршення якості та надійності виробів і нарешті до їх руйнування. Останнім часом все частіше переходять від експлуатації за ресурсом до експлуатації за технічним станом, і надійна технічна діагностика дозволяє продовжувати строк експлуатації значної частини обладнання, яке відпрацювало свій ресурс, що дає вагомий економічний ефект. В зв'язку з цим продовжуються пошуки об'єктивних методів діагностування деталей і конструкцій.

Більшість відомих методів неруйнівного контролю стану матеріалів, такі як ультразвукова дефектоскопія, рентгенівська радіографія і віхреструмний контроль, описані в роботах Ботаки А.А. [1], Копея Б.В. [2], Потапова А.І. [3], Учаніна В.М. [4] та ін., забезпечують лише вибірковий контроль в окремих зонах матеріалу, виявляючи значні дефекти, і не дають інформацію про те, наскільки небезпечним може бути виявлений дефект, хоча дефект може бути небезпечним або безпечним в залежності від його розташування в полі напружень, що виникають при навантаженні матеріалу. На відміну від вищезгаданих методів, метод акустичної емісії (АЕ), що базується на випромінюванні матеріалом при зміні його внутрішньої структури пружних механічних хвиль, джерелом яких є дефекти, що розвиваються, володіє високою чутливістю, можливістю виявити і стежити за поведінкою дефектів, інтегральністю, що дозволяє контролювати стан матеріалу без сканування, простотою використання в процесі випробувань, виробництва й експлуатації, можливістю контролювати матеріали не тільки під механічним навантаженням, але і в процесі фазових перетворень.

Однією з найважливіших задач АЕ-контролю є локація, тобто визначення місця розташування дефекту, що дозволяє не тільки знайти дефектні місця матеріалу, але і оцінити їх небезпечність. Незважаючи на існування множини робіт із явища АЕ [5-10], питання про його практичне застосування, особливо визначення

координат дефектів для неруйнівного контролю і діагностування технічного стану матеріалів, деталей і конструкцій з метою визначення їх придатності до експлуатації, є актуальним і таким, що потребує подальшого розвитку.

У даній роботі розглядаються методики і засоби акустико-емісійної діагностики литих деталей, паяних і зварних з'єднань деталей машин та інших відповідальних конструкцій з визначенням координат дефектів.

Тема дисертації спрямована на розробку нових акустико-емісійних методик та засобів неруйнівного контролю і діагностики технічного стану деталей і конструкцій, та їх впровадження в практику.

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

Робота проводилась відповідно до держбюджетної теми на 2000-2002 р. (шифр «ЗБ -2000») підрозділу 4.8. «Розробка комплексу лінійної, площинної, об'ємної локації сигналів акустичної емісії та його застосування для неруйнівного контролю, діагностики та прогнозування міцності матеріалів, деталей та електронних систем нафтогазового обладнання», яка велася на кафедрі прикладної механіки Технологічного університету Поділля. Роль автора як відповідального виконавця цієї науково-дослідної роботи полягає у розробці комплексу локації джерел АЕ, методик діагностування деталей і конструкцій.

Мета і завдання дослідження полягають в розробці та впровадженні методик і засобів комп'ютерного акустико-емісійного контролю і діагностування технічного стану деталей і конструкцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати існуючі методи і засоби неруйнівного контролю з метою їх використання для діагностування технічного стану матеріалів, деталей і конструкцій різноманітної форми з визначенням координат дефектів.
2. Теоретично розробити способи локації, які можуть бути реалізованими за допомогою модернізованих двоканальних серійних приладів типу АФ-15:
 - площинної локації джерел АЕ в конструкціях, які можуть бути схематизовані пластинами і оболонками (об'єктів, для яких два розміри набагато більші за третій);

- просторової локації джерел АЕ в конструкціях, які можуть бути схематизовані масивами (об'єктів, для яких всі розміри порівнюванні).
- 3. Створити технічний засіб на базі серійних приладів АФ-15 і персонального комп'ютера для реалізації способів локації з метою неруйнівного контролю і діагностування технічного стану деталей і конструкцій.
- 4. Розробити методику діагностування і контролю технічного стану зварних з'єднань в процесі остигання розплаву.
- 5. Розробити методику діагностування конструкцій з численними різномірними матеріалами з метою суттєвого підвищення точності визначення координат дефектів.
- 6. Підтвердити ефективність розроблених методик і засобів на натурних деталях і конструкціях.

Об'єктом дисертаційного дослідження є деталі та елементи металоконструкцій.

Предметом дослідження є технічний стан литих, зварних і паяних деталей та елементів конструкцій, які можуть бути зведені до схем брусків, оболонок і масивів.

Методи дослідження. Дослідження проводилися експериментально за теоретично розробленими методиками. Експериментальні дослідження проводилися із застосуванням методу АЕ та електротензометрії на сучасній акустико-емісійній і тензометричній апаратурі зі спеціально розробленою схемою температурної компенсації, на розривній машині ИР 5070-50 в експлуатаційних і виробничих умовах. В якості додаткових методів неруйнівного контролю застосовувались методи капілярної дефектоскопії і рентгенівської радіографії. Під час проведення експериментальних досліджень та обробки їх результатів застосовувались методи теорії ймовірності і математичної статистики. Розробка технічних засобів здійснювалась з використанням методів схемо- та системотехніки.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Удосконалено існуючі схеми площинної локації джерел АЕ шляхом реєстрації двох різниць часу приходу сигналів АЕ до двох незалежних пар приймальних

перетворювачів, розташованих навхрест, що дозволило спростити розрахункові формули і підвищити точність локації.

2. Удосконалено існуючі схеми просторової локації джерел АЕ шляхом реєстрації трьох різниць часу приходу сигналів АЕ до трьох незалежних пар приймальних перетворювачів, розташованих навхрест, що дозволило спростити розрахункові формули і підвищити точність локації.
3. Запропоновано схему локації джерел АЕ на сферичній поверхні, що дозволило однозначно визначати місця небезпечних дефектів, реєструючи три різниці часу приходу сигналів АЕ до трьох незалежних пар приймальних перетворювачів, розташованих в полюсах і на екваторі сфери.
4. Вперше, шляхом занурення контрольованого об'єкту і приймальних перетворювачів в акустопрозоре однорідне середовище, вирішено задачу визначення координат дефектів у конструкціях зі складною неоднорідною поверхнею.
5. Знайдено кореляційні залежності між руйнуючим навантаженням деяких деталей машин та енергією сигналів АЕ, накопиченою упродовж безпечного навантаження, що дозволило оцінювати їх міцність.

Достовірність і обґрунтованість наукових результатів та висновків підтверджується багаторазовим повторенням експериментів з подальшою статистичною обробкою результатів; досить високою збіжністю результатів експериментів з розрахунками; практикою експлуатації впроваджених рекомендацій.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Модифікація двох субблоків серійного приладу АФ-15 для можливості безперервної передачі сигналів АЕ у персональний комп'ютер (ПК) і розробка та створення інтерфейсів введення/виведення для узгодження роботи з ПК дозволяє підвищити об'єм АЕ-інформації, що обробляється та узгодити роботу трьох приладів АФ-15 між собою і ПК, програмне врахування швидкості поширення сигналів АЕ дозволяє підвищити точність локації, створення програм збору, обробки і локації сигналів АЕ дозволяє реалізувати способи лінійної, площинної і просторової локації дефектів.
3. Методика неруйнівного контролю і визначення небезпечних дефектів зварних

з'єднань дозволяє проводити неруйнівний контроль зварних з'єднань чавуну СЧ-4 в процесі остигання розплаву.

4. Методики діагностування і способи площинної і просторової локації дефектів застосовані для оцінки можливості подальшої експлуатації повітрязбірника, а також автомобільного газозаправника.
5. Спосіб локації дефектів в акустопрозорому середовищі дозволяє проводити діагностику технічного стану деталей і конструкцій, насичених різноманітними матеріалами, із швидкостями поширення хвиль АЕ, які суттєво різняться.
6. Методика визначення небезпечних дефектів паяних з'єднань при безпечному навантаженні і спосіб площинної локації в акустопрозорому середовищі дозволяє проводити контроль міцності паяних з'єднань функціональних плат електронної техніки.
7. Методика та устаткування для неруйнівного контролю, діагностики технічного стану і прогнозування руйнуючого навантаження литих важелів, впроваджені на ВАТ "Адвіс" (акт впровадження від 21 червня 2002 р.), дозволили в 1,5 рази зменшити кількість браку продукції, зменшити витрати на неруйнівний контроль іншими методами. Методика діагностування газозаправника, впроваджена на ДП Подільський експертно-технічний центр Держнаглядохоронпраці, дозволила підвищити якість і надійність, зменшити трудомісткість діагностування (акт впровадження від 21 грудня 2001 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати та положення дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Особисто автором уточнені розв'язки задач площинної і просторової локації дефектів, розроблено спосіб і пристрій локації в акустопрозорому середовищі [11, 17-19]; модифіковано два субблоки серійного приладу АФ-15 для можливості безперервної передачі сигналів АЕ у ПК, розроблено і створено інтерфейси введення/виведення для узгодження роботи з ПК, створено програми збору, обробки і локації сигналів АЕ; розроблено спосіб діагностування міцності зварних з'єднань в процесі тверднення розплаву на прикладі зварних з'єднань чавуну СЧ-4 [12]; із застосуванням локації в акустопрозорому середовищі [13] розроблено методики і засоби використання параметрів АЕ

для неруйнівного контролю і діагностування технічного стану паяних з'єднань друкованих плат [14]; розроблено методику акустико-емісійного контролю, діагностування і прогнозування характеристик міцності литих важелів автотранспортного засобу; відпрацьовано методики проведення неруйнівного контролю і технічного діагностування посудин, які експлуатуються під тиском [15, 16].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на 2-й міжнародній науково-практичній конференції “Надійність машин і прогнозування їх ресурсу” (Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу, 2000); міжнародній конференції “Системные проблемы качества, математического моделирования и информационных технологий” (м. Сочі, 2000); 2-й міжнародній науково-практичній конференції „Современные информационные и электронные технологии» (м. Одеса, 2001); 3-й міжнародній науково-практичній конференції „Современные информационные и электронные технологии» (м. Одеса, 2002); 1-й міжнародній науково-технічній та методичній конференції “Динаміка машин і механізмів” (м. Хмельницький, 2002); 8-й науково-технічній конференції “Вимірювальна й обчислювальна техніка в технологічних процесах” (Хмельницький, 2001 р.); 8-й міжнародній науково-технічній конференції-виставці “Неруйнівний контроль та діагностика неоднорідних об’єктів” серії “Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів” (м. Славськ, 2003); наукових семінарах кафедри прикладної механіки Технологічного університету Поділля (м. Хмельницький, 1999-2003).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 6 статтях (1 стаття одноосібна) наукових фахових журналів, перелік яких затверджено ВАК України, 3 патентах України, 5 збірниках тез доповідей наукових конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку літератури та додатків. Робота виконана на 138 сторінках машинописного тексту, містить 78 рисунків, 8 таблиць, 10 додатків та список використаних джерел з 119 найменувань. Загальний об'єм дисертації 203 сторінки.

Автор висловлює подяку доц. Ковтуну І.І., доц. Цасюку В.В., Письменку В.П. і **Гарховському Ю.М.** спільна робота з якими сприяла появі цієї роботи.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ І ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ДЕТАЛЕЙ І КОНСТРУКЦІЙ

1.1. Неруйнівний контроль і діагностика технічного стану суцільних і зварних деталей та конструкцій

Для неруйнвної технічної діагностики деталей та зварних конструкцій найбільше застосування знайшли метод рентгеноскопії, ультразвуковий метод, магнітопорошковий метод і метод проникаючих барвних і люмінесцюючих рідин, які називають також традиційними методами неруйнвного контролю (НК). Традиційні методи НК добре описані в літературі [1-4, 20-30].

За допомогою методу рентгенівської радіографії можна виявити великі включення, однак інформативні параметри цього методу не завжди корелюють із характеристиками міцності досліджуваних матеріалів [6].

За допомогою ультразвукового методу (УЗК) виявляють дефекти типу несуцільностей - раковини, пори, розшарування, тріщини [1]. Метод УЗК базується на принципі локального введення енергії в об'єкт. Параметри, що характеризують передачу (відбиток) енергії, використовують у якості інформативних, тому диференційоване обстеження виробів вимагає громіздких систем виміру або досить складних систем сканування. На сучасному етапі за допомогою ультразвукового методу з деякою долею ймовірності вирішують завдання поділу об'єктів на дві якісно помітні групи за ознакою «придатний - не придатний». Більш тонкі відмінності дефектів цим методом виявити важко.

Заслужують на увагу методи дефектоскопії, які базуються на обліку процесів, зв'язаних із переносом речовини або енергії, у тому числі і процесів, зв'язаних із випромінюванням хвиль напружень.

В основі застосування цих методів для НК лежить той факт, що при навантаженні мікро- і макродефекти матеріалу випромінюють пружні хвилі. Поширюючись по елементу, хвилі досягають датчиків, що перетворюють пружні пе-

решення на поверхні в електричний сигнал. Вимір параметрів цих хвиль дозволяє виявити дефекти, оцінювати їх розміри, ступінь небезпеки, прогнозувати руйнівне навантаження. Методи НК, що базуються на обліку процесів випромінювання хвиль напружень, обумовлених виникненням і розвитком дефектів структури матеріалу, одержали назву емісійних методів. До них відносяться екзоелектронна емісія та акустична емісія (АЕ) - емісія хвиль напружень.

Екзоелектронна емісія (ефект Крамера) - це випромінювання електронів із знову утвореної поверхні [31]. Багато чого ще нез'ясоване в механізмі екзоелектронної емісії, але оскільки характер екзоелектронної емісії поверхні матеріалів визначається щільністю дефектів на поверхні, розміром деформації і ступенем окислення, то за допомогою ефекту Крамера можна досліджувати зміну властивостей поверхонь матеріалів при втомних ушкодженнях. Використання методу екзоелектронної емісії вимагає складної апаратури і складних випробувань.

Аналізуючи типові конфігурації деталей і конструкцій, видно, що традиційних методів та засобів НК не достатньо для оцінки стану цілого виробу. А часом їх використання і взагалі неможливе. Як правило, неруйнівні методи контролю, такі як рентгенівська радіографія, УЗК, кольорова дефектоскопія та ін. можуть бути застосовані тільки при огляді локальних (вибіркових) ділянок, а в важкодоступних місцях контроль практично не проводиться. В роботі [32] показано, що НК традиційними методами охоплює не більше 20% поверхні діагностованого виробу

1.2. Неруйнівний контроль паяних деталей і конструкцій

Основним методом отримання електричних з'єднань, а також кріплення елементів у вузлах і блоках електронних систем залишається на сьогоднішній день пайка. Паяні з'єднання (ПЗ) є широким класом нероз'ємних з'єднань, утворення яких здійснюється в результаті взаємодії матеріалів деталей, що паяються, з матеріалом припою [33]. Процес утворення ПЗ являє собою складний

технологічний процес з широким комплексом фізико-хімічних явищ, що відбуваються в твердій, рідкій та газоподібній фазах [34]. Одним з основних параметрів, які використовуються для характеристики ПЗ є міцність, а саме границя міцності на розтяг σ_e або границя міцності на зсув τ_e . В процесі пайки припій і основний матеріал зазнають різні фізико-хімічні перетворення, що викликають суттєві зміни їх властивостей по відношенню до початкового стану [35]. Міцність ПЗ залежить від значної кількості конструкторських та технологічних факторів і, таким чином, визначається опором руйнуванню найбільш слабкої ланки дії силового або температурного поля. Основні дефекти паяних з'єднань та їх короткий опис приведено в табл. А.1 (додаток А). При отриманні ПЗ електричних схем на друкованих платах найхарактерніші наступні дефекти: незможуваність, пористість пайки, поява кульок припою, відшарування пайки від контактних площадок, розриви пайки, перемички припою, холодні пайки, надлишок або недостача припою.

В радіоелектроніці і обчислювальній техніці у зв'язку з їх комплексною мікромініатюризацією вимоги до якості і надійності ПЗ безперервно збільшуються. Основною проблемою, що ускладнює отримання надійних ПЗ, є відсутність об'єктивних неруйнівних методів їх контролю. Так, галузевий стандарт ОСТ 4Г0.054.089 «Узлы и блоки радиоэлектронной аппаратуры. Пайка монтажных соединений. Типовые технологические процессы» вказує, що основний метод контролю – візуальний [36]. Допоміжними методами є оцінка міцності ПЗ на відрив або зріз (руйнівний метод). Застосування цих методів, як показує практика, не завжди забезпечує надійне відбракування неякісних ПЗ. У зв'язку з цим виникла необхідність пошуку більш ефективних методів контролю паяних з'єднань і їх стандартизація. Основним критерієм, за яким може бути оцінена якість ПЗ, є величина перехідного електричного опору $R_{ПЗ}$. Однак при виробництві радіоелектронної апаратури (РЕА) оцінка ПЗ за цим критерієм викликає значні труднощі або виявляється неможливою. Це пояснюється малою величиною перехідного опору $R_{ПЗ} \leq 100$ мкОм і залежністю величини $R_{ПЗ}$ від параметрів електричної схеми, що привело до використання на практиці вто-

ринних ознак, які характеризують основний критерій якості ПЗ - $R_{ПЗ}$, до яких, в першу чергу, відносять характер поведінки розплавленого припою і його взаємодії з поверхнями, що паяються; стан (зовнішній вигляд, зернистість, колір і т. д.) поверхні припою після лудіння та пайки; характер, розміри та форма дефектів; зусилля, що витримують ПЗ при випробуваннях на руйнування.

До останнього часу ці непрямі ознаки достатньо повно характеризували якість ПЗ. Однак впровадження комплексної мініатюризації різко ускладнило РЕА. Зокрема, значно збільшилась кількість ПЗ, зменшились їх геометричні розміри. Так, площа контактної ділянки під мікросхеми в корпусах SOIC, PLCC складає $2,1 \cdot 0,8$ мм² і менше. Все це привело до того, що перераховані критерії перестали забезпечувати надійне відбраковування неякісних ПЗ. В зв'язку з цим були продовжуються пошуки більш інформативних вторинних критеріїв якості ПЗ і розробка на їх основі методів НК. Загальна класифікація методів НК приведена в ГОСТ 18353 [37], класифікація методів, застосовуваних для виробів електронної техніки - в ОСТ 11.094.024 [38].

В ряді розглянутих робіт виказані припущення про можливість застосування для контролю якості ПЗ електрофізичних методів, які базуються на реєстрації електрофізичних параметрів, що несуть інформацію про якість і надійність контролюваного об'єкту. У відповідності з [37] до електрофізичних методів відносять: електропараметричний, шумовий, акустичної емісії, екзоелектронної емісії, фотовідповіді та рекомбінаційного випромінювання. Для контролю якості ПЗ використовуються електропараметричні і шумові методи.

Електропараметричні методи контролю базуються на отриманні інформації про об'єкт за його вольт-амперною характеристикою (ВАХ) шляхом оцінки ступеня нелінійності цих характеристик і характері зміни ВАХ при різних впливах. Серед електропараметричних методів розрізняють методи НК, які базуються на оцінці ступеня нелінійності ВАХ ПЗ а також на вимірюванні зміни ВАХ ПЗ при механічних впливах. Шумовими методами контролю є метод струмових шумів та метод високочастотних шумів.

Основним недоліком вказаних методів є складність визначення місця роз-

ташування дефектного ПЗ, висока вартість і складність обладнання для контролю.

1.3. Метод акустичної емісії

За традиційними методами НК в об'єкті збуджують те або інше фізичне поле і реєструють зміну його параметрів при взаємодії з дефектом. Більш простим методом із погляду практичного використання є метод акустичної емісії (АЕ), що на відміну від інших методів НК є пасивним [5]. Метод АЕ з цих позицій [7] є цікавим і перспективним, оскільки явище АЕ виникає при протіканні фізичних процесів в матеріалах і є їх відображенням. Інформація, що реєструється, об'ємна, і її зміну, в залежності від процесів, що протікають, можливо відслідковувати в часі, що є важливішим елементом в задачах прогнозування.

Необхідно відзначити, що на теперішній час метод АЕ є можливо єдиним методом, який можливо використовувати для слідування за розвитком дефектів структури і створення систем безперервного моніторингу об'єктів. Даний метод базується на збудженні фізичного поля випромінювання (поля динамічних пружних напружень) самим дефектом, у результаті виділення пружної енергії при його розвитку. Основні переваги методу АЕ: висока чутливість, можливість виявити і стежити за поведінкою дефектів, що розвиваються, інтегральність, що дозволяє контролювати стан елемента без сканування, простота використання в процесі проведення технологічної операції і можливість адаптивного керування процесом, можливість контролювати різноманітні матеріали, як однорідні, так і неоднорідні, у тому числі і композити, дистанційний інтегральний контроль стану великогабаритних об'єктів, включаючи можливість одночасного контролю декількох різнопрофільованих об'єктів, виявлення небезпечних дефектів, що розвиваються, причому на ділянках конструкції, які недоступні ніяким іншим методам НК, діагностування об'єктів без повного розбирання і зняття захисних елементів або ізоляції, в тому числі при їх підводному або підземному заляганні.

Висока чутливість методу АЕ обумовлена тим, що при утворенні і рості дефектів звільняється акустична енергія значного розміру. Так, амплітуда сигналу АЕ при зростанні тріщини на 0,01...0,1 мм у сотні разів перевищує зміну амплітуди ультразвукового сигналу, відбитого тією ж зростаючою тріщиною. Порівняльна оцінка методу АЕ та ультразвукової дефектоскопії показує, що чутливість методу АЕ на порядок вище [39]. Найбільш істотною перевагою методу АЕ є здатність реагувати не тільки на найбільш небезпечні - зростаючі дефекти але і визначати степінь небезпеки дефектів, що не вдається здійснити традиційними неруйнівними методами контролю. Отже, ним можна визначати не тільки акустичну активність того або іншого дефекту, але і прогнозувати подальшу поведінку елемента, який навантажується, визначати міцність і ресурс роботи. Якщо додати сюди таку характеристику, як оперативність оцінки стану об'єкту, то приведені можливості АЕ-контролю ставлять його в ряд найбільш прогресивних методів НК.

АЕ-метод виступає як самостійний, якщо за його оцінкою, отриманою на основі критеріального [32] аналізу зареєстрованої АЕ-інформації від джерел-дефектів, стан об'єкту визнається задовільним. В протилежному випадку для кінцевого рішення можуть притягуватись додаткові методи НК. Найбільшу надійність оцінки дає застосування АЕ-методу в комплексі з такими традиційними методами, як візуально-оптичний, капілярний, магнітопорошковий, ультразвуковий, рентгенівський. Ефективність комплексного контролю визначається тим, що в задачу АЕ-методу входить виявлення АЕ-активних джерел і визначення координат або зон їх розташування, що забезпечує багатократну мінімізацію об'ємів наступного контролю традиційними методами. Останні доповнюють АЕ-оцінку стану об'єкту свідченням про геометричні параметри і ступенем небезпечності виявлених дефектів (розмірах, формі, орієнтації і глибині залягання).

Найбільш поширеним завданням, що розв'язується методом акустичної емісії, є відбраковування виробу. Він може відбраковуватися ще при пробному навантаженні, під час якого порівнюються які-небудь характеристики АЕ (най-

частіше це активність або накопичення сигналів) із контрольними характеристиками. Контрольні характеристики встановлюються умовно, наприклад, по випробуваннях таких же виробів, але із заздалегідь заданими дефектами, що знижують міцність виробу нижче припустимої. При відбракуванні найчастіше користуються одним приймальним перетворювачем без визначення місця розташування джерел випромінювання АЕ.

Основні недоліки цього методу як методу пасивного контролю: необхідність для його реалізації деформування матеріалу контрольованого об'єкту, оскільки тільки за цієї умови різні дефекти структури, як концентратори напружень, випромінюють дискретні акустичні хвилі локального пружного розвантаження матеріалу, чутливість до різного роду завад, в тому числі електромагнітних, вібраційних, кліматичних, акустичних та ін.

Основні напрямки реалізації методу АЕ: дослідження фізичних закономірностей деформування і руйнування структури матеріалів, включаючи металічні і композиційні матеріали, кераміку, експериментальна конструктивно-технологічна обробка з метою підвищення ресурсу деталей машин, зварних з'єднань і вузлів, оболонкових та інших корпусних конструкцій в складі масштабних і натурних моделей суднобудівної, аерокосмічної, атомної, машинобудівної і інших галузей промисловості, широкого класу посудин тиску і трубопроводів (як технологічних, так і магістральних продуктопроводів) в процесі їх гідравлічних і пневматичних випробувань, включаючи реактори риформінгу, колони, теплообмінники, ресивери, автоклави, котли та інше обладнання нафтодобувної, нафтопереробної, хімічної і інших галузей промисловості, а також підприємств теплоенергетичного комплексу, діагностика стану різних ємностей, сховищ, стаціонарних і транспортних цистерн і іншого наливного обладнання широкого призначення.

Основні задачі, що вирішуються АЕ-методом: виявлення різних дефектів матеріалу, в тому числі і тріщин, які розвиваються, корозійних уражень, місць ерозійного зносу з визначенням їх місцеположення на контрольованому об'єкті; контроль герметичності корпусних конструкцій в режимі шукання течії і вияв-

лення наскрізних дефектів, в тому числі свищів, корозійних поїдань і нещільних з'єднань; контроль зварних швів безпосередньо в процесі зварювання і в період тверднення; виявлення районів підвищеної напруженості і перевантаженості конструкцій за реєстрацією хвиль локальних пластичних деформацій і загальної текучості матеріалу.

1.4. Параметри сигналів акустичної емісії і їх використання для діагностики технічного стану деталей і конструкцій

Метод АЕ є методом НК, при якому розвиток дефектів супроводжується генерацією акустичного сигналу. Роль приймача сигналу відіграє п'єзоелектричний перетворювач [5]. Він перетворює механічні коливання поверхні, викликані явищем АЕ, в електричні. Далі електричний сигнал АЕ підсилюється, фільтрується та обробляється спеціальними пристроями з метою виділення параметрів, що дозволяють судити про стан і подальшу поведінку матеріалу або конструкції в процесі навантаження.

Сигнал АЕ на виході первинного п'єзоелектричного перетворювача (ПЕП) є високочастотним коливанням (рис. 1.1). Одним сигналом вважається сукупність коливань, реалізованих протягом 1 мс.

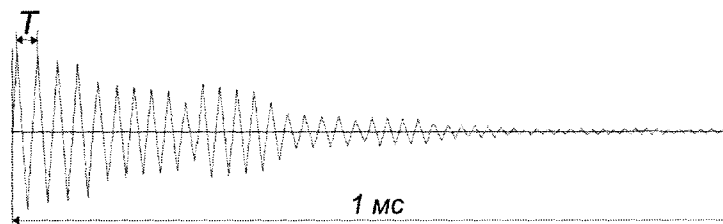


Рис. 1.1. Сигнал акустичної емісії

Кожний імпульс АЕ може бути апроксимований залежністю (1.1) [1].

$$U = Ae^{-nt} \sin \omega t, \quad (1.1)$$

де A - амплітуда; n - показник загасання (коефіцієнт, що залежить від демпфуючих властивостей досліджуваної системи); ω - колова частота,

$$\omega = \sqrt{p^2 - n^2}; \quad (1.2)$$

тут

$$p = \sqrt{\frac{c}{m}}, \quad (1.3)$$

де c - коефіцієнт жорсткості (статичне зусилля, що викликає одиничне переміщення); m - приведена маса. Зазвичай $n \ll m$ і $\omega = p$. Коливання характеризуються також періодом

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{p^2 - n^2}} \approx \frac{2\pi}{p}. \quad (1.4)$$

При обробці осциляцій і подій у вимірювальній апаратурі [5] найчастіше використовують такі параметри АЕ: кількість сигналів, загальний рахунок сигналів, кількість сигналів в одиницю часу (активність), амплітуда сигналів, координата джерела АЕ-сигналу.

Проблема пошуку зв'язку між процесами руйнування і АЕ-інформацією, яка реєструється при цьому, обумовлена цілою низкою причин: відсутністю досить досконалої системи реєстрації виникнення сигналів АЕ при утворенні і розвитку дефектів, стохастичним характером процесу АЕ, значним спотворенням форми вихідного сигналу АЕ внаслідок дисперсії і багатомодовості акустичної хвилі, структурною неоднорідністю матеріалу, недосконалістю використовуваної АЕ апаратури та іншими причинами [6].

Приведені в різних джерелах дані свідчать про те, що розрахунково-експериментальні дослідження акустико-емісійних полів, закономірностей їхнього поширення в об'єктах навіть простої геометричної форми, показують надзвичайну складність цього шляху для вирішення завдання створення методики технічної діагностики конструкцій [8]. У зв'язку з цим одержують поширення більш прості, хоча і менш жорсткі якісні підходи до оцінки ступеня небезпеки дефектів. Суть їх полягає в тому, щоб за якісними змінами одного або декількох параметрів АЕ щодо якоїсь фізичної характеристики об'єкту діагностики (часу, навантаження, кількості циклів і т. д.) оцінювати степінь небезпеки дефекту.

Одним із документів, які містять рекомендації з оцінки ступеня небезпеки дефектів, є стандарт США E 596-76 [40]. Відповідно до нього повинна аналізуватись залежність параметра АЕ (сумарний рахунок) від параметра навантаження (час, навантаження, номер циклу і т. ін.). Можуть спостерігатися наступні випадки (рис. 1.2): джерело випромінювання пасивне (1), активне (2) і критично активне (3). У відповідності зі стандартом пасивні джерела надалі залишаються без уваги, активні підлягають періодичному контролю, а при виявленні критично активних джерел АЕ стандарт рекомендує зробити НК зони даного джерела, використовуючи інші методи.

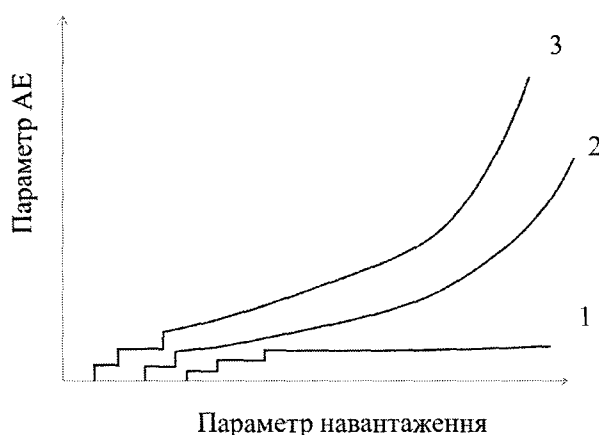


Рис. 1.2. Класифікація джерел АЕ за ступенем небезпеки

У роботі [21] також розглянуті можливі підходи до оцінки міцності і ступені пошкодження композиційних полімерних матеріалів. Тут для оцінки міцності матеріалів може бути використано декілька АЕ критеріїв.

1. Кількість імпульсів АЕ за весь період навантаження зразка або виробу. Цей критерій відбиває реальне співвідношення між процесом руйнування і границею міцності, як його критичною характеристикою у випадку протікання тільки одного виду руйнування, або при сталості співвідношення різних його видів [41], що обмежує його застосування.

2. Кількість імпульсів АЕ на окремих ділянках безупинного навантаження. Ця характеристика найбільш прийнятна для ходу процесу руйнування, типового для випадку навантаження оболонок внутрішнім тиском [42].

3. Розподіл сигналів по амплітудах. Використання амплітудного розподілу в

якості критерію міцності припускає оцінку близькості моменту руйнування за зростанням частки високоамплітудних імпульсів, зв'язаного з наростаючою кількістю розривів волокон або злиттям мікродефектів [43].

4. Кількість імпульсів АЕ за час витримки при східчастому навантаженні [44]. Ця характеристика дозволяє оцінювати міцність виробів при їхньому навантаженні до навантажень порядку половини від руйнуючих.

У роботах [7,45-50] показане дослідження цих та інших критеріїв для оцінки небезпеки виявлених дефектів зразків однорідних і композиційних матеріалів, зварних з'єднань, посудин тиску та ін. при статичних, динамічних і термічних навантаженнях.

У роботах [51, 52] наводяться дані визначення типу дефекту за отриманими параметрами АЕ, відповідно до якого, вимірюючи амплітуду, активність, тривалість, енергію або потужність сигналів, можна виділити джерела сигналів АЕ: колективні переміщення дислокацій, смуги ковзання, розвороти зерен, блоків мікротріщин, фазові перетворення, наприклад мартенситного типу.

Практично всі роботи з дослідження дефектів методом АЕ показують можливість локації сконцентрованих у матеріалі дефектів, однак поряд із цим автори говорять про неможливість визначення місця майбутнього руйнування при безпечному рівні навантаження.

Таким чином, незважаючи на безліч робіт, присвячених дослідженню дефектів матеріалів методом АЕ, залежність між параметрами АЕ і механічними характеристиками різних матеріалів усе ще мало вивчена, відсутні практичні рекомендації з використання параметрів АЕ для НК, діагностування і прогнозування міцності зварних з'єднань в процесі зварювання і тверднення. Тому для вирішення конкретних завдань забезпечення надійності і міцності відповідальних деталей і конструкцій, що використовуються у машинобудуванні й інших галузях техніки, необхідні подальші дослідження методом АЕ для виявлення інформативних параметрів АЕ, їхнього зв'язку з механічними характеристиками під впливом різних неруйнівних навантажень, і розробки методик неруйнівної діагностики і прогнозування міцності і місця майбутнього руйнування виробів.

1.5. Аналіз способів визначення координат джерел акустичної емісії

Важливе завдання засобів АЕ-контролю, особливо багатоканальних – визначення координати дефектів, що розвиваються.

Знання координат джерел АЕ [5] має велике практичне значення, оскільки джерелами є дефекти структури матеріалу. Зазвичай припускають, що поняття “координати джерела АЕ” і координати “дефекту” еквівалентні. Однак дефекти можуть мати деяку просторову конфігурацію і характеризуватись деяким геометричним місцем точок. Тому поняття “координати дефекту” не має сенсу без вказування того, яка характерна точка дефекту при цьому розглядається. Розрахунок координат джерела АЕ дає точку в матеріалі конструкції, в малому околі якої в даний момент розвивається дефект. Приймавши ці координати за координати дефекту, можна говорити про еквівалентність вказаних двох понять. В наступному викладенні поняття “координати дефекту” використано саме в такому смислі. Наприклад, під координатами тріщини розуміють координати її вершини, що випромінює імпульси АЕ при розвитку тріщини.

Найпоширеніший спосіб локації сигналів АЕ базується на вимірі різниці часу приходу (РЧП) сигналів до ПЕП [53]. Лінійна координата подій встановлюється за різницею часу приходу сигналу АЕ до двох ПЕП. Оскільки в більшості конструкцій товщина матеріалів значно менше їх інших лінійних розмірів, а абсолютні похибки визначення координат дефектів за допомогою АЕ порівнюванні зі значенням товщини, то зазвичай задачу локації ставлять як двомірну (площинну), тобто цікавляться координатами джерела АЕ на серединну або зовнішню поверхню стінки конструкції. Для визначення місця джерела АЕ на площині розташування джерела необхідно мати не менше трьох ПЕП, які оточують його, щоб знайти його положення методом тріангуляції. Даний метод широко описаний у літературі [5, 53], однак його практичне застосування висвітлене слабо.

Розглянемо детальніше тріангуляційний спосіб локації за допомогою n ПЕП. При такому способі локації вимірюють $n-1$ РЧП сигналів до них. Вимір

всіх РЧП починається з моменту приходу сигналу на будь-який із ПЕП, що виявився першим приймачем хвилі сигналу. В момент прийняття сигналу наступним ПЕП закінчується вимір першої РЧП. Вимір наступної РЧП закінчується по прибутті сигналу до наступного ПЕП. Аналогічним чином реєструються всі $n-1$ РЧП до n ПЕП. Однозначне визначення координат можливе лише усередині трикутника, створеного трьома ПЕП (мінімальна кількість для здійснення площинної локації), тому необхідно введення четвертого приймача і реєстрація трьох значень РЧП, що усуває неоднозначність у визначенні координат і тим самим дозволяє контролювати поверхні як в середині трикутника, так і за його межами.

Недоліком вказаного способу є складність і громіздкість розрахункових формул локації. Крім того, описана схема реєстрації РЧП може бути реалізована не на всіх засобах АЕ-контролю. Наприклад, на основі серійних двоканальних приладів реєстрації АЕ-сигналів АФ-15 можна будувати багатоканальні АЕ-системи, які можуть виконувати тільки лінійну локацію. Це пов'язано з тим, що кожний двоканальний прилад може реєструвати лише РЧП до двох власних ПЕП. Системи АЕ, побудовані на основі АФ-15, не могли здійснювати вимір РЧП відносно якогось одного з групи ПЕП.

Необхідно відмітити, що у випадку локації дефектів складних неоднорідних конструкцій, які містять матеріали з акустичними характеристиками (швидкість поширення, затухання хвиль), які суттєво різняться, визначення координат відомими способами має незадовільну точність і не дозволяє вказати місце дефекту. Врахування середньої швидкості поширення хвиль АЕ також не дає бажаної точності.

Для визначення координат течії використовують такі способи, як пошук сигналу за напрямком і амплітудний [54]. Спосіб за напрямком має суттєвий недолік, що полягає в двозначному визначенні напрямку. Принцип роботи пристроїв, які базуються на способі амплітудної локації, полягає в порівнянні амплітуд акустичних сигналів, прийнятих у різних місцях поверхні об'єкта контролю. Координати джерела визначаються за відомим загасанням акустичних ко-

ливань в обраному діапазоні частот. Недоліками цього способу є залежність загасання сигналу від частоти, що вносить похибку при зміні спектра сигналу і нерівномірність амплітудно-частотної характеристики на поверхні об'єкта. Слід зазначити, що прилади амплітудної локації і локації за напрямком практично не використовуються в науково-дослідних цілях головним чином через вузьку спеціалізацію галузі.

Наявність великої кількості способів вимірів і схемних вирішень апаратури [55-63] говорить про відсутність на даний момент усталеного уявлення про оптимальний підхід до знаходження координат джерел АЕ.

1.6. Побудова засобів акустико-емісійного контролю

Комплекс фізико-хімічних процесів, що відбуваються в матеріалах, визначає природу джерел випромінювання АЕ і накладає певні вимоги на специфіку методик проведення експериментальних досліджень і апаратуру, яка використовується для реєстрації і обробки сигналів АЕ. Характерною рисою всіх сучасних приладів для виміру АЕ є наявність у їхньому складі ЕОМ або мікропроцесорів. Це пов'язано, по-перше, із збільшенням числа каналів прийому і угрупованням ПЕП у антени, за допомогою котрих можливо знайти джерела АЕ. Обробка значних потоків інформації про АЕ від багатьох каналів із здійсненням обчислювальних процедур, що до того ж змінюються в залежності від конфігурації антен, не під силу приладам, у яких відсутні цифрові процесори. По-друге, через те, що на сьогоднішній день ще не вироблені єдині критерії інформативності різних параметрів АЕ, апаратура повинна по можливості вимірювати велику кількість параметрів АЕ і зберігати їх у довгостроковій пам'яті для наступного післяекспериментального аналізу. Це особливо важливо для систем, призначених для дослідницьких цілей. Тому в рамках даного огляду не розглядаються «аналогові системи», призначені для вирішення вузько напрямлених завдань.

Невід'ємною частиною систем збору даних, що використовують ЕОМ, є

програмне забезпечення. Вартість програмного забезпечення в ряду закордонних фірм перевершує вартість самої системи збору даних, і це в значній мірі виправдане тим, що гнучке програмне забезпечення дає можливість навіть недосвідченому в програмуванні ЕОМ досліднику вирішити конкретне завдання в найкоротший час.

Умовно цифрові системи збору й обробки даних АЕ можна розділити на дві категорії: системи з великою кількістю каналів прийому (32-256), призначені в основному для контролю цілісності методом АЕ великогабаритних конструкцій, і системи з меншим числом каналів (4-32), призначені для дослідницьких цілей. Як правило, перші включають в себе досить потужні ЕОМ із розгалуженою периферією, однак такі системи громіздкі і багато коштують. Прикладом такої системи може служити апаратура АФ33-АФ36, розроблена в НПО «Волна». Так, прилад АФ36 має 256 каналів прийому і містить більше 10 шаф розмірами 80×100×180. Він укомплектований програмою збору даних з обмеженими можливостями спостереження за процесом АЕ і програмним забезпеченням післяекспериментальної обробки.

В даний час випускається достатня кількість різних багатоканальних систем [7], метою яких є не тільки реєстрація і аналіз сигналів АЕ, але і визначення місця розташування джерела АЕ. Спектр використовуваних апаратних засобів реєстрації і обробки АЕ широкий і різноманітний. Застосовуються як промислові системи і блоки, що випускаються фірмами та організаціями: «Dunegan/Endevco» (США), «Briel and Kjer» (Данія), «Trodyne» (США), «Setim» (Франція), «AVT» (Англія), «Physical Acoustics Corporation» (США), «ВНИИК» (Молдова), «НПО Дальстандарт» (Росія), «ІЕЗ ім. Е.О. Патона» (Україна), так і ті, що виготовляються експериментаторами. Російським товариством СКБ «Спецтехника» випускаються ЛОКУС-3080, 4160, ЛОКАН, СПАРТАН, АВГУР, МАЛАХІТ-1 і ін. для контролю нафтогазових трубопроводів, суднобудування (витоки, тріщини, корозія, деформація). Однак, вітчизняна промисловість на теперешній час не випускає комп'ютеризованого обладнання, спроможного отримувати, відбраковувати, накопичувати і аналізувати інфор-

мацію АЕ, виконувати локацію на об'єктах різноманітної форми. Мобільних, компактних і порівняно дешевих систем для дослідницьких цілей у даний час в нашій країні немає.

В літературному огляді висвітлено і проаналізовано основні напрямки сучасних досліджень з НК і діагностування технічного стану деталей і конструкцій, зокрема методом акустичної емісії. Однак експериментальних робіт, присвячених безпосередньо розробці методів і засобів з АЕ-контролю, що можуть бути впроваджені у виробництво, порівняно мало. Зокрема, недостатньо вивчена можливість і повністю відсутні методи контролю і діагностування технічного стану зварних з'єднань в процесі їх виготовлення. Зовсім не вивчена можливість застосування методу АЕ і зокрема локації для визначення місць неякісних паяних з'єднань друкованих плат електронних систем. Існуючі публікації і методичні рекомендації загального характеру із застосування методу АЕ для діагностики посудин, що працюють під тиском, не дозволяють на сьогоднішній день впровадити його як офіційний метод НК поряд з ультразвуковою, капілярною дефектоскопією та ін.

В Україні метод АЕ активно розвивається останні 15-20 років, і поки що використовуються далеко не всі його можливості. Дослідники, в силу технічних можливостей апаратури, нерідко обмежуються одним-двома акустичними параметрами, не враховуючи таку важливу інформацію, як місцеположення джерела АЕ. За станом на 01.01.2000 р. в Україні експлуатувалось лише одинадцять зареєстрованих акустико-емісійних систем. Вартість таких багатоканальних систем складає десятки тисяч доларів. Наприклад, вартість останньої моделі вимірювального комплексу "ЕМА" виробництва ІЕЗ ім. Е.О. Патона складає близько 120 тис. доларів.

За даними Подільського експертно-технічного центра Держнаглядохоронпраці, 80% контрольованих ними об'єктів відпрацювали свій ресурс і їх заміна не планується. Для продовження експлуатації таких об'єктів необхідні надійні методи і засоби НК і діагностики їх технічного стану. Однак лише незначна частина промислових підприємств і експертно-технічних служб Держнаглядохоро-

ронпраці спроможні придбати коштовні засоби АЕ-контролю. За цих причин актуальною задачею є створення відносно недорогого, простого в експлуатації комп'ютерного АЕ-засобу. Така спроба була зроблена, наприклад, спеціалістами ОКБМ (Нижній Новгород), які створили комплекс на базі приладу АФ-15 і персонального комп'ютеру [64]. Недоліком комплексу є спроможність виконувати лише лінійну локацію, а також збереження багатьох недоліків приладу АФ-15 (мала швидкодія, втрата корисних сигналів АЕ).

1.7. Висновки до розділу

1. Для неруйнівного контролю і діагностування технічного деталей і конструкцій запропоновано використовувати метод акустичної емісії. Він дозволяє виявляти дефекти, що розвиваються, тобто небезпечні дефекти, і стежити за динамікою їхнього розвитку в реальному часі.
2. Розглянуто відомі акустико-емісійні методики технічної діагностики деталей і конструкцій, у результаті чого показано необхідність проведення експериментальних досліджень методом АЕ для виявлення інформативних параметрів АЕ, їхнього зв'язку з механічними характеристиками суцільних, паяних і зварних деталей та конструкцій під впливом різноманітних неруйнівних навантажень, для створення методик неруйнівного діагностування їх технічного стану.
3. Встановлено, існуючі акустико-емісійні способи локації дозволяють визначати координати дефектів з недостатньою точністю, особливо в конструкціях з різнорідних матеріалів. Показано необхідність створення нових акустико-емісійних способів визначення координат небезпечних дефектів деталей і конструкцій різноманітної форми.
4. Показано необхідність розробки та створення дослідницького комп'ютерного засобу для реалізації акустико-емісійних методик діагностування з визначенням координат дефектів об'єктів різноманітної форми.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА СПОСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Виходячи з поділу контрольованих об'єктів за формою, в літературі [5-7] прийнято поділяти локацію джерел АЕ на лінійну, площинну і просторову (об'ємну), а саме:

- для стрижнів, тобто для об'єктів, в яких один із розмірів в 5 і більше разів перевищує два інші, достатньо визначити лінійну координату дефекту, застосовуючи лінійну локацію джерел АЕ. Прикладами таких об'єктів можуть служити ділянки трубопроводів, цистерни, стріли вилиту вантажопідйомних кранів.
- діагностуючи оболонки, і їх частинний випадок – пластини, необхідно знати не менше двох координат дефекту - тут застосовується площинна локація джерел АЕ. Слід зазначити, що під площинною розуміється не тільки локація на плоских об'єктах, але і на об'єктах будь-якої іншої форми, якщо контролюється тільки їх поверхня. В цьому випадку результати локації представляються у вигляді розгорток контрольованих криволінійних поверхонь. Глибина залягання дефекту, як правило, не визначається.
- для масивних об'єктів необхідно знати три просторові координати залягання дефекту, для чого застосовується просторова локація.

В розділі приведено теоретичні розв'язки задач локації джерел АЕ, які можуть бути реалізовані за допомогою приладів АФ-15. На відміну від відомих способів, замість декількох різниць часу приходу (РЧП) сигналу АЕ відносно якогось одного з ПЕП (див. п. 1.5), використовуються незалежні РЧП, які реєструються кожним двоканальним приладом АФ-15. Кількість РЧП дорівнює кількості задіяних у вимірі приладів АФ-15.

2.1. Лінійна локація джерел акустичної емісії

Задача лінійної локації джерел АЕ розв'язується за допомогою одного приладу АФ-15, реєструючи РЧП до двох ПЕП [65].

Нехай джерело сигналів АЕ знаходиться в точці K , ПЕП – в точках A і B , як показано на рис. 2.1.

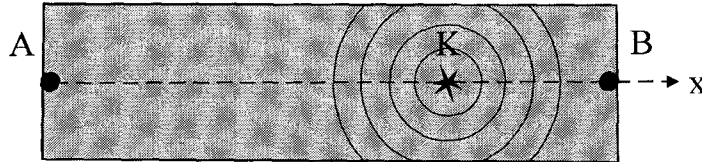


Рис. 2.1. Схема лінійної локації:

т. K – джерело АЕ;

A і B – п'єзoeлектричні перетворювачі.

РЧП τ сигналу АЕ до ПЕП A і B пов'язана з різницею їх відстаней від джерела співвідношенням

$$AK - BK = \tau v, \quad (2.1)$$

де v – швидкість поширення хвиль АЕ в матеріалі досліджуваного об'єкта.

Очевидним є співвідношення

$$AK + BK = AB. \quad (2.2)$$

Розв'язуючи сумісно рівняння (2.1) і (2.2), отримуємо такі формули для визначення координат джерела АЕ:

$$\begin{cases} AK = \frac{AB}{2} + \frac{\tau v}{2}, \\ BK = \frac{AB}{2} - \frac{\tau v}{2}. \end{cases}$$

Отже, лінійна координата джерела АЕ визначається як

$$x_k = \frac{AB}{2} + \frac{\tau v}{2}. \quad (2.3)$$

Застосування лінійної локації обмежено формами досліджуваних об'єктів. Наприклад, локація сигналів АЕ при діагностиці циліндричної цистер-

ни дозволить визначити лише координату поперечного перетину цистерни з дефектом металу. Для більш точного визначення місця дефекту в цьому випадку необхідне застосування площинної локації джерел АЕ.

2.2. Площинна локація джерел акустичної емісії

Для розв'язку задачі площинної локації було вирішено приєднати та узгодити з персональним комп'ютером (ПК) два прилади АФ-15, отримуючи при цьому чотири канали прийому сигналів АЕ і відповідно дві РЧП [66, 67].

В роботі вперше шляхом реєстрації двох різниць часу приходу сигналу АЕ до двох незалежних пар ПЕП розв'язано задачу площинної локації джерел АЕ. Схема розташування ПЕП представлена на рис. 2.2. Для розв'язку задачі площинної локації в Декартових координатах вибрана локаційна п'єзоантена, що містить чотири ПЕП A , B , C і D , розташовані попарно навхрест на осях координат. Таке розташування ПЕП дозволяє, як буде показано пізніше, значно спростити процес математичної обробки сигналів АЕ.

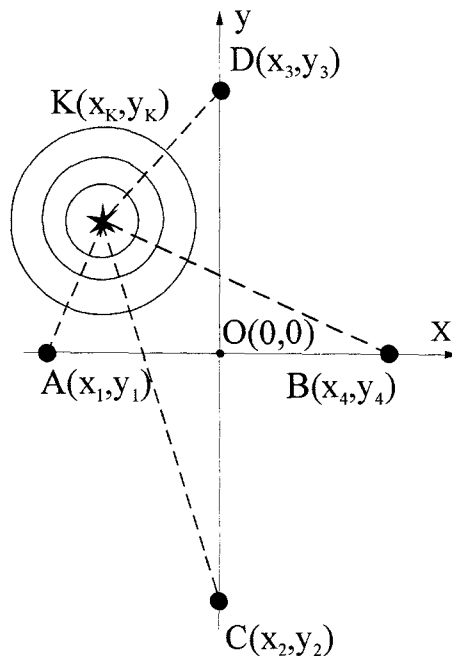


Рис. 2.2. Схема розташування ПЕП для площинної локації джерел АЕ:

т. K – джерело АЕ;

A , B , C і D – п'єзоелектричні перетворювачі.

Розв'язок задачі локації зводиться до розв'язку системи двох рівнянь

$$\begin{cases} BK - AK = \tau_1 \nu, \\ CK - DK = \tau_2 \nu. \end{cases} \quad (2.4)$$

Тут τ_1 - РЧП сигналів АЕ до ПЕП A і B , τ_2 - РЧП до ПЕП C і D , ν - швидкість поширення хвиль АЕ в матеріалі контрольованої площини. Відстані AK , BK , CK , DK в координатах виражаються наступним чином:

$$\begin{aligned} AK &= \sqrt{(x_1 - x_K)^2 + (y_1 - y_K)^2}, \\ BK &= \sqrt{(x_4 - x_K)^2 + (y_4 - y_K)^2}, \\ CK &= \sqrt{(x_2 - x_K)^2 + (y_2 - y_K)^2}, \\ DK &= \sqrt{(x_3 - x_K)^2 + (y_3 - y_K)^2}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

де x_i, y_i - Декартові координати ПЕП ($i=1\dots4$), x_K, y_K - шукані координати джерела АЕ. Після підстановки значень AK, BK, CK, DK в (2.4), отримаємо

$$\begin{cases} \sqrt{(x_4 - x_K)^2 + (y_4 - y_K)^2} - \sqrt{(x_1 - x_K)^2 + (y_1 - y_K)^2} = \tau_1 \nu, \\ \sqrt{(x_2 - x_K)^2 + (y_2 - y_K)^2} - \sqrt{(x_3 - x_K)^2 + (y_3 - y_K)^2} = \tau_2 \nu. \end{cases}$$

Оскільки ПЕП розташовані симетрично відносно осей координат, маємо $x_2 = x_3 = y_1 = y_4 = 0$, $x_1 = -x_4$, $y_2 = -y_3$ і відповідно

$$\begin{cases} \sqrt{(x_4 - x_K)^2 + y_K^2} - \sqrt{(x_4 + x_K)^2 + y_K^2} = \tau_1 \nu, \\ \sqrt{x_K^2 + (y_2 - y_K)^2} - \sqrt{x_K^2 + (y_2 + y_K)^2} = \tau_2 \nu. \end{cases} \quad (2.6)$$

Як відомо з аналітичної геометрії [68], рівняння системи (2.6) є рівняннями гіпербол в Декартовій системі координат. Після перенесення перших радикалів обох рівнянь в їх праву частину, піднесення обох рівнянь до квадрату, отримаємо

$$\begin{cases} \pm \frac{\tau_1 \nu}{2} \sqrt{(x_4 + x_K)^2 + y_K^2} = x_4 x_K + \left(\frac{\tau_1 \nu}{2}\right)^2, \\ \pm \frac{\tau_2 \nu}{2} \sqrt{x_K^2 + (y_2 + y_K)^2} = y_2 y_K + \left(\frac{\tau_2 \nu}{2}\right)^2. \end{cases}$$

Після піднесення ще раз цих рівнянь до квадрату і приведення подібних членів, маємо

$$\begin{cases} x_K^2 \left(x_4^2 - \left(\frac{\tau_1 \nu}{2} \right)^2 \right) - y_K^2 \left(\frac{\tau_1 \nu}{2} \right)^2 = \left(\frac{\tau_1 \nu}{2} \right)^2 x_4^2 - \left(\frac{\tau_1 \nu}{2} \right)^4, \\ y_K^2 \left(y_2^2 - \left(\frac{\tau_2 \nu}{2} \right)^2 \right) - x_K^2 \left(\frac{\tau_2 \nu}{2} \right)^2 = \left(\frac{\tau_2 \nu}{2} \right)^2 y_2^2 - \left(\frac{\tau_2 \nu}{2} \right)^4. \end{cases}$$

Після ділення рівнянь на відповідні праві частини, отримаємо систему канонічних рівнянь двох гіпербол:

$$\begin{cases} \frac{x_K^2}{\left(\frac{\tau_1 \nu}{2} \right)^2} - \frac{y_K^2}{x_4^2 - \left(\frac{\tau_1 \nu}{2} \right)^2} = 1, \\ \frac{y_K^2}{\left(\frac{\tau_2 \nu}{2} \right)^2} - \frac{x_K^2}{y_2^2 - \left(\frac{\tau_2 \nu}{2} \right)^2} = 1. \end{cases} \quad (2.7)$$

Перше рівняння системи описує гіперболу, для якої вісь Oy є уявною, а друге – гіперболу, для якої уявною є вісь Ox . Але ці дві гіперболи не є спряженими і тому існує чотири точки їх перетину. Розв'язуючи систему рівнянь (2.7) відносно невідомих x_K^2, y_K^2 , знайдемо координати точок перетину гіпербол:

$$\begin{cases} x_K = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau_1^2 \nu^2 \cdot (4y_2^2 - \tau_2^2 \nu^2) \cdot (4x_4^2 - \tau_1^2 \nu^2 + \tau_2^2 \nu^2)}{(4x_4^2 - \tau_1^2 \nu^2) \cdot (4y_2^2 - \tau_2^2 \nu^2) - \tau_1^2 \tau_2^2 \nu^4}}, \\ y_K = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau_2^2 \nu^2 \cdot (4x_4^2 - \tau_1^2 \nu^2) \cdot (4y_2^2 - \tau_2^2 \nu^2 + \tau_1^2 \nu^2)}{(4x_4^2 - \tau_1^2 \nu^2) \cdot (4y_2^2 - \tau_2^2 \nu^2) - \tau_1^2 \tau_2^2 \nu^4}}. \end{cases} \quad (2.8)$$

Підстановка отриманих розв'язків в систему рівнянь (2.6) показує, що її задовольняє лише певний один із розв'язків (2.8) в залежності від знаків τ_1 і τ_2 . Справді, аналізуючи рис. 2.2 і систему рівнянь (2.4), видно, що у випадку розташування джерела АЕ в II квадранті координатної площини завжди виконуються нерівності $BK > AK$, $CK > DK$, а тому маємо: $\tau_1 > 0$, $\tau_2 > 0$. Аналогічно можна доказати, що у випадку розташування джерела АЕ в I квадранті виконуються нерівності $\tau_1 < 0$, $\tau_2 > 0$, в III квадранті виконуються нерівності $\tau_1 > 0$, $\tau_2 < 0$, в IV квадранті виконуються нерівності: $\tau_1 < 0$, $\tau_2 < 0$. Отже, шляхом аналізу знаків певних вимірних значень РЧП можна визначити квадрант розміщення джерела АЕ і прийняти відповідні знаки для x_K, y_K в (2.8). В табл. 2.1 наведені дані для

вибору знаків x_K, y_K в залежності від знаків τ_1 і τ_2 .

Таблиця 2.1

Різниця часу приходу	$\tau_1 < 0$ $\tau_2 > 0$	$\tau_1 > 0$ $\tau_2 > 0$	$\tau_1 > 0$ $\tau_2 < 0$	$\tau_1 < 0$ $\tau_2 < 0$
Координати джерела АЕ	$x_K > 0$ $y_K > 0$	$x_K < 0$ $y_K > 0$	$x_K < 0$ $y_K < 0$	$x_K > 0$ $y_K < 0$
№ квадранта	I	II	III	IV

В запропонованих формулах (2.8) використано дві РЧП, що значно спрощує процес розрахунку координат дефектів на площині, і тим самим, на відміну від існуючих залежностей [5, 62], в яких використовуються три РЧП, досягається більша точність за рахунок меншої кількості вимірів і рівнянь. Використання формул (2.8) дозволяє знаходити координати джерел АЕ не тільки всередині приймальної антени, утвореної ПЕП, а і поза її межами.

В загальному випадку плоскі деталі і конструкції можуть мати форму (рис. 2.3 (а)), яка спотворює шляхи поширення сигналів АЕ при розташуванні ПЕП хрестоподібно на її поверхні. Найкоротший шлях поширення хвилі АЕ від джерела до ПЕП не є прямими лініями, що збільшує похибку визначення координат. В цьому випадку площинну локацію за наведеною вище схемою можна здійснювати, доповнюючи форму контрольованого об'єкта до прямокутника, як показано на рис. 2.3 (б) спеціальним хвилеводом і таким чином штучно створюючи прямолінійні шляхи поширення хвиль АЕ. Таким хвилеводом може бути, наприклад, пластина з того ж матеріалу, що і контрольована конструкція, або будь-яка металева пластина. ПЕП розташовуються на поверхні даної прямокутної пластини, яка стикається з контрольованою деталлю. Акустичний контакт між пластиною і контрольованою деталлю здійснюється за допомогою шару акустичного мастила, нанесеного по поверхні контакту.

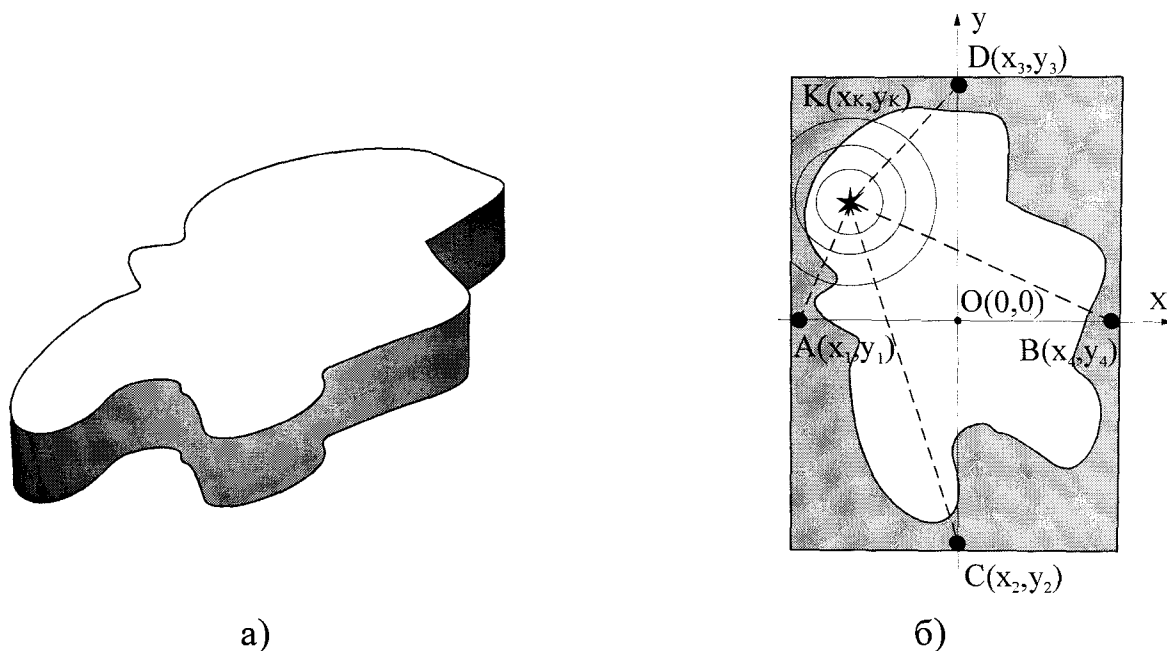


Рис. 2.3. Контрольований об'єкт а) і схема локації джерел АЕ б)

2.3. Просторова локація джерел акустичної емісії

Для розв'язку задачі просторової локації було вирішено приєднати та узгодити з ПК три прилади АФ-15, отримуючи при цьому шість каналів прийому сигналів АЕ і відповідно три РЧП.

В роботі вперше шляхом реєстрації трьох різниць часу приходу сигналу АЕ до шести ПЕП розв'язано задачу просторової локації дефектів деталей та конструкцій в загальному випадку, що дозволило проводити контроль і діагностування деталей у вигляді масивів.

Для розв'язку задачі із об'єму контрольованого об'єкту виділимо прямокутний паралелепіпед і розташуємо в точці перетину його осей симетрії початок Декартових координат. ПЕП розташуємо на осях координат на поверхні прямокутного паралелепіпеду, як показано на рис. 2.4.

За алгоритмом роботи, кожен з приладів АФ-15 фіксує різницю часу приходу (РЧП) τ_1 , τ_2 і τ_3 сигналів на свою пару ПЕП. Ці РЧП дають інформацію про різницю відстаней від джерела сигналів АЕ (точка K) до відповідних ПЕП.

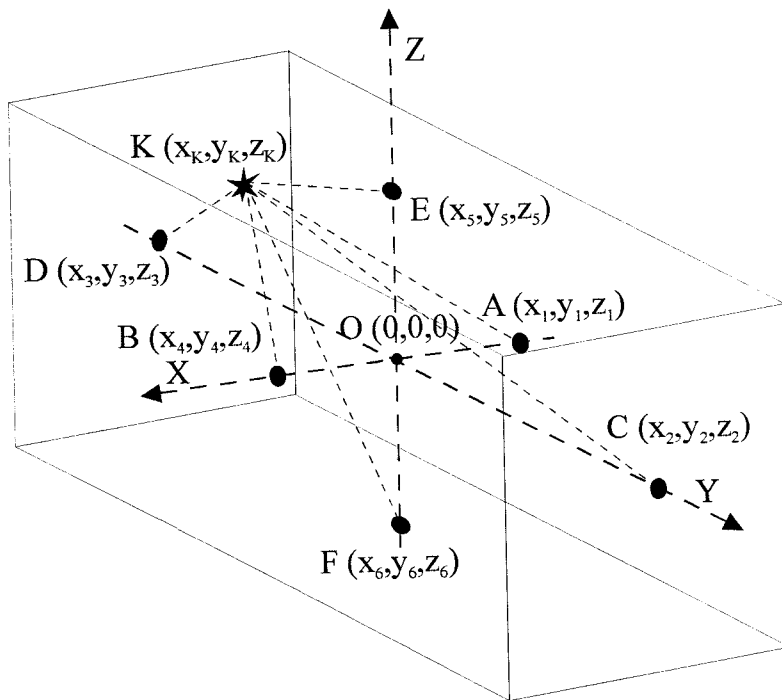


Рис. 2.4. Схема просторової локації:

т. K – джерело АЕ;

A, B, C, D, E і F – п'єзоелектричні перетворювачі.

РЧП τ_1, τ_2 і τ_3 сигналу АЕ до ПЕП, розміщених в точках A, B, C, D, E і F , зв'язані з різницею їх відстаней від джерела такими співвідношеннями

$$\begin{cases} BK - AK = \tau_1 \nu, \\ CK - DK = \tau_2 \nu, \\ EK - FK = \tau_3 \nu. \end{cases} \quad (2.9)$$

Тут τ_1 - РЧП сигналів АЕ до ПЕП A і B , τ_2 - РЧП до ПЕП C і D , τ_3 - РЧП до ПЕП E і F , ν - швидкість поширення хвиль АЕ в матеріалі об'єкта.

Довжини відрізків AK, BK, CK, DK, EK і FK в координатах можуть бути виражені наступним чином:

$$\begin{aligned} AK &= \sqrt{(x_1 - x_K)^2 + (y_1 - y_K)^2 + (z_1 - z_K)^2}, \\ BK &= \sqrt{(x_4 - x_K)^2 + (y_4 - y_K)^2 + (z_4 - z_K)^2}, \\ DK &= \sqrt{(x_3 - x_K)^2 + (y_3 - y_K)^2 + (z_3 - z_K)^2}, \\ CK &= \sqrt{(x_2 - x_K)^2 + (y_2 - y_K)^2 + (z_2 - z_K)^2}, \\ EK &= \sqrt{(x_5 - x_K)^2 + (y_5 - y_K)^2 + (z_5 - z_K)^2}, \\ FK &= \sqrt{(x_6 - x_K)^2 + (y_6 - y_K)^2 + (z_6 - z_K)^2}. \end{aligned}$$

Після підстановки значень довжин відрізків AK, BK, CK, DK, EK і FK в (2.9), отримаємо

$$\begin{cases} \sqrt{(x_4 - x_K)^2 + (y_4 - y_K)^2 + (z_4 - z_K)^2} - \sqrt{(x_1 - x_K)^2 + (y_1 - y_K)^2 + (z_1 - z_K)^2} = \tau_1 \nu, \\ \sqrt{(x_2 - x_K)^2 + (y_2 - y_K)^2 + (z_2 - z_K)^2} - \sqrt{(x_3 - x_K)^2 + (y_3 - y_K)^2 + (z_3 - z_K)^2} = \tau_2 \nu, \\ \sqrt{(x_5 - x_K)^2 + (y_5 - y_K)^2 + (z_5 - z_K)^2} - \sqrt{(x_6 - x_K)^2 + (y_6 - y_K)^2 + (z_6 - z_K)^2} = \tau_3 \nu, \end{cases} \quad (2.10)$$

де x_i, y_i, z_i - Декартові координати ПЕП ($i = 1 \dots 6$), x_K, y_K, z_K - шукані координати джерела АЕ. Враховуючи, що ПЕП розташовані симетрично відносно осей координат, маємо $x_2 = x_3 = x_5 = x_6 = y_1 = y_4 = y_5 = y_6 = z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = 0$, $x_4 = -x_1$, $y_2 = -y_3$, $z_5 = -z_6$, і система рівнянь (2.10) спрощується до вигляду

$$\begin{cases} \sqrt{(x_4 - x_K)^2 + y_K^2 + z_K^2} - \sqrt{(x_4 + x_K)^2 + y_K^2 + z_K^2} = \tau_1 \nu, \\ \sqrt{x_K^2 + (y_2 - y_K)^2 + z_K^2} - \sqrt{x_K^2 + (y_2 + y_K)^2 + z_K^2} = \tau_2 \nu, \\ \sqrt{x_K^2 + y_K^2 + (z_5 - z_K)^2} - \sqrt{x_K^2 + y_K^2 + (z_5 + z_K)^2} = \tau_3 \nu. \end{cases} \quad (2.11)$$

Використавши для (2.11) двічі дію піднесення до квадрата, отримуємо

$$\begin{cases} \left(1 - \left(\frac{2x_4}{\tau_1 \nu}\right)^2\right) x_K^2 + y_K^2 + z_K^2 = \left(\frac{\tau_1 \nu}{2}\right)^2 - x_4^2, \\ x_K^2 + \left(1 - \left(\frac{2y_2}{\tau_2 \nu}\right)^2\right) y_K^2 + z_K^2 = \left(\frac{\tau_2 \nu}{2}\right)^2 - y_2^2, \\ x_K^2 + y_K^2 + \left(1 - \left(\frac{2z_5}{\tau_3 \nu}\right)^2\right) z_K^2 = \left(\frac{\tau_3 \nu}{2}\right)^2 - z_5^2. \end{cases} \quad (2.12)$$

Застосуємо заміну: $1 - \left(\frac{2x_4}{\tau_1 \nu}\right)^2 = a$, $1 - \left(\frac{2y_2}{\tau_2 \nu}\right)^2 = b$, $1 - \left(\frac{2z_5}{\tau_3 \nu}\right)^2 = c$, $\left(\frac{\tau_1 \nu}{2}\right)^2 - x_4^2 = e$,

$\left(\frac{\tau_2 \nu}{2}\right)^2 - y_2^2 = f$, $\left(\frac{\tau_3 \nu}{2}\right)^2 - z_5^2 = g$. Система (2.12) лінійна відносно квадратів невідомих x_K^2, y_K^2, z_K^2 . Розв'яжемо її методом Крамера: $x_K^2 = \frac{\Delta_x}{\Delta}$, $y_K^2 = \frac{\Delta_y}{\Delta}$, $z_K^2 = \frac{\Delta_z}{\Delta}$,

де маємо визначники:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a & 1 & 1 \\ 1 & b & 1 \\ 1 & 1 & c \end{vmatrix} = abc - a - b - c + 2,$$

$$\Delta_x = \begin{vmatrix} e & 1 & 1 \\ f & b & 1 \\ g & 1 & c \end{vmatrix} = bce + f + g - bg - cf - e,$$

$$\Delta_y = \begin{vmatrix} a & e & 1 \\ 1 & f & 1 \\ 1 & g & c \end{vmatrix} = acf + e + g - ce - ag - f,$$

$$\Delta_z = \begin{vmatrix} a & 1 & e \\ 1 & b & f \\ 1 & 1 & g \end{vmatrix} = abg + f + e - be - af - g.$$

Вихідні формули обчислення координат джерела АЕ одержимо такими:

$$\begin{cases} x_K = \pm \sqrt{\frac{bce - bg - cf + f + g - e}{abc - a - b - c + 2}}, \\ y_K = \pm \sqrt{\frac{acf - ag - ce + e + g - f}{abc - a - b - c + 2}}, \\ z_K = \pm \sqrt{\frac{abg - af - be + e + f - g}{abc - a - b - c + 2}}. \end{cases} \quad (2.13)$$

Рівняння системи (2.11) є рівняннями гіперболоїд. Двочисність розв'язків (2.13) обумовлена тим, що в загальному випадку три гіперболоїди можуть мати вісім точок перетину. Підстановка отриманих розв'язків в систему рівнянь (2.10) показує, що її задовольняє лише певний один із розв'язків (2.13) в залежності від знаків τ_1, τ_2 і τ_3 . Аналогічно описаному в п. 2.2, аналізуючи рис. 2.4, і систему рівнянь (2.9) знайдемо, що кожному з випадків розміщення джерела АЕ в одному з восьми октантів просторової системи координат відповідає певна єдина комбінація знаків τ_1, τ_2 і τ_3 . Отже, шляхом аналізу знаків певних вимірних значень РЧП, можна визначити октант розміщення джерела АЕ і прийняти відповідні знаки для x_K, y_K і z_K в (2.13). В табл. 2.2 наведені дані для вибору знаків x_K, y_K і z_K в залежності від знаків τ_1, τ_2 і τ_3 .

Таблиця 2.2

Значення координат джерела АЕ x_K, y_K і z_K в залежності від τ_1, τ_2 і τ_3

РЧП	$\tau_1 < 0 \quad \tau_2 < 0$	$\tau_1 < 0 \quad \tau_2 > 0$	$\tau_1 > 0 \quad \tau_2 < 0$	$\tau_1 > 0 \quad \tau_2 > 0$
$\tau_3 < 0$	$x_K > 0 \quad y_K > 0 \quad z_K > 0$ I октант	$x_K < 0 \quad y_K > 0 \quad z_K > 0$ IV октант	$x_K < 0 \quad y_K < 0 \quad z_K > 0$ II октант	$x_K > 0 \quad y_K < 0 \quad z_K > 0$ III октант
$\tau_3 > 0$	$x_K > 0 \quad y_K > 0 \quad z_K > 0$ V октант	$x_K > 0 \quad y_K > 0 \quad z_K > 0$ VIII октант	$x_K > 0 \quad y_K > 0 \quad z_K > 0$ VI октант	$x_K > 0 \quad y_K > 0 \quad z_K > 0$ VII октант
Координати джерела АЕ				

Якщо $\tau_1=0$, або $\tau_2=0$, або $\tau_3=0$, що відповідає випадку, коли джерело АЕ-сигналів знаходиться на однаковій відстані від двох ПЕП однієї пари, система (2.17) немає розв'язку. Наприклад, якщо $\tau_1=0$, то $a = \infty$ і з (2.17) отримаємо $x_K=0$, що відповідає дійсності і задача локації зводиться до плоскої. Аналогічно можна показати, що при $\tau_2=0$, $b = \infty$ і $y_K=0$, при $\tau_3=0$, $c = \infty$ і $z_K=0$. Отже, в цьому випадку для того, щоб система рівнянь мала розв'язки, маємо право замість нуля РЧП присвоїти значення, близьке до 0 і таке, що не впливає на точність локації.

Це значення РЧП вибирається з наступних міркувань. В більшості випадків швидкість поширення ν має розмірність [мм/мкс], а τ - [мкс]. Враховуючи те, що апаратна похибка виміру РЧП складає близько 3 мкс, значення $\tau=0,001$ мкс не впливає на точність локації і може прийматись в розрахунках замість $\tau=0$.

Використання формул (2.17) дозволяє знаходити координати джерел АЕ не тільки всередині прямокутного паралелепіпеда, утвореного ПЕП, а і поза його межами. Розроблені раніше схеми лінійної і площинної локації є частинними випадками даної схеми просторової локації.

2.4 Просторова локація джерел акустичної емісії на сфері

Для розв'язку задачі локації АЕ-джерел при контролі сферичних об'єктів [19] в Декартових координатах використовуються просторова система координат x, y, z . Для зручності початок координат збігається з центром сфери. ПЕП A, B, C, D, E та F розташовуються на поверхні сфери радіусом R на осях координат x, y та z , як показано на рис. 2.5. Шість ПЕП розділені на три групи, кожна група контролює відповідну вісь координат. Координати ПЕП з врахуванням їх симетричного розташування відносно осей координат вказані на рис. 2.5. Оскільки найкоротша відстань між будь-якими двома точками на сфері визначається єдиним чином геодезичними лініями, для розв'язку задачі локації необхідно

розв'язати систему рівнянь (2.9), замінюючи відстані від дефекту до ПЕП на відповідні дуги $\overset{\frown}{AK}, \overset{\frown}{BK}, \overset{\frown}{CK}, \overset{\frown}{DK}, \overset{\frown}{EK}, \overset{\frown}{FK}$.

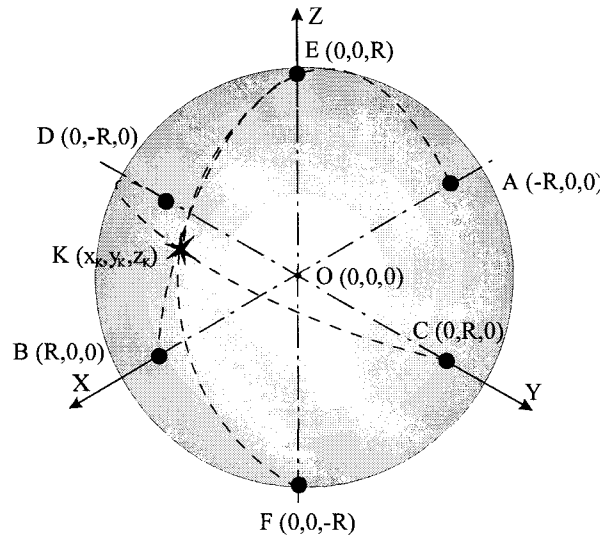


Рис. 2.5. Схема просторової локації джерел АЕ на сферичних об'єктах:

т. K – джерело АЕ;

A, B, C, D, E і F – п'єзоелектричні перетворювачі.

$$\begin{cases} \overset{\frown}{BK} - \overset{\frown}{AK} = \tau_1 \nu, \\ \overset{\frown}{CK} - \overset{\frown}{DK} = \tau_2 \nu, \\ \overset{\frown}{EK} - \overset{\frown}{FK} = \tau_3 \nu. \end{cases} \quad (2.14)$$

Тут $\overset{\frown}{AK}, \overset{\frown}{BK}, \overset{\frown}{CK}, \overset{\frown}{DK}, \overset{\frown}{EK}, \overset{\frown}{FK}$ - довжини дуг, що з'єднують джерело АЕ з відповідними ПЕП, τ_1 - РЧП сигналів АЕ до ПЕП A та B , τ_2 - РЧП до ПЕП C та D , τ_3 - РЧП до ПЕП E та F , ν - швидкість поширення ультразвуку в матеріалі досліджуваного об'єкту. Запишемо (2.14) у вигляді

$$\begin{cases} \overset{\frown}{BK} + \overset{\frown}{AK} - 2\overset{\frown}{AK} = \tau_1 \nu, \\ \overset{\frown}{CK} + \overset{\frown}{DK} - 2\overset{\frown}{DK} = \tau_2 \nu, \\ \overset{\frown}{EK} + \overset{\frown}{FK} - 2\overset{\frown}{FK} = \tau_3 \nu. \end{cases} \quad (2.15)$$

Враховуючи, що $\overset{\frown}{BK} + \overset{\frown}{AK} = \overset{\frown}{CK} + \overset{\frown}{DK} = \overset{\frown}{EK} + \overset{\frown}{FK} = \pi R$, отримаємо

$$\begin{cases} \pi R - 2\overset{\smile}{AK} = \tau_1 \nu, \\ \pi R - 2\overset{\smile}{DK} = \tau_2 \nu, \\ \pi R - 2\overset{\smile}{FK} = \tau_3 \nu. \end{cases} \quad (2.16)$$

Довжина дуги $\overset{\smile}{AK} = R(\pi - \alpha)$, $\overset{\smile}{DK} = R(\pi - \beta)$, $\overset{\smile}{FK} = R(\pi - \gamma)$, де кут α, β, γ - центральні кути секторів відповідно до осей x, y, z , як показано на рис. 2.6.

Кут $\pi - \alpha = 2 \arcsin \frac{AK}{2R}$, де AK - довжина хорди, що дорівнює

$$AK = \sqrt{(x_K + R)^2 + y_K^2 + z_K^2}. \quad \text{Отже} \quad \overset{\smile}{AK} = 2R \arcsin \frac{\sqrt{(x_K + R)^2 + y_K^2 + z_K^2}}{2R}. \quad \text{Аналогічно,}$$

$$\overset{\smile}{DK} = 2R \arcsin \frac{\sqrt{x_K^2 + (y_K + R)^2 + z_K^2}}{2R}, \quad \overset{\smile}{FK} = 2R \arcsin \frac{\sqrt{x_K^2 + y_K^2 + (z_K + R)^2}}{2R}.$$

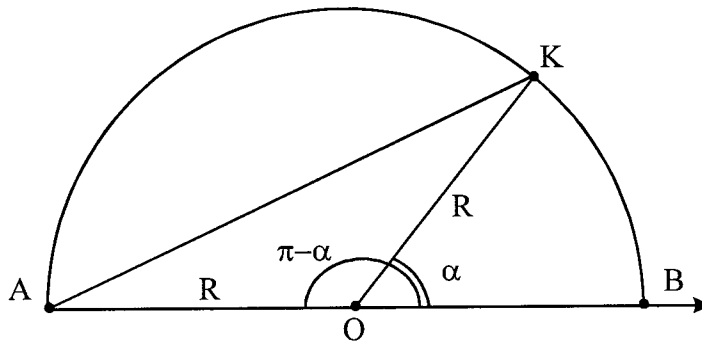


Рис. 2.6. Зображення півперетину сфери:

т. K - джерело АЕ;

A і B - п'єзоелектричні перетворювачі.

Після підстановки цих значень довжини дуг $\overset{\smile}{AK}, \overset{\smile}{DK}$ і $\overset{\smile}{FK}$ в систему рівнянь (2.16) отримаємо

$$\begin{cases} \pi R - 4R \arcsin \frac{\sqrt{(x_K + R)^2 + y_K^2 + z_K^2}}{2R} = \tau_1 \nu, \\ \pi R - 4R \arcsin \frac{\sqrt{x_K^2 + (y_K + R)^2 + z_K^2}}{2R} = \tau_2 \nu, \\ \pi R - 4R \arcsin \frac{\sqrt{x_K^2 + y_K^2 + (z_K + R)^2}}{2R} = \tau_3 \nu. \end{cases}$$

Після нескладних перетворень, отримаємо

$$\begin{cases} (x_K + R)^2 + y_K^2 + z_K^2 = 4R^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\tau_1 \nu}{4R}\right), \\ x_K^2 + (y_K + R)^2 + z_K^2 = 4R^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\tau_2 \nu}{4R}\right), \\ x_K^2 + y_K^2 + (z_K + R)^2 = 4R^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\tau_3 \nu}{4R}\right). \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_K^2 + y_K^2 + z_K^2 + 2x_K R + R^2 = 4R^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\tau_1 \nu}{4R}\right), \\ x_K^2 + y_K^2 + z_K^2 + 2y_K R + R^2 = 4R^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\tau_2 \nu}{4R}\right), \\ x_K^2 + y_K^2 + z_K^2 + 2z_K R + R^2 = 4R^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\tau_3 \nu}{4R}\right). \end{cases}$$

Врахуємо, що $x_K^2 + y_K^2 + z_K^2 = R^2$, тоді отримуємо систему рівнянь у вигляді

$$\begin{cases} 2x_K R = 4R^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\tau_1 \nu}{4R}\right) - 2R^2, \\ 2y_K R = 4R^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\tau_2 \nu}{4R}\right) - 2R^2, \\ 2z_K R = 4R^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\tau_3 \nu}{4R}\right) - 2R^2. \end{cases}$$

Після нескладних перетворень, маємо

$$\begin{cases} x_K = -R(1 - 2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\tau_1 \nu}{4R}\right)), \\ y_K = -R(1 - 2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\tau_2 \nu}{4R}\right)), \\ z_K = -R(1 - 2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\tau_3 \nu}{4R}\right)). \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_K = -R \cos 2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\tau_1 \nu}{4R}\right), \\ y_K = -R \cos 2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\tau_2 \nu}{4R}\right), \\ z_K = -R \cos 2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\tau_3 \nu}{4R}\right). \end{cases}$$

Вихідні формули для обчислення координат дефектів на сферичній поверхні мають вигляд (2.17).

$$\begin{cases} x_K = -R \sin\left(\frac{\tau_1 \nu}{2R}\right), \\ y_K = -R \sin\left(\frac{\tau_2 \nu}{2R}\right), \\ z_K = -R \sin\left(\frac{\tau_3 \nu}{2R}\right). \end{cases} \quad (2.17)$$

Знаки вимірних РЧП τ_1, τ_2 і τ_3 впливають на знаки синусів у виразах (2.21), а цим самим і на знаки координат x_K, y_K і z_K .

2.5 Точність локації джерел акустичної емісії

Точність непрямих вимірів, якими є визначення координат джерел АЕ, визначалась теоретично і перевірялась експериментально. В подальших розрахунках не приймалась до уваги точність вимірювань відстані між ПЕП, яка використовується для знаходження координат джерел АЕ, тому що похибка цих вимірювань набагато менша за похибку визначення координат джерел АЕ.

2.5.1 Точність визначення лінійних координат. Для оцінки точності визначення лінійних координат джерел АЕ проаналізуємо формулу (2.3), звідки видно, що випадкова абсолютна похибка Δx визначення лінійних координат складається із випадкових похибок $\Delta \tau$ реєстрації РЧП і похибки $\Delta \nu$ прийнятого в розрахунках значення швидкості поширення хвиль АЕ. Оскільки лінійна координата $x=f(\tau, \nu)$ є функцією РЧП і швидкості поширення хвиль АЕ, для визначення абсолютної похибки вимірювання лінійної координати джерела АЕ використаємо загальний метод [69-71], який полягає у визначенні частинних похідних, а саме

$$\Delta x \approx \frac{\partial f}{\partial \tau} \Delta \tau + \frac{\partial f}{\partial \nu} \Delta \nu = \frac{1}{2}(\nu \Delta \tau + \tau \Delta \nu), \quad (2.18)$$

де τ, ν - середні значення РЧП і швидкості поширення хвиль АЕ, які застосовуються у вимірах. Виходячи із технічних характеристик приладу АФ-15 [65], вимірювані РЧП лежать у межах 0...800 мкс, а швидкість поширення у межах 0...6

мм/мкс. Звідси, середніми значеннями будуть $\tau=400$ мкс, $\nu=3$ мм/мкс.

Абсолютна похибка реєстрації РЧП за технічними характеристиками приладу АФ-15 дорівнює $\Delta\tau=3$ мкс. Швидкість поширення хвиль АЕ для більшості матеріалів є табличною величиною, тому похибку прийнятого в розрахунках значення швидкості поширення хвиль АЕ приймемо $\Delta\nu=0,1$ мм/мкс, що узгоджується із значенням десятих долей табличних значень швидкості поширення хвиль АЕ. Відносну похибку ε визначення лінійних координат визначимо як

$$\varepsilon = \left| \frac{\Delta x}{x_0} \right|, \quad (2.19)$$

де x_0 – дійсна лінійна координата. Оскільки дійсна лінійна координата наперед невідома, то в розрахунках з високим ступенем точності приймемо

$$\varepsilon = \left| \frac{\Delta x}{x_K} \right|, \quad (2.20)$$

де x_K – лінійна координата джерела АЕ, обчислена за формулою (2.3).

В таблиці Б.1 (додаток Б) приведені значення відносних похибок визначення лінійних координат джерел АЕ, обчислені з використанням формул (2.18) і (2.20) при відстані між ПЕП 2400 мм (максимальна відстань, для якої можливе вимірювання РЧП при середній швидкості хвиль АЕ $\nu=3$ мм/мкс) для різних значень швидкості поширення хвиль АЕ і використаних РЧП. На рис. Б.1 представлені відповідні залежності. Встановлено, що при $\tau \geq 250$ мкс відносна похибка зменшується із збільшенням швидкості поширення хвиль АЕ, а при $\tau < 250$ мкс – навпаки зростає.

2.5.2 Точність визначення площинних координат. Оцінемо відносну похибку визначення площинних координат джерел АЕ, аналізуючи формули (2.8). Оскільки площинні координати джерела АЕ є функцією двох РЧП і швидкості поширення хвиль АЕ, $x=f_1(\tau_1, \tau_2, \nu)$, і $y=f_2(\tau_1, \tau_2, \nu)$, маємо

$$\begin{cases} \Delta x \approx \frac{\partial f_1}{\partial \tau_1} \Delta \tau + \frac{\partial f_1}{\partial \tau_2} \Delta \tau + \frac{\partial f_1}{\partial v} \Delta v, \\ \Delta y \approx \frac{\partial f_2}{\partial \tau_1} \Delta \tau + \frac{\partial f_2}{\partial \tau_2} \Delta \tau + \frac{\partial f_2}{\partial v} \Delta v. \end{cases} \quad (2.21)$$

Радіус кола похибок визначення площинних координат $\Delta x y$ чисельно буде дорівнювати відрізку KK' , показаному на рис. 2.7, отже маємо $\Delta x y = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$.

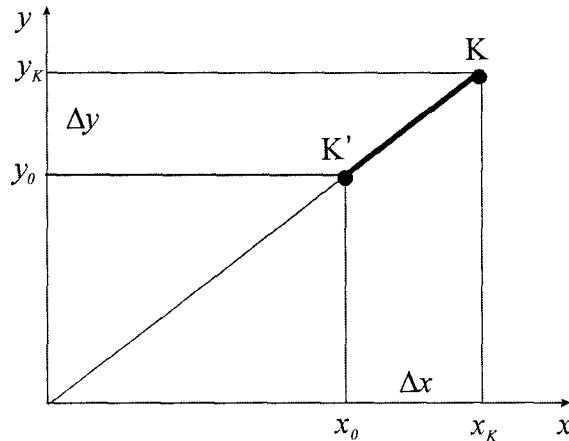


Рис. 2.7. Радіус кола похибок площинної локації:

т. K' – дійсне джерело АЕ;

т. K – обчислене джерело АЕ.

Відносну похибку ε_{xy} визначення площинних координат знайдемо як

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}}{\sqrt{x_K^2 + y_K^2}}, \quad (2.22)$$

де x_K, y_K – обчислені за формулою (2.8) координати джерела АЕ відповідно по осі x і y , оскільки дійсні координати невідомі.

В загальному випадку $\Delta x \neq \Delta y$, $\varepsilon_x \neq \varepsilon_y$, оскільки $\tau_1 \neq \tau_2$, тому аналітична оцінка похибки визначення координат джерел АЕ на площині є досить складною задачею, яка не вирішувалась в даній роботі. Взяти для спрощення у формулі (2.22) максимальні значення РЧП $\tau_1 = \tau_2 = 800$ мкс і $v = 6$ мм/мкс, маємо $\Delta x = \Delta y$ і $\varepsilon_{xy} = \varepsilon_x$. Отже, відносну похибку визначення площинних координат джерел АЕ знайдемо за формулою (2.20), обчисливши попередньо Δx за формулами (2.21) і (2.8).

2.5.3 Точність визначення просторових координат. Аналогічно знаходилась похибка визначення просторових координат джерел АЕ, аналізуючи формули (2.13). Оскільки площинні координати джерела АЕ є функцією трьох РЧП і швидкості поширення хвиль АЕ, $x=f_1(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \nu)$, $y=f_2(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \nu)$ і $z=f_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \nu)$, маємо

$$\begin{cases} \Delta x \approx \frac{\partial f_1}{\partial \tau_1} \Delta \tau + \frac{\partial f_1}{\partial \tau_2} \Delta \tau + \frac{\partial f_1}{\partial \tau_3} \Delta \tau + \frac{\partial f_1}{\partial \nu} \Delta \nu \\ \Delta y \approx \frac{\partial f_2}{\partial \tau_1} \Delta \tau + \frac{\partial f_2}{\partial \tau_2} \Delta \tau + \frac{\partial f_2}{\partial \tau_3} \Delta \tau + \frac{\partial f_2}{\partial \nu} \Delta \nu \\ \Delta z \approx \frac{\partial f_3}{\partial \tau_1} \Delta \tau + \frac{\partial f_3}{\partial \tau_2} \Delta \tau + \frac{\partial f_3}{\partial \tau_3} \Delta \tau + \frac{\partial f_3}{\partial \nu} \Delta \nu \end{cases} \quad (2.23)$$

Радіус кола похибок визначення просторових координат Δx_{yz} буде дорівнювати $\Delta x_{yz} = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$. Відносну похибку ε_{xyz} визначення просторових координат знайдемо за формулою

$$\varepsilon_{xyz} = \frac{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}}{\sqrt{x_K^2 + y_K^2 + z_K^2}}, \quad (2.24)$$

де x_K , y_K і z_K – обчислені координати джерела АЕ відповідно по осі x , y , і z за формулами (2.13), оскільки дійсні координати невідомі. Взявши для спрощення у (2.23) максимальні значення РЧП $\tau_1=\tau_2=\tau_3=800$ мкс і $\nu=6$ мм/мкс, маємо $\Delta x=\Delta y=\Delta z$ і $\varepsilon_{xyz}=\varepsilon_x$. Отже, відносну похибку визначення просторових координат джерел АЕ знайдемо за формулою (2.20), обчисливши попередньо Δx за формулами (2.23) і (2.13).

В таблиці Б.2 приведені розраховані значення відносних похибок обчислення лінійних, площинних і просторових координат джерел АЕ при різних швидкостях поширення хвиль АЕ і різних відстанях між датчиками. Через суттєву відмінність між значеннями похибок для різних відстаней між датчиками, в таблицю вносились максимальні значення похибок. На рис. Б.2 представлені залежності максимальної відносної похибки визначення координат джерел АЕ від швидкості поширення хвиль АЕ для РЧП=800 мкс і відстанню між датчиками 2400 мм.

Похибки локації на сфері, що є частинним випадком просторової локації, не перевищують розрахованих вище похибок просторової локації.

Забігаючи наперед, скажимо, що з використанням розробленої в розділі 3 апаратури для порівняння розрахованих похибок з експериментальними були проведені експерименти з визначення лінійних, площинних і просторових координат джерел АЕ на спеціально виготовлених металевих і склотекстолітових зразках у формі бруса, пластини і масиву, при різних значеннях відстаней між датчиками. В якості імітатора сигналів АЕ використовувався п'єзоперетворювач П113, на який поступали гармонічні коливання від генератора так, як описано в п. 4.1.3. Перед експериментом вимірювали дійсні координати x_0 , y_0 і z_0 джерел АЕ з точністю до 0,5 мм. Швидкість поширення хвиль АЕ бралась із таблиць [72, 73]. Проводилось по 10 експериментів при відстані між датчиками до 100 мм, 100-1000 мм і 1000-5000 мм при різних швидкостях поширення хвиль АЕ. Відносні похибки знаходились за формулами: $\varepsilon = \left| \frac{x_K - x_0}{x_0} \right|$,

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\sqrt{(x_K - x_0)^2 + (y_K - y_0)^2}}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}, \quad \varepsilon_{xyz} = \frac{\sqrt{(x_K - x_0)^2 + (y_K - y_0)^2 + (z_K - z_0)^2}}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}},$$

де x_0 – дійсна координата джерела АЕ по осі x , y_0 – дійсна координата джерела АЕ по осі y , z_0 – дійсна координата джерела АЕ по осі z , x_K , y_K і z_K – обчислені координати джерела АЕ. За матеріалами експериментів знаходили середні похибки отрима-

них значень за формулами: $\varepsilon_x = \frac{\sum_{i=1}^{10} (\varepsilon_x)_i}{10}$, $\varepsilon_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{10} (\varepsilon_{xy})_i}{10}$, $\varepsilon_{xyz} = \frac{\sum_{i=1}^{10} (\varepsilon_{xyz})_i}{10}$. В табл. Б.3

приведені експериментальні значення відносних похибок визначення координат джерел АЕ. Деякі отримані за результатами експериментів похибки визначення координат перевищують розраховані теоретично, отже є правомірним оцінювати похибки за табл. Б.3.

Слід зауважити, що при контролі складних конструкцій, які геометрично відрізняються від бруса, площини і масиву, і шляхи поширення хвиль АЕ в яких відрізняються від теоретично прийнятих, похибки визначення координат не вивчені і можуть перевищувати розраховані вище.

2.6 Кластеризація джерел акустичної емісії

Невід'ємною частиною локації є кластеризація джерел АЕ, тобто об'єднання подій АЕ за координатною ознакою, яка може здійснюватись як візуально, так і програмно. Кластером будемо вважати ділянку поверхні об'єкту з підвищеною активністю АЕ. Графічно на локаційній карті кластер визначає собою скупчення крапок, які дозволяють визначити місце, у якому передбачається присутність дефекту. В роботі розроблено наступну методичку кластеризації.

Нехай кластер знаходиться в ділянці S_0 контрольованої площі конструкції S . Імовірність P_S попадання сигналу в ділянку S_0 контрольованої площі S визначається так:

$$P_S = \frac{S_0}{S}. \quad (2.25)$$

Частота попадання P_N лоційованих АЕ-сигналів в ділянку S_0 буде такою:

$$P_N = \frac{N_0}{\sum N}, \quad (2.26)$$

де N_0 – кількість АЕ-сигналів, лоційованих в ділянці S_0 , $\sum N$ – загальна кількість локалізованих сигналів на контрольованій площі S . Імовірність знаходження кластера в даній ділянці дорівнює добутку ймовірностей, тобто:

$$P = P_S \cdot P_N. \quad (2.27)$$

Використовуючи формулу (2.27), стало можливим оцінювати технічний стан контрольованого матеріалу за імовірнісними ознаками. Для цього необхідно задати розмір ділянки S_0 , провести сканування контрольованої площі S ділянкою S_0 , визначаючи імовірність знаходження кластера в даній ділянці. Якщо імовірність певного кластера P не перевищує критичного значення, яке свідчить про наявність небезпечних дефектів, то можна вважати, що кластер є безпечним. В іншому випадку у вказаному кластері можуть знаходитись приховані дефекти і такі ділянки матеріалу потребують подальшої перевірки.

2.7. Висновки до розділу

1. Представлений розв'язок задачі лінійної локації джерел АЕ, який може бути реалізований за допомогою приладу АФ-15, що дозволяє проводити діагностування технічного стану деталей і конструкцій у формі брусків з визначенням координат дефектів.
2. Вперше, шляхом реєстрації двох різниць часу приходу сигналів АЕ до двох незалежних пар приймальних перетворювачів, розташованих навхрест, розроблено спосіб площинної локації джерел АЕ, який може бути реалізований за допомогою двох приладів АФ-15, що дозволяє проводити діагностування технічного стану деталей і конструкцій у формі пластин і оболонок, визначаючи координати дефектів за більш простими і точними розрахунковими формулами.
3. Вперше, шляхом реєстрації трьох різниць часу приходу сигналу АЕ до незалежних пар приймальних перетворювачів, розташованих навхрест, розроблено спосіб просторової локації джерел АЕ, який може бути реалізований за допомогою трьох приладів АФ-15, що дозволяє проводити діагностування технічного стану деталей і конструкцій у формі масивів, визначаючи координати дефектів за більш простими і точними розрахунковими формулами.
4. Вперше розроблено схему локації джерел АЕ на сферичній поверхні, що дозволяє однозначно визначати місця небезпечних дефектів, реєструючи три різниці часу приходу сигналів АЕ до трьох незалежних пар приймальних перетворювачів, розташованих в полюсах і на екваторі сфери.

РОЗДІЛ 3

СТВОРЕННЯ ШЕСТИКАНАЛЬНОЇ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОЇ СТАНЦІЇ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Шестиканальна вимірювальна програмно-апаратна станція акустичної емісії (ПАСАЕ) розроблена в експериментальній лабораторії кафедри Прикладної механіки Технологічного університету Поділля з безпосередньою участю автора. Зовнішній вигляд ПАСАЕ представлений на рис. 3.1.

Основним призначенням станції є реєстрація та обробка параметрів сигналів АЕ, що виникають при статичних і динамічних навантаженнях деталей, а також для локації джерел сигналів АЕ. Станція застосовується для контролю, діагностики і прогнозування міцності матеріалів, деталей і конструкцій, апаратів різних галузей техніки, з визначенням координат дефектів, при різних видах навантаження, а саме: при статичних випробуваннях на розтяг, стиск і згин (використовується машина розривна ИР 5057-50), при випробуваннях під впливом пневматичного і гідравлічного тиску (контроль і діагностика посудин тиску та трубопроводів).

Для прийому і виділення параметрів сигналів акустичної емісії служать три вимірювальні акустико-емісійні прилади АФ-15 (рис. 3.2), які оперують електричними сигналами [65]. Перетворення енергії пружних коливань в електричну здійснюється ПЕП. Обробка параметрів сигналів АЕ покладена на персональний комп'ютер типу ІВМ, дані у який надходять від АФ-15 за допомогою спеціально розробленого інтерфейсу РІО-48. Структурна схема ПАСАЕ представлена на рис. 3.3.

При розробці станції були вирішені наступні завдання:

- модифікація субблоків лінійних координат і амплітуд приладів АФ-15;
- розробка і створення програмованих паралельних інтерфейсів введення/виведення;
- розробка програмного забезпечення збору й обробки даних АЕ.

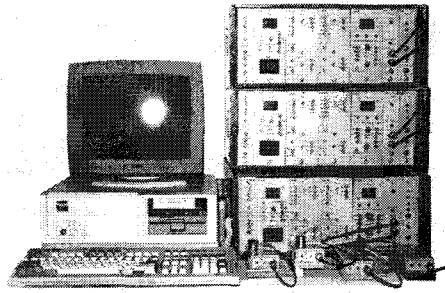


Рис. 3.1. Зовнішній вигляд ПАСАЕ

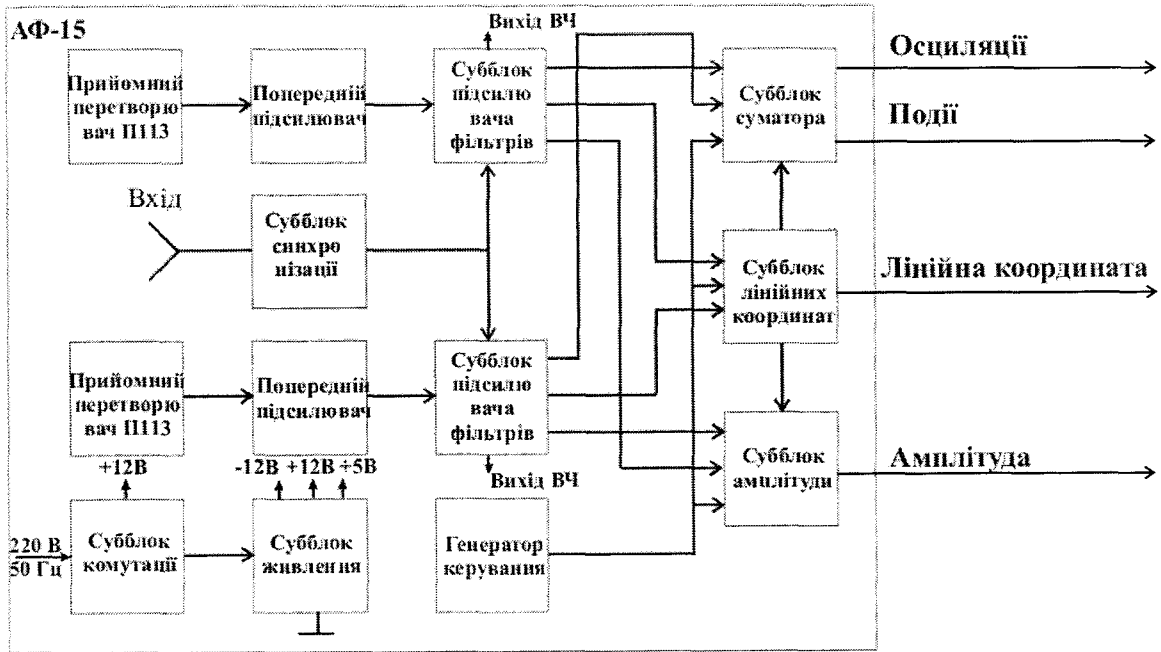


Рис. 3.2. Структурна схема приладу акустико-емісійного АФ-15

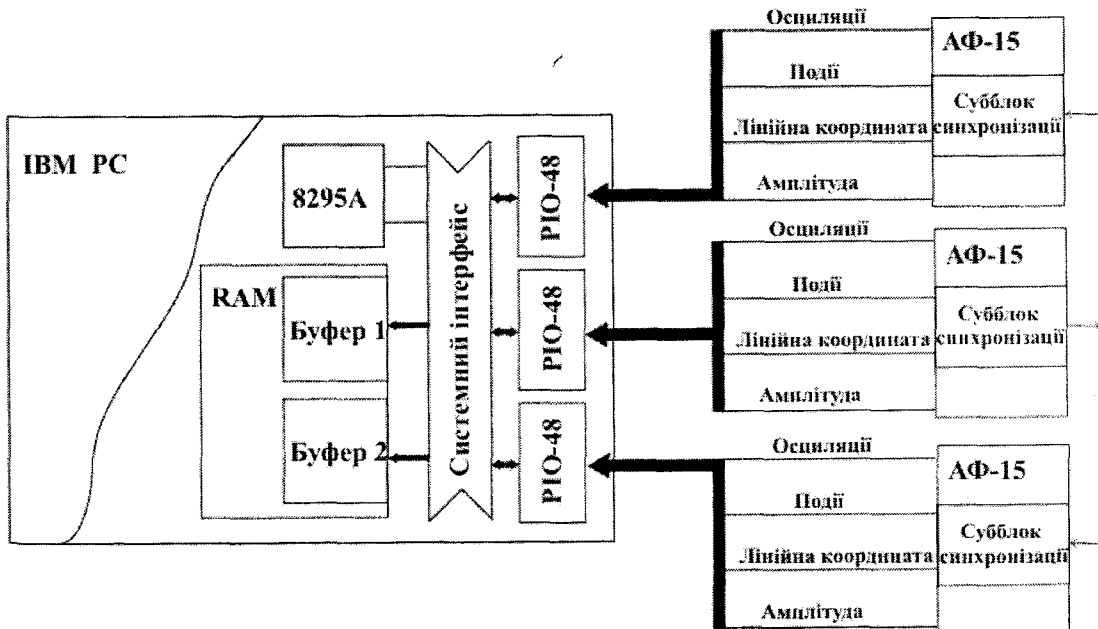


Рис. 3.3. Структурна схема ПАСАЕ

3.1. Прилад акустико-емісійний АФ-15

Прилад акустико-емісійний АФ-15 призначений для проведення досліджень і контролю механічних властивостей різних об'єктів (зразки конструкційних матеріалів, посудини тиску, деталі і вузли механізмів і машин і т.д.) за інформативними параметрами сигналів АЕ.

Прилад АФ-15 забезпечує прийом сигналів АЕ по двох каналах і одночасну реєстрацію не менше чотирьох параметрів: максимальної амплітуди сигналів АЕ за період часу, активності сигналів АЕ, суми осциляцій (високочастотних коливань, рівень яких перевершує рівень дискримінації) за період часу, лінійної координати джерела сигналу АЕ. Для виведення інформації про сигнали АЕ прилад укомплектований раніше допрацьованим цифродрукуючим пристроєм (ЦДП) типу Щ68000К; також можливе використання графопобудовника НЗ06. Прилад є універсальним і містить усі поширені в даний час субблоки акустико-емісійних приладів (рис. 3.2 [65]). У таблиці В.1. (додаток В) наведені основні технічні параметри і характеристики приладу.

Робота приладу ґрунтується на принципі прийому, реєстрації та аналізу сигналів АЕ, що виникають у тілах, які деформуються при статичних і динамічних навантаженнях. Розглянемо функціонування і організацію АФ-15, коротко зупиняючись на його субблоках, їхньому призначенні і взаємозв'язку між собою.

Сигнали АЕ надходять на ПЕП типу П113 першого і другого каналів приладу і перетворюються ними в електричні коливання високої частоти в діапазоні 20 – 2000 кГц. Попередні підсилювачі каналів підсилюють ці сигнали з коефіцієнтом 40 дБ і передають на субблоки підсилювачів фільтрів, де відбувається їх подальше підсилення на 60 дБ в обраній смузі частот. Діапазон частот і коефіцієнт підсилення субблоків фільтрів встановлюються дискретно в межах, зазначених у таблиці В.1. Далі відбувається формування сигналів осциляцій і подій, а також пікова амплітуда події, що дорівнює максимальній амплітуді осциляцій.

Сформовані сигнали подаються на субблоки суматора, лінійних координат і амплітуд.

Субблок суматора дозволяє обробляти і реєструвати сигнали АЕ з обраної зони контролю в режимі інтенсивності (кількість осциляцій і подій за встановлений період) і безупинного рахунку (безупинне підсумовування осциляцій і подій у встановлений період від початку виміру). Виведення обробленої інформації із субблока суматора здійснюється:

- осциляції - на індикатори передньої панелі, ЦДП і самописець;
- події - на ЦДП і самописець.

Субблок лінійних координат, на який приходять сигнали подій, визначає місце розташування джерела АЕ, використовуючи РЧП хвилі до ПЕП (див. п. 2.1), істинність події, тобто знаходження джерела АЕ в зоні контролю, і дає дозвіл на подальшу обробку сигналів субблокам суматора і амплітуд. Виведення координати джерела здійснюється на ЦДП та індикатори передньої панелі.

Значення амплітуди подій подаються на субблок амплітуд, де відбувається вибір максимальної амплітуди серед подій, що прийшли за період 0,1; 1; 10 або 30 с, перетворення амплітуди в цифрову форму для виведення на ЦДП, формування імпульсного значення амплітуди для виведення на аналізатор імпульсів і перетворення з цифрової в аналогову форму для запису на самописці.

Субблоки лінійних координат, суматора і амплітуд керується генератором керування, що містить генератор тактових імпульсів (ГТІ) і генератор розгортки. Період ГТІ вибирається дискретно і служить для задання частоти виведення інформативних параметрів на ЦДП. Генератор розгортки керується імпульсами частотою 1кГц і виробляє лінійно - змінну напругу різної тривалості (період також вибирається дискретно) для керування розгорткою самописця.

Живлення електричних кіл усіх субблоків приладу здійснюється від стабілізованих джерел субблока живлення, керованого субблоком комутації.

Для запису і відображення інформації про процес АЕ до приладу АФ-15, як зазначалось раніше, під'єднано ЦДП, призначений для друку на стрічці вихідних величин сигналів, що передаються через цифрові розняття АФ-15.

Задача з'єднання АФ-15 і ПК була вирішена шляхом створення програмованих паралельних інтерфейсів (48 ліній введення/виведення) і математичного програмного забезпечення збору й обробки даних. Крім цього, необхідно було позбутися недоліків самого приладу АФ-15, до яких відносяться особливості схемотехнічних вирішень субблоків приладу, орієнтованого на повільні пристрої виведення (ЦДП). До таких субблоків відносяться субблоки координат і амплітуд.

3.2. Модифікація субблока лінійних координат СКА-04 приладу АФ-15

Для опису модифікації даного субблока скористаємося його структурною і принциповою схемами (рис. 12, 13 [65]). Схема калібрування призначена для підготовки субблока до роботи. Вона дозволяє вмикати і вимикати індикатори і встановлювати перед початком вимірів у регістрі величину $L/2$, що дорівнює половині відстані між ПЕП; дана величина буде використовуватися надалі для визначення місця розташування джерел АЕ. Запис і контроль інформації в регістрі $L/2$ відбувається підсумовуванням імпульсів ГТІ в двійково-десятковому лічильнику, що і виконує роль регістру.

Координата джерела АЕ щодо першого ПЕП визначається як $x = \frac{L}{2} \pm \tau \frac{\nu}{2}$,

де τ - РЧП сигналу АЕ до ПЕП, ν - швидкість поширення ультразвуку в матеріалі. Це здійснюється в такий спосіб. Величина $L/2$ записується в регістрі. Формується імпульс тривалістю τ і заповнюється імпульсами частотою

f [МГц] = $\frac{\nu}{2}$ [мм/мкс], таким чином, одержуючи добуток $\tau \frac{\nu}{2}$, що, сумуючись з

$\frac{L}{2}$ або віднімаючись, в залежності від того, до якого ПЕП сигнал прийшов першим, дає координату джерела сигналу АЕ.

Таке схемне вирішення було реалізовано через низький стан цифрової техніки на момент проектування приладу і описаний спосіб обчислення коор-

динат має суттєвий недолік. Швидкість поширення ультразвукових хвиль в різних матеріалах може змінюватися в широких межах і для цього передбачена настройка височастотного генератора гармонійних коливань, частота якого [Гц] відповідає половині швидкості поширення хвилі в [мм/мкс]. Очевидно, що такий спосіб настройки не має високої точності (за технічними характеристиками приладу АФ-15 похибка у визначенні координат не повинна перевищувати $\pm 20\%$ відстані між ПЕП). До того ж при проведенні досліджень деталей та конструкцій з різних матеріалів доводилось перенастроювати частоту генератора. З огляду на це, і приймаючи до уваги використання ПК, у субблок координат були внесені зміни.

Генератор змінної частоти модифікується таким чином, щоб частота його коливань була незмінною. Аналогічно поступають з генераторами інших приладів АФ-15. У результаті всі генератори мають фіксовані значення частот, які вводяться в програму обробки. В програмі обробки значення координат використовуються для знаходження РЧП сигналу на ПЕП за залежністю

$$\tau = \pm \frac{2X - L}{v}. \quad (3.1)$$

Координати джерела АЕ знаходяться способом, описаними в розділі 2, з програмним врахуванням значення швидкості поширення сигналів АЕ, що істотно підвищує точність локації. Отже тепер, підключивши в систему ПК, що бере на себе основні функції аналізу і обробки сигналів АЕ, потреба в перебудові частоти генератора відпадає.

Схема керування аналізує сигнали, які потрапляють від субблоків підсилювачів фільтрів Подія 1 і Подія 2, тобто сигнали, вироблені по прибутті хвилі до двох ПЕП за наступним принципом. З приходом першої події запускається формувач зони контролю - одновібратор, який виробляє імпульс тривалістю, що дорівнює часу поширення сигналу АЕ між ПЕП. Тривалість зони контролю встановлюється дискретно перемикачем у залежності від матеріалу контролюваного виробу і відстані між ПЕП. Якщо другий сигнал надходить за час визначений зоною контролю, схема керування виробляє сигнал "Керування", а якщо

ні, то виробляється імпульс “Сигнал помилковий”.

При облаштуванні приладу, що орієнтовано на використання повільного і непродуктивного пристрою відображення інформації ЦДП, немає можливості забезпечити експресність вимірів та синхронність одержання параметрів сигналів АЕ. Наступні значення координат джерел АЕ не будуть зафіксовані і виведені на друк доти, поки регістр пам'яті не буде цілком зчитаний ЦДП. Виміри, у яких прилад АФ-15 працює з включеним субблоком координат, доводиться або припиняти після заповнення пам'яті ОЗП для виведення інформації, що у свою чергу не дає гарантії точності зіставлення раніше отриманих параметрів АЕ - амплітуди, активності й інтенсивності з пізніше виведеними координатами, або робити зчитування координат, не припиняючи вимірів, що приведе до втрати мінімум 50% інформації про координати зареєстрованих подій, досить важливої в дослідженні АЕ.

При підключенні ПК використання ОЗП як буферного каскаду в приладі втрачає свій сенс.

По-перше, ємність ОЗП - 512 12-ти розрядних слів є незадовільною для досліджень АЕ, тому що кількість реєстрованих АФ-15 подій може досягати 1000 у секунду і режим використання ОЗП не дозволяє безупинно одержувати дані.

По-друге, з'явилася можливість створити буферний каскад в оперативній пам'яті (RAM) самого ПК зручного для вимірів розміру. Більш того, таких каскадів було створено два для того, щоб у момент, коли один із буферів заповниться, інформація, що надходить від АФ-15, не втрачалася під час зчитування з буфера в постійну пам'ять ПК, а надходила в інший буфер до заповнення, і, коли другий буфер заповниться і почнеться виведення його інформації на жорсткий диск ПК, перший буде уже вільний і готовий до прийняття нових даних. Більш докладно про структуру збору даних буде вказано пізніше.

Для забезпечення безперервної передачі даних у ПК вихідне роз'язтя ХЗ субблока (рис. 14 [65]), точніше його контакти 1-12, були підключені до виходу обчислювального пристрою після польових узгоджуючи транзисторів VT1-

VT12 (контакти 1-12). При такому підключенні ОЗП не буде впливати на передачу даних до виходу АФ-15. Сигнал «Керування» одержав призначення маскованого запиту на переривання за рівнем IRQ3. По приходу запиту на переривання процесор ПК зчитує інформацію від обчислювального пристрою субблока, і поміщає в буфер до наступного запису на жорсткий диск. Запит на переривання виведений на позицію 15 розняття Х3.

3.3. Модифікація субблока амплітуд СРА-22 прилада АФ-15

Субблок призначений для обробки сигналів АЕ по амплітуді в цифровій і аналоговій формі з виведенням інформації на аналізатор імпульсів (розняття Х3), самописець (розняття Х4), ЦПУ (розняття Х6).

Розглянемо роботу субблока в двоканальному режимі - роботу разом із субблоком лінійних координат (рис. 18, 19 [65]) (одноканальний режим дозволяє здійснювати реєстрацію сигналів АЕ без вимірювання РЧП сигналів і не є цікавим для розгляду).

Пікові значення аналогової амплітуди з першого і другого субблоків підсилювачів фільтрів через розняття Х1 (Вхід А1) і Х2 (Вхід А2) надходять на ключові схеми К1 і К2, зібрані на мікросхемах DD3, DD2.1, DD4.1 і транзисторах VT1 і VT2. При надходженні із субблока координат сигналів Подія I або Подія II відбувається відчинення одного з ключів і пікове значення амплітуди проходить на узгоджуючий повторювач DA1.

Одночасно керуючі сигнали Подія I або Подія II через схему АБО DD4.2 надходять на схему I DD6.2, на інший вхід якої надходять імпульси з частотою 0,5МГц. Сигнал пікового значення амплітуди з узгоджуючого повторювача подається на перший вхід компаратора, зібраного на мікросхемі DA3 і транзисторі VT3. Сигнал з виходу компаратора відчиняє схему I DD6.2 і в двійкових лічильниках DD10, DD11 і DD8, DD9 відбувається запис інформації. Інформація лічильника (DD10, DD11) надходить на цифроаналоговий перетворювач ЦАП1, зібраний на мікросхемах DA2 і на регістр 1. З виходу ЦАП1 сигнал надходить

на формувач імпульсної амплітуди, на перший вхід другого компаратора (DA7), який відчиняє схему I DD6.1, на другий вхід першого компаратора, який порівнює напругу пікового значення амплітуди, що надходить на перший вхід з напругою виходу ЦАП1, яка надходить на другий вхід. При рівності цих напруг сигнал з виходу 1-го компаратора зачиняє схему I (DD6.2) і тим самим припиняється запис інформації в лічильниках (DD8, DD9, DD10, DD11). Регістр 1, зібраний на мікросхемах DD15 і DD16, дозволяє запам'ятати інформацію двійкового лічильника DD10, DD11 і видавати її на ЦАП 2 (DA6, DA8). Інформація з виходу ЦАП 2 надходить на роз'єднання (Вихід А) для запису на самописі і на другий вхід другого компаратора, виконаного на мікросхемі DA7 і транзисторі VT6, який порівнює напруги з виходів ЦАП 1 і ЦАП 2. При рівності цих напруг сигнал з виходу другого компаратора закриває схему I DD6.1, на яку через інвертор DD2.1 подається сигнал «Керування» із субблока координат, тим самим здійснюється заборона на запис нової інформації в регістрі 1.

Інформація з двійково-десятькового лічильника (DD8, DD9) подається на другий регістр (DD12, DD13), який призначений для її запам'ятовування. Керування регістрами здійснюється через схему АБО DD7.1 сигналами з виходу схеми I (DD6.1), сигналами „Затримка ГТІ”, кнопкою „Скидання” через схему АБО (DD7.2) і лінію затримки (DD1).

Скидання лічильників у вихідний стан здійснюється через схему АБО (DD7.2) сигналами ГТІ, сигналом „Сигнал помилковий” із субблока координат, натисканням кнопки скидання і вихідним імпульсом третього чекаю чого мультивібратора (DD5.3, DD5.4), який запускається заднім фронтом вихідного імпульсу другого чекаю чого мультивібратора (DD5.1, DD5.2).

Таким чином, з описаної структури видно, що керування регістрами 1 і 2, тобто здійснення запису значення амплітуди нової події, можливо тільки у випадку перевищення рівня попереднього, а скидання регістрів у вихідний стан відбувається по приходу сигналів ГТІ з заданим періодом.

Така конструкція субблока амплітуд, також як і субблока лінійних координат, пояснюється застосуванням у якості пристрою виведення інформації

ЦДП, і ми одержуємо значення амплітуди не кожної події, а значення максимальної амплітуди подій, які прийшли за період ГТІ, тобто період виведення на ЦПУ. Здійсненням даної задачі в субблоці служить коло керування, що складається з регістра 1, ЦАП 2, компаратора 2, схеми І (DD6.1) та АБО (DD7.1). Тому було вирішено зчитувати інформацію не з регістра 2 (як це відбувається по конструкції субблока), що знаходиться під керуванням кола, а з двійково-десятькового лічильника DD10, DD11. Контакти вихідного цифрового розняття Х6 (1-8) були з'єднані з контактами двоїчно-десятькового лічильника (25-32). Значення амплітуди події зчитується процесором ПК по приходу від субблока лінійних координат запиту на перериванням IRQ3, IRQ4 та IRQ7, тобто по приходу сигналів «Керування», що підтверджує істинність події. Через інтервал часу, визначений другим і третім мультівібратором, лічильник обнуляється і готовий до прийому нового значення амплітуди події.

Даний пристрій модифікованого субблока амплітуд дозволяє безупинно одержувати достовірну інформацію про значення амплітуд всіх сигналів АЕ, зареєстрованих приладом АФ-15.

Для роботи ПАСАЕ робота всіх модифікованих приладів АФ-15 синхронізується. Для цього вихід субблока синхронізації одного з приладів з'єднується з відповідними входами субблоків синхронізації двох інших АФ-15. Це дозволяє синхронізувати тактові генератори приладів, виключаючи можливість пропуску зареєстрованих сигналів АЕ.

3.4. Розробка паралельного цифрового інтерфейсу введення/виведення для персонального комп'ютера типу ІВМ РС/ХТ/АТ

Модуль паралельного цифрового інтерфейсу введення/виведення РІО-48 призначений для обміну інформацією між персональної ЕОМ типу ІВМ РС/ХТ/АТ і зовнішніми пристроями. Наявність великої кількості ліній введення/виведення дозволяє реалізувати не тільки обмін даними, а також необхідний протокол обміну шляхом його програмної емуляції, у тому числі відповідним

стандартам CENTRONICS і ІРІР. Для з'єднання кожного з трьох приладів АФ-15 з ПК були розроблені і створені три модулі РІО-48.

3.4.1. Функціональний опис модуля РІО-48. Модуль паралельного цифрового інтерфейсу введення/виведення РІО-48 забезпечує обмін по 48 лініям введення/виведення, сумісних по рівнях із ТТЛ схемами. Забезпечується прийом зовнішніх сигналів запиту переривання і дозволу запиту переривання. Структурна схема модуля приведена на рис. 3.4.

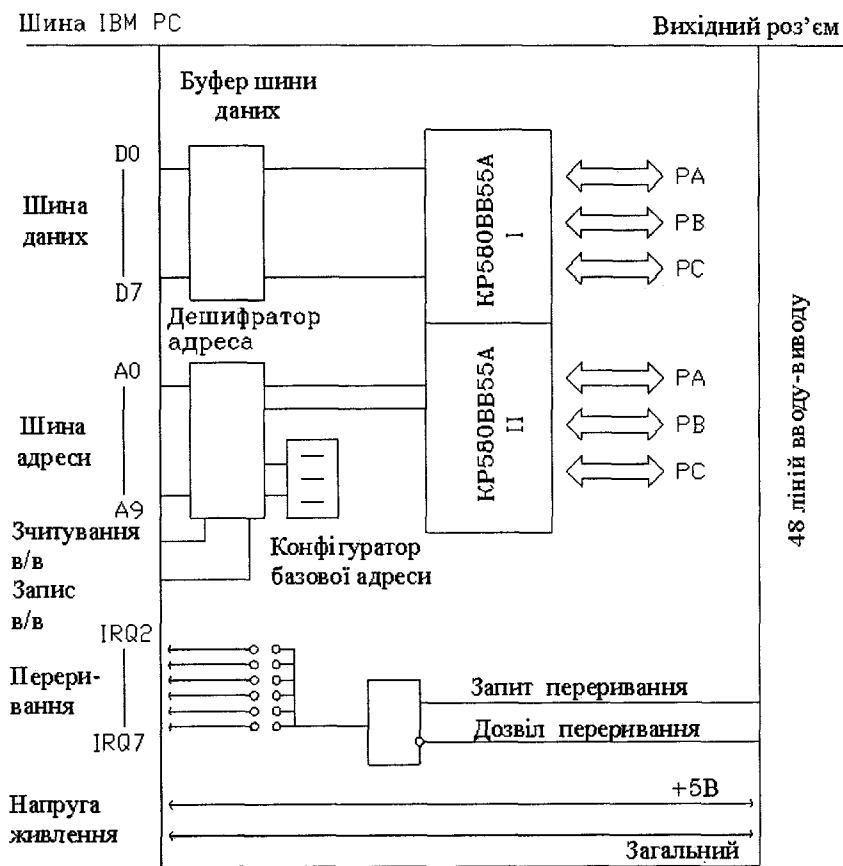


Рис. 3.4. Структурна схема модуля цифрового введення/виведення РІО-48

Видача і прийом сигналів по 48 лініям зв'язку здійснюється шляхом використання двох ВІС (ППІ) КР 580ВВ55А (INTEL 8255-5) периферійного програмованого інтерфейсу. Можливості всього модуля цілком визначаються можливостями, структурою і режимами ППІ, що складається з трьох 8-бітових портів РА, РВ, і РС, причому останній у свою чергу може бути використаний як два 4-бітових порти: РС4-7 і РС0-3 [74, 75]. Кожний із цих портів може бути програмно сконфігурований на введення або на виведення, незалежно один від

одного, шляхом запису в регістр керування ПП відповідного байта керування.

Порти ПП доступні як для запису інформації в них, так і для читання.

Модуль може функціонувати відповідно до режимів ПП в такі способи:

- а) режим 0 ПП - статичне введення/виведення, при цьому для портів РА, РВ, РС0-3 і РС4-7 можлива будь-яка з 16 комбінацій з настройки на введення чи виведення;
- б) режим 1 ПП - стробує введення/виведення, при цьому обмін даними здійснюється через порти РА і РВ, а стробуючі сигнали, і сигнали керування - через порт РС;
- в) режим 1' ПП – двонаправлене введення/виведення, при цьому порт РА є двонаправленою шиною даних, порт РВ може працювати на введення або на виведення, так само як і лінії РС0, РС1 і РС2 порту РС, а лінії з РС3 по РС7 служать для керування обміном даними по двонаправленій шині.

Зовнішній запит на переривання буферизується за допомогою схеми з третім станом, дозволяючий вхід якої підключається до зовнішнього сигналу дозволу запиту переривання, що має активний низький рівень. Запит на переривання може бути поміщений на один із рівнів із номерами 2 - 7, доступних на даній ПЕОМ. Це досягається шляхом установки відповідної даному рівню переривання перемички на платі. Формований запит на переривання надходить на контролер переривання 8259А, програмування якого здійснюється відповідно до встановленого хендлами переривань у ПЕВМ.

3.4.2. Установка базової адреси модулів РІО-48. Адреса модуля РІО-48 може бути обрана довільно в межах адресного простору пристроїв введення/виведення ПК, що не збігаються з адресами внутрішніх пристроїв введення/виведення ПК. Діапазон адрес, що рекомендується, для установки базової адреси - 200Н - 3FFН (512 - 1023). Вибір базової адреси здійснюється шляхом установки перемичок для тих адресних ліній, яким відповідають рівні логічної «1». Початкова установка перемичок модулів 1, 2, 3 відповідає базовим адресам 220Н, 230Н, 330Н. Адресація внутрішніх регістрів і портів для двох ПП КР580ВВ55А вимагає виділення 8-ми осередків в адресному просторі пристроїв введення/виведення, тому карта адрес для модулів РІО-48 має вигляд, показаний у табл. 3.1 – 3.3.

Таблиця 3.1

Карта адрес першого модуля РІО-48

Адреса	Функція	Тип
220	порт РА-1	запис/читання
221	порт РВ-1	запис/читання
222	порт РС-1	запис/читання
223	регістр 1 керування	тільки запис
224	порт РА-2	запис/читання
225	порт РВ-2	запис/читання
226	порт РС-2	запис/читання
227	регістр 2 керування	тільки запис

Таблиця 3.2

Карта адрес другого модуля РІО-48

Адреса	Функція	Тип
230	порт РА-1	запис/читання
231	порт РВ-1	запис/читання
232	порт РС-1	запис/читання
233	регістр 1 керування	тільки запис
234	порт РА-2	запис/читання
235	порт РВ-2	запис/читання
236	порт РС-2	запис/читання
237	регістр 2 керування	тільки запис

Таблиця 3.3

Карта адрес третього модуля РІО-48

Адреса	Функція	Тип
330	порт РА-1	запис/читання
331	порт РВ-1	запис/читання
332	порт РС-1	запис/читання
333	регістр 1 керування	Тільки запис
334	порт РА-2	запис/читання
335	порт РВ-2	запис/читання
336	порт РС-2	запис/читання
337	регістр 2 керування	Тільки запис

На рис. 3.5-3.7 приведена установка базової адреси і показане положення перемичок на платі. Програмування адресної лінії A2 не впливає на вибір модуля і може бути «0» або «1». Для простоти рекомендується приймати A2=0 при обчисленні базової адреси модуля.

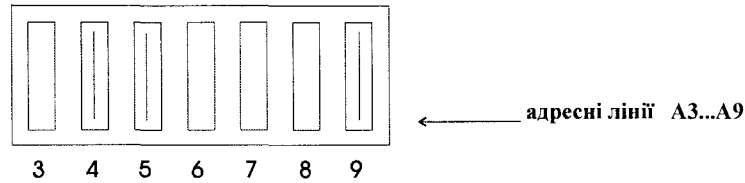


Рис. 3.5. Установка базової адреси ППІ (1). Базова адреса = 220H (544 Dec)

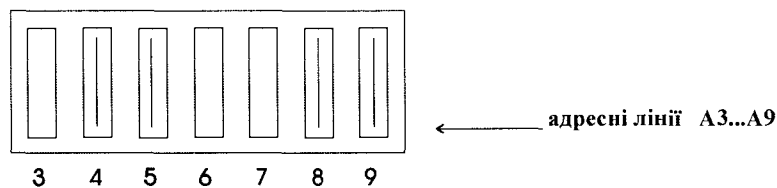


Рис. 3.6. Установка базової адреси ППІ (2). Базова адреса 330H (816 Dec)

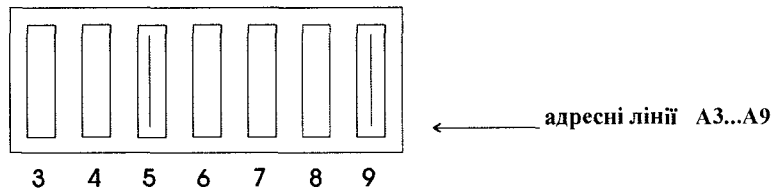


Рис. 3.7. Установка базової адреси ППІ (3). Базова адреса 230H (560 Dec)

3.4.3 Програмування модулів РІО-48. Програмування даних модулів може бути здійснено або на мові асемблера, або на мовах високого рівня, наприклад, ПАСКАЛЬ або БЕЙСІК.

Розглянемо програмування модулів на прикладі першого модуля РІО-48. Програмування ППІ здійснюється ініціалізацією ППІ шляхом запису байта керування, що відповідає обраним режимам роботи ППІ. Призначення бітів у байті керування і відповідність їхнім режимам роботи приведене на рис. 3.8. При вмиканні напруги живлення або подачі сигналу скидання всі порти ППІ включаються на введення інформації.

При програмуванні модуля ППІ була використана наступна конфігурація: РА - вхід, РВ - вхід, РС0-3 - вхід, РС4-7 - вхід. Для портів РА, РВ, РС0-3, РС4-7 використовується режим 0, тобто режим статичного в даному випадку введення

інформації.

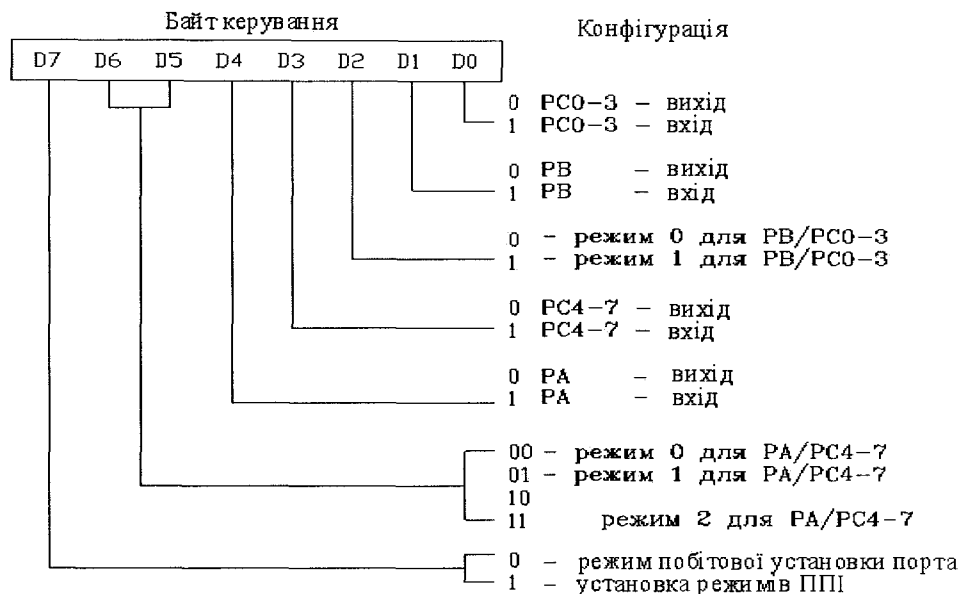


Рис. 3.8. Структура байта керування ППІ

Байт керування в двійковому коді має вид 10011011 або 9b у шістнадцятковому форматі.

Програмування ППІ являє собою підпрограму, реалізовану на мові низького рівня асемблері [76, 77], яка вступає при запуску програми збору даних (В.1).

```

mov dx,227h
mov al,9bh
out dx,al
mov dx,223h
out dx,al
jmp $+2

```

При конфігурації портів ППІ біт 7 завжди має високий рівень, тобто відповідає логічній «1».

Програмування інших двох модулів здійснюється аналогічно з урахуванням базових адрес. Після того, як зроблена ініціалізація портів, ППІ зберігає конфігурацію до моменту нового запису в регістр керування.

3.4.4. Програмування контролера переривань 8259А. Програмований контролер переривань 8259А обробляє запити на зовнішні переривання, які надійшли по лінії переривання INTR [76], що маскується. Він приймає запити по 8-ми лініях від зовнішніх пристроїв і генерує для процесора код типу переривань у якості відгуку на шинний цикл підтвердження запиту на переривання. У контролері реалізується режим роботи з цілком вкладеними перериваннями. На рис. 3.9 показані вісім переривань, що подаються на 8259А IRQ0-IRQ7.



Рис. 3.9. Структура переривань, які подаються на 8259А

Для передачі інформації з трьох АФ-15 у ПК використовуються чотири запити на переривання рівнів IRQ3, IRQ4, IRQ5 і IRQ7. Перемички на платі модуля ППІ встановлені в позиціях, що відповідають пріоритетам переривань.

Вибір даних рівнів пояснюється наступними причинами:

- 1) до установки в системну шину ці переривання не використовувалися ПК і тому їхнє використання не приведе до змін у функціонуванні системи;
- 2) пріоритет цих рівнів достатній, щоб не відбувалося втрати інформації з приходом запиту від АФ-15, що могло б відбутися у випадку, якщо до цього моменту процесор уже зайнятий обробкою переривання з більш високим пріоритетом.

По перериванням IRQ3, IRQ4 та IRQ7, яким служать сигнали «Керування» субблоків лінійних координат, зчитуються сигнали значень амплітуди і координати подій АЕ трьох приладів АФ-15. Читається перша мікросхема ППІ:

Порт1-РА - амплітуда (8 біт);

Порт1-РВ - молодша частина координати (8 біт);

Порт1-PC0-3 - старша частина координати (4 біта).

По перериванню IRQ5 зчитуються також два сигнали: події й осциляцій. Запитом на переривання служить імпульс ГТІ. Інформація читається з другої мікросхеми ППІ модуля РІО-48:

Порт2-РА - молодша частина осциляцій (8 біт);

Порт2-РВ - молодша частина подій (8 біт);

Порт2-PC0-3 - старша частина подій (4 біта);

Порт2-PC4-7 - старша частина осциляцій (4 біта).

Інформація з двох інших ППІ зчитуються аналогічно.

Вектори задіяних переривань змінюються програмно (додаток Г.1). Реалізацією цього в програмі збору даних є макрос Change Handler.

ChangeHandler macro Vector

```

mov ax,35&Vector
int21h
mov old&Vector&o,bx
mov old&Vector&s,es
lea dx,New&Vector
mov ax,25&Vector
int21h
endm

```

Таким шляхом змінюються вектори IRQ1, IRQ3, IRQ4, IRQ5 і IRQ7 переривань. Переривання IRQ1, показане на рис. 3.9, приходять до контролера від клавіатури при натисканні клавіш. Зміна вектора й оброблювача переривання IRQ1 призначено для установки реакції на натискання клавіші ESC як завершення програми.

По завершенні збору даних вектора змінюються знову, при цьому відбувається відновлення старих векторів, для чого призначений макрос RestoreHandler.

RestoreHandler macro Vector

```

push ds mov
dx,old&Vector&o
mov ax,old&Vector&s
mov ds,ax
mov ax,25&Vector
int 21h
pop ds
endm

```

Далі в програмі робиться дозвіл обробки переривань IRQ3, IRQ4, IRQ5 і IRQ7. Окремі переривання дозволяються або забороняються відповідно до вмісту регістра дозволу переривань контролера. Розряди даного регістра відповідають лініям запиту на переривання і переривання маскується, тобто дозволяється, якщо необхідний розряд встановлений у 1.

Установка розрядів 3, 4, 5 і 7 у високий рівень робиться наступною підпрограмою, що також входить в основну програму збору даних.

```

mov dx,21h
in al,dx
xor al,00111010b
out dx,al

```

По завершенню функціонування в програмі передбачене відновлення старої маски контролера переривань:

```

mov dx,21h
in al,dx
xor al,00111010b
out dx,al

```

Зчитування інформації з PIO-48 в ОЗП (RAM) персонального комп'ютера здійснюється оброблювачами переривань, опис яких приводиться в п. 3.4.4. Програмування двох інших модулів робиться аналогічно з заміною базової адреси на відповідну.

3.4.5. Призначення контактів зовнішнього роз'язтя. Усі лінії цифрового введення/виведення здійснюються через зовнішнє 64-контактне роз'язтя типу СНП 58-64, показане на рис. 3.10, що доступне з боку задньої панелі ПК IBM PC/XT/AT. Найменування контактів відповідає найменуванню виводів портів першої (I) і другої (II) ВІС КР580ВВ55А.

	В	Δ	
Загальний	1	1	Загальний
PВ3-1	2	2	Загальний
РА7-1	3	3	PВ7-1
РА5-1	4	4	РА6-1
Вход ІRQ	5	5	РА4-1
РА3-1	6	6	Разр ІRQ
РА1-1	7	7	РА2-1
PВ2-1	8	8	РА0-1
РС2-1	9	9	РС3-1
РС0-1	10	10	РС1-1
РС5-1	11	11	РС4-1
РС7-1	12	12	РС6-1
PВ5-2	13	13	PВ3-2
PВ7-2	14	14	PВ6-2
РА6-2	15	15	РА7-2
РА4-2	16	16	РА5-2
РА2-2	17	17	РА3-2
РА0-2	18	18	РА1-2
PВ1-2	19	19	PВ2-2
РС3-2	20	20	PВ0-2
PВ4-1	21	21	РС2-2
PВ5-1	22	22	РС1-2
PВ6-1	23	23	РС0-2
PВ1-1	24	24	РС4-2
PВ0-1	25	25	РС5-2
PВ4-2	26	26	РС6-2
РС7-2	27	27	Загальний
Загальний	28	28	Загальний
+5В	29	29	+5В
+5В	30	30	+5В
Загальний	31	31	Загальний
Загальний	32	32	Загальний

Рис. 3.10. Зовнішнє 64-контактне роз'язтя типу СНП 58-64

3.4.6. Технічні характеристики модуля РІО-48. Основні технічні характеристики модуля РІО-48 подані в табл. 3.4. Усі вхідні і вихідні сигнали сумісні з рівнями ТТЛ логічних мікросхем. Кожна вихідна лінія інтерфейсу може бути з'єднана по навантаженню з 1 входом ІМС серії К155 або SN74, із 4 входами ІМС серії К555 (К533) або SN74LS. Сумісність із КМОП схемами може бути досягнута шляхом підключення додаткового резистора 10К між входом або виходом і шиною +5В. Струм споживання модуля не більш 250 мА, робочий діапазон температур від 0 до +50°C, габаритні розміри - напівплата IBM PC (160 x 100 мм).

Технічні характеристики модуля РІО-48

Технічні характеристики	Мін.	Макс.
Вхідна напруга низького рівня, В	-0.5	0.8
Вхідна напруга високого рівня, В	2.0	5.0
Вхідний струм: РА, РВ, РС	-10 мкА	+10 мкА
Вхідний струм переривання:		
- при низькому рівні вхідного сигналу	-	-0.4 мА
- при високому рівні вхідного сигналу	-	20 мкА
Вихідна напруга низького рівня: порти РА, РВ, РС (струм навантаження = -1.7 мА)	-	0.45 В
Вихідна напруга високого рівня: порти РА, РВ, РС (струм навантаження = 0.2 мА)	2.4 В	-

3.5. Параметри акустичної емісії, що реєструються програмно-апаратною станцією акустичної емісії

До параметрів АЕ, що виділяє шестиканальна ПАСАЕ, відносяться наступні: амплітуда подій, активність подій, сумарний рахунок сигналів АЕ, енергія сигналів АЕ, лінійна, площинна і просторова координата подій та ін. Параметри, що виділяються приладом АФ-15, такі як амплітуда, кількість осциляцій кожної події докладно описані в [65], тому далі зупинимося на параметрах, одержуваних за допомогою програмної обробки в ПК.

Активність подій АЕ визначається як кількість сигналів АЕ, які реєструються за визначений період часу, тобто

$$\dot{N} = \frac{N_c}{T}, \quad (3.2)$$

де N_c - кількість подій АЕ (сумарний рахунок), T - період часу реєстрації.

Сумарна амплітуда визначається як сума амплітуд подій, що реєструються за

визначений період часу, а саме

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} A_i}{T}, \quad (3.3)$$

де A_i - амплітуда i - го події АЕ.

Потужність або електрична потужність події АЕ, що виділяється на виході п'єзоелектричного перетворювача, визначається формулою

$$W = k \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt, \quad (3.4)$$

де k - коефіцієнт пропорційності; T - інтервал реалізації; $U(t)$ - миттєве значення сигналу.

Використовуючи дані сигналів АЕ, одержувані від АФ-15, потужність сигналів АЕ визначається як $W = U^2 N_o$, де U - амплітуда події, N_o - кількість осциляцій події, що прямо пропорційно тривалості події.

Енергія акустичної емісії визначається формулою

$$E = k \frac{\sum_{i=1}^{N_c} W_i}{T}, \quad (3.5)$$

де k - коефіцієнт пропорційності, W_i - потужність i - ї події АЕ.

Лінійні, площинні і просторові координати джерел АЕ, а також координати на сфері визначаються за формулами (2.3), (2.8) (2.13) і (2.17) відповідно.

3.6. Програмне забезпечення збору і обробки параметрів сигналів акустичної емісії

Програмне забезпечення вимірювальної ПАСАЕ складається з двох частин - програми збору (читання і буферизації) даних і пакета програм обробки даних.

Вимоги до цих програм різні: програма збору даних повинна забезпечити

максимальну швидкість системи без складної обробки інформації, що надходить, тоді як програми обробки не зв'язані лімітом швидкодії і повинні повною мірою використовувати широкі можливості персонального комп'ютера.

3.6.1. Програма читання і буферизації даних сигналів акустичної емісії. Для забезпечення максимальної швидкодії збору даних програма `acoust_a.com` була написана на мові низького рівня Асемблері (додаток Г.1), що дозволяє використовувати мінімум машинних кодів для виконання необхідних операцій [77].

Функціонально програма ділиться на 4 модулі - 1, 2 і 3-й призначені для обробки переривань і 4-й являє собою основний цикл.

1. Обробка переривання IRQ1.

IRQ1 виникає в момент натискання клавіші ESC і основною функцією обробки цього переривання є завершення програми.

2. Обробка переривання IRQ3, IRQ4, IRQ7.

IRQ3, IRQ4, IRQ7 виникають асинхронно в момент фіксації події (сигналу АЕ, вірогідність якого підтверджена відповідним приладом АФ-15). Обробка переривань здійснює наступні функції читання портів, збереження даних у буфері, введення лічильника переривань, виведення на екран динаміки роботи.

3. Обробка переривання IRQ5.

IRQ5 виникає періодично по тактах генератора тактових імпульсів одного з АФ-15, синхронізованого з двома іншими приладами. Основними функціями обробки переривання є читання портів, збереження даних у буфері, виведення на екран динаміки роботи, перевірка втрати переривання по лінії IRQ3.

4. Основний цикл являє собою послідовність функцій виконуваних безупинно до завершення програми. Виконує функції перевірки буфера клавіатури, перевірки прапора втрати переривання, перевірки прапора заповнення буфера, перевірка прапора неготовності буфера, збереження заповненого буфера на диск.

Тепер розглянемо структуру і призначення модулів більш докладно в порядку функціонування програми.

На початку дії програми робиться ряд необхідних установок. Дані уста-

новки включають:

- визначення сегментних адрес двох буферів;
- визначення розміру буфера;
- установка кількості байтів, які зчитуються по перериваннях;
- позначення прапора й ознаки помилки буфера;
- визначення відеопам'яті;
- визначення імені файлу і його Handle;
- перепризначення векторів переривань;
- програмування контролера переривань, маскування переривань по рівнях 3, 4, 5 і 7;
- призначення адрес портів;
- позначення прапора завершення програми.

Для збору даних вимірів використовуються два буфери. Розміщаються вони в ОЗП по адресах 8000H і 9000H (адреси приведені в шістнадцятковому коді), кожний із них має розмір 16×1024 тобто 16 кбайт. Дані в буфер надходять по черзі відповідно до сегментного Seg_Adr_A або поточним Cur_Seg_Adr адресою буфера і зміщенням Cur_Off_Adr, що збільшується в міру нагромадження і вказує на наступну позицію даних. При заповненні першого, тобто поточного буфера, прийом даних переходить до другого Seg_Adr_B або наступному Next_Seg_Adr, розміщення в який відбувається аналогічно першому, при цьому він стає поточним Cur_Seg_Adr, а першому привласнюється ім'я наступного Next_Seg_Adr і він записується на жорсткий диск у файл, після чого готовий до прийняття нової інформації при заповненні поточного. І так процес продовжується циклічно. Така організація прийому даних і досить великий розмір буферів дозволяють приймати параметри сигналів АЕ навіть при їхній максимальній інтенсивності без втрат. Кількість байтів, що зчитуються по перериваннях, дорівнює 11.

Ознака і прапор помилки буфера виставляється у випадку, якщо обидва буфери заповнені, тобто попередній буфер не встиг звільнитись до моменту заповнення поточного, і програма завершується з видачею повідомлення про не-

готовність буфера.

Відеопам'ять визначається адресою 0b800H і використовується для відображення динаміки ознак переривань тобто “3”, “4”, “5” і “7” на екрані.

Ім'я файлу, що вводиться з клавіатури, може бути довільним і мати довжину не більш 30 символів. Номер файлу або Handle буде визначений системно і використаний для відкриття, запису і закриття файлу даних АЕ.

Відповідно до встановлених адрес спроектованого модуля РІО-48 12 портів даних мають наступної адреси:

Adr3_Port1=220H; Adr3_Port2=221H; Adr3_Port3=222H;

Adr5_Port1=224H; Adr5_Port2=225H; Adr5_Port3=226H;

Adr4_Port1=334H; Adr5_Port2=335H; Adr5_Port3=336H;

Adr7_Port1=234H; Adr5_Port2=235H; Adr5_Port3=236H;

Крім даних установок, у програмі описуються макроси, тобто макрокоманди, призначені для виконання наступних дій: збереження регістрів у стеку, відновлення регістрів із стека, переміщення сегментних регістрів, установки і відновлення векторів переривань.

Далі програма переходить до визначення оброблювачів переривань.

Програма обробки переривання IRQ1 знаходиться по мітці New09H, призначена для перевірки стану клавіатури. Перевіряється наявність снак-коду 01H, тобто чи натиснута клавіша ESC. Якщо клавіша натиснута, програма завершується і реєстрація даних припиняється.

Обробка переривання IRQ3 виникає асинхронно. При визначенні істинності події субблок координат приладу АФ-15 виробляє запит на переривання. По приході запиту керування передається в програму з міткою New0b, що зчитує три порти ППІ по адресах 220, 221, 222H і формує значення амплітуди і координати. Після обробки переривання буфер містить 11 байтів у ASCII коді: 33 20 20 3X 3X 20 3X 3X 3X 0a 0d, або 3 XX XXX, де 3 - ознака переривання, XX - значення амплітуди, XXX - значення координати джерела АЕ. Тут також передбачений лічильник переривань за період ГТІ. Аналогічно відбувається обробка переривання IRQ4 і IRQ7.

Запит на переривання IRQ5 виникає з встановленим в АФ-15 періодом (ГТІ). Послідовність операцій, що відбуваються по приході переривання за рівнем 5, аналогічна операції обробки IRQ3 за винятком деяких деталей.

По приході запиту на переривання IRQ5 у ППІ зчитується значення кількості подій і осциляцій, що прийшли до АФ-15 за період ГТІ. Підпрограма обробки переривання запускається по мітці Newod. Відбувається читання портів другого ППІ по адресах 224, 225 і 226 і формування значень подій і осциляцій. Інформація, яка вміщується далі в буфер, має вигляд: 35 20 3X 3X 3X 20 3Y 3Y 3Y у ASCII коді, або 5 XXX YYY у десятковому коді, де 5 - ознака переривання, XXX - значення кількості осциляцій, YYY - значення кількості подій прийнятих АФ-15.

Контроль функціонування ППІ (РІО-48) здійснюється за допомогою контролю відповідності кількості фіксованих переривань при обробці IRQ3 і кількості подій, що видає прилад АФ-15, що є процедурою установлення вірогідності одержання інформації від АФ-15. У випадку втрати переривання програма по завершенню її функціонування видає повідомлення про кількість втрачених переривань, тобто параметрів АЕ.

На відміну від оброблювачів переривань, що приймають керування по приході на них запиту на переривання, основний цикл функціонує постійно.

Першим кроком основного циклу є перевірка прапора помилки буфера. Якщо прапор установлений, то програма завершує функціонування і видає повідомлення про помилку. Якщо прапор не виставлений, перевіряється готовність буфера до запису на диск. У випадку, коли буфер ще не заповнений, то цикл повторюється спочатку, інакше робиться запис змісту буфера на жорсткий диск у файл під зазначеним ім'ям, для цього використовується його Handle.

Завершення програми відбувається по перериванню IRQ1, після обробки якого відбувається запис даних на диск, відновлення старих векторів переривань, відновлення старої маски контролера переривань, закриття файлу і друк статистики роботи.

Після вирішення завдання збору даних і формування їх у текстовому

файлі здійснюється завдання вибірки і перетворення.

3.6.2. Програми обробки даних сигналів акустичної емісії. Відповідно до програми збору дані у файлі розташовані в точно визначеному порядку й обробка даних зводиться до розпакування файлу і послідовного зчитування інформації, її аналізу, обчислень і побудови графічних залежностей.

Програма попередньої швидкої обробки сигналів AE Report.exe (додаток Г.2.1) написана на мові програмування високого рівня Turbo Pascal [78]. Програма призначена для швидкого післяекспериментального оцінювання основних параметрів зареєстрованих сигналів АЕ: середньої і максимальної амплітуди, середньої і максимальної активності, сумарного рахунку АЕ.

Програма лінійної локації АЕ-джерел Graph.mcd (додаток Г.2.2), написана в оболонці математичного програмного забезпечення MATHCAD (надалі „MATHCAD”), будує графічні залежності амплітуди і активності зареєстрованих сигналів від часу і величини навантаження, амплітудного розподілу сигналів АЕ, сумарної кількості зареєстрованих сигналів АЕ від часу та від величини прикладеного навантаження, розподілу сигналів по лінійній координаті. Основні параметри зареєстрованих сигналів АЕ представляються також у вигляді таблиць.

Програма площинної локації 2Dgraph.mcd написана в MATHCAD і представлена в додатку Г.2.3. Програма представляє знайдені джерела АЕ у вигляді двомірних акустограм (так званих локаційних карт), де точками на площині показані локалізовані сигнали АЕ і трьохмірних акустограм (так званої “вичавленої сітки”), в яких по осі z відкладений один із параметрів сигналів АЕ. В програмі передбачено формування відеофайлу в форматі AVI, який дає можливість проглянути процес виникнення сигналів АЕ у часі.

Програма просторової локації 3Dgraf.mcd (додаток Г.2.4), написана MATHCAD, будує тримірні акустограми розподілу АЕ в об’ємі зразка, де крапками позначаються локалізовані сигнали АЕ.

Програма математичної обробки даних для просторової локації джерел АЕ сферичних об’єктів 3Dgraph_sphere.mcd (додаток Г.2.5) написана в

MATHCAD. Програма представляє результати локації у вигляді тримірних акустограм розподілу АЕ по поверхні зразка, а також локаційних карт, які являють собою проекції сфери з локалізованими сигналами АЕ.

3.7. Метрологічна оцінка вимірювальної програмно-апаратної станції акустичної емісії

В даній роботі не ставилась задача детальної метрологічної оцінки вимірювальної ПАСАЕ, тому метрологічну оцінку визначення основних параметрів ПАСАЕ, описаних в п. 3.5, здійснимо, враховуючи лише типові похибки складових вимірювального каналу зв'язку. Спрощена структурна схема кожного вимірювального каналу представлена на рис. 3.11, причому блок аналого-цифрового перетворення бере участь у формуванні восьмирозрядного двійкового коду значення амплітуди події, що впливає на похибку визначення амплітуди, сумарної амплітуди і енергії сигналів АЕ. На похибку визначення активності і сумарного рахунку сигналів АЕ впливають лише похибка ПЕП, попереднього підсилювача і підсилювача фільтрів.

В якості типових похибок візьмемо значення похибок сучасних електронних пристроїв, наприклад тих, які виробляються фірмою ANALOG DEVICES. Похибку восьмирозрядного ($n=8$) аналого-цифрового перетворювача, тобто помилку квантування, визначимо як половину молодшого розряду

$$\varepsilon = \frac{1}{2 \cdot (2^n - 1)} = 0,002. \quad (3.6)$$

Типові значення максимальних похибок представлені на рис. 3.11.

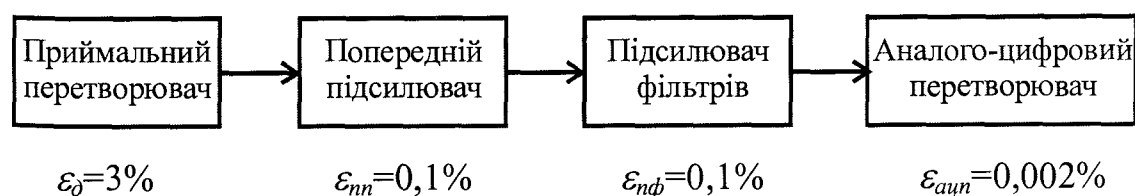


Рис. 3.11. Спрощена структурна схема вимірювального каналу

Без врахування законів розподілу складових похибок, сумарну похибку визначення основних параметрів сигналів АЕ визначимо як середньоквадратичне значення складових похибок

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_{\delta}^2 + \varepsilon_m^2 + \varepsilon_{нф}^2 + \varepsilon_{аип}^2} . \quad (3.7)$$

Оскільки похибка ПЕП набагато більша за інші, то сумарна похибка буде приблизно дорівнювати похибці ПЕП $\varepsilon = \varepsilon_{\delta} = 3\%$

Повірка розробленої ПАСАЕ включала повірку складових прилада АФ-15, а саме: попереднього підсилювача, субблока підсилювачів фільтрів, субблока амплітуди, субблока лінійних координат і субблока суматора. Повірка виконувалась згідно методики, розробленої Всесоюзним науково-дослідним інститутом з розробки неруйнівних методів і засобів контролю якості матеріалів Мінприладу СРСР м. Кишинів [79].

3.8. Висновки до розділу

1. Створено шести каналну програмно-апаратну станцію АЕ, для чого проведено модифікацію двох субблоків серійного приладу АФ-15 для можливості безперервної передачі сигналів АЕ у персональний комп'ютер (ПК), розроблено і створено модулі комп'ютерного паралельного інтерфейса введення/виведення РІО-48 для узгодження роботи з ПК, створено програми збору сигналів АЕ, що дозволяє підвищити в 40 разів об'єм АЕ-інформації, яка обробляється, здійснювати швидку комп'ютерну обробку, узгодити роботу декількох приладів АФ-15 між собою і ПК.
2. Розроблено пакет прикладних програм обробки параметрів сигналів АЕ, що дозволяє визначати лінійні, площинні та просторові координати джерел АЕ, представляти АЕ-сигнали у зручному наглядному вигляді дво- і тримірних графіків, підвищити точність локації завдяки програмному врахуванню швидкості поширення сигналів АЕ.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДИК ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЗВАРНИХ І ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ

Метою досліджень, приведених в даному розділі, було виявлення інформативних характеристик параметрів сигналів акустичної емісії, їх зв'язок з механічними характеристиками зварних і паяних з'єднань під неруйнівним впливом різноманітних навантажень і розробка методик контролю і діагностування їх технічного стану.

4.1. Діагностика технічного стану зварних з'єднань

Слід зазначити, що процес зварювання, крім переваг, володіє і рядом особливостей, які необхідно враховувати в процесі розрахунку, проектування і виготовлення зварних конструкцій. Так, в результаті зварювання у виробі з'являються залишкові напруження, які практично досягають границі текучості. Наявність залишкових зварних напружень інтенсифікує корозію матеріалів, які експлуатуються в агресивних середовищах. Відхилення в технології зварювання викликають появу гарячих і холодних тріщин, непроварів, різного роду включень в метал шва. Після приходу шва у стан рівноваги для виникнення АЕ необхідний загальний або локальний вплив зовнішнього навантаження на шов. Зварний шов, що є частиною силової схеми конструкції, бере участь в передачі цього навантаження. Характер навантаження, як і дефектність шву, визначає особливості виникаючої АЕ, і з методичної точки зору немає суттєвих особливостей в її порівнянні з досліджуваними іншими авторами випробуваннями суцільного матеріалу [80-85]. Набагато цікавішим є оцінка, контроль і прогнозування міцності зварних швів в процесі охолодження зварного шву після закінчення зварювання до приходу шва у стан рівноваги.

За об'єкт досліджень були взяті зварні з'єднання пластин сірого чавуну

СЧ-4, який відноситься до “важко зварюваних матеріалів. Зварювання чавуну ускладнюється через відбілювання його у місці нагріву, що створює тверду і крихку структуру, яка викликає тріщини, особливо при нерівномірному нагріві і швидкому охолодженні, сильне пароутворення за рахунок великої кількості окису вуглицю в шві, появу тугоплавкого окису кременя на поверхні ванни [86]. В ході аналізу отриманих сигналів АЕ передбачалось виявити залежність параметрів АЕ, зареєстрованих після зварювання до приходу шва у стан рівноваги, з дефектами зварювання.

4.1.1. Апаратура і обладнання для випробувань. Для реєстрації сигналів АЕ використовувались широкосмугові п'єзоелектричні перетворювачі ПІ 13 зі смугою пропускання 20–2000 кГц.

Для зварювання експериментальних зразків чавуну використовувався зварювальний апарат постійного струму ЗВА зі струмом дуги прямої полярності 110 А, напруга дуги 30 В. Швидкість зварювання – 0,35 см/с.

Для вимірювання температури зварного з'єднання використовувався прилад ПСР1 (Термопара хромель-копелева) з записом залежності температури від часу на самописець. Хромель-копелевий спай кріпився в спеціально зробленому отворі на відстані 20 мм від зварного шва.

Для механічних випробувань матеріалів використовувалась розривна машина ІР 5075-50.

Особливості методик визначення АЕ при розвитку дефектів зварного шву і її практичне застосування пов'язані з фізичною специфікою самого процесу зварювання, а також технологічних операцій при зварюванні [5]. Насамперед необхідно взяти до уваги високу шумність зварювання. В залежності від різних видів зварювання основними джерелами хвиль напружень в контрольованому виробі, як показують експерименти, є: горіння дуги, виток захисного газу, плавлення, твердіння і розтріскування флюсу або захисного покриття електроду, падіння крапель металу в зварювальну ванну, окислення поверхні при поганому захисті, тертя в затисних пристроях, механічні шуми в деталях автомата при автоматичному зварюванні, в пристроях для переміщення (обертання об'єкту),

плавлення і кристалізація матеріалу в зварній ванні, фазові перетворення в матеріалі в твердому стані, тріщиноутворення. При інших видах зварювання хвилі напружень можуть виникати і від інших джерел.

Другою особливістю є підвищена температура контролю. Це викликає необхідність застосування спеціальних ПЕП АЕ. При застосуванні п'єзоелектричної кераміки з відносно низькою температурою Кюрі необхідно забезпечувати спеціальне охолодження місця установки перетворювача, застосовувати штучні хвилеводи з метою зниження температури внаслідок природних втрат тепла або вимірювати АЕ після достатнього охолодження об'єкту.

4.1.2. Заходи щодо забезпечення зменшення рівня завад при експерименті. Використання АЕ для оцінки якості зварного шву визначається можливістю виділення сигналів, які породжуються дефектами, що розвиваються, з загальної маси сигналів, викликані вказаними раніше факторами, більшість з яких заважають. Тому однією з перших виникає задача оцінки рівня заважаючих факторів. Для оцінки рівня сигналів, викликаних окремими факторами або їх групами, застосовували наступну методику.

Шум дуги досліджували при її загоранні на мідній пластині, інтенсивність охолодження якої виключала плавлення основного металу. Сигнали, пов'язані з основним металом при його плавленні і кристалізацією, разом з шумом горящої дуги, реєструвались при швидкості зварювання 0,35 см/с. Сигнали, пов'язані тільки з кристалізацією металу, реєструвались при відключеній дузі. Результати оцінювання електромагнітних завад представлені в табл. 4.1. Для більшої завадозахищеності при експерименті було вирішено вимикати також і вентиляційне обладнання, завдяки чому рівень завад не перевищував 10 дБ. Такий рівень є цілком задовільним і відповідає динамічному діапазону реєстрованих сигналів АЕ 30...2000 мкВ.

4.1.3. Заходи щодо забезпечення виводу приймальних п'єзоперетворювачів з високотемпературної зони. При підготовці до експерименту виникла проблема контролю методом АЕ при високій температурі зварювання.

Оцінка електромагнітних завад при зварюванні

Назва завади	Рівень, дБ	Частота, кГц
Шум горящої дуги	35-40	200-1000
Шум працюючого зварювального апарату	20	0-500
Шум вентиляційного обладнання	16	0-200

До проведення випробувань необхідно було перевірити роботу ПЕП в умовах високих додатних температур, при яких вони самі можуть виявитись джерелами сигналів АЕ, тому що містять в своїй конструкції деталі із різнорідних матеріалів: металу, пластмаси, кераміки, компаунда, з коефіцієнтами лінійного розширення, які суттєво відрізняються. З цією метою ПЕП П113, приєднаний до ПАСАЕ, розташовувався в термокамері Файтрон 3526/51. Джерелом сигналів АЕ служив імітатор сигналів АЕ СМА-04 (рис. 4.1).

Випробування показали, що ПЕП П113 працездатний в інтервалі температур від $+50^{\circ}\text{C}$ до -50°C , графік залежності чутливості ПЕП від температури показаний на рис. 4.2. При температурах від $+50^{\circ}\text{C}$ до $+85^{\circ}\text{C}$ на показання ПЕП впливали завади, пов'язані з різницею в коефіцієнтах лінійного розширення матеріалів складових частин ПЕП (рис. 4.3).

Отже, кріпити ПЕП П113 безпосередньо до зварювальних поверхонь виявилось неможливим. На сучасному етапі проблема виведення ПЕП з високотемпературної зони вирішується в трьох напрямках: розробка безконтактних методів і пристроїв прийому сигналів АЕ; створення перетворювачів, здатних працювати при високих температурах; використання хвилеводів, що виводять перетворювач із високотемпературної зони [46].

Безконтактні методи, а саме лазерний інферометричний і конденсаторні методи не знайшли широкого застосування через значну складність, громіздкість і вартість.

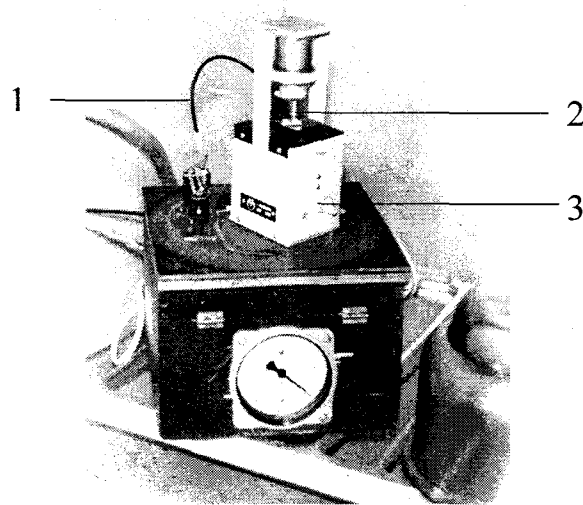


Рис. 4.1. Апаратура для перевірки працездатності ПЕП ПІ13:

1 - кабель ПЕП;

2 - ПЕП,

3 - імітатор сигналів АЕ СМА-04.

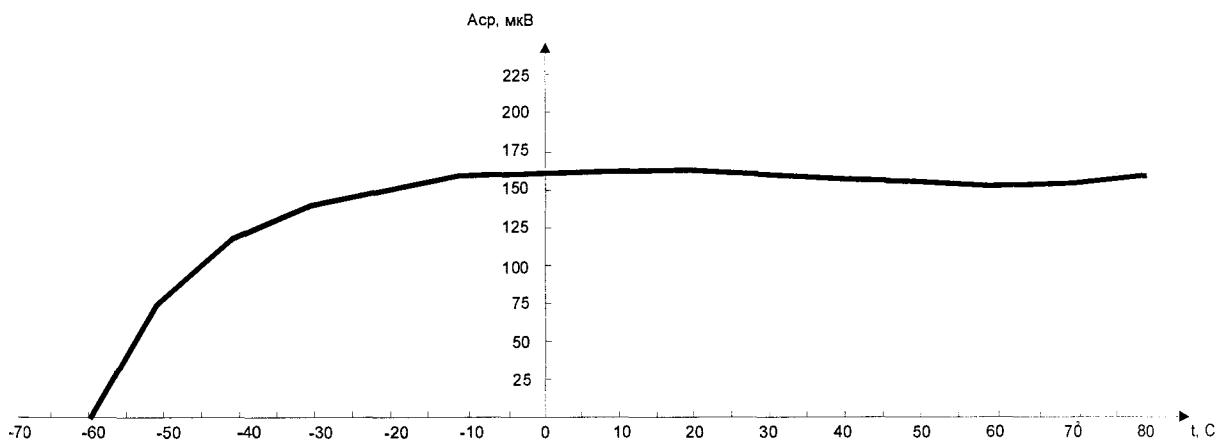


Рис. 4.2. Залежність чутливості ПЕП ПІ13 від температури

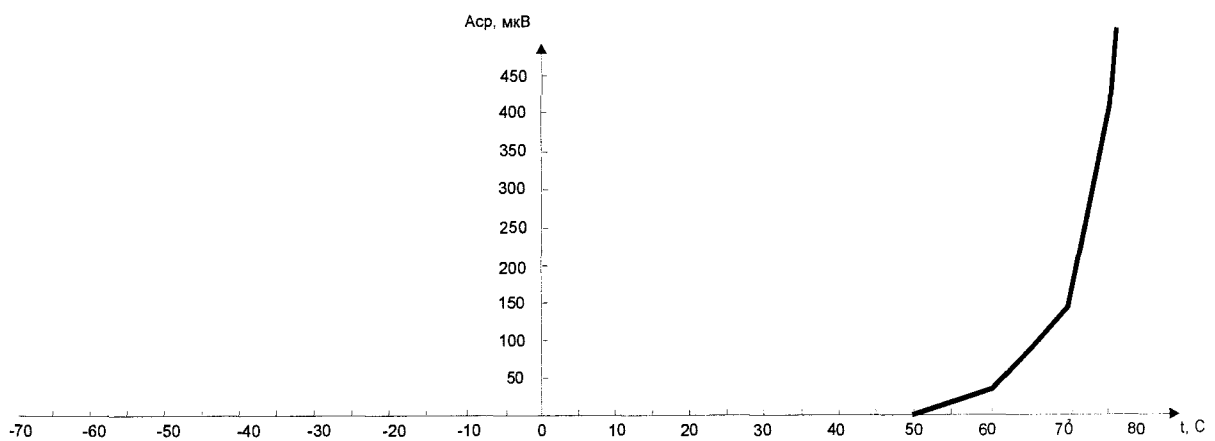


Рис. 4.3. Залежність появи сигналів АЕ ПЕП від температури

Створення нових перетворювачів для роботи при підвищених температурах є досить складним процесом. Тому для виведення ПЕП з високотемпературної зони було вирішено застосовувати хвилеводи. На рис. 4.4 представлені залежності температури торця хвилеводу від його довжини для декотрих металів [46].

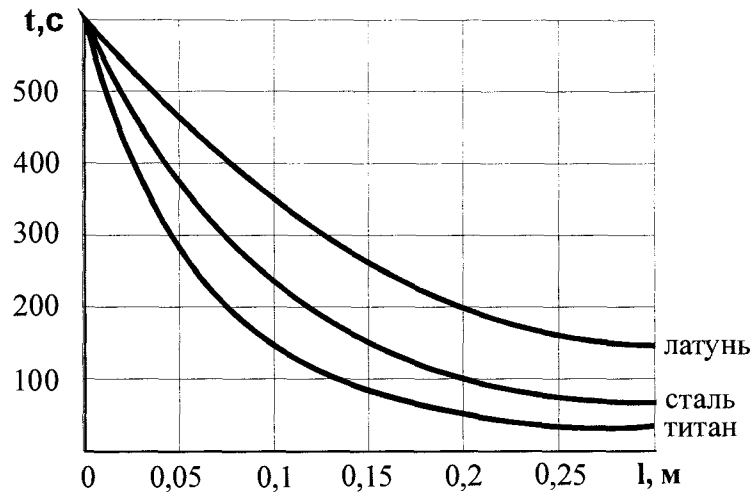


Рис. 4.4. Температура торця хвилеводу в залежності від його довжини:

Для вибору необхідного хвилеводу були проведені експерименти із застосування хвилеводів з різних матеріалів. При випробуваннях користувались рекомендаціями, викладеними в [46]. Хвилевод повинен забезпечувати достатню температуру в місці кріплення ПЕП при задовільному затуханні і низькому спотворенні сигналів.

Випробувались наступні хвилеводи: кварцові, свинцеві, титанові, латунні і сталеві розміром 500x400x25. Експеримент проводився за нормальних кліматичних умов за допомогою генератора ГЗ-112/1, що використовувався для збудження перетворювача ПЕП П113(1). Другий ПЕП (П113(2)) виконував роль приймача сигналів АЕ. Апаратура для випробувань хвилеводів представлена на рис. 4.5.

ПЕП кріпились до торців хвилеводу крізь контактний шар-клей ВК-1. Радіоімпульси з генератора подавались на ПЕП П113(1), який працював в режимі випромінювання. Останній збуджував в хвилеводі сигнали АЕ, які приймалися ПЕП П113(2). Контроль радіоімпульсів з генератора здійснювався: за напругою

- мікровольтметром (1), за частотою - частотоміром, за формою сигналу - осцилографом (канал 1). Вихідні сигнали перевірялись: за рівнем - мікровольтметром (2), за формою - осцилографом (канал 2).

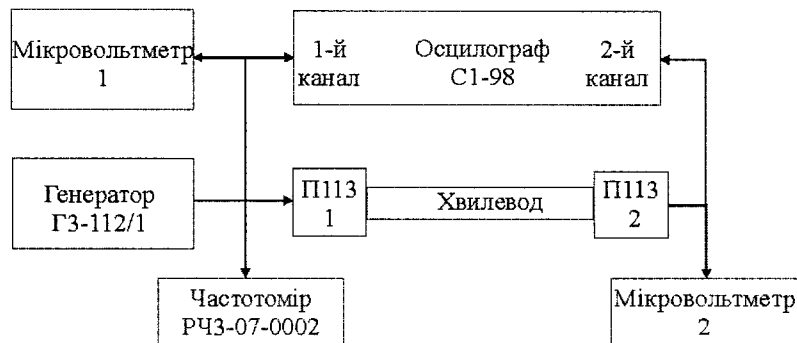


Рис. 4.5. Блок-схема установки для вимірювання коефіцієнта затухання сигналів АЕ в хвилеводі

Використання осцилографа дозволило порівнювати форму сигналів на вході і виході, зсув фаз, коефіцієнт затухання, що вносяться хвилеводами і контактними шарами. Параметри хвилеводу підбирались таким чином, щоб в ньому збуджувалась тільки повздовжня хвиля. Результати випробувань хвилеводів зведено до табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Визначення коефіцієнтів затухання сигналів АЕ при частотах 0,02-2,0МГц і вхідному сигналі випромінювача 300 мВ для хвилеводів з різних матеріалів

Тип хвилеводу	Сигнал на виході, мВ	Коефіцієнт затухання
Кварц	126	0,42
Свинець	30	0,1
Титан	129	0,43
Латунь	90	0,3
Чавун	210	0,7
Сталь	240	0,8

Коефіцієнт затухання визначався за формулою

$$K = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}, \quad (4.1)$$

де K - коефіцієнт затухання, $U_{\text{вих}}$ - покази мікрровольтметра на виході системи, $U_{\text{вх}}$ - покази мікрровольтметра на вході системи.

Конструкцію і розміри хвилеводів вибирали, враховуючи необхідність достатнього охолодження в місці розташування ПЕП ($t \leq 50^\circ\text{C}$) і зручності та надійності їх установки. В якості хвилеводів були вибрані сталеві пластини, які кріпилися на попередню зачищену поверхню чавунних зразків гвинтовими з'єднаннями.

4.1.4. Хід і результати експерименту. Для випробувань було підготовлено 20 пар пластин сірого чавуну СЧ-4 розміром 10-70-140, з яких передбачалось отримати 10 якісних зварних з'єднань, і 10 зварних з'єднань з дефектами. Для отримання якісних швів використовували гаряче зварювання. Зварювання вели чавунними електродами марки ЦЧ-4 постійним струмом оберненої полярності, з виконанням всіх необхідних температурних режимів. Для того, щоб ініціювати розвиток дефектів, зварювання вели електродами типу Э42 марки УОНИ – 13/45 діаметром 3 мм, які не призначені для зварювання чавуну. Зварювання виконували постійним струмом прямої полярності (струм 110 А, напруга дуги 28-30 В), при швидкості зварювання 0,35 см/с. Якість зварних швів оцінювали візуальним контролем і кольоровою (капілярною) дефектоскопією. Сигнали АЕ записувались відразу після відключення зварювальної дуги упродовж 30 хв. до приходу шва у стан рівноваги, тобто до моменту настання термодинамічної рівноваги, коли температура зварного шва дорівнювала кімнатній. На рис. 4.6 представлений типовий вигляд зварного шва чавуну. На рис. 4.7 (а) представлена типова залежність активності сигналів АЕ від часу і температури якісного зварного шва.

Як видно з акустограми, відразу після зварювання спостерігається зниження активності сигналів АЕ, при температурі 600-300 $^\circ\text{C}$ спостерігається характерний підйом активності, пов'язаний з термопластичними перетвореннями, що узгоджується з даними, отриманими іншими авторами [87]. Далі активність

сигналів АЕ плавно спадає до нуля.

Як видно з рис. 4.7 (б), характер АЕ дефектного шва інший. Тут при температурі $T=200-20^{\circ}\text{C}$ спостерігаються окремі значні спалахи активності, які пов'язані з формуванням дефектів. Цікавим є той факт, що поряд з ростом активності при тріщиноутворенні амплітуда сигналів АЕ зростає в 5 разів, що продемонстровано на рис. 4.8 (а).

Поділ сигналів АЕ за амплітудою сигналів АЕ на низькоамплітудні ($A \leq 0,4$ мВ) і високоамплітудні ($A > 0,4$ мВ) відповідно показав, що характер активності низькоамплітудних сигналів дефектного шва нагадує характер активності всіх сигналів АЕ бездефектного шва. Звідси можна зробити висновок, що високоамплітудні сигнали АЕ, показані на рис. 4.8 (б), випромінюються дефектами.

4.1.5. Лінійна локація дефектів зварних з'єднань під час їх формування. З метою визначення місць виникнення небезпечних дефектів зварювання в процесі тверднення розплаву була застосована лінійна локація. Два ПЕП кріпились крізь шар акустичного мастила на пластині-хвилеводі, як показано на рис. 4.9.

Результати показали, що застосування лінійної локації для контролю зварних швів в процесі їх охолодження дозволило виявити місця виникнення тріщин з точністю до поперечного перетину зварного шва. Типова трьохмірна діаграма, записана під час тверднення розплаву дефектного шва, представлена на рис. 4.10.

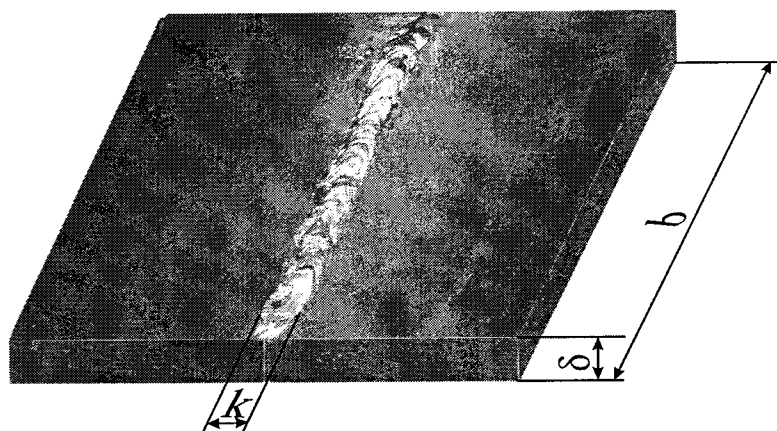


Рис. 4.6. Зварний шов, отриманий при зварюванні чавуну СЧ-4

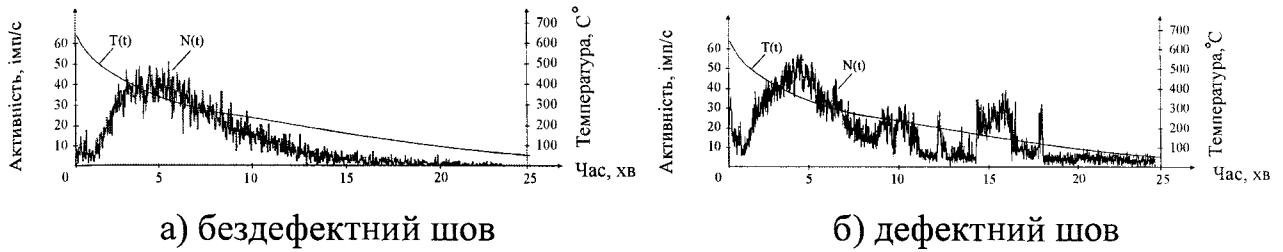


Рис. 4.7. Типові залежності активності сигналів АЕ від часу тверднення швів

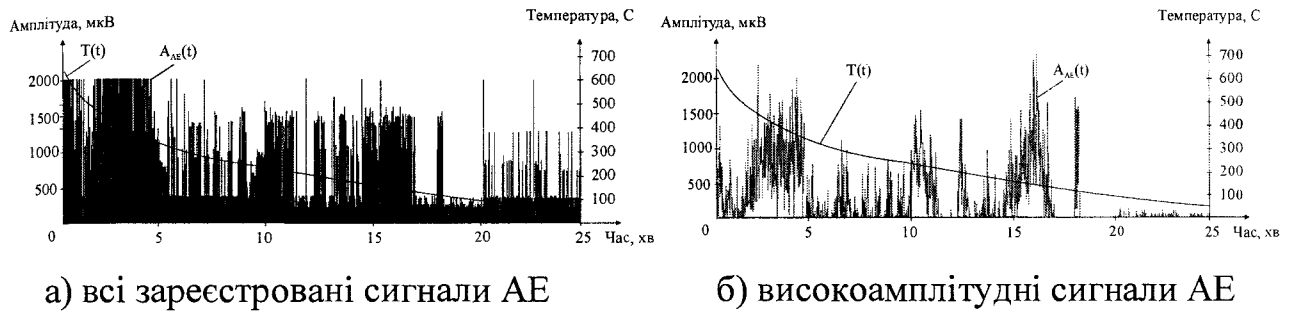


Рис. 4.8. Типові залежності амплітуди сигналів АЕ від часу тверднення дефектного шва

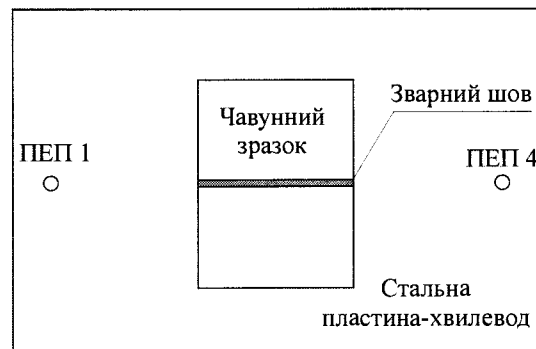


Рис. 4.9. Схема розташування ПЕП при контролі зварних швів

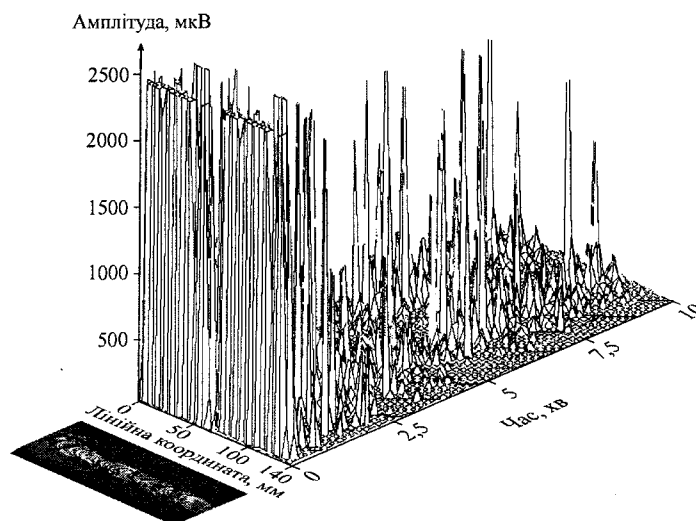


Рис. 4.10. Тримірна акустограма амплітуди сигналів АЕ по довжині зварного шва

Як показали експерименти, тріщини, розташовуючись хаотично, можуть заходити глибоко в навколошовну зону. Застосування лінійної локації дозволило виявляти перетини зварних швів, що містять тріщини, однак більш ефективним і практично цінним є визначення координат дефектів на площині.

4.1.6. Площинна локація дефектів зварних з'єднань під час їх формування. Для визначення координат дефектів зварювання в процесі тверднення розплаву за допомогою площинної локації джерел АЕ чотири ПЕП кріпили на пластині-хвилеводі крізь шар акустопрозорого мастила так, як показано на рис. 4.11.

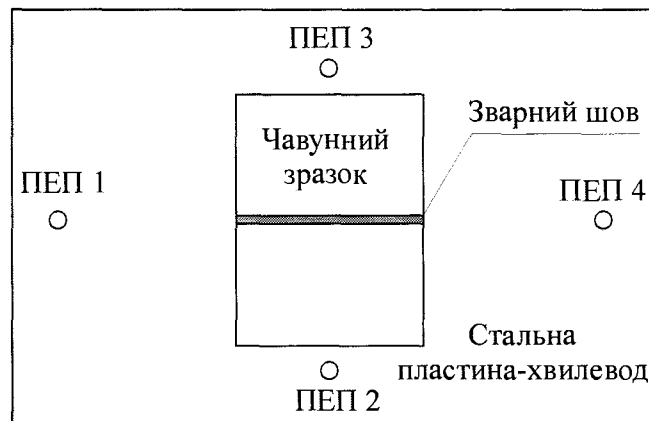


Рис. 4.11. Схема розташування ПЕП на чавунних зразках

Результати досліджень показали, що місця виникнення тріщин чітко прослідковуються за допомогою площинної локації сигналів АЕ, що продемонстровано на рис. 4.12 (виділені ділянки підвищеної АЕ-активності – кластери), при температурі середини лінії зварного шва ($\bar{T}=200^{\circ}\text{C}$). Як видно з акустограм, лоційовані сигнали АЕ за координатною ознакою можна об'єднати в кластери, в яких і проходять процеси тріщиноутворення. Для підтвердження того, що у зареєстрованих кластерах дійсно виникають тріщини, було проведено візуальний огляд і кольорова (капілярна) дефектоскопія зварних швів. Візуальний огляд (ГОСТ 3242-79) проводився неозброєним оком і за допомогою

лупи 10-кратного збільшення. Кольорова дефектоскопія (ГОСТ 18442-80) виконувалась із застосуванням яскраво-червоної проникаючої рідини пенетран і водного розчину каоліну. Результати візуального огляду і капілярної дефектоскопії отриманих зварних з'єднань чітко корелюються з даними АЕ. В місцях, виявлених способом площинної локації сигналів АЕ, було знайдено тріщини довжиною від 1 до 10 мм. Результати представлені на рис. 4.13.

Для кореляції сигналів АЕ, отриманих в процесі охолодження зварного шву після закінчення зварювання до приходу шва у стан рівноваги і отриманих при руйнуванні, були проведені випробування на розтяг на розривній машині ИР 5057-50.

4.1.7. Площинна локація дефектів зварних з'єднань при випробуванні на розтяг. Випробування на розтяг чавунних зразків проводили на розривній машині ИР 5057-50 зі швидкістю 0,5 мм/хв. Схема прикладення навантаження представлена на рис. 4.14 (а).

Навантаження проводили з одночасним записом сигналів АЕ. Оскільки випробування на розтяг на відміну від попередніх проводились при кімнатній температурі, чотири ПЕП розташовували безпосередньо в кутах звареної конструкції і кріпились крізь шар акустичного мастила струбцинами, як показано на рис. 4.14 (б).

Сигнали АЕ приймалися і оброблялись на ПАСАЕ. На рис. 4.15 (а) представлена типова тримірна акустограма амплітуди сигналів АЕ, лоційованих на зварних зразках способом площинної локації. Кластеризація джерел виконувалась з такою ж імовірністю, як і у випадку площинної локації сигналів АЕ в процесі тверднення розплаву після закінчення зварювання до приходу шва у стан рівноваги (рис. 4.15 (б)).

Встановлено, що в обох процесах кількість і місцезнаходження кластерів співпадають. Це означає, що мікротріщини, які виникли в зварному шві при його охолодженні, є ініціаторами макротріщин, що ведуть до повного руйнування зварної конструкції.

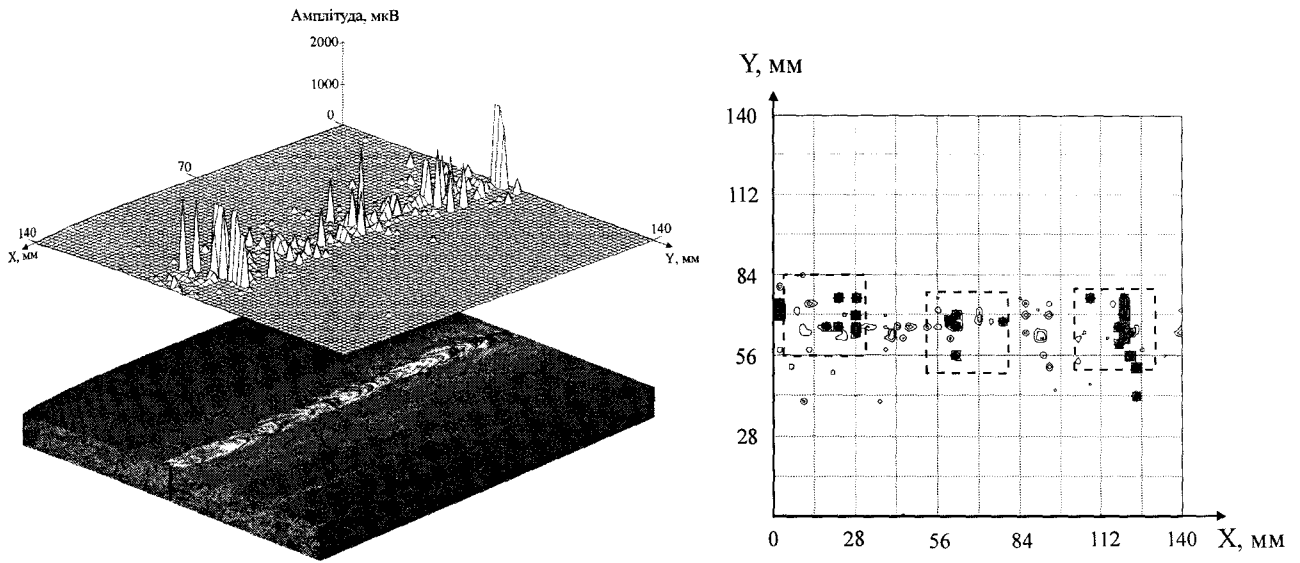


Рис. 4.12. Фрагмент площинної локації під час тверднення розплаву

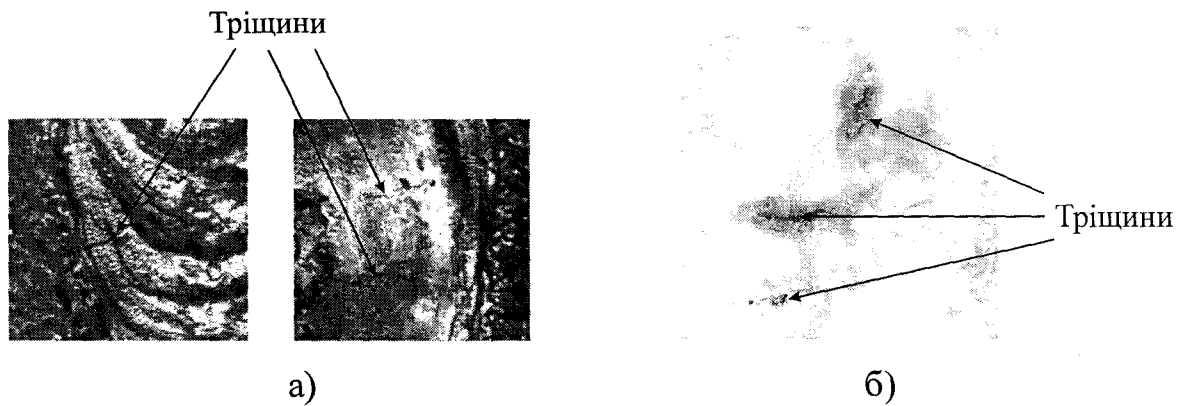


Рис. 4.13. Тріщини та мікротріщини, виявлені при візуальному огляді а) і методом капілярної дефектоскопії б)

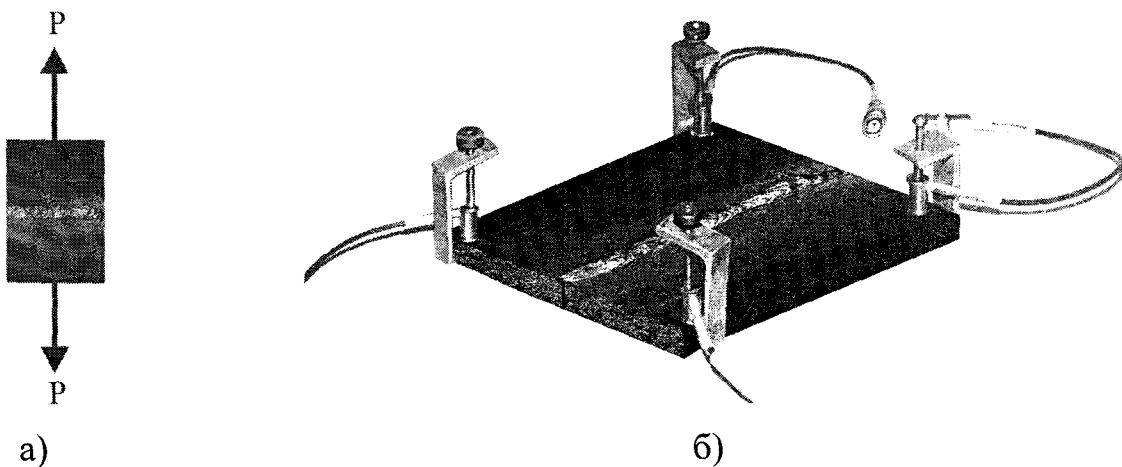


Рис. 4.14. Схема навантаження зварного з'єднання на відрив а) і розташування ПЕП на зварених чавунних зразках б)

На рис. 4.16 представлений фрагмент зруйнованого зварного шва. Як видно з фотографії, в зварному шві знаходиться багато внутрішніх пор, що є концентраторами напружень і зменшують його міцність. З літератури [88-90] відомо, що раковини і пори виникають під час зварювання при температурі, вищій 200°C. Це означає, що вклад сигналів АЕ, пов'язаних з виникненням пор і раковин, в загальну кількість зареєстрованих сигналів незначний. Цей факт підтверджує, що зареєстровані піки активності високоамплітудних сигналів, лоційовані за допомогою площинної локації, пов'язані з формуванням мікротріщин.

Кореляцію між характером сигналів АЕ під час тверднення розплаву і механічним випробуванням зварних з'єднань підтверджує наступний факт. При контролі зварних з'єднань деяких зразків під час формування шва способом площинної локації були знайдені тріщини, що заходили далеко в навколошовну зону. При випробуванні на розтяг вказаних зразків руйнування охоплювало основний метал. Відомо, що під впливом високої температури внутрішня структура чавуну змінюється (укрупнюється структура), що очевидно, і викликало у вказаних місцях подібний характер руйнування. На рис. 4.17 добре видно місце руйнування основного металу.

Аналіз сигналів АЕ в процесі тверднення розплаву показав, що найбільш інформативним параметром, який реагує на формування небезпечних дефектів, є максимальна активність сигналів АЕ. Для об'єктивної оцінки різноманітних зварних швів було вирішено використовувати питому активність сигналів АЕ на одиницю об'єму шва. Об'єм шва знаходився за формулою $V = \delta \cdot b \cdot k$, де δ - товщина зварюваного зразка, b - довжина шва, k - ширина шва. Для досліджуваних зразків маємо об'єм зварного шва $V = 10 \cdot 140 \cdot 8 = 11200 \text{ мм}^3$. За статистичною обробкою результатів експериментів визначено, що при твердненні шва при $T=200...20^\circ\text{C}$ максимальна активність сигналів АЕ від бездефектного шва не перевищує $0,89 \text{ імп/с}\cdot\text{см}^3$. Максимальна активність сигналів АЕ від дефектного шва в середньому складає $2,68 \text{ імп/с}\cdot\text{мм}^3$. За критерій дефектності було вибрано перевищення рівня питомої активності сигналів АЕ $\dot{N}=1 \text{ імп/с}\cdot\text{мм}^2$, завдяки чому була вироблена методика НК і діагностування технічного стану зварних швів в процесі тверднення розплаву [91].

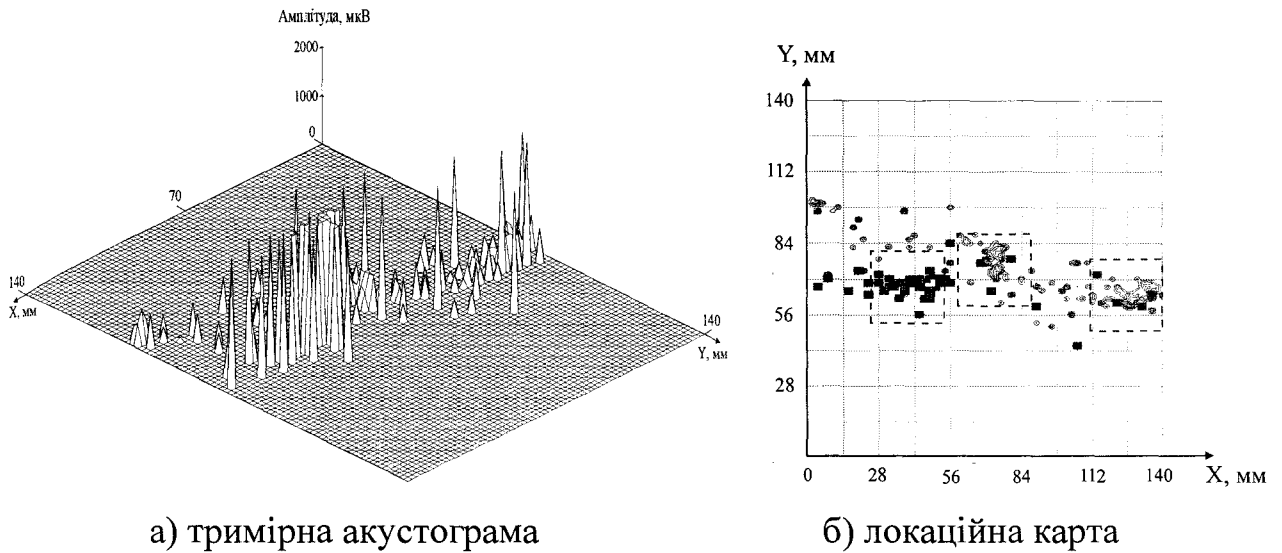


Рис. 4.15. Площинна локація при навантаженні зварного з'єднання на відрив

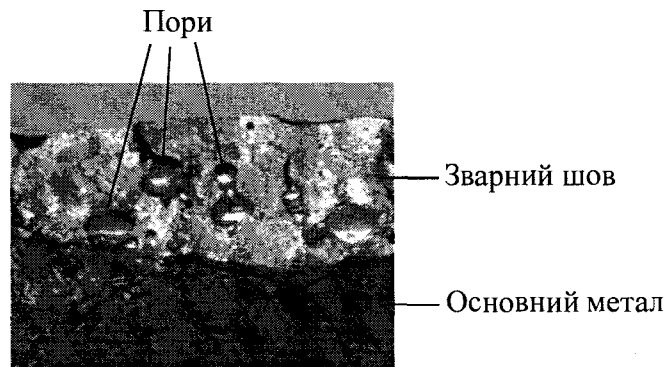


Рис. 4.16. Фрагмент зруйнованого зварного шва

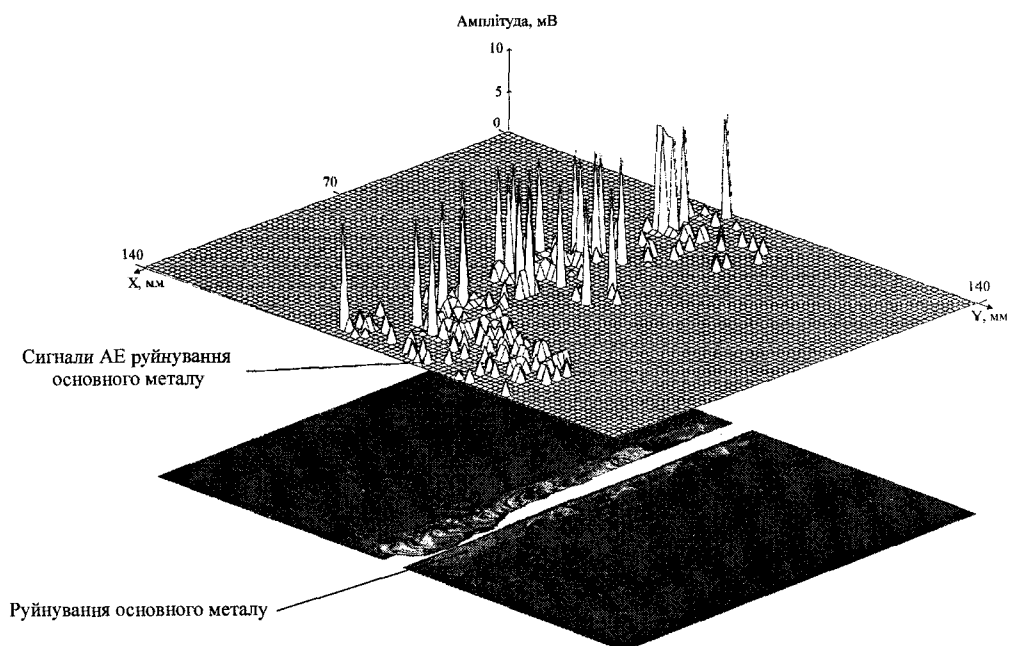


Рис. 4.17. Площинна локація при випробуванні зразків на відрив

4.1.8. Методика неруйнівного контролю і діагностування технічного стану зварних швів в процесі тверднення розплаву.

1. Після закінчення горіння дуги проводиться запис сигналів АЕ при кімнатній температурі навколишнього середовища протягом зміни температури шва від 200°C до 20°C (кімнатної температури).
2. Якщо максимальна активність сигналів АЕ під час спостережень перевищує допустимий рівень $N=1$ імп/с·см³, це означає, що у контрольованому зварному шві формуються небезпечні дефекти.
3. Координати небезпечних дефектів зварювання визначаються в процесі тверднення розплаву за допомогою площинної локації джерел АЕ.

4.2. Неруйнівний контроль і діагностування технічного стану паяних з'єднань друкованих плат електронних систем

Об'єктами досліджень були ПЗ друкованих плат електронної техніки, виконані як монтажем у отвори, так і поверхневим монтажем. Дослідження показали, що при твердненні ПЗ легкоплавких припоїв випромінюється незначна кількість сигналів АЕ, чого недостатньо для розробки методик контролю їх технічного стану, тому використовували випробування при механічному навантаженні ПЗ.

Метою роботи було дослідження міцності ПЗ друкованих плат електронних систем методом АЕ, випробування ПЗ з наперед заданими дефектами для кореляції і аналізу пов'язаних з ними сигналів АЕ, застосування методу АЕ для контролю і діагностування міцності ПЗ.

4.2.1. Випробування паяних з'єднань на відрив. Випробування на відрив на прикладі ПЗ резистора МЛТ2 з контактною ділянкою діаметром 2 мм на друкованій платі, проводили, застосовуючи експериментальну машину розривну ИР-5057-50, для чого в якості силовімірювача використовували ПЕП, що входить в комплект розривної машини, з максимальним граничним наван-

таженням 500Н. Похибка вимірювання навантажень не перевищувала 1% від максимального навантаження.

Для випробувань один вивід резистора МЛТ2 припаювався припоєм ПОС61 до металізованого отвору відрізка друкованої плати і закріплювався у верхніх затискачах розривної машини. Відрізок плати за допомогою спеціально розроблених затискних пристроїв нерухомо закріплювався у нижніх затискачах. Схема прикладення сили при випробуваннях ПЗ на відрив представлена на рис. 4.18.

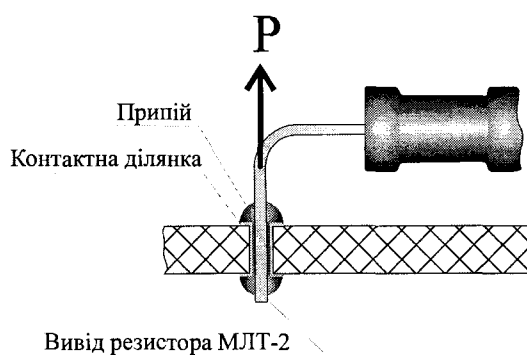


Рис. 4.18. Схема прикладення сили при випробуванні ПЗ на відрив

Випробуванню підлягали шістдесят ПЗ, двадцять з яких були виконані без дефектів, двадцять були виконані з дефектом “холодна пайка”, і двадцять – з дефектом “неспай”. Навантаження здійснювалось з постійною швидкістю 0,1 мм/хв. В ході випробувань фіксувались наступні параметри АЕ: амплітуда, активність, сумарний рахунок АЕ.

Попередні експерименти показали, що найменшу міцність на відрив мають ПЗ з дефектом “неспай”. Найбільше навантаження, що витримувало таке ПЗ, складає близько 30-40Н. При цьому вивід витягався з припоєю і в місці такого руйнування практично не випромінювались сигнали АЕ. Оскільки при виробництві РЕА факт повного необлуджування зустрічається дуже рідко, актуальним було дослідження частково залуджених виводів. Отже, у всіх наступних експериментах дефектом “неспай” вважався дефект ПЗ, отриманий в результаті частково незалуджування поверхні радіоелемента. Середнє навантаження, що витримувало таке ПЗ, склало близько 70-80Н. Для порівняння, середня сила

відриву виводу ПЗ з «холодною пайкою» склала 44Н, а бездефектного ПЗ 116Н. Як і передбачалось, характер АЕ від різних видів дефектів відрізнявся. Аналіз показав, що сумарний рахунок зареєстрованих АЕ-сигналів від ПЗ з «холодною пайкою» склав 70 імп. при максимальній активності під час руйнування 210 імп/с. Сумарний рахунок зареєстрованих АЕ-сигналів від ПЗ з «неспаєм» склав 22 імп. при максимальній активності під час руйнування 40 імп/с. Сумарний рахунок зареєстрованих АЕ-сигналів від бездефектного ПЗ склала 34 імп. при максимальній активності 51 імп/с. На рис. 4.19 приведені акустограми залежності сумарної кількості та активності сигналів АЕ від навантаження дефектних і бездефектних ПЗ, зафіксовані від початку навантаження до навантаження 44Н, тобто середнього руйнуючого навантаження найслабшого виду ПЗ з дефектом - «холодна пайка», що склало відповідно 40% від сили відриву бездефектного ПЗ.

Статистична обробка результатів випробувань (додаток Д.1) показала, що зниження значення руйнуючих навантажень ПЗ з дефектом «холодна пайка» і «неспай» є не випадковим з імовірністю довіри 95%, дефект «холодна пайка» знижує міцність ПЗ в середньому на 62%, дефект «неспай» знижує значення руйнуючих навантажень ПЗ в середньому на 35%.

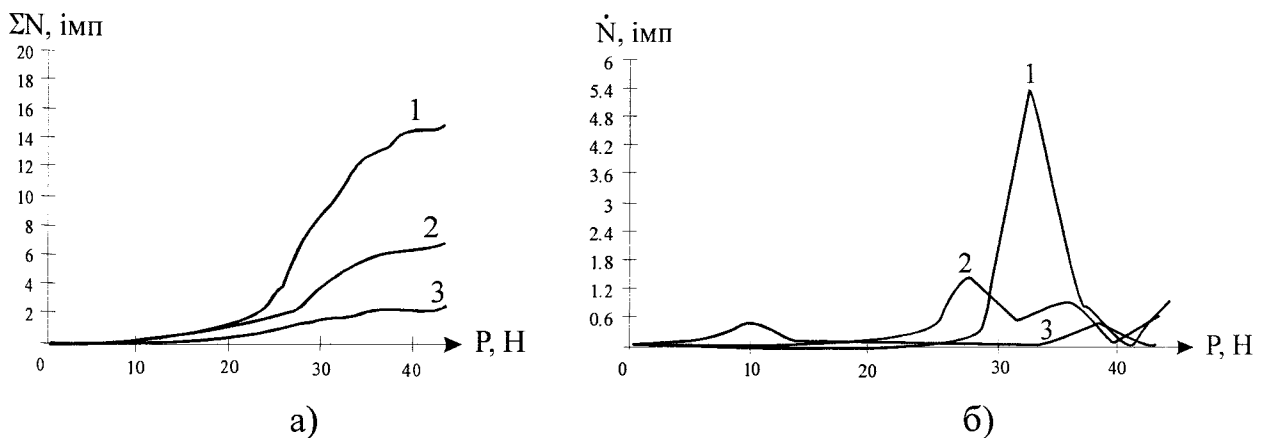


Рис. 4.19. Залежність сумарного рахунку сигналів АЕ а) і активності сигналів АЕ б) від навантаження на відрив:

- 1 - ПЗ з «холодною пайкою»;
- 2 - ПЗ з неспаєм;
- 3 - ПЗ без дефектів.

4.2.2. Визначення руйнуючих навантажень та деформацій при розтягу конденсаторів КМ-5В та К-10-9 із застосуванням акустичної емісії. Об'єктом наступних досліджень були металокерамічні конденсатори типу SMD, які все частіше використовуються в електронних системах. Частина таких конденсаторів у процесі зборки, випробувань та під час експлуатації виходять з ладу через відшарування контактних ділянок (і руйнування конденсатора), що потребує дослідження статичної міцності вказаних виробів. Випробування конденсаторів на зсув під дією поперечної сили показали, що у даному випадку відшарування виникає при величині сили, що в 2-4 рази перевищує руйнуюче навантаження розтягу, тому конденсатори типу К10-9 та КМ-5В випробовували на розтяг.

Метою роботи було визначення навантаження, яке приводить до відшарування контактних ділянок конденсаторів типу К10-9 та КМ-5В при розтягу, деформацій, які виникають у конденсаторах при розтягу, визначення та порівняння руйнуючих навантажень, що виникають у конденсаторах типу КМ-5В при пайці з перегрівом та “холодним” сплавом Розе, встановлення зв'язку між сигналами АЕ та міцнісними характеристиками ПЗ конденсаторів, паяних за різних технологічних умов.

З метою зменшення похибки вимірювання малих значень навантажень випробувань конденсаторів на розтяг вирішено було проводити на спеціально розробленому пристрої, що показаний на рис. 4.20, який містить платформу 1, кронштейн 2, коромисло 3, динамометр 4, тягу 6, барабан 7 і рукоятку 8.

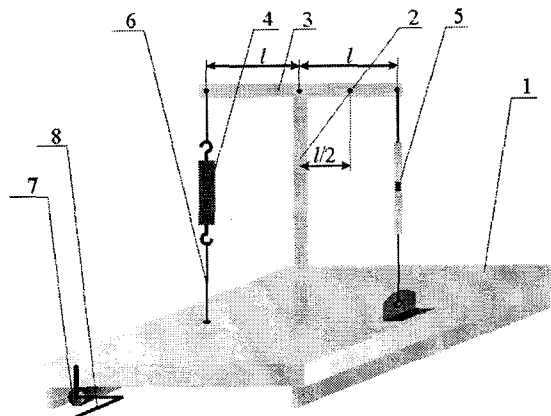


Рис. 4.20. Пристрій для випробування на розтяг

Обладнання для випробування включало 100 шт. конденсаторів К10-100 шт. конденсаторів КМ-5В, пристрій для випробування на розтяг, міст постійного струму АС-2, гальванометр типу М 17/2, комутаційний пристрій тип АП-1А, тензодатчики МБ-2, ПАСАЕ.

Навантаження конденсаторів здійснювалось наступним чином. Випробований конденсатор 5 закріплювався до коромисла і платформи шляхом підпайки виводів. Обертаючи рукоятку 8, здійснюється навантаження конденсатора з візуальною реєстрацією навантаження розтягу на динамометрі 4. Для підвищення точності вимірювання руйнуючого навантаження при випробуванні конденсаторів К10-9 (що мають менші значення руйнуючих навантажень) в пристрої передбачена можливість зміни довжини коромисла 3, тобто зміна плечей важеля в навантажуючій системі.

Випробуванню підлягали конденсатори типу К10-9 та КМ-5В, кожен із яких були взяті із однієї партії. Частина конденсаторів була припаяна на смугах, що вирізані із друкованих плат ПММ (рис. 2.21 (а)), а до частини конденсаторів припаювалися дротяні виводи (рис. 2.21 (б)). Далі конденсатори піддавали розтягу на пристрої (рис. 2.20) до руйнування з одночасним записом сигналів АЕ та записували значення руйнуючих навантажень. У всіх випадках руйнування відбувалось через відшарування контактної ділянки. Результати експериментів приведені в таблиці Е.1 (додаток Е).

Декілька конденсаторів були препаровані тензодатчиками, як показано на рис. 4.21 (в), за допомогою яких визначали залежність між деформаціями ε поверхні конденсатора, де розташовувався тензодатчик, та величиною прикладеного навантаження P . На рис. 4.22 представлені графіки залежності ε від P для випробуваних екземплярів конденсаторів.

Галузевим стандартом ОСТ 4Г0.054.061 передбачено монтаж конденсаторів КМ-5В на плату ПММ припоєм ПОС-61 ГОСТ 1499-77 (допускається припій ПСрОО-3-58) при потужності паяльника 15-20 Вт і тривалості пайки не більше 3-х секунд.

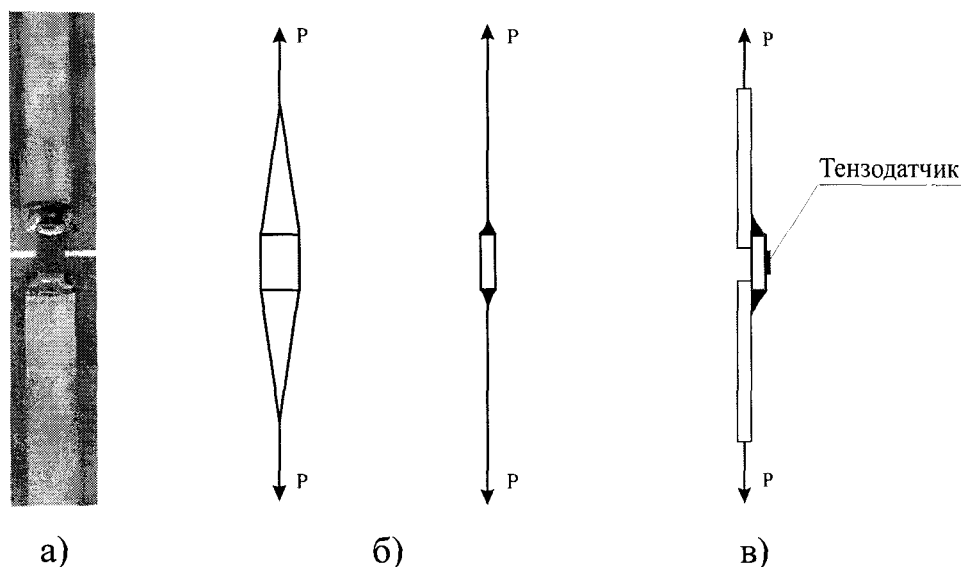


Рис. 4.21. Випробувальні зразки конденсаторів:

- а) зовнішній вигляд розташування конденсаторів на платах ПММ;
- б) схема припаювання дротяних виводів до конденсаторів;
- в) розташування тензодатчика на конденсаторі.

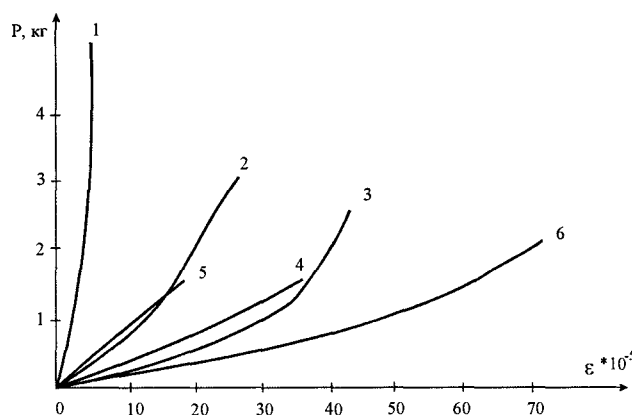


Рис. 4.22. Залежність між деформаціями і навантаженням розтягу у конденсаторах КМ-5В (1) і К10-9 (2,3 - 6)

Для визначення впливу прогріву контактного вузлу на величину руйнуючих його навантажень був проведений наступний експеримент. Конденсатори КМ-5В, взяті із однієї партії, були поділені на дві групи. Конденсатори першої групи припаювались до плати за вказаною технологією, але при тривалості пайки не менше 10 с при температурі 220-270°C, а конденсатори другої – сплавом Розе при температурі 94-120°C. Після контролю якості пайки конденсатори піддавались випробуванню за вказаною вище методикою.

Аналізуючи результати експерименту, представлені в таблиці Е.2 (додаток Е), можна припустити, що прогрів конденсаторів під час пайки не знижує міцності контактних вузлів, а покращує зчеплення контактних ділянок з обкладинками конденсатора і тому навіть підвищує міцність на відрив цих ділянок від конденсатора.

Під час навантаження конденсаторів К10-9, паяних припоєм ПОС-61 з “перегрівом” (тобто при прогріві вузла паяльником на протязі 10 с) і “холодним” припоєм Розе, реєструвались сигнали АЕ. Навантаження здійснювалось до руйнування за описаною вище методикою. Сигнали АЕ реєструвались одним ПЕП, закріпленим крізь шар акустичного мастила за допомогою струбцини на платі ПММ. На рис. 4.23 представлені порівняльні залежності сумарної кількості АЕ-сигналів упродовж часу навантаження конденсаторів, паяних припоєм ПОС-61 з “перегрівом”, що відповідає відносній деформації $\varepsilon=70 \cdot 10^{-5}$ (руйнування контактного вузлу конденсаторів К10-9 паяних “холодним” припоєм Розе відбувалось в середньому при $\varepsilon=45 \cdot 10^{-5}$). Як видно із графіків, високоамплітудні сигнали у конденсаторів, паяних “холодним” припоєм Розе з’являються набагато раніше, ніж у конденсаторів, паяних припоєм ПОС-61 з “перегрівом”. Активність їх відповідно у 2,5, а сумарний рахунок в 1,5 рази більший.

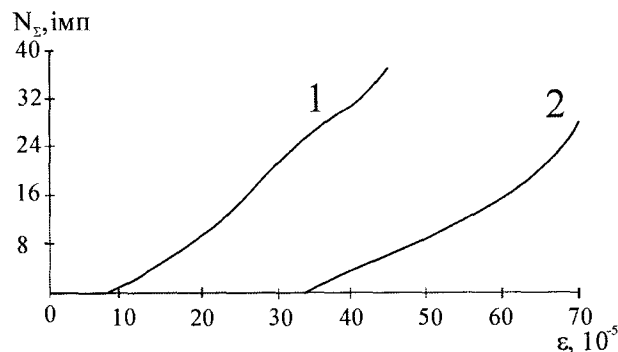


Рис. 4.23. Залежність сумарної кількості АЕ-сигналів від відносної деформації:

- 1- сигнали АЕ “холодного” припою Розе;
- 2- сигнали АЕ припою ПОС-61 з “перегрівом”.

Отже, за допомогою методу АЕ було підтверджено, що прогрів конденсаторів під час пайки не тільки не знижує міцності контактних вузлів, а покращує

зчеплення контактних ділянок з обкладинками конденсатора і тому навіть підвищує міцність на відрив цих ділянок від конденсатора.

В зв'язку з цим було висловлене припущення, що міцність контактних вузлів залежить від температури прогріву, яку можна регулювати, змінюючи температуру жала паяльника. Оскільки температуру пайки теоретично визначити досить складно, а практично можна регулювати лише температуру жала паяльника і тривалість пайки, було вирішено провести експеримент таким чином, щоб технологія пайки лишилась без змін, а необхідна температура контактного вузла досягалась попереднім прогрівом конденсаторів. В ході експерименту конденсатори були поділені на групи, кожна з яких витримувалась в термостаті протягом 1 год. при температурі відповідно 150°C, 180°C, 200°C, 215°C, 230°C, 250°C, після чого відбувалась їх розпайка. Припаяні конденсатори піддавались випробуванню за описаною вище методикою. Результати випробувань представлені в табл. Е.2. Результати випробувань показують, що в непрогрітому стані значення руйнуючих зусиль складає 30,6 Н, а після прогріву при 200°C – 47,6 Н, тобто міцність контактних вузлів в середньому підвищилась на 50%. Також встановлено, що оптимальна температура прогріву лежить у межах 180-200°C.

4.2.3. Випробування паяних з'єднань статичним навантаженням за схемою чистого згину. Випробування ПЗ на відрив з записом сигналів АЕ показали можливість їх НК і діагностування, однак такий контроль незручний в першу чергу через можливість одночасного контролю лише одного окремо взятого ПЗ. Тому було запропоновано провести випробування ПЗ навантаженням друкованих плат за схемою чистого згину, як показано на рис. 4.24. Така схема навантаження дозволяє отримати однакові за величиною механічні напруження в кожній точці поверхні плати, розташованої між опорами. Застосовуючи таку схему, можна контролювати всі ПЗ, розташовані між опорами.

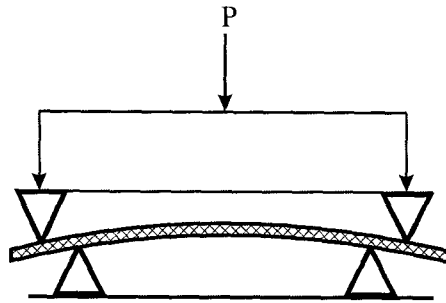


Рис. 4.24. Схема навантаження плат за схемою чистого згину

Для досліджень були вибрані друковані плати з SMD-монтажем (поверхневим монтажем). Останнім часом SMD-монтаж все частіше застосовується у електронній апаратурі завдяки ряду переваг перед монтажем у отвори. Більш того, там де це можливо, спостерігається тенденція до повної заміни монтажу у отвори на SMD-монтаж.

При оцінці міцності ПЗ необхідно використовувати механічні характеристики припоїв, які визначаються з врахуванням впливу конструктивних і технологічних факторів з'єднання. Міцність легкоплавких припоїв в литому стані менша за міцність ПЗ. Мінімальне значення границі міцності для припою ПОС40 в литому стані $\sigma_B=40$ Мпа [33].

Значення границі міцності для склотекстоліту $\sigma_B=45\dots 100$ МПа. Використовуючи значення границі міцності для припою (помилка, пов'язана з неврахуванням впливу конструктивних і технологічних факторів з'єднання піде в запас міцності), визначимо безпечний рівень механічних напружень за формулою

$$[\sigma] = \frac{\sigma_B}{n} = \frac{40}{2,5} = 16 \text{ МПа}, \quad (4.2)$$

де σ_B – границя міцності, $n=2,5$ – коефіцієнт запасу міцності. Такий запас міцності є достатнім для того, щоб безпечно напруження $\sigma_{\text{тест}}$ знаходилось на ділянці пропорційності припою і в припої відбувались лише пружні деформації, що не знижують міцності ПЗ. Визначимо силу, необхідну для неруйнівного навантаження ПЗ друкованої плати. Схема навантаження плати на чистий згин представлена на рис. 4.25. Поперечний переріз склотекстолітової пластини, що є основою плати, представлений на рис. 4.26.

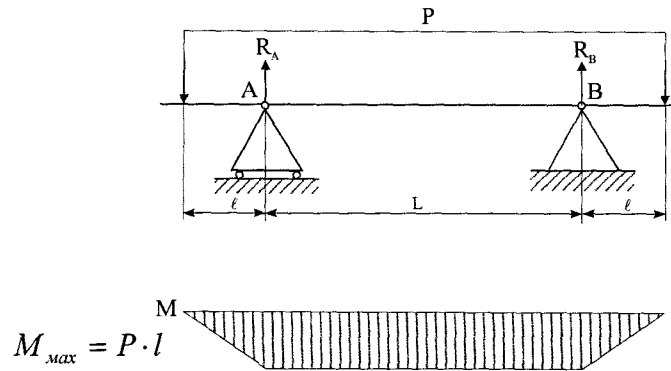


Рис. 4.25. Схема навантаження плати на чистий згин

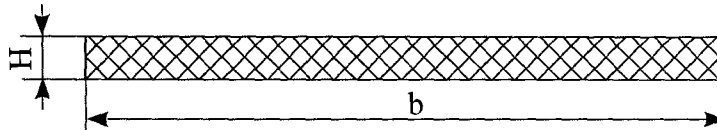


Рис. 4.26. Поперечний переріз склотекстолітової пластини

Максимальні напруження [92, 93], що виникають у небезпечному перетині, зв'язані з навантаженням формулою

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W_{oc}}, \quad (4.3)$$

де M_{max} – максимальний момент сили P , W_{oc} – момент опору, y_{max} – максимальна відстань від нейтральної лінії, $y_{max} = H/2$, де H - висота плати.

Максимальне прикладене навантаження має задовольняти умову

$$P \leq \frac{b \cdot H^2}{6l} [\sigma]. \quad (4.4)$$

Навантаження плат за схемою чистого згину на розривній машині ІР-5057-50 показало, що кількість реєстрованих сигналів залежить від швидкості навантаження плати, причому чим швидше зростає навантаження, тим більша кількість сигналів АЕ. Для аналізу сигналів АЕ необхідно реєструвати їх у достатній кількості, тому було вирішено навантажувати плати з максимально можливою для експериментальної розривної машини ІР-5057-50 швидкістю 100 мм/хв. На рис. 4.27 представлений пристрій для навантаження друкованих плат на чистий згин.

Навантаження ПЗ проводилось не перевищуючи максимально допустиме неруйнівне навантаження, що підраховувалось за формулою (4.3) і склало

$p=36\text{Н}$. Через малу кількість зареєстрованих сигналів упродовж одного циклу навантаження, випробування проводили за схемою навантаження/розвантаження. Кількість циклів навантаження/розвантаження кожної плати - 5. Мінімальне та максимальне значення напружень, що діяли на ПЗ, дорівнюють відповідно $\sigma_{min} = 0$ МПа та $\sigma_{max} = 16$ МПа. Сигнали акустичної емісії реєструвались ПЕП П-113 зі смугою пропускання 0,02-0,2 МГц, закріпленим на поверхні пластини крізь шар акустичного мастила.

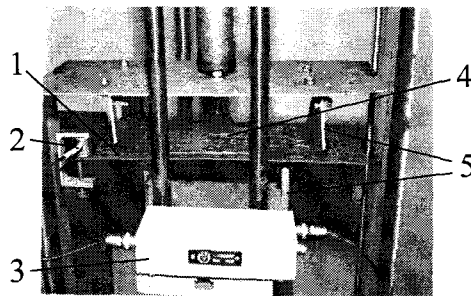


Рис. 4.27. Пристрій для навантаження друкованих плат на чистий згин:

- 1 – друкована плата;
- 2 – ПЕП;
- 3 – попередній підсилювач;
- 4 – резистор МЛТ-2;
- 5 – опори.

Випробування проводились на шістдесяті однотипних двосторонніх склотекстолітових фольгованих платах розмірами $320 \times 120 \times 1,5 \pm 0,1$ мм, показаних на рис. 4.28. Для експерименту були вибрані ПЗ без дефектів та з дефектами видів «холодна пайка» та «неспай», для чого на двадцяти платах якісно припаювався резистор МЛТ - 2 з дотриманням технологічних умов пайки (ОСТ 4Г0.054.089), на інших двадцяти платах в ПЗ одного із виводів резистора МЛТ - 2 штучно вводився дефект «холодна пайка», а саме такий її різновид, як «кільцева тріщина», що досить часто зустрічається при монтажі друкованих плат. На останніх двадцяти платах в ПЗ вводився дефект «неспай», для чого виводи резистора перед процесом паяння не залуджувались.

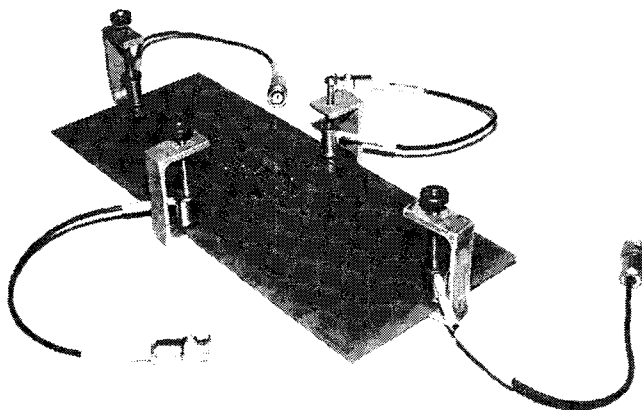


Рис. 4.28. Зразок досліджуваної плати з розташованими на ній ПЕП

В ході випробувань фіксувались наступні параметри АЕ: амплітуда, активність, сумарний рахунок. В результаті випробувань встановлено, що бездефектні ПЗ друкованих плат упродовж часу циклічного навантаження не випромінюють сигнали АЕ взагалі. Кількість сигналів від дефекту типу «неспай» складала 10-15 амплітудою до 1 мВ. Як правило, такі сигнали випромінюються під час збільшення навантаження та в моменти максимального навантаження. Сигнали від дефекту типу «холодна пайка» характеризуються значно більшою кількістю (30-40) амплітудою до 3 мВ. Характерною особливістю цього типу дефектів є те, що сигнали АЕ реєструються при знятті навантаження друкованої плати, що можна пояснити сходженням країв тріщини. На рис. 4.29 і 4.30 представлені характерні акустограми навантаження ПЗ з різними дефектами пайки.

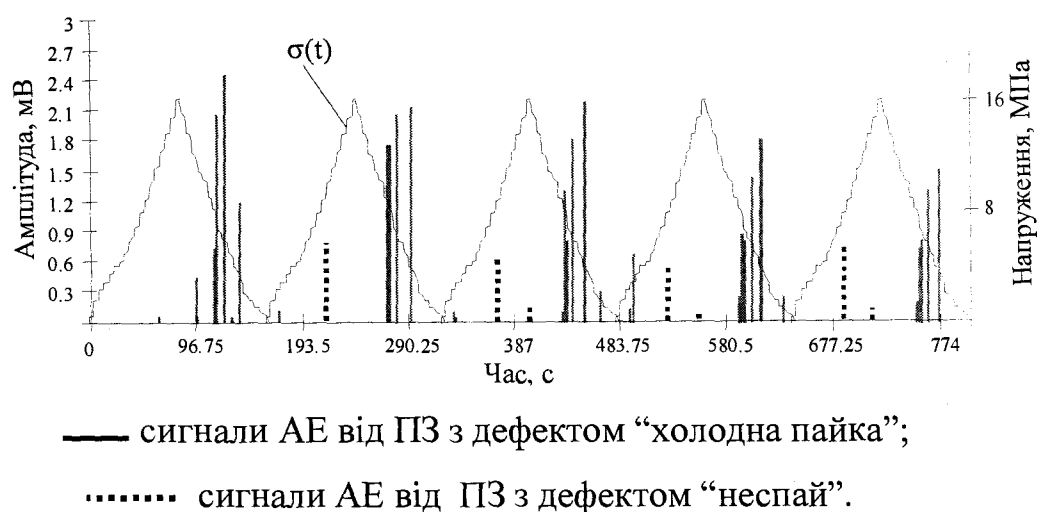


Рис. 4.29. Залежність амплітуди сигналів АЕ від циклічного навантаження

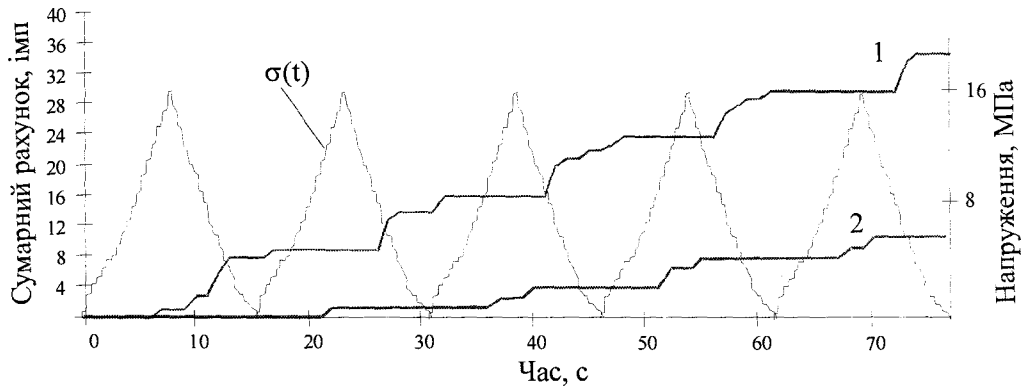


Рис. 4.30. Залежність сумарної кількості сигналів АЕ від циклічного навантаження:
 1 - ПЗ з "холодною пайкою";
 2 - ПЗ з "неспаєм".

Результати випробувань показали, що найінформативнішим параметром для аналізу сигналів АЕ та кореляції параметрів АЕ з різними видами дефектів ПЗ є сумарний рахунок акустичної емісії (кількість зареєстрованих перевищень імпульсами АЕ встановленого рівня дискримінації (обмеження) за інтервал часу спостереження).

Проведені дослідження показали можливість визначення технічного стану ПЗ друкованих плат методом АЕ, однак важливою задачею є визначення координат дефектних ПЗ, застосовуючи площинну локацію джерел АЕ.

З метою перевірки можливості застосування розробленого способу і засобу площинної локації для визначення місць розташування дефектів ПЗ проведено наступний експеримент. На склотекстолітовій друкованій платі розміром 300×120 мм в заданому місці з координатами $x = 75$ мм, $y = 220$ мм припаювався резистор МЛТ-2. ПЕП кріпились до плати крізь шар акустопрозорого мастила струбцинами на поверхні друкованої плати.

Швидкість поширення хвиль АЕ у матеріалі друкованої плати знаходилась експериментально. Для цього у двох взаємно-перпендикулярних напрямках розташовувались ПЕП. Сигнали АЕ імітувались поряд з одним із ПЕП. ПАСАЕ працювала в режимі лінійної локації. Проведено 10 експериментів в одному напрямку, і 10 в іншому. За дійсне значення швидкості взято середнє значення із 20-ти експериментів. Визначена експериментально середня швид-

кість поширення сигналів АЕ по поверхні плати складала 2,3 мм/мкс.

Плата з дефектом ПЗ “холодна пайка навантажувалась статично за схемою чистого згину. Точність локації виявилась невисокою, площа локалізованого джерела складала 2-4% від площі контрольованої плати, тобто зареєстровані сигнали мають розкид координат, що не дозволяє точно вказати місцеположення дефекту.

4.2.4. Площинна локація дефектів конструкцій, які містять різноманітні матеріали. Як говорилося раніше, на точність локації впливають акустичні характеристики середовища, у якому поширюються акустичні хвилі. Оскільки найчастіше локація здійснюється на крупногабаритних металоконструкціях, акустичні характеристики металу є сталими і питання про врахування відмінностей акустичних характеристик контрольованого матеріалу у літературі не висвітлені. Розглянемо це питання докладніше.

Поширюючись від джерела до ПЕП сигнали АЕ проходять неоднорідне середовище, яке містить свинцево-олов'яний припій, текстоліт, який сам собі є складною конструкцією, металізовані (наприклад мідні) доріжки і т. п., акустичні характеристики яких різняться. В табл. Ж.1 (додаток Ж) [72] приведені порівняльні акустичні характеристики декотрих із вказаних середовищ.

Крім суттєвої різниці в швидкостях поширення, на сигнали АЕ впливають неоднорідність середовища, в якому вони поширюються. На границі кожного середовища внаслідок розсіяння виникає дисперсія хвиль, що також змінює швидкості поширення через їх спотворення. В результаті для здійснення локації неможливо знайти та врахувати істинне значення швидкості поширення хвиль, врахування ж середньої швидкості не дає бажаної точності локації.

Отже, для підвищення точності локації і спрощення обчислень був запропонований спосіб локації в однорідному акустопрозорому середовищі зі сталою швидкістю поширення. Такий вибір був зроблений з наступних міркувань. Коефіцієнт затухання середовища складається з коефіцієнтів поглинання і розсіювання: $\delta = \alpha_n + \alpha_p$. При поглинанні звукова енергія переходить в теплову, а при розсіянні залишається звуковою, але відхиляється від напрямку хвилі, що по-

ширюється, в результаті відбиття від неоднорідностей середовища. В однорідному акустопрозорому середовищі (рідині або газі), не забруднених завислими частинками, бульбашками повітря (в рідині), розсіяння відсутнє, і затування визначається тільки поглинанням. У газах і рідинах поширюються тільки повздовжні акустичні хвилі (розтягу-стиску), завдяки чому можна уникнути одночасної реєстрації повздовжніх, поперечних і поверхневих хвиль, а значить і хибної локації. [72, 73]. Швидкість поширення ультразвукових хвиль в акустопрозорому середовищі визначається як

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}},$$

де K – модуль всебічного стиску, ρ - густина середовища, і не залежить від модуля пружності і коефіцієнта Пуассона, як в твердих тілах. В табл. Ж.2 приведені значення затування в деяких рідинах і повітрі при 20°C.

Для підвищення точності і спрощення локації був запропонований спосіб локації в однорідному акустопрозорому середовищі [17, 18]. Як видно з таблиці, найбільш прийнятним коефіцієнтом затування володіє вода - $\delta=2,5$. Отже, всі наступні експерименти з локації проводили у воді, для чого досліджувана друкована плата разом з навантажувальним пристроєм і ПЕП занурювалась у ванну з рідиною. ПЕП розташовуються не на поверхні плати, а на площині, паралельній площині плати на заданій відстані від неї так, щоб приймаюча поверхня ПЕП була спрямована в сторону поверхні деталі і хвиля, створена АЕ-джерелом, поширювалась і приймалась ПЕП в об'ємі рідини. Спосіб може бути застосований не тільки для прямокутних об'єктів, якими є плати, але і для будь-яких плоских конструкцій.

Для розв'язку задачі площинної локації в Декартових координатах використовується просторова система координат x у z . ПЕП розташовуються на осях координат x і y в площині $z=0$, як показано на рис. 4.31.

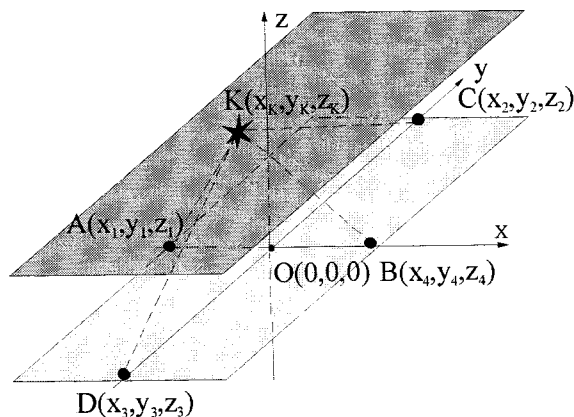


Рис. 4.31. Схема площинної локації в акустопрозорому середовищі:

т. K – джерело АЕ;

A, B, C і D – п'єзоелектричні перетворювачі.

Контрольована плоска конструкція лежить в площині $z = z_K$, де z_K - відома відстань від контрольованої площини до площини розташування ПЕП. Координати ПЕП відомі. За алгоритмом роботи, кожен з приладів АФ-15 фіксує РЧП τ_1 і τ_2 сигналів на свою пару ПЕП. Ці РЧП дають інформацію про різницю відстаней від джерела сигналів АЕ (точка K) до відповідних ПЕП:

$$\begin{cases} BK - AK = \tau_1 \nu, \\ CK - DK = \tau_2 \nu. \end{cases} \quad (4.5)$$

Тут τ_1 - РЧП сигналів АЕ до ПЕП A і B , τ_2 - РЧП до ПЕП C і D , ν - швидкість поширення ультразвуку в однорідному середовищі. Довжини відрізків AK , BK , CK і DK в координатах можуть бути виражені у вигляді

$$\begin{aligned} AK &= \sqrt{(x_1 - x_K)^2 + (y_1 - y_K)^2 + (z_1 - z_K)^2}, \\ BK &= \sqrt{(x_4 - x_K)^2 + (y_4 - y_K)^2 + (z_4 - z_K)^2}, \\ CK &= \sqrt{(x_2 - x_K)^2 + (y_2 - y_K)^2 + (z_2 - z_K)^2}, \\ DK &= \sqrt{(x_3 - x_K)^2 + (y_3 - y_K)^2 + (z_3 - z_K)^2}. \end{aligned}$$

де x_i, y_i, z_i - Декартові координати ПЕП ($i = 1 \dots 4$), z_K - відома координата площини досліджуваного об'єкта, x_K, y_K - шукані координати джерела АЕ. Підставивши значення довжин відрізків AK, BK, CK і DK в (4.5), отримуємо

$$\begin{cases} \sqrt{(x_4 - x_K)^2 + (y_4 - y_K)^2 + (z_4 - z_K)^2} - \sqrt{(x_1 - x_K)^2 + (y_1 - y_K)^2 + (z_1 - z_K)^2} = \tau_1 \nu, \\ \sqrt{(x_2 - x_K)^2 + (y_2 - y_K)^2 + (z_2 - z_K)^2} - \sqrt{(x_3 - x_K)^2 + (y_3 - y_K)^2 + (z_3 - z_K)^2} = \tau_2 \nu. \end{cases} \quad (4.6)$$

Внаслідок того, що початок координат вибраний на перетині осей симетрії прямокутника, що співпадає з площиною xu , $x_2 = x_3 = y_1 = y_4 = z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = 0$, $x_4 = -x_1$, $y_2 = -y_3$, і система рівнянь (4.6) спрощується до вигляду

$$\begin{cases} \sqrt{(x_4 - x_K)^2 + (y_K)^2 + z_K^2} - \sqrt{(x_4 + x_K)^2 + (y_K)^2 + z_K^2} = \tau_1 v, \\ \sqrt{(x_K)^2 + (y_2 - y_K)^2 + z_K^2} - \sqrt{(x_K)^2 + (y_2 + y_K)^2 + z_K^2} = \tau_2 v. \end{cases} \quad (4.7)$$

Легко побачити, що задача площинної локації в акустопрозорому середовищі є частинним випадком розв'язаної раніше задачі просторової локації джерел АЕ, описаної в п. 2.3. Справді, прийнявши у формулі (2.10) $\tau_3=0$, отримуємо систему рівнянь (4.7) з наперед відомим значенням z_K .

Використавши для (4.7) двічі дію піднесення до квадрата, після спрощення отримуємо

$$\begin{cases} \left(1 - \left(\frac{2x_4}{\tau_1 v}\right)^2\right) x_K^2 + y_K^2 = \left(\frac{\tau_1 v}{2}\right)^2 - x_4^2 - z_K^2, \\ x_K^2 + \left(1 - \left(\frac{2y_2}{\tau_2 v}\right)^2\right) y_K^2 = \left(\frac{\tau_2 v}{2}\right)^2 - y_2^2 - z_K^2. \end{cases} \quad (4.8)$$

Система (4.8) лінійна відносно квадратів невідомих x_0^2, y_0^2 . Розв'язавши її відносно x_0^2, y_0^2 , маємо

$$\begin{cases} x_K = \pm \sqrt{\frac{\left(1 - \left(\frac{2y_2}{\tau_2 v}\right)^2\right) \cdot \left(\left(\frac{\tau_1 v}{2}\right)^2 - x_4^2 - z_K^2\right) - \left(\left(\frac{\tau_2 v}{2}\right)^2 - y_2^2 - z_K^2\right)}{\left(1 - \left(\frac{2x_4}{\tau_1 v}\right)^2\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{2y_2}{\tau_2 v}\right)^2\right) - 1}}, \\ y_K = \pm \sqrt{\frac{\left(1 - \left(\frac{2x_4}{\tau_1 v}\right)^2\right) \cdot \left(\left(\frac{\tau_2 v}{2}\right)^2 - y_2^2 - z_K^2\right) - \left(\left(\frac{\tau_1 v}{2}\right)^2 - x_4^2 - z_K^2\right)}{\left(1 - \left(\frac{2x_4}{\tau_1 v}\right)^2\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{2y_2}{\tau_2 v}\right)^2\right) - 1}}. \end{cases}$$

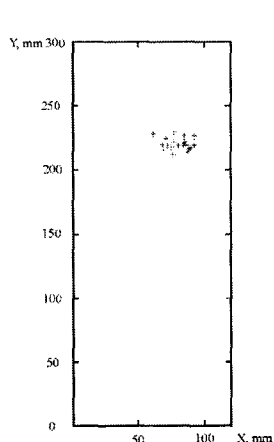
Розрахунковими формулами обчислення координат джерела АЕ є

$$\begin{cases} x_K = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau_1^2 v^2 \tau_2^2 v^2 (\tau_2^2 v^2 - \tau_1^2 v^2 + 4x_4^2 - 4y_2^2) + 4\tau_1^2 v^2 y_2^2 (\tau_1^2 v^2 - 4x_4^2 - 4z_K^2)}{4\tau_1^2 v^2 y_2^2 + 4\tau_2^2 v^2 x_4^2 - 16x_4^2 y_2^2}}, \\ y_K = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau_1^2 v^2 \tau_2^2 v^2 (\tau_1^2 v^2 - \tau_2^2 v^2 - 4x_4^2 + 4y_2^2) + 4\tau_2^2 v^2 x_4^2 (\tau_2^2 v^2 - 4y_2^2 - 4z_K^2)}{4\tau_1^2 v^2 y_2^2 + 4\tau_2^2 v^2 x_4^2 - 16x_4^2 y_2^2}}. \end{cases} \quad (4.9)$$

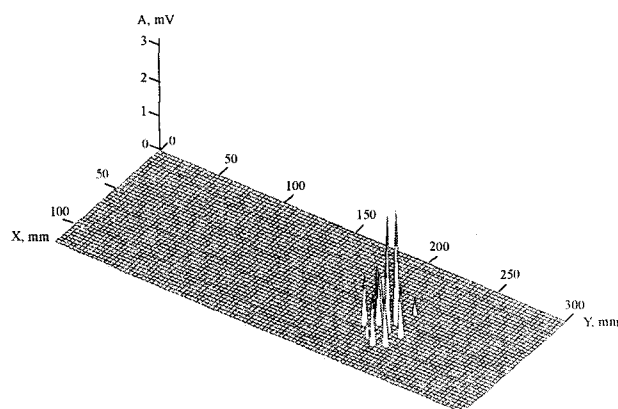
Знак + чи – вибирається виходячи з тих же міркувань, що і для площинної локації, описаної в п. 2.2.

Для експериментальної перевірки ефективності такого способу був проведений наступний експеримент, аналогічний описаному в п. 4.2.3, але ПЕП розташовувались на площині, віддаленій від площини плати на 70 мм, так, щоб приймаюча поверхня ПЕП була обернена до плати. Друкована плата разом з ПЕП занурювалась у воду з відомою швидкістю поширення акустичних хвиль 1,49 мм/мкс. Порівняльні результати площинної локації звичайним способом і в акустопрозорому однорідному середовищі представлені на рис. 4.32 і 4.33. Результати способу локації в акустопрозорому середовищі показали, що точність локації підвищилась не менш ніж в 4 рази і площа локалізованого джерела складає близько 1% від контрольованої площі друкованої плати, що в 2-4 рази перевищує точність локації звичайним способом.

В результаті проведених досліджень розроблено методику НК і діагностування технічного стану ПЗ друкованих плат, і всі наступні випробування промислових друкованих плат було вирішено проводити в акустопрозорому середовищі.

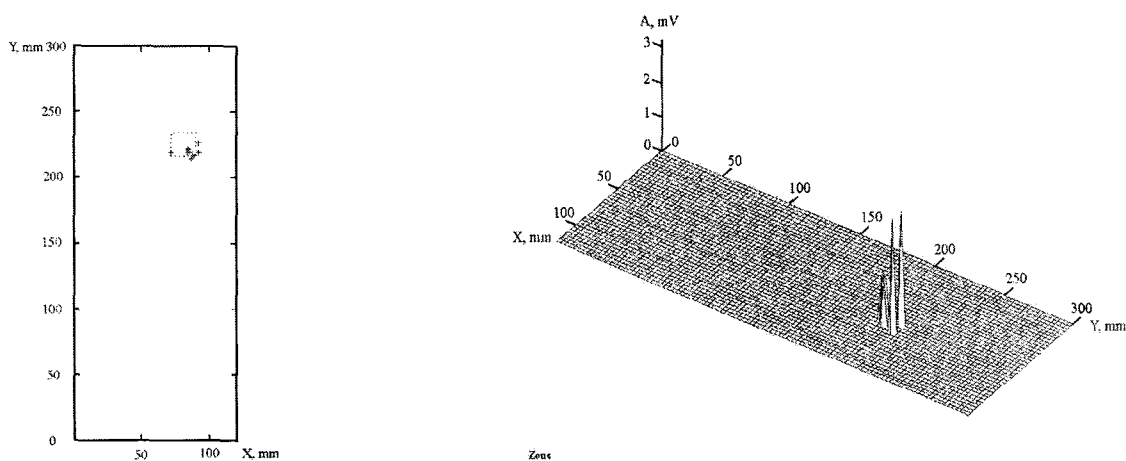


а) двомірні акустограма



б) тримірні акустограма

Рис. 4.32. Акустограми розподілу сигналів по площині досліджуваної плати (ПЕП розташовувались на поверхні плати)



а) двомірна акустограма

б) тримірна акустограма

Рис. 4.33. Акустограми розподілу сигналів по площині досліджуваної плати (локація в однорідному акустопрозорому середовищі)

4.2.5. Методика діагностування технічного стану паяних з'єднань друкованих плат.

1. Друковану плату навантажувати за схемою чистого згину до безпечного рівня навантаження з коефіцієнтом запасу міцності матеріалу припою $n=2,5$;
2. При появі сигналів АЕ повторюють цикл навантаження/розвантаження до 5 разів, і, якщо емісія не припиняється, плата містить дефект ПЗ і відбраковується.
3. За необхідністю, проводять локацію дефектів у відбракованих платах в акустопрозорому середовищі, виявляючи місце дефектного ПЗ і ліквідують дефект.

Розроблена методика була перевірена при діагностуванні ПЗ партії промислових друкованих плат [13, 14, 94].

4.2.6. Діагностування технічного стану паяних з'єднань промислових друкованих плат. Випробуванню підлягало 32 однотипних склотекстолітових двосторонніх друкованих плат з одностороннім SMD-монтажем розміром 120×140 мм. Плати були взяті із однієї партії. Випробування проводились за методикою, описаною вище, циклічно за схемою чистого згину. Пристрій навантаження, друкована плата і ПЕП занурювались у воду. ПЕП розташовувались на відстані 70 мм від друкованої плати на склотекстолі-

товій пластині (рис. 4.34).

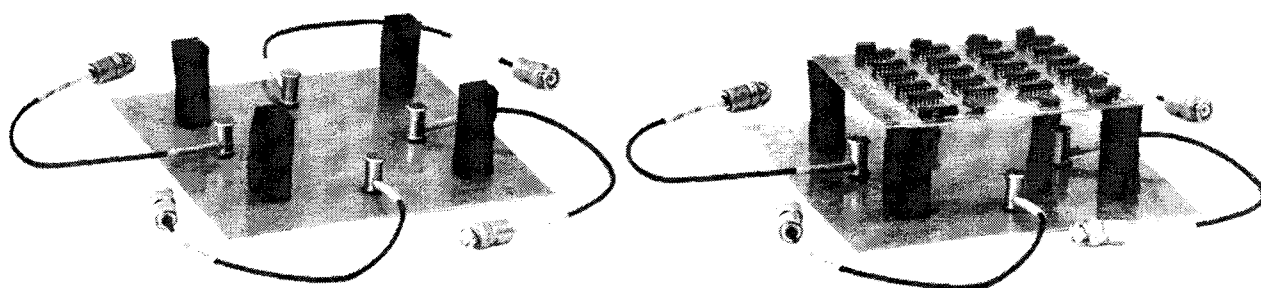
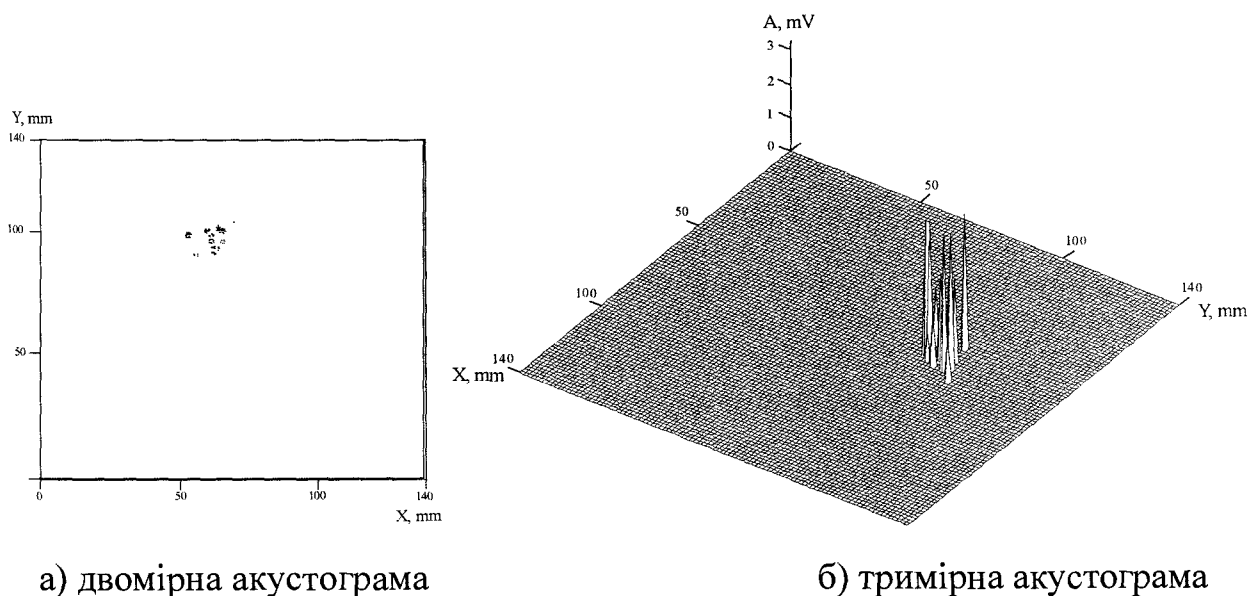


Рис. 4.34. Розташування ПЕП відносно тестованої плати

За результатами випробувань в трьох платах були виявлені місця АЕ активності. За характером АЕ був визначений тип дефектів – “неспай”, що підтвердилося при подальшому ретельному огляді плат у вказаних місцях за допомогою лупи 10-кратного збільшення. Наявність дефектів перевірялась пропусканням струму крізь ПЗ, а також заміром його електричного опору. Оскільки плати були в експлуатації тривалий час, можна припустити, що вказаний дефект був прихованим і міг проявитись при подальшій експлуатації електронного виробу, що привело б до його відмови. На рис. 4.35 представлені характерні акустограми сигналів АЕ друкованих плат з вказаними дефектами ПЗ.



а) двомірна акустограма

б) тримірна акустограма

Рис. 4.35. Акустограми розподілу сигналів по площині досліджуваної плати (локація в акустопрозорому середовищі)

4.3. Висновки до розділу

1. Встановлено, що метод АЕ неефективний для контролю якості паяних з'єднань легкоплавких припоїв в процесі тверднення розплаву, і навпаки, високоефективний для контролю якості зварювання в процесі тверднення шва.
2. Використовуючи рекомендації [46], проведений відбір хвилеводів, які служать для передачі сигналів АЕ від зварювального з'єднання до ПЕП П113, що дало можливість вивести ПЕП з високотемпературного поля, де він не працездатний.
3. Розроблено методику діагностування технічного стану зварних з'єднань в процесі тверднення розплаву з визначенням координат дефектів за допомогою площинної локації джерел сигналів АЕ:
 - після закінчення горіння дуги проводиться запис сигналів АЕ при кімнатній температурі навколишнього середовища протягом зміни температури шва від 200°C до 20°C (кімнатної температури);
 - якщо максимальна активність сигналів АЕ під час спостережень перевищує допустимий рівень $N=1$ імп/с·см³, то це свідчить про те, що у контрольованому зварному шві формуються небезпечні дефекти.
 - за допомогою площинної локації визначаються місця небезпечних дефектів зварного шва.
4. Експериментально встановлено, що попередній прогрів конденсаторів КМ-5В збільшує міцність їх контактних вузлів, і оптимальна температура прогріву лежить в діапазоні 180...200°C.
5. Встановлена кореляція між параметрами АЕ і такими дефектами паяних з'єднань, як "холодна пайка" і "неспай" при неруйнівному навантаженні друкованих плат за схемою чистого згину.
6. Вперше, шляхом занурення контрольованого об'єкту і ПЕП в акустопрозор однорідне середовище, значно точніше вирішено задачу визначення координат дефектів у конструкціях зі складною неоднорідною поверхнею.
7. Розроблено методику діагностування технічного стану паяних з'єднань елек-

тронних систем з визначенням координат дефектів:

- друкована плата навантажується за схемою чистого згину до безпечного рівня навантаження з коефіцієнтом запасу міцності матеріалу припою $n=2,5$;
- при появі сигналів АЕ повторюють цикл навантаження/розвантаження до 5 разів, і, якщо емісія не припиняється, плата містить дефект ПЗ і відбраковується.
- за необхідністю, проводять локацію дефектів в акустопрозорому середовищі, знаходять місце дефекту і ліквідують його.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА АКУСТИКО-ЕМІСІЙНИХ МЕТОДИК ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

В даному розділі приведені акустико-емісійні дослідження технічного стану різноманітних промислових об'єктів. Результатами досліджень є розроблені методики неруйнівного контролю і діагностики технічного стану, які були впроваджені на виробництві.

5.1. Діагностика технічного стану і прогнозування міцнісних характеристик важелів S 48.167230

Об'єктом дослідження були важелі S 48.167230, які поряд з деякими іншими деталями виробляються на ВАТ "АДВІС" (м. Хмельницький) та є відповідальними складовими деталями автовантажників, які випускається фірмою "JUNGHEINRICH" (Німеччина) і експортуються у більш ніж 80 країн світу. Креслення важеля представлено на рис. 5.1. Матеріал важелів – сталь 45ХЛ, причому після литва важелі проходять термічну обробку (HRCэ-26-30) для підвищення значення границі міцності до $\sigma_{\epsilon} = 900-950$ МПа. Важелі експлуатуються в динамічних умовах і працюють як обмежувачі вільного ходу вил навантажника. Експлуатаційне навантаження прикладається таким чином, що важіль працює на згин відносно нерухомо закріплених центрів отворів, у більшому з яких знаходиться стрижень з роликом.

Від представників фірми "JUNGHEINRICH" стало відомо, що під час експлуатації одного з автовантажників у Великій Британії відбулось руйнування важеля, що привело до аварії. Як виявилось пізніше, причиною була небезпечна внутрішня раковина металу. На рис. 5.2 показаний зовнішній вигляд зруйнованого важеля.

В зв'язку з цим німецька сторона посилила контроль за якістю продукції

ВАТ «АДВІС». В результаті вибіркового руйнівного контролю металу (важелі розрізались), який проводився фірмою “JUNGHEINRICH“, виявилось, що при литті в металі важелів з’являються різні види дефектів, найчастіше пори і раковини. Як наслідок, було забраковано і повернуто назад в Україну декілька крупних партій важелів, що поставило під загрозу подальше співробітництво обох сторін і нанесло значну матеріальну шкоду фірмі «АДВІС».

В даній ситуації виникла необхідність пошуку простого і надійного методу діагностики технічного стану важелів, за допомогою якого можна виявляти дефекти і дати відповіді на питання, чи дійсно вказані дефекти металу є небезпечними і можуть привести до руйнування важелів, або навпаки, знайдені дефекти не впливають на їх несучу спроможність.

Метою даної частини роботи була розробка методики акустико-емісійного діагностування технічного стану і прогнозування міцнісних характеристик важелів шляхом встановлення кореляційних зв’язків між руйнуючим навантаженням важелів і параметрами АЕ, зареєстрованими при безпечному навантаженні.

5.1.1. Експериментальне обладнання для навантаження. Статичні випробування 20-ти важелів, відібраних з однієї партії, проводились на розривній машині ИР5057-50 за допомогою спеціально створеного пристрою для навантаження важелів за схемою трьохточкового згину, представленого на рис. 5.3 із одночасним записом сигналів АЕ. Пристрій було розроблено для того, щоб навантаження при випробуваннях було максимально наближене до експлуатаційного. Оскільки в умовах експлуатації навантаження до важеля прикладалось через ролик, закріплений у отворі, у пристрої для статичного навантаження передбачено аналогічний ролик 2. Навантаження передавалось через пуансон 3 на ролик 2, закріплений у отворі важеля 1, який лежить на опорах 4. Опори нерухомо закріплювались на спеціальній підставці, яка з’єднана з силоміром. Сигнали АЕ реєструвались ПЕП 5 і передавались на ПАСАЕ. Навантаження прикладалось таким чином, щоб найтонша стінка полиці важеля розтягувалась, що відповідає небезпечним умовам експлуатації.

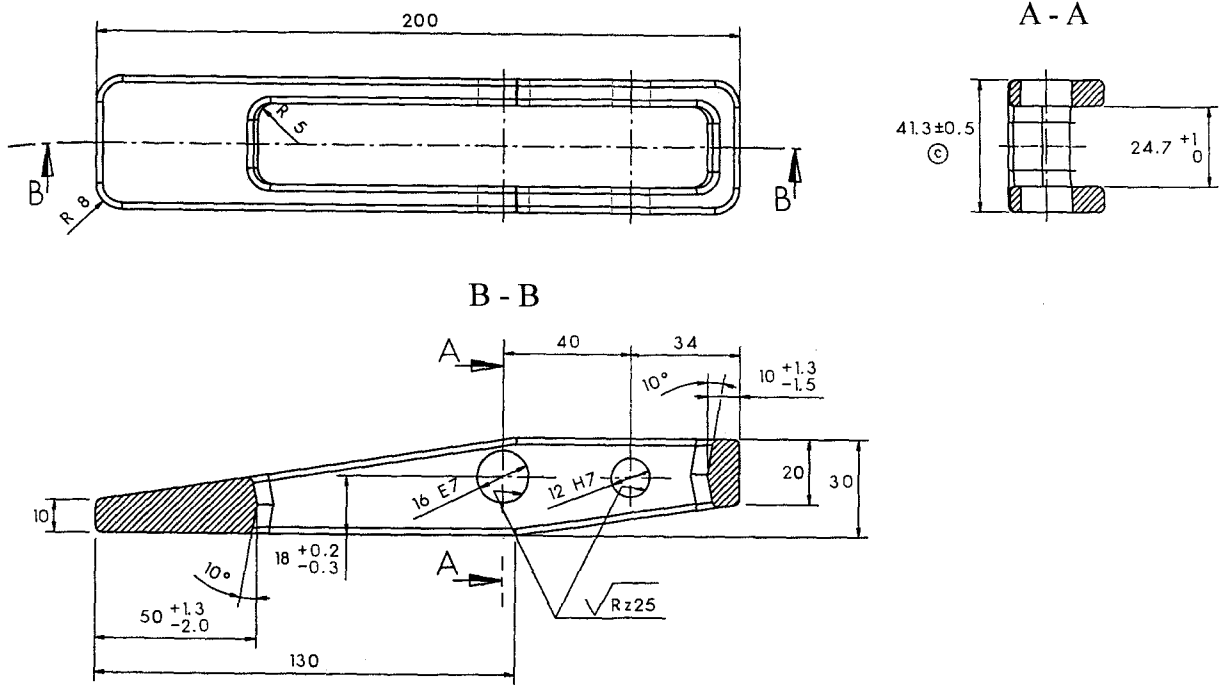


Рис. 5.1. Креслення важеля

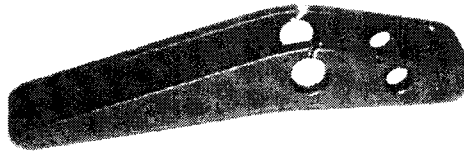


Рис. 5.2. Зовнішній вигляд зруйнованого важеля

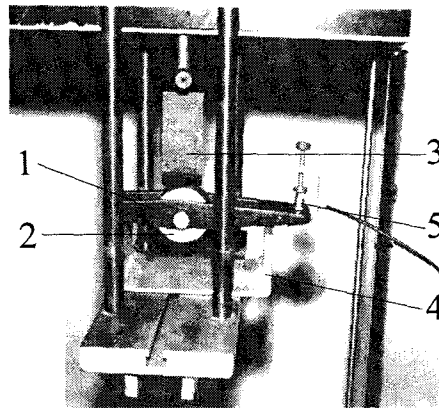


Рис. 5.3. Установка для навантаження важелів:

- 1 – випробовуваний важіль;
- 2 – допоміжний ролик;
- 3 – пуансон;
- 4 – опори;
- 5 – ПЕП.

Необхідно відмітити, що немає необхідності розглядати весь період навантаження, в особливості з моменту, коли в матеріалі важелів під дією навантаження відбуваються необоротні і катастрофічні зміни структури. Найбільш цікавою областю досліджень є область безпечних зусиль, оскільки інформація, отримана в цій області, може бути використана для НК стану важеля.

5.1.2. Визначення допустимої величини безпечного навантаження при тестуванні важелів. Для проведення НК стану важелів і оцінювання їх міцності необхідно, щоб навантаження, які здійснюються при діагностуванні, не перевищували рівня навантажень, при яких відбуваються необоротні процеси руйнування, що знижують міцність тестованих важелів.

Оскільки необхідна умова міцності, висунута замовником, є значення границі текучості металу важелів $\sigma_m \geq 720$ МПа, безпечний рівень механічних напружень визначався за формулою

$$\sigma = \frac{\sigma_T}{n}, \quad (5.1)$$

де σ_m – границя текучості, $n=1,5$ – коефіцієнт запасу міцності. При мінімальному значенні $\sigma_m=720$ МПа (можлива помилка піде в запас міцності), максимальне значення безпечного напруження тестування складає $\sigma_{тест}=480$ МПа. Такий запас міцності є достатнім для того, щоб неруйнівне напруження $\sigma_{тест}$ знаходилось на ділянці пропорційності металу і в металі відбувались лише пружні деформації, які не знижують міцності важелів. Розрахунки показали (додаток 3.1), що напруженню $\sigma_{тест}=480$ МПа відповідає неруйнівний рівень навантаження $P_{тест} \approx 19000$ Н.

Для додаткової перевірки того, що рівень $P_{тест}=19000$ Н є неруйнівним і не знижує міцність важелів, був проведений наступний експеримент. З однієї партії було відібрано 20 бездефектних за результатами радіографії важелів. Група важелів в кількості 10 штук піддавалась випробуванню на згин за вищеприписаною схемою, після чого розвантажувалась до нуля і після того навантажувалась до руйнування. Отримані значення руйнуючих навантажень цієї групи порівнювались зі значеннями руйнуючих зусиль, отриманих для іншої групи

10-ти важелів при безперервному навантаженні до руйнування. У випадку, якщо, як передбачалося, попереднє навантаження не знижує міцності тестованих важелів, середні значення руйнуючих зусиль тестованих груп не повинні відрізнятись, або в іншому випадку їх різниця повинна бути суттєвою.

Порівняння руйнуючих навантажень двох незалежних серій експериментів проводилося методом порівняння середніх (додаток 3.2). З імовірністю довіри 0,95 встановлено, що попереднє навантаження важелів до рівня тестування $P_{тест}=19000Н$ не приводить до зниження їх міцності і рівень $P_{тест}$ є неруйнівним.

5.1.3. Акустична емісія важелів під дією неруйнівного навантаження.

Перед проведенням акустико-емісійних випробувань було проведено візуальний і радіографічний контроль, а також контроль методом капілярної (кольорової) дефектоскопії партії досліджуваних важелів у кількості 20 штук. Контролю підлягав в першу чергу небезпечний окіл центрального отвору, де при навантаженні виникають найбільші механічні напруження (розріз А-А на рис. 5.1). Як показав досвід експлуатації важелів, руйнування відбувається саме в цьому місці, і тут, як показала локація, виникають сигнали АЕ. Контроль проводився разом із спеціалістами КП “Зварювальна лабораторія” Ас. “Подільськ-промонтаж” корпорації “Укрмонтажспецрембуд”. За результатами контролю (додаток 3.3.) всі важелі були умовно поділені на „дефектні” і „бездефектні”. Серед знайдених дефектів найчастіше зустрічаються внутрішні та поверхневі пори і раковини розміром 1,1...1,4 мм. На рис. 5.4 представлений фрагмент рентгеноскопічної плівки, на якій видно дві внутрішні раковини, що знаходяться в небезпечному перетині металоконструкції.

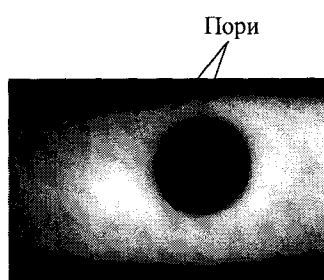


Рис. 5.4. Фрагмент рентгенограми одного з дефектних важелів

Проведений капілярний контроль вказаних 20-ти важелів підтвердив результати радіографічного контролю, що продемонстровано на рис. 5.5.

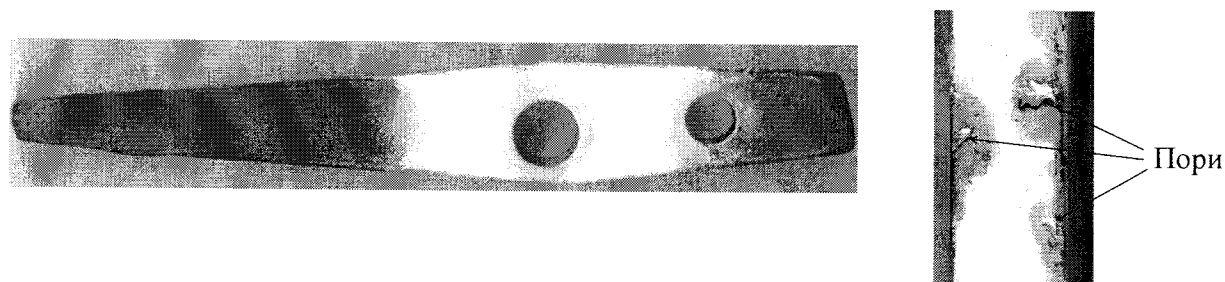


Рис. 5.5. Важелі після капілярної дефектоскопії

Неруйнівне навантаження вказаної партії важелів із записом сигналів АЕ здійснювалось зі швидкістю 0,5 мм/хв. Таке значення швидкості є мінімально можливим для розривної машини ІР 5057-50 і було вибране з урахуванням рекомендацій [95], згідно яких швидкість навантаження металевих зразків, що досліджуються із застосуванням методу АЕ, не повинна перевищувати 1 мм/хв. Сигнали АЕ записувались від початку навантаження до $P_{mecm} \approx 19000\text{Н}$ за допомогою двох ПЕП, закріплених крізь шар акустичного мастила струбцинами в двох протилежних кінцях важеля, як показано на рис. 5.6. Два ПЕП були застосовані для того, щоб за допомогою лінійної локації відсіювати сторонні сигнали АЕ, які виникали поза межами контрольованої зони деталі, а також для виявлення місць розташування найбільш небезпечних дефектів.

В процесі навантаження реєструвались основні параметри сигналів АЕ: амплітуда, активність, сумарний рахунок, енергія сигналів АЕ. Одночасно з параметрами АЕ на самописці машини ІР5057-50 фіксувалась діаграма залежності навантаження в матеріалі від деформації. Дані експериментів оброблялись спеціальними програмами в персональному комп'ютері ПАСАЕ.

Як правило, при неруйнівному навантаженні „бездефектних” важелів не було зареєстровано жодного сигналу АЕ, а в „дефектних” сигнали АЕ виникають вже при навантаженні близько 15000Н, їх активність зростає з наближенням до $P_{mecm} \approx 19000\text{Н}$. На рис. 5.7 представлена акустограма залежності амплітуди, сумарного рахунку сигналів АЕ і механічного напруження від деформації зги-

ну, типова для „дефектних” важелів.

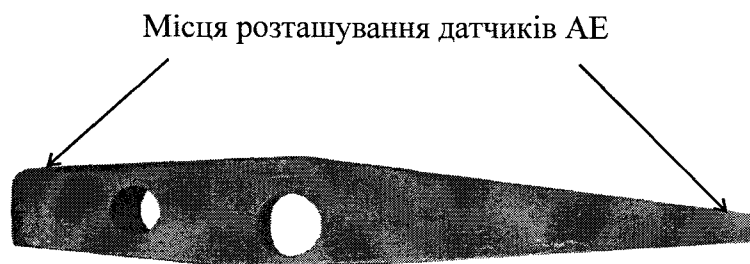


Рис. 5.6. Схема розташування ПЕП на поверхні важелів

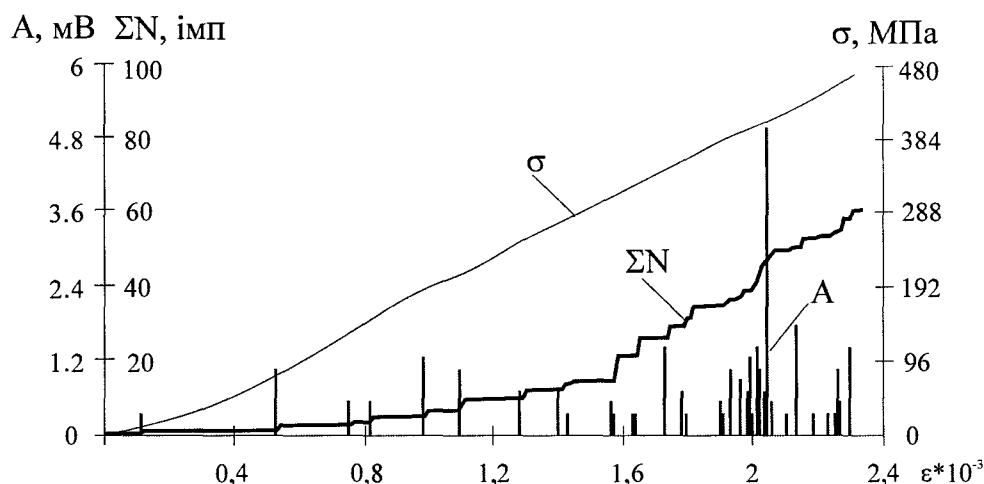


Рис. 5.7. Акустограма залежності амплітуди, сумарного рахунку сигналів АЕ і механічного напруження від деформації згину важелів з дефектами

5.1.4. Випробування важелів з метою визначення їх механічних характеристик. Далі постало питання, чи дійсно знайдені дефекти металу знижують механічні властивості важелів, і якщо так, то наскільки. Для цього було вирішено провести механічні випробування важелів до руйнування з одночасною реєстрацією сигналів АЕ. За критерій руйнування приймали появу крізної тріщини на нижній стінці важеля.

Для визначення механічних характеристик важелів з тих самих, що випробувались на згин, були вирізані стандартні зразки [96] і проведені випробування на розтяг. Результати експериментів показали, що знайдені значення границі текучості і границі міцності несуттєво відрізняються від підрахованих за формулою (3.13) при навантаженні на згин. Отже, було вирішено правомірним

визначати σ_m і σ_e при навантаженні на згин.

Після руйнування дефектність важеля встановлювалась, враховуючи отримані в результаті випробувань значення σ_m , які за критерієм міцності мають відповідати $\sigma_m \geq 720$ МПа, а також присутності дефектів у місці руйнування. Як і передбачалось, дефектні і бездефектні важелі володіли різними міцнісними характеристиками, (табл. 3.1 додатка 3.4). Аналіз результатів експериментів всіх важелів показав, що руйнуючі навантаження бездефектних важелів знаходяться в діапазоні 33120-35500Н ($\sigma_T=720\dots772$ МПа), значення ж для дефектних коливаються від 28000 до 33120Н ($\sigma_T=609\dots720$ МПа).

Статистична обробка результатів випробувань (додаток Д.2) показала, що зниження значення руйнуючих навантажень важелів з дефектами є не випадковим і становить 13% з ймовірністю довіри 95%.

Один із типових дефектів металу (внутрішня раковина діаметром 2 мм) представлений на фотографії місця руйнування дефектного важеля (збільшення 14 разів) на рис. 5.8 Площа поперечного перерізу займає 13% від площі перерізу зруйнованої металевої полиці важеля.

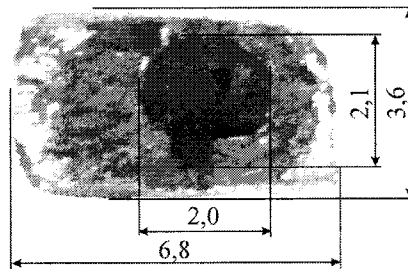
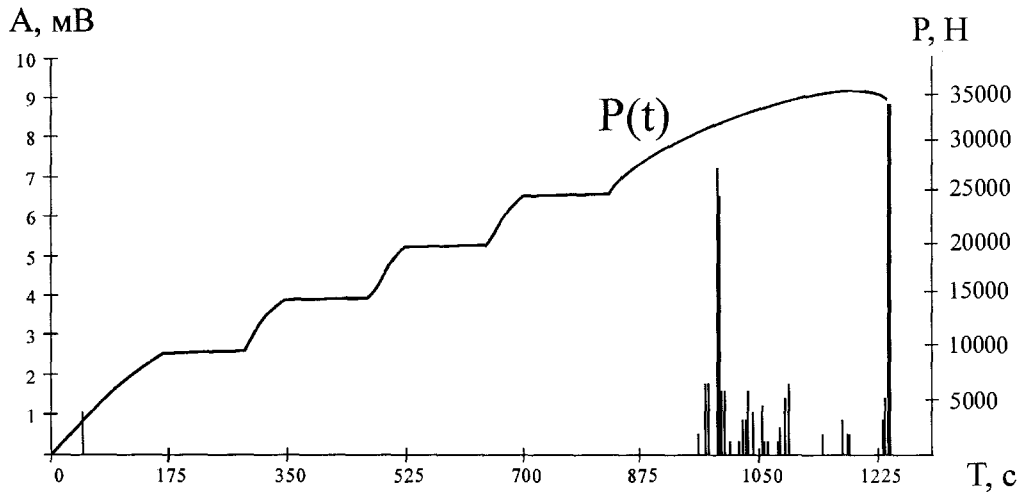


Рис. 5.8. Типовий дефект важелів - внутрішня раковина

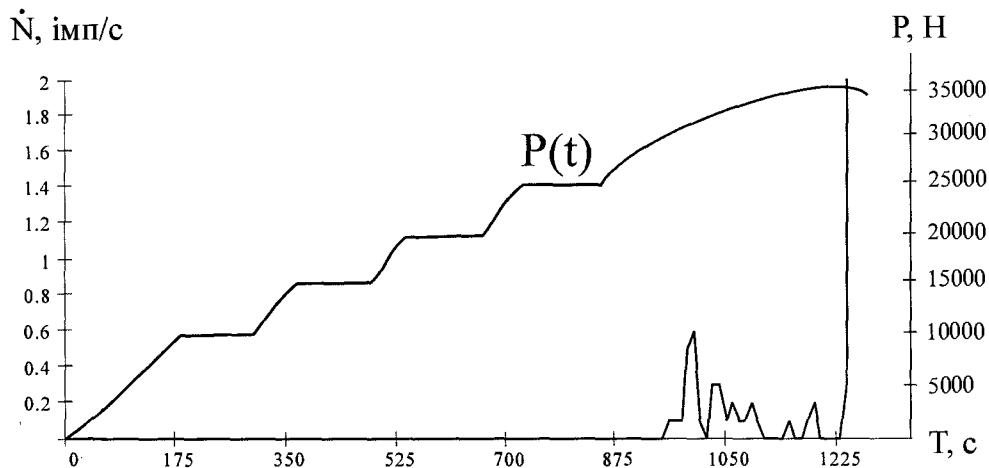
5.1.5. Аналіз даних сигналів акустичної емісії. На рис. 5.9 представлені типові залежності параметрів сигналів АЕ і прикладеного східчастого навантаження від часу, отримані в результаті проведення статичних випробувань на згин бездефектних важелів.

Поведінка АЕ для сталі 45, з якої виготовлені важелі, має свої особливості. Сигналів АЕ випромінюється небагато, а максимум активності і амплітуди приходить на зону навантаження, близьку до моменту катастрофічного руй-

нування. Перші сигнали АЕ реєструються при навантаженні, що перевищує 0,6 від руйнівного. При навантаженні 0,8-0,9 від руйнівного, що відповідає текучості металу важелів, швидко підсилюються, далі спадають до нуля і знов зростають, досягаючи максимуму в момент руйнування.



а) амплітуда сигналів АЕ



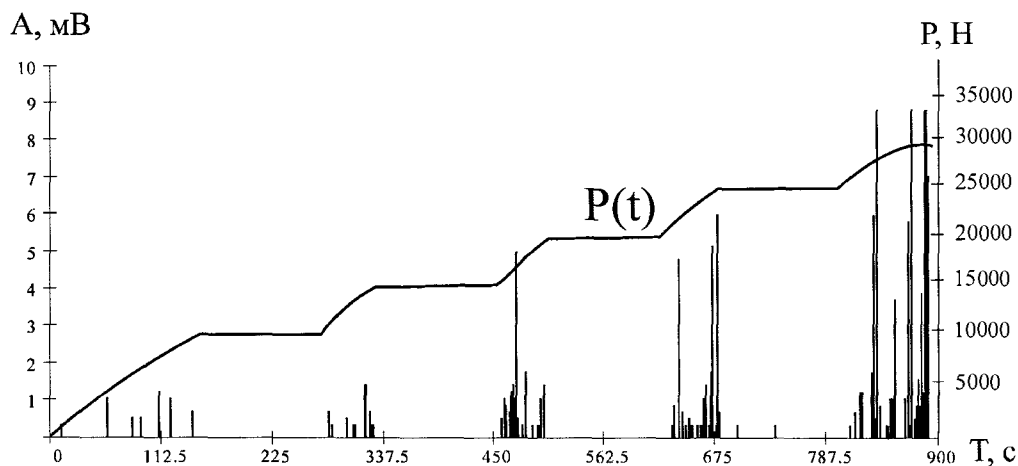
б) активність сигналів АЕ

Рис. 5.9. Типові залежності амплітуди, активності сигналів АЕ і величини прикладеного навантаження від часу (бездефектні важелі)

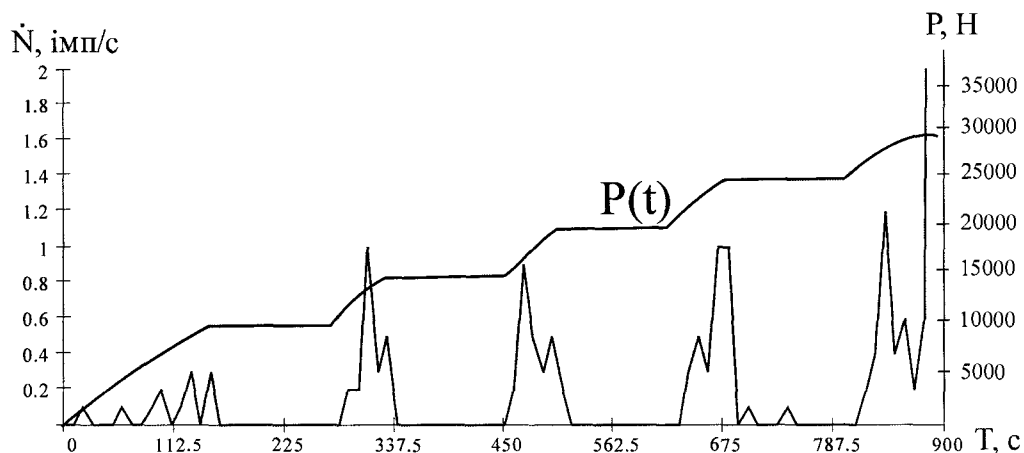
На рис. 5.10 представлені акустограми, отримані при дослідженні дефектних важелів.

Спостереження АЕ, отриманої при тестуванні важелів, показує, що приховані дефекти структури проявляють себе наступним чином: сигнали АЕ, які випромінюються дефектами, мають високі амплітуди, що досягають 2000 мкВ, а низька інтенсивність свідчить про нерівномірний (скачкоподібний) їх розви-

ток, характерний для розвитку мікротріщин та інших небезпечних для міцності дефектів.



а) амплітуда сигналів АЕ



б) активність сигналів АЕ

Рис. 5.10. Типові залежності амплітуди, активності сигналів АЕ величини прикладеного навантаження від часу (дефектні важелі)

Аналіз результатів показав, що сигнали АЕ у всіх випробовуваних бездефектних важелів починаються при навантаженні, більшому за 25000Н. В залежності від небезпечності раковини, перші сигнали АЕ в дефектних важелів починається при різних значеннях навантаження, але завжди при навантаженні, не більшому за 15000Н, і продовжують випромінюватись із зростаючими параметрами аж до руйнування. При навантаженні 19000Н спостерігається наступна картина: сигнали АЕ в бездефектних важелів ще не виникають, а в дефектних досягають рівня, достатнього для чіткого відбракування важелів.

З метою визначення механічних характеристик матеріалу важелів, був проведений перерахунок діючих навантажень в напруження, який показав, що руйнування бездефектних важелів відбувається при напруженнях в середньому $\sigma_{руйн} = 891 \text{ МПа}$. Беручи до уваги те, що після обов'язкової термічної обробки (HRC₃-26-30) значення границі міцності має бути $\sigma_g = 900 \dots 950 \text{ МПа}$, можна зробити припущення про випадки недотримання ВАТ «АДВІС» необхідних технологічних норм при виробництві важелів.

Порівняльна характеристика параметрів АЕ дефектних і бездефектних груп важелів показала, що найбільш чутливими параметрами АЕ до виявлення небезпечних дефектів є сумарний рахунок і накопичена енергія сигналів АЕ, що випромінювались при навантаженні важелів. Енергія сигналів АЕ в порівнянні з іншими параметрами АЕ найменш за всіх схильна до спотворень і втрат, за допомогою цього параметру можна оцінювати пружнозапасену енергію, яка виділяється дефектом матеріалу, що зароджується або розвивається.

На рис. 5.11 представлені графічні залежності параметрів сигналів АЕ від неруйнівного навантаження для важелів обох груп з різними значеннями руйнуючих навантажень.

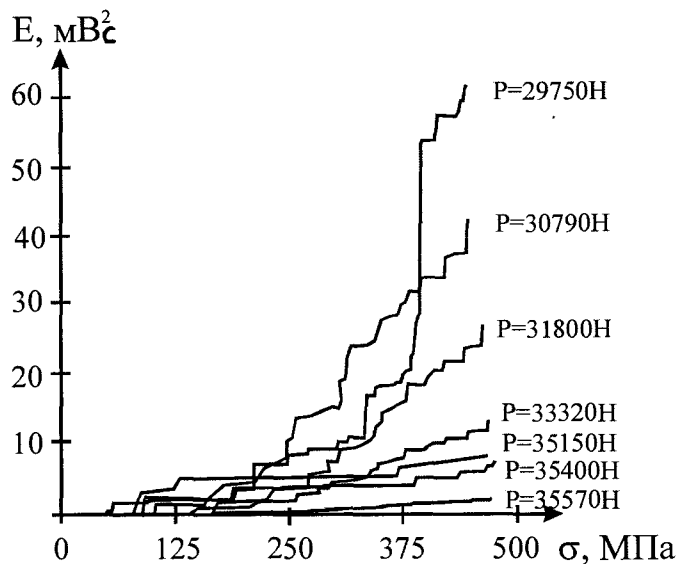


Рис. 5.11. Залежності накопиченої енергії сигналів АЕ від неруйнівного навантаження для важелів з різними значеннями руйнуючих зусиль

Встановлено, що між руйнуючими зусиллями (а значить і максимальним механічними напруженнями) і параметрами АЕ спостерігається деяка залежність, а саме чим вища міцність важеля, тим нижчий рівень накопиченої енергії зареєстрованих сигналів АЕ. Подібний характер спостерігається і для сумарного рахунку сигналів АЕ. Фізичний зміст цього явища в тому, що дефекти матеріалу, які знижують міцність важелів, проявляють себе (у вигляді випромінювання АЕ) тим раніше, чим суттєвішим є викликане ними зниження міцності.

Встановлено, що така залежність, продемонстрована на рис. 5.12, найкраще може бути апроксимована степеневою залежністю виду

$$\sigma = A \cdot E^{-b}, \quad (5.2)$$

де σ - напруження руйнування, E - енергія сигналів АЕ, накопичена упродовж неруйнівного діагностування, b - безрозмірний коефіцієнт, який враховує небезпечність дефектів, A $\left[\frac{\text{МПа}}{(\text{мВ}^2)^b} \right]$ - максимальне значення напруження руйнування при $b=0$.

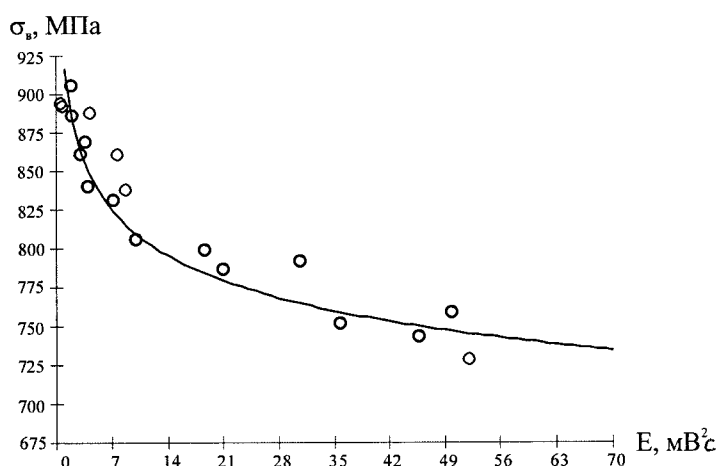


Рис. 5.12. Залежність руйнуючого напруження металу важелів від енергії сигналів АЕ, накопиченої упродовж неруйнівного навантаження

Знайдемо коефіцієнти A і b , застосовуючи метод найменших квадратів [97, 98]. Пролінеаризувавши рівність (5.2) складемо нормальну систему рівнянь у вигляді

$$\begin{cases} n \cdot \ln A + (-b) \cdot \sum_{i=1}^n \ln E_i = \sum_{i=1}^n \ln \sigma_i, \\ \ln A \cdot \sum_{i=1}^n \ln E_i + (-b) \cdot \sum_{i=1}^n (\ln E_i)^2 = \sum_{i=1}^n (\ln E_i \cdot \ln \sigma_i), \end{cases} \quad (5.3)$$

де n – кількість експериментів. Розв'язуючи систему рівнянь (5.3), отримаємо

$$\begin{cases} A = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n \ln \sigma_i \sum_{i=1}^n (\ln E_i)^2 - \sum_{i=1}^n \ln E_i \sum_{i=1}^n (\ln E_i \cdot \ln \sigma_i)}{n \sum_{i=1}^n (\ln E_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln E_i \right)^2} \right), \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n \ln E_i \sum_{i=1}^n \ln \sigma_i - n \sum_{i=1}^n (\ln E_i \cdot \ln \sigma_i)}{n \sum_{i=1}^n (\ln E_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln E_i \right)^2}. \end{cases}$$

Використавуючи статистичні дані експериментів, наведені в табл. 3.1

(додаток 3.4), знаходимо коефіцієнти A і b : $A = 950 \left[\frac{\text{МПа}}{(\text{МВ}^2)^b} \right]$, $b=0,1$. Отже, рів-

ність (5.2) запишеться у вигляді

$$\sigma_{\text{руїн}} = 950 \frac{\text{МПа}}{(\text{МВ})^{0,1}} \cdot E_{AE}^{-0,1}. \quad (5.4)$$

Встановлено, що коефіцієнт кореляції даної залежності становить 0,88, що говорить про високу тісноту зв'язку (додаток 3.4).

Залежність (5.4) отримана в припущенні наявності степеневі кореляційної залежності між максимальним нормальним напруженням, що виникає у полиці важеля, і накопиченою енергією сигналів АЕ, зареєстрованих в проміжку неруйнівного навантаження від 0 до $\sigma=480$ МПа. В розрахунках необхідно враховувати середньоквадратичне відхилення, тому визначене за (5.4) σ приймається меншим на величину $\Delta = 31,6$ МПа, тобто $\sigma_{\text{min}} = \sigma - \Delta$, тоді можлива помилка в прогнозуванні піде в запас міцності. Необхідно відмітити, що подібний вибір σ є одним з важливих, в залежності від того, наскільки відповідальним є тестований об'єкт, можна приймати і більш низькі значення σ (із отриманої вибірки), підвищуючи тим самим запас міцності, але при цьому, зрозуміло, знижуючи точність прогнозування.

Критичному значенню напруження $\sigma_m=720$ МПа відповідає рівень накопиченої енергії сигналів АЕ $E=3,1$ мВ². Отже, навантажуючи важелі до рівня $P_{тест}$ і реєструючи параметри сигналів АЕ, можна визначити з імовірністю довіри 0,95 дефектність важеля, а також спрогнозувати його руйнующе напруження за формулою (5.4).

Таким чином, результати аналізу показали, що метод АЕ чітко виявляє різницю в фізико-механічних і міцнісних особливостях дефектних і бездефектних важелів і дає можливість використовувати її для оцінки міцності, тим самим, здійснювати діагностику технічного стану важелів.

Слід зазначити, що при виробництві важелів розкид механічних характеристик, а саме σ_m , складає близько 15%. Сталь 45 відноситься до матеріалів, що не містять явної ділянки текучості, тому визначення σ_T є досить складним завданням. В роботі запропоновано визначати границю текучості за першим зареєстрованим максимумом активності сигналів АЕ. Подібний характер АЕ при збільшенні деформацій може бути викликаний переходом основної маси матеріалу з пружного стану в пластичний (лавиноподібний відрив і переміщення дислокацій, утворення систем смуг ковзання та інш.) [99-105]. Такий спосіб визначення границі текучості може бути застосований для вибіркового контролю важелів.

Застосування лінійної локації для діагностування технічного стану важелів дозволило знаходити місця розташування небезпечних дефектів за допомогою розподілу сигналів АЕ по довжині деталей. На рис. 5.13 представлена залежність амплітуди, і гістограма розподілу кількості сигналів АЕ по лінійній координаті, отримані в процесі навантаження важеля.

На практиці використання параметрів сигналів АЕ для неруйнівної діагностики міцності може бути спрощено, тому запропонований наступна методика неруйнівного діагностування і прогнозування руйнующого напруження важелів [91], впроваджена на ВАТ “Адвіс” (додаток Л).

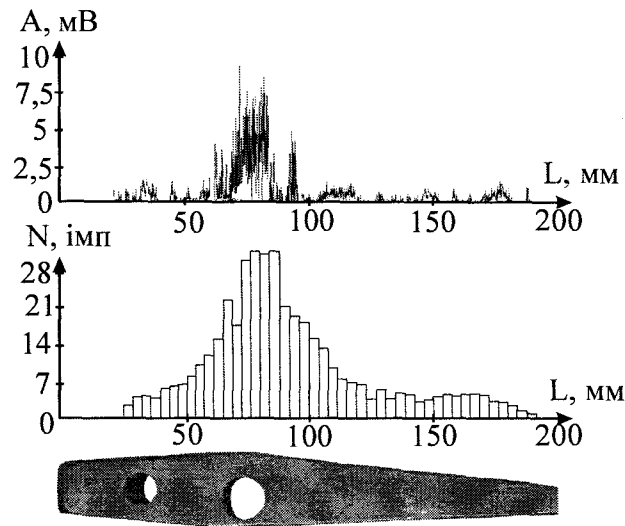


Рис. 5.13. Акустограми розподілу сигналів АЕ по лінійній координаті

5.1.6. Методика неруйнівного діагностування і прогнозування руйнуючого напруження важелів.

1. Тестування кожного важеля проводяться статичним навантаженням на згин до безпечного навантаження, значення якого знаходиться з врахуванням коефіцієнту запасу міцності ($n=1,5 \dots 1,8$) і не перевищує границю пропорційності матеріалу важелів, з одночасною реєстрацією параметрів сигналів АЕ. Для кожного з тестованих важелів визначаються значення накопиченої енергії сигналів АЕ, зареєстрованих при тестуванні деталей.
2. Якщо рівень накопиченої енергії зареєстрованих сигналів АЕ перевищує допустиме значення $E=3,1 \text{ мВ}^2$, важіль визнається таким, що містить небезпечні дефекти.
3. За необхідністю, для дефектних важелів проводиться прогнозування їх руйнуючого напруження для застосування в менш відповідальних конструкціях, використовуючи емпіричний вираз (5.4).

Цікавим є той факт, що два важеля, визнані за результатами радіографії і кольорової дефектоскопії дефектними, за результатами АЕ-контролю були визнані бездефектними. Для перевірки достовірності цих результатів важелі довели до руйнування за описаною вище методикою. Характер сигналів АЕ, зареєстрованих в ході випробувань, вказував на відсутність небезпечних дефектів. Як показали результати руйнуючих випробувань, важелі насправді не містили не-

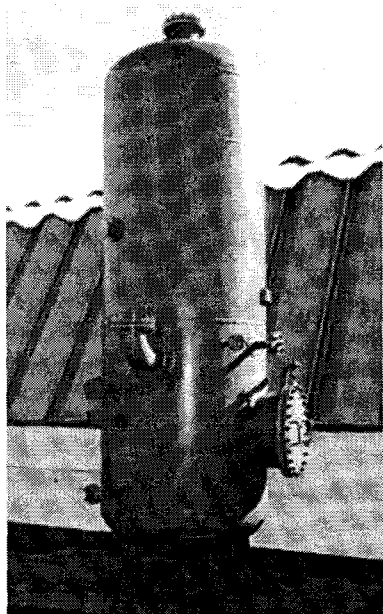
безпечних дефектів і за своїми міцнісними характеристиками не поступались іншим бездефектним важелям. Отже, при НК традиційними методами (тут критерієм небезпечності є розміри дефекту), кількість браку виявилась завищеною. Таким чином, застосування методу АЕ для неруйнівного діагностування в порівнянні з традиційними методами НК виявилось більш точним для виявлення не тільки дефектів, а й оцінювання міцності, оскільки один і той самий дефект в залежності від його розташування в полі напружень, може бути безпечним або небезпечним, а метод АЕ реагує лише на небезпечні дефекти, тобто дефекти, які себе проявляють і знижують міцність конструкції. Розроблена методика АЕ-контролю, діагностування і прогнозування міцності важелів є ефективнішою за інші методи НК, оскільки крім ефективного відбракування дає можливість спрогнозувати міцнісні характеристики бракованих виробів і застосувати їх для експлуатації в менш відповідальних експлуатаційних умовах.

5.2. Акустико-емісійний контроль технічного стану повітрозбірника В-6,ЗГОСТ9028-59.

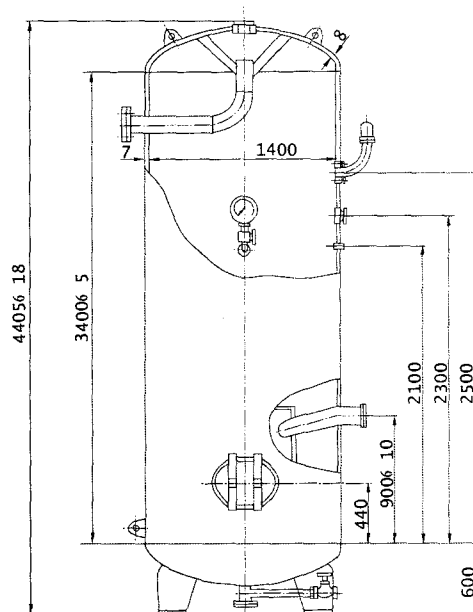
В наш час перехід від експлуатації відповідальних деталей і конструкцій, наприклад посудин, які експлуатуються під тиском, за ресурсом, до експлуатації за технічним станом є особливо актуальним. Надійна технічна діагностика дозволяє продовжувати строк експлуатації значної частини обладнання, особливо посудин тиску [106-113], яке відпрацювало свій ресурс, що дає вагомий економічний ефект. Для діагностування технічного стану посудин тиску методом АЕ в більшості випадків необхідна площинна локація сигналів АЕ.

Об'єктом дослідження був повітрозбірник типу В-6,ЗГОСТ9028-59, призначений для комплектації повітряних стаціонарних компресорів загального призначення і служить для згладжування пульсацій тиску в повітропроводах та створення запасу повітря. Загальний вигляд повітрозбірника представлений на рис. 5.14. Один з таких повітрозбірників знаходиться в експлуатації ДЕПО (ст. Гречани, м. Хмельницький). Повітрозбірник відпрацював свій термін експлуа-

тації, а також термін, продовжений спеціалістами Державного підприємства Подільський експертно-технічний центр (ДП Подільський ЕТЦ). Тепер же необхідно було оцінити його технічний стан і дати висновок про можливість повторного продовження строку експлуатації. Спеціалісти Подільського ЕТЦ провели НК повітрязбірника візуальним та ультразвуковим методом а також за допомогою ультразвукової товщинометрії. За результатами контролю вказаними методами, дефектів, небезпечних для експлуатації, не виявлено, однак у спеціалістів ДП Подільський ЕТЦ лишилися сумніви щодо прийняття рішення про продовження експлуатації повітрязбірника.



а) Загальний вигляд повітрязбірника



б) креслення повітрязбірника

В - 6,3 ГОСТ 9028-59

Рис. 5.14. Загальний вигляд повітрязбірника

Технічні характеристики повітрязбірника:

- місткість повітрязбірника - 6,3 м³;
- робочий тиск – 0,8 МПа;
- робоча температура від мінус 30°С до плюс 200°С.

Матеріал, з якого виготовлений повітрязбірник - СТ09Г2С з допустимим рівнем механічних напружень $[\sigma_0]=148$ МПа.

- Для визначення можливості подальшої експлуатації повітрязбірника було

вирішено провести його акустико-емісійний і тензометричний контроль. При випробуваннях використовувалась ПАСАЕ, гідравлічний прес, тензометрична апаратура 8АНЧ-26, призначена для виміру статичних та динамічних деформацій у восьми точках і світлопроміневий осцилограф Н071.4М для запису сигналів з восьми каналів тензометричної апаратури на реєструючий фотопапір УФ-67;

Основні технічні характеристики 8АНЧ-26:

- кількість каналів – 8;
- межі вимірів деформацій при двох активних тензорезисторах з чутливістю $S_m=2$ і $U_m=6В$: основні $\pm(0,25; 0,5; 1,25; 2,5; 5; 12,5) \cdot 10^{-3}$ відносних одиниць деформації, додаткові дозволяють зменшити основні межі відповідно в 1,2,5 і 10 раз;
- первинні перетворювачі - тензорезистори типу КФ 5П1-10-200-Б-12.

Згідно встановлених норм і правил [114, 115] повітрозбірник навантажували гідравлічно. Перед проведенням гідровипробувань після заповнення водою були проведені контрольні прозвучування металоконструкції з метою визначення затухання ультразвукових коливань та швидкості поширення хвиль АЕ у металі конструкції. Значення коефіцієнта затухання дозволяє визначити зону контролю одним ПЕП, а також вибрати схему їх розстановки для локації джерел АЕ-активності. Значення швидкості поширення необхідне для здійснення локації джерел АЕ. Для цього проведено 10 контрольних експериментів. ПЕП розташовували на поверхні повітрозбірника з таким розрахунком, щоб збуджені імітатором АЕ сигнали АЕ поширювались у різних напрямках. В якості імітатора АЕ-сигналів використовувалось джерело Хсу-Нільсона (відлом олівця твердістю 2Т). За результатами експериментів, встановлено, що швидкість поширення хвиль АЕ в матеріалі повітрозбірника складає $\nu=5$ мм/мкс, затухання між двома сусідніми ПЕП не перевищує 10 дБ, що цілком задовольняє умови здійснення локації сигналів АЕ.

Тиск вирішено було піднімати за допомогою гідравлічного пресу до випробувального тиску, що становить 1,25 від робочого, тобто 10 атм, а також

зробити 5-хвилинну витримку на випробувальному тиску. При оцінці рівня механічних шумів виявилось, що гідравлічний прес вносить в канали акустичний шум з рівнем, що досягав 300 мкВ. Реєстрація сигналів АЕ з амплітудою більше 300 мВ не дозволяла фіксувати значну частину корисних сигналів з меншою амплітудою. Аналіз сторонніх сигналів шуму води і працюючого гідравлічного пресу показала, що спектр їх частот знаходиться в діапазоні до 500 кГц. Оскільки у даній смузі частот можуть виникати корисні сигнали від течій і росту тріщин, було вирішено застосовувати ПЕП П-113 з діапазоном частот 200-2000 кГц і робити витримки після зростання навантаження на кожні 0,1 МПа, що дозволило реєструвати АЕ-сигнали у витримках між зростанням навантаження при вимкненому пресі, а також зробити 10-хвилинну витримку при випробувальному тиску.

Тензометруванню підлягала найнебезпечніша частина повітрозбірника - нижнє днище, що продемонстровано на рис. 5.15.

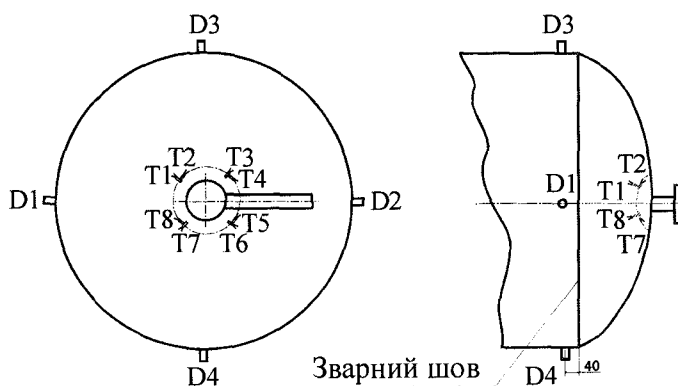


Рис. 5.15. Нижнє днище повітрозбірника:

D1-D4 - ПЕП;

T1-T8 – тензодатчики.

Як показав досвід експлуатації повітрозбірників, саме тут починають розвиватись небезпечні внутрішні дефекти металу. Тензодатчики T1-T8 кріпилися до днища за допомогою клею по колу на відстані 60 мм від дренажного отвору. АЕ - ПЕП П-113 зі смугою пропускання 200-2000 кГц D1-D4 розташовувались крізь шар акустопрозорого мастила на однаковій відстані один від одного на

циліндричній частині поверхні повітрозбірника на відстані 40 мм від кільцевого зварного шву, що з'єднує циліндричну частину з нижнім днищем. ПЕП закріплювались за допомогою гумового джгута, що охоплював по колу об'єкт. Оскільки контрольована поверхня конструкції являє собою частину сфери діаметром 1400 мм і глибиною 400 мм, то наближено застосовували площинну локацію.

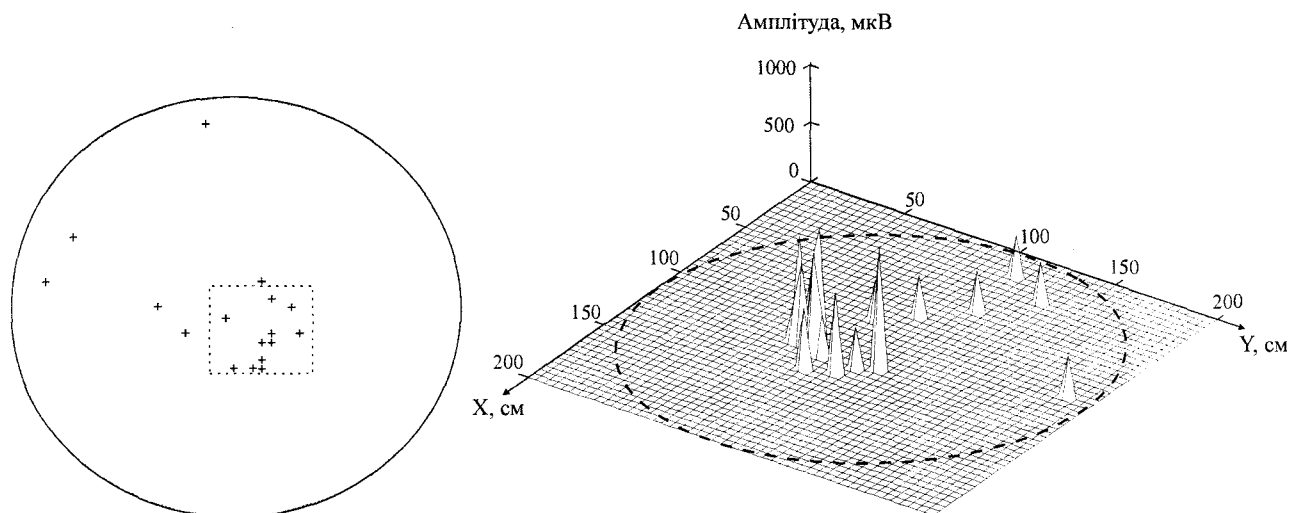
При піднятті тиску до робочого (0,8 МПа) в проміжках між навантаженням не було зареєстровано сигналів АЕ і це дозволило зробити висновок, що при робочому тиску в металоконструкції немає прогресуючих дефектів. При витримці на 0,9 МПа були зареєстровані сім сигналів АЕ. При випробувальному тиску $P=1$ МПа зареєстровані ще п'ять сигналів. Далі була проведена витримка, впродовж якої сигнали не з'являлись. Всі зареєстровані АЕ-сигнали були невеликої амплітуди (до 3 мВ).

На рис. 5.16 представлена локаційна карта розгортки нижнього днища повітрозбірника і тримірна акустограма залежності амплітуди сигналів АЕ від площинної координати днища повітрозбірника. Як видно з акустограм, основна кількість АЕ-джерел знаходиться в центрі нижнього днища поряд з дренажним отвором. Результати тензометрування показали, що рівень вимірянних механічних напружень в небезпечних місцях дорівнює $\sigma=18-20$ МПа, що набагато нижче допустимих, значення яких для даного матеріалу $\sigma_d=148$ МПа.

Після акустико-емісійних випробувань на ділянці металу в околі дренажного опору (місце підвищеної АЕ-активності) були знайдені невеликі корозійні ушкодження металу – так звані язви глибиною до 1,5 мм, що не являють собою небезпеки для міцності.

Оскільки сигнали АЕ мали невелику амплітуду, низьку активність і під час витримки випробувального тиску не з'являлись, а напруження в небезпечних місцях набагато нижче допустимих, був зроблений висновок що у контрольованому матеріалі повітрозбірника немає небезпечних дефектів. Враховуючи також результати обстеження спеціалістами Подільського ЕТЦ, було дано дозвіл на продовження експлуатації повітрозбірника за умови періодичного слід-

кування за розвитком корозійних ушкоджень.



а) двомірною акустограмою дна,

б) тримірною акустограмою.

Рис. 5.16. Розподіл сигналів АЕ по поверхні нижнього дна повітряного балона:

5.3. Акустико-емісійна діагностика технічного стану ємностей кулеподібних ПАГЗ-2800-32.23.01.000.

Об'єктом досліджень були ємності кулеподібні ПАГЗ-2800-32.23.01.000, представлені на рис. 5.17, (надалі посудини) пересувного автомобільного газозаправника ПАГЗ-2800-32. Посудини використовуються для зберігання і транспортування природного газу (метану).

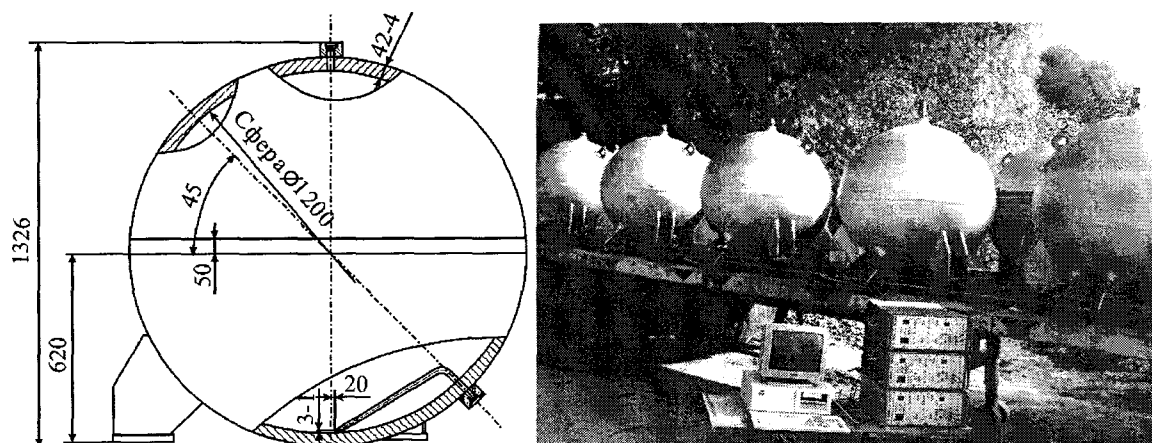


Рис. 5.17. Креслення ємності кулеподібної ПАГЗ-2800-32.23.01.000 а)

і загальний вигляд автомобільного газозаправника б)

Технічні характеристики посудини:

- місткість - 0,9 м³;
- середовище – природний газ ТУ 51-166-83
- робочий тиск – 31,4 МПа (32 МПа);
- робоча температура - від мінус 50°С до плюс 45°С;
- маса порожньої ємності – 1605 кг.

Матеріал – сталь 12ХН2МДФ ТУ 14-1-3116-81 з границею текучості $\sigma_m=490$ МПа границею міцності $\sigma_b=650$ МПа.

ПАГЗ являє собою автопоїзд, що складається з тягача і напівпричепа з встановленими на ньому обладнанням. На тягачі і напівпричепі встановлені по 10 кулеподібних ємностей, з'єднаних між собою газопроводами. Конструктивно посудини являють собою дві суцільні півсфери, з'єднанні між собою за допомогою зварювання. До нижньої частини приварені три опори для кріплення її до рами. В бобишках посудини знаходяться різьбові отвори, що служать для приєднання газопроводу, закріплення запобіжного пристрою і пристрою для слива конденсату. Посудини відносяться до посудин підвищеної небезпеки, оскільки, по-перше, експлуатуються під високим тиском (робочий тиск 320 атм), по-друге – заповнені вибухонебезпечною речовиною. Саме тому оцінка технічного стану цих об'єктів є складним і відповідальним завданням. Існуючі методи НК дозволяють здійснити лише вибірковий контроль. Спеціалісти Подільського ЕТЦ провели контроль зварних швів методами кольорової і ультразвукової дефектоскопії, а також вибірковий контроль основного металу посудин методом ультразвукової товщинометрії. За результатами ультразвукової дефектоскопії в зварних швах були знайдені незначні дефекти, що були визнані як безпечні. Товщина металу у контрольованих вибіркових зонах знаходилась у допустимих межах. Слід відмітити, що конструкція посудин не дозволила провести внутрішній огляд металу посудин оптичними дефектоскопами. Таким чином, за допомогою сучасних традиційних методів НК не вдалося провести надійну діагностику технічного стану посудин, отже, неможливо було дати висновки про їх придатність для подальшої експлуатації. В таких випадках необ-

хідний метод, що контролює 100% матеріалу, яким є метод АЕ.

Конструктивно посудини відносяться до сферичних об'єктів оболонково-го типу, однак графічне представлення сферичних поверхонь у вигляді розгортки і застосування площинної локації значно ускладнює процес визначення координат дефектів і знижує його точність. Для діагностування даних посудин був застосований розроблений раніше спосіб визначення координат дефектів на сферичних поверхнях [19] як частинний випадок просторової локації (див. п.2.4).

Згідно норм і правил проведення випробувань [114-116], посудини вирішено було навантажувати гідравлічно. Перед початком випробувань після заповнення посудин водою були проведені контрольні експерименти з визначення швидкості поширення хвиль АЕ. Отримане значення $v=3$ мм/мкс було введено в програму обробки сигналів АЕ. В якості навантажуючого обладнання для збільшення внутрішнього тиску посудин використовувався електричний масляний насос з низьким рівнем механічних і електромагнітних шумів. Рівень шумів насосу реєструвався перед початком випробувань АЕ-апаратурою і склав 9 дБ. Такий незначний рівень шумів дозволив застосувати широкосмугові ПЕП П113, реєструвати сигнали АЕ у максимально широкій для ПАСАЕ смузі частот 20-2000 кГц і підсилювати сигнали з коефіцієнтом підсилення 68-71 дБ.

ПЕП *A, B, C* і *D* закріплювались на кільцевому горизонтальному зварному шві, а *E* та *F* відповідно у вершинах верхньої та нижньої півсфери за схемою, представленою на рис. 2.5. ПЕП закріплювались крізь шар акустичного мастила за допомогою гумового джгута, що охоплює по колу об'єкт.

Тиск піднімали до значення внутрішнього тиску 1,25 від робочого, що становить 400 атм. (39,2 МПа) Реєструвались такі параметри АЕ, як амплітуда, активність і сумарний рахунок сигналів АЕ. Параметри зареєстрованих сигналів АЕ зведено до табл. К.1 (додаток К).

Упродовж навантаження більшості посудин від 0 до 400 атм зареєстровано в середньому від 6 до 382 імпульсів АЕ, джерела яких розташовані по всій поверхні посудини з середньою амплітудою 0,261 мВ, сумарною середньою

амплітудою 19,444 мВ, максимальною активністю 1,9 імп/с. На витримці на випробувальному тиску сигнали АЕ не з'являлись. Невелика кількість зареєстрованих АЕ-сигналів, відсутність яскраво виражених локалізованих місць АЕ-активності, характер виникнення сигналів у часі, бідний амплітудний спектр, дозволили зробити висновок про відсутність в даний час дефектів, небезпечних для подальшої експлуатації даних конструкцій.

Але упродовж випробування однієї з посудин при зростаючому тиску була зареєстрована дискретна акустична емісія “вибухового типу” з наростаючою активністю та амплітудою, що продемонстровано на рис. 5.18. При тиску 180 атм та 250 атм була зафіксована дискретна емісія з високим значенням амплітуди, тому при вказаних значеннях тиску були зроблені 5-хвилинні витримки.

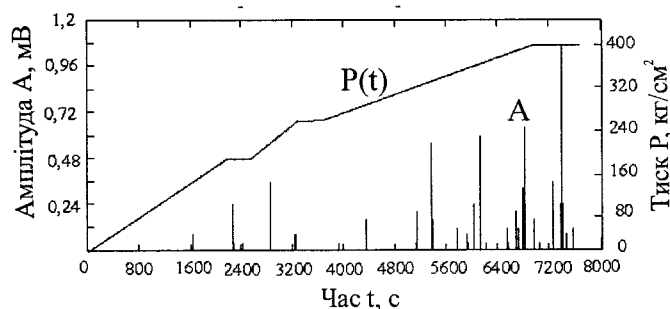
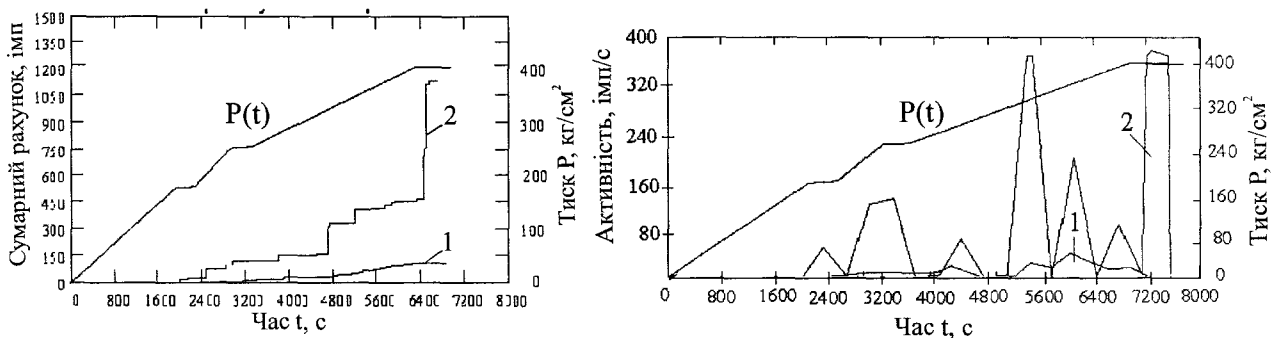


Рис. 5.18. Залежність амплітуди сигналів АЕ дефектної посудини від часу

При подальшому збільшенні тиску були зареєстровані дискретні сигнали АЕ, що характеризувались зростаючою амплітудою і активністю. Упродовж випробування при зростаючому тиску від 250 до 400 атм була зареєстрована акустична емісія з наростаючою амплітудою та активністю, під час витримки тиску активність сигналів зростала, і сигнали належали одному джерелу, тому все свідчило про те, що в матеріалі посудини є дефекти, що розвиваються. На витримці при 400 атм була зафіксована дискретна емісія із найбільшою за час спостереження активністю, що досягала $\dot{N}_{max}=397$ імп/с. При повторному випробуванні АЕ не зникла, тобто не проявився ефект Кайзера. На рис. 5.19 представлені порівняльні акустограми залежностей параметрів АЕ та навантаження від часу для даної посудини і посудин без дефектів.

Локація АЕ-сигналів, зареєстрованих при діагностуванні дефектної посу-

дини, виявила найбільшу густину АЕ-джерел навколо привареної верхньої заглушки, де встановлений манометр, а також в районі стикового зварного шва, що продемонстровано на рис. 5.20. Подібний характер АЕ спостерігався при навантаженні ще однієї з посудин. Оскільки довести до руйнування посудину було неможливим, не вдалося оцінити небезпечність знайдених дефектів. Зважаючи на характер АЕ - сигналів, посудини рекомендували виключити з подальшої експлуатації.



а) сумарний рахунок АЕ

б) активність АЕ

Рис. 5.19. Порівняльні залежності параметрів АЕ від часу навантаження:

1-посудина без дефектів;

2-посудина з дефектом.

При піднятті тиску однієї з посудин при значенні тиску 320 атм зафіксована безперервна акустична емісія, характер якої вказував на виникнення течії.

Перша ознака появи течії – активізація одного або двох близько розташованих каналів з плавним зростанням кількості імпульсів у цих каналах при практично відсутній реакції на це інших каналів.

Другою ознакою служить характер акустичних сигналів: генеруються однотипні імпульси середньої та малої амплітуди, що узгоджується з даними ряду авторів [117, 118]. Це пояснюється тим, що зареєстрований шумовий сигнал течії являє собою безперервний квазістаціонарний випадковий процес (на відміну від сигналів АЕ, де інформація поступає у вигляді дискретних актів емісії).

Локація сигналів АЕ дозволила чітко визначити місце течії - заглушка у нижній частині посудини. Течія виникла в недостатньо затиснутій заглушці через

недбалість технічного персоналу. Слід зазначити, що течію неможливо було визначити за зниженням показників контрольного манометру. На рис. 5.21 представлена акустограма амплітуди АЕ, зафіксованих у момент виявлення течії та зупинки підняття внутрішнього тиску. На акустограмі зафіксований процес виникнення течії при зростаючому внутрішньому тиску та встановленні його на постійному рівні. На рис. 5.22 представлені результати просторової локації течії.

Статистична обробка результатів експериментів, представлена в додатку Д.3, показала, що критичним значенням сумарного рахунку сигналів АЕ є 200 імп. Отже на основі сумарного рахунку сигналів АЕ був створений критерій оцінки технічного стану посудин. Для цього зону акустограми із значенням сумарного рахунку $\Sigma N \leq 200$ імп. було визначено як безпечну, тобто таку, у якій знаходяться безпечні для експлуатації значення сумарного рахунку сигналів АЕ (рис. 5.23).

В процесі локації була застосована кластеризація джерел АЕ, тобто об'єднання подій АЕ за координатною ознакою, описана в п. 2.6). Для цього необхідно задати розмір ділянки S_0 , наприклад 500 см^2 , провести сканування площі S ділянкою S_0 , визначаючи імовірність знаходження кластеру в даній ділянці. Якщо імовірність певного кластеру P не перевищує критичного значення, яке свідчить про наявність небезпечних дефектів, вважати, що кластер є безпечним. В іншому випадку у вказаному кластері можуть знаходитись приховані дефекти і такі ділянки матеріалу потребують подальшої перевірки.

За результатами діагностики були вироблені рекомендації з АЕ-контролю даних посудин [16, 119]. Зокрема, поява ефекту Кайзера, відсутність АЕ на витримках тиску, плавний ріст сумарного рахунку АЕ, що не перевищує 200 імп. свідчать про відсутність на даний час дефектів, небезпечних для подальшої експлуатації.

Невиконання ефекту Кайзера, поява АЕ упродовж витримок, “вибуховий” ріст активності і амплітуди сигналів АЕ, перевищення сумарного рахунку сигналів АЕ безпечного рівня 200 імп. вказує на небезпечні для подальшої експлуатації дефекти.

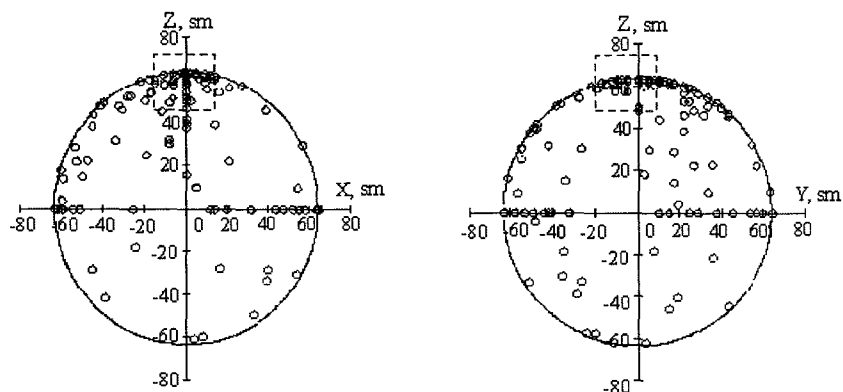


Рис 5.20. Локаційна карта дефектної посудини

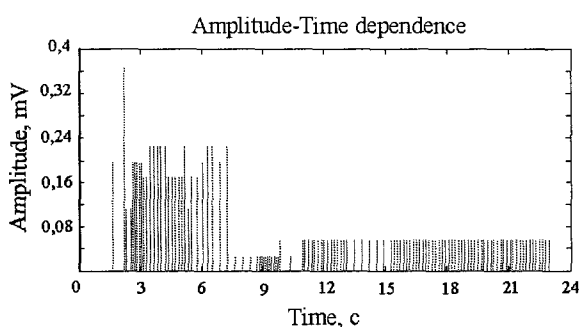


Рис. 5.21. Фрагмент залежності амплітуди АЕ від часу під час виникнення течії

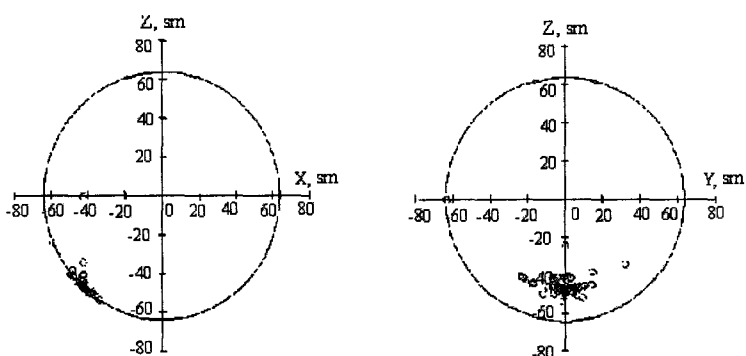


Рис. 5.22. Локаційна карта посудини, в якій виникла наскрізна течія

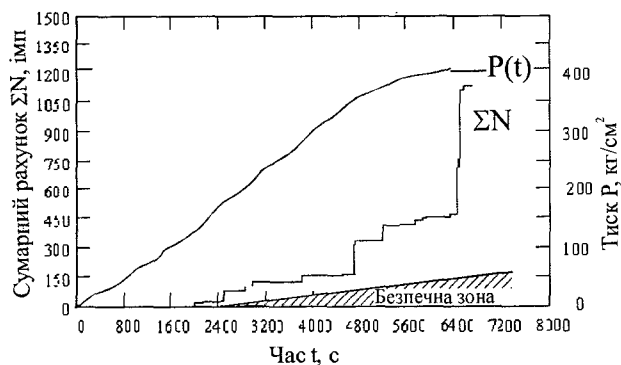


Рис 5.23. Залежність сумарного рахунку сигналів АЕ дефектної посудини від часу навантаження (показана безпечна зона)

Практичне застосування розроблених способів і засобів просторової локації дефектів, а також методик діагностики технічного стану посудин показало ефективність застосування розробленого комплексу АЕ і достатню чутливість при виявленні та визначенні місцеположення дефектів матеріалу і наскрізних течій, що підтверджується актом впровадження (додаток Л).

5.4. Висновки до розділу

1. Знайдено кореляційні залежності між напруженням руйнування важелів автотранспорту та енергією сигналів АЕ, накопиченою упродовж їх безпечного навантаження, що дозволяє прогнозувати їх міцність за отриманою аналітичною залежністю.

2. Для контролю і діагностування важелів S 48.167230 застосована лінійна локації дефектів, що дозволяє знаходити місця розташування найбільш небезпечних дефектів за допомогою розподілу сигналів АЕ по довжині деталей.

3. Розроблена методика АЕ-контролю і діагностування пошкоджень литих важелів підйомників була впроваджена на ВАТ “Адвіс”:

- тестування кожного важеля проводяться статичним навантаженням на згин до безпечного навантаження, значення якого знаходиться з врахуванням коефіцієнту запасу міцності ($n=1,5 \dots 1,8$) і не перевищує границю пропорційності матеріалу важелів, з одночасною реєстрацією параметрів сигналів АЕ. Для кожного з тестованих важелів визначаються значення накопиченої енергії сигналів АЕ, зареєстрованих при тестуванні деталей;

- якщо рівень накопиченої енергії зареєстрованих сигналів АЕ перевищує допустиме значення $E=3,1 \text{ мВ}^2$, важіль визнається таким, що містить небезпечні дефекти;

- за необхідністю, для дефектних важелів проводиться прогнозування їх руйнуючого напруження для застосування в менш відповідальних конструкціях.

Для прогнозування руйнуючих напружень використовується емпіричний вираз (5.4).

4. Спосіб і засіб площинної локації дефектів впроваджений на Подільському ЕТЦ Держнаглядохоронпраці для оцінки можливості подальшої експлуатації повітрозбірника в залізничному депо станції Гречани.
4. Застосовано розроблений спосіб просторової локації джерел АЕ на сфері, що дозволило проводити діагностування технічного стану сферичних посудин тиску на прикладі ємностей кулеподібних ПАГЗ-2800-32.23.01.000.
5. Показано, що створена станція акустичної емісії і розроблені способи локації можуть застосовуватись для пошуку течії.
6. Розроблена методика неруйнівного контролю і діагностування технічного стану сферичних посудин тиску на прикладі ємностей ПАГЗ-2800-32.23.01.000. Зокрема, поява ефекту Кайзера, відсутність АЕ на витримках тиску, плавний ріст сумарного рахунку АЕ, що не перевищує 200 імп. свідчать про відсутність на даний час дефектів, небезпечних для подальшої експлуатації.
7. Спосіб і засіб просторової локації дефектів у сферичних посудин тиску на прикладі ємностей кулеподібних ПАГЗ-2800-32.23.01.000, а також розроблені методики їх діагностування були впроваджені на Подільському ЕТЦ Держнаглядохоронпраці для оцінки можливості подальшої експлуатації автомобільного газозаправника.

ВИСНОВКИ

1. На основі проведеного аналізу відомих методів і приладів контролю технічного стану деталей і конструкцій сформульовані невирішені задачі. Встановлено, існуючі акустико-емісійні способи локації дозволяють визначати координати дефектів з недостатньою точністю, особливо в конструкціях з різнорідних матеріалів. Розглянуто відомі акустико-емісійні методики технічної діагностики деталей і конструкцій, у результаті чого виявлено, що на сьогодні відсутні методики неруйнівного контролю паяних з'єднань електронної техніки, зварних з'єднань в процесі остигання зварного шва.
2. Теоретично розроблені способи площинної і просторової локації джерел АЕ, шляхом реєстрації РЧП до незалежних пар приймальних перетворювачів, розташованих навхрест.
3. Для реалізації комп'ютерних акустико-емісійних методик діагностування створено комп'ютерний засіб, для чого проведено модифікацію двох субблоків серійного приладу АФ-15 для можливості безперервної передачі сигналів АЕ у персональний комп'ютер (ПК); розроблено і створено інтерфейси введення/виведення для узгодження роботи з ПК, створено програми збору, обробки і локації сигналів АЕ.
4. Встановлено, що метод АЕ малоефективний для контролю якості пайки в процесі тверднення розплаву легкоплавких припоїв.
5. Розроблено методику неруйнівного діагностування технічного стану зварних з'єднань чавуну СЧ-4 в процесі остигання розплаву.
6. Розроблено спосіб локації дефектів у конструкціях зі складною неоднорідною поверхнею і методику неруйнівного контролю паяних з'єднань друкованих плат.
7. Створено методику АЕ-контролю, діагностування технічного стану і прогнозування руйнуючого навантаження литих важелів автотранспортних засобів.
8. Розроблені і застосовані методики діагностування технічного стану автомобільного газозаправника а також повітрозбірника в залізничному депо станції

Гречани.

9. Методика АЕ-контролю, діагностування технічного стану і прогнозування руйнуючого навантаження литих важелів автонавантажників була впроваджена на ВАТ “Адвіс”, способи і засоби площинної і просторової локації дефектів, а також методики діагностування технічного стану посудин, які експлуатуються під тиском, впроваджені на Подільському ЕТЦ Держнаглядохоронпраці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ботаки А.А., Ульянов В.Л., Шарко А.В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. - М.: Машиностроение, 1983. - 74 с.
2. Копей Б.В., Лопатін В.В., Копей І.Б. Вимірювальні засоби контролю та експрес-діагностики обладнання нафтогазового машинобудування // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. - №1(6). С.129-133.
3. Потапов А.И., Пеккер Ф.П. Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов. - Л.: Машиностроение, 1977. - 192 с.
4. Учанін В.М., Гоголя В.М., Луценко Г.Г. Дослідження вихрострумових методів оцінки глибини довгих тріщин в феромагнітних матеріалах // Збірник наукових праць 8-ої міжнародної науково-технічної конференції-виставки “Неруйнівний контроль та діагностика неоднорідних об’єктів” серії “Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів”. –Львів.: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2003, - С.40-47.
5. Грешников В.А., Дробот Ю.В. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. - М.: Изд-во стандартов, 1976. - 272 с.
6. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций. / Стрижало В.А., Добровольский Ю.В., Стрельченко В.А. и др. / Отв. ред. Писаренко Г.С. - АН УССР. Ин-т проблем прочности. - Киев: Наук. Думка, 1990. - 232 с.
7. Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия. Измерения, контроль, диагностика. -К.: КМУГА, 1999. - 312 с.
8. Тутнов А.А., Тутнов И.А., Чуварин А.И. Динамика работоспособности конструктивных элементов на основе анализа структуры сигналов акустической эмиссии. - М.: 1984. - 27 с.
9. Цасюк В.В. Расчетно-экспериментальные методы исследования механической прочности изделий электронной техники: Дис. канд. техн. наук:

05.27.04.-Хмельницький, 1991. -236 с.

10. Ковтун И.И. Диагностика прочности неразъемных элементов конструкций методом акустической эмиссии: Дис. канд. техн. наук: 05.02.02.- Хмельницький, 1998. – 175 с.

11. Ройзман В.П., Ковтун І.І., Горошко А.В. Просторова локація джерел акустичної емісії // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2001. - №2. - С.84-86.

12. Ройзман В.П., Ковтун І.І. Горошко А.В. Неруйнівне технічне діагностування і прогнозування міцності деталей машин методом акустичної емісії // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2001. - №4. - С.46-52.

13. Ройзман В.П., Ковтун І.І., Горошко А.В. Локація небезпечних дефектів методом акустичної емісії // Вісник Технологічного університету Поділля. - Част. 1. – 2002. - №1. - С.195-200.

14. Цасюк В.В., Горошко А.В., Байдич Л.Е. Дослідження міцності паяних з'єднань радіоелектронної техніки // Вісник Технологічного університету Поділля. – Част. 3. - 2000. - №6. - С.14-17.

15. Ройзман В.П., Ковтун І.І. Горошко А.В. Неруйнівний контроль, діагностування і прогнозування міцності вузлів і деталей машин методом акустичної емісії із застосуванням локації // Вісник Технологічного університету Поділля. – Част. 1. – 2002. - №6. - С.224-233.

16. Горошко А.В. Акусто-емісійний контроль посудин підвищеної небезпеки // Вісник Технологічного університету Поділля. – Част. 1. -2002. - №4. - С.131-136.

17. Пат. 41138 А, G 01 N 29/04. Пристрій для визначення координат джерела акустичної емісії / Ройзман В.П., Ковтун І.І., Горошко А. В, Прохоренко С.В. - № 2001031425; Заявл. 01.03.2001; Опубл. 15.08.2001; Бюл. №7.

18. Пат. 43125 А, G 01 N 29/04. Спосіб визначення координат дефектів методом акустичної емісії / Ройзман В.П., Ковтун І.І., Горошко А. В., Прохоренко С.В. -

№ 2001031426; Заявл. 01.03.2001; Опубл. 15.11.2001; Бюл. №10.

19. Пат. 51981 А, G 01 N 29/04. Спосіб визначення координат дефектів методом акустичної емісії / Ройзман В.П., Ковтун І.І., Горошко А. В. - № 2001128312; Заявл. 04.12.2001; Опубл. 16.12.2002; Бюл. №12.

20. Неразрушающий контроль. Кн.2 Акустические методы контроля.: Практическое пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов / Под ред. В.В. Сухорукова. - М.: Высш. шк., 1991. - 283 с.

21. Милов В.А. Исследования склерометрических и акустических методов измерения прочности бетона: Автореф. Канд. дис. ЛИСИ. - Л., 1969.

22. Крылов Н.А. Электронно-акустические и радиометрические методы испытания материалов и конструкций. - Л.: Стройиздат, 1963. - 240 с.

23. Крылов Н.А., Калашников В.А., Полищук А.Н. Радиотехнические методы контроля качества железобетона. - Л.: Стройиздат, 1966. - 369 с.

24. Латишенко В.А. Диагностика прочности и жесткости материалов. - Рига.: Зинанте, 1968. - 320 с.

25. Гершберг М.В., Илюшин С.В., Смирнов В.И. Неразрушающие методы контроля судостроительных стеклопластиков. -Л.: Судостроение, 1971.- 199 с.

26. Аппен А.А., Козловская Е.И., Гань Фу-Си. Исследования упругих и акустических свойств силикатных стекол // Прикладная химия. - 1961. - №5. - С.35-39.

27. Рудаков В.Н. Радиодефектоскопия // Неразрушающий контроль качества конструкций и изделий из стеклопластика. - ЛДНТП, 1971. - Ч.2 - С.3-8.

28. Потапов А.И., Эбельс Ю.М., Толокнов В.Г. Инфракрасная дефектоскопия пластмасс. // Неразрушающий контроль качества конструкций и изделий из стеклопластика. - ЛДНТП. - 1971. - Ч. 1 - С.52-63.

29. Потапов А.И., Савицкий Г.М. Прочность и деформативность стеклопластиков (контроль в конструкциях). - Л.: Стойиздат, 1973. - 145 с.

30. Судаков В.В. Практическое применение электроники в строительстве. - Л.: Стройиздат, 1964. - 286 с.

31. Комаа К. Экзоэлектронная эмиссия поверхностей металлов при усталостных повреждениях // Нихон киндзону таккай си (ВЦП №79/59748). - 1976. - №9. С - 46.
32. Современные возможности и тенденции развития акустико-эмиссионного метода. // В мире неразрушающего контроля. - 2000. - №3. - С.8-12.
33. Кузнецов О.А., Погалов А.И. Прочность паяных соединений. - М.: Машиностроение, - 1987.-112 с.
34. Напряжения и деформации в элементах микросхем / В.С. Сергеев, О.А. Кузнецов, Н. П. Захаров, В.А. Летягин. - М.: Радио и связь, 1987. - 88 с. Долгов Ю.С., Сидохин Ю.Ф. Вопросы формирования паяного шва. - М., Машиностроение, 1973. - 136 с.
35. Монтаж на поверхность. Технология. Контроль качества. Под общей редакцией И. О. Шурчкова. М. Издательство стандартов. - 1991. С.115-117.
36. ОСТ 4Г0.054.089. Узлы и блоки радиоэлектронной аппаратуры. Пайка монтажных соединений. Типовые технологические процессы.
37. ГОСТ 18353. Контроль неразрушающий. Классификация методов.
38. ОСТ 11.094.024. Изделия электронной техники. Контроль неразрушающий. Общие положения и классификация методов.
39. Иванов В.И. О возможных формах сигналов акустической эмиссии. // Дефектоскопия. - 1979. - №5. - С.99-101.
40. Standard recommended practice for acoustic emission monitoring of structures during controlled stimulation. - ASTM E-569-76. - 1976.
41. Милешкин М.Б., Музыка Е.И., Жученко С.В., Библик И.В., Каневская Е.В. // Тезисы докладов V Всесоюзной конференции по композиционным материалам. - вып.1. - М.: 1981. - С.199-201.
42. Hamstad M.A., Chiao T.T. SAMPE Quarterly. - 1976. - 1. - P.31-45.
43. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. // Доклады АН СССР. – 1981. – т.259. - №6. С.1350-1353.
44. Гузь И.С., Милешкин М.Б., Музыка Е.И., Жуженко С.В., Каневская Е.В. //

Механика композитных материалов. - 1981. - №4. - С.631-636.

45. Бунина Н.А. Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии. - Л.: ЛГУ, 1990. - 156 с.

46. Трипалин А.С., Буйло С.И. Акустическая эмиссия. // Физико-механические аспекты. - Издательство Ростовского университета, - 1986. – 160 с.

47. Цасюк В.В. Методи неруйнівного контролю та діагностики механічної міцності конденсаторів // Матеріали III міжнародного симпозіуму “Некласичні проблеми теорії тонкостінних елементів конструкцій, та механіки композиційних матеріалів”.- Івано-Франківськ . - 1996. - С.15-18.

48. Терентьев В.М., Лихаций С.И., Лудзская Т.А., Пономаренко И.Н., Белогурова В.И. Использование акустической эмиссии в технологическом производстве керамических материалов. – Хабаровск, 1984. - 180 с.

49. Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. Теория, методы и средства акусто-эмиссионной диагностики. - Вып. 7. К.: Наукова думка, 1988. - 91 с.

50. Лексовский А.М., Усмонов Г.Х., Нарзуллаев Г.Х. Микротрещины, повреждаемость и разрушение композиционных материалов // Физика и механика разрушения композиционных материалов. - Л.: Академия наук СССР, Ордена Ленина Физико-Технический институт им. Иоффе. - 1986. С.69.

51. Кулешова Е.А., Куликов В.А., Гусев О.В., Пенкин А.Г. Анализ уровней деформации волокнистого композиционного материала методом АЭ // Акустическая эмиссия гетерогенных материалов. - Л.: Академия наук СССР, Ордена Ленина Физико-Технический институт им. Иоффе. - 1986.- С. 54.

52. Frederick J.R., Felbeck D.K. Acoustic Emission. - ASTM STP 505. - 1972. - P. 129-139.

53. Баранов В.М. Акустические измерения в ядерной энергетике.- М.: Энергоатомиздат, 1990. - 320 с.

54. В.Н. Бачегов, Ю.Б. Дробот, В.В. Лупанос. Акустическое контактное течеискание. Хабаровск, 1987. – 78 с.

55. К.Б. Вакар, Д.П. Красильников, Н.И. Овчинников. Некоторые результаты промышленного применения АЭ-метода контроля // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - Киев. - 2000. - №1. - С.25-29.
56. А.С. №1516955. В.К. Анишев. Акустоэмиссионное устройство для определения координат усталостных дефектов в крупногабаритных изделиях из листовых материалов / Авторское свидетельство по кл. G 01 N 29/04. – 1989. - Бюл. №39.
57. А.С. №1511673. Д.С. Коротченко, Б.Е. Патон, Г.Е. Пухов, А.Ф. Верлань, К. О Шепеленко, А.С. Ковбасенко, А.Е. Коваленко, Н.Н. Межуев и В.Н. Тесля. Многоканальное устройство для локации источника акустической эмиссии. / Авторское свидетельство по кл. G 01 N 29/04. – 1989. - Бюл. №36.
58. А.С. №1516955. В.К. Анишев. Акустоэмиссионное устройство для определения координат усталостных дефектов в крупногабаритных изделиях из листовых материалов. / Авторское свидетельство по кл. G 01 N 29/04. – 1989. - Бюл. №39.
59. А.С. №1467503. А.Ф. Паньков, В.П. Стариков, Л.Н. Степанова и И.В. Усманов. Многоканальное устройство для локации источника акустической эмиссии. / Авторское свидетельство по кл. G 01 N 29/04. – 1989. - Бюл. №11.
60. А.С. №1644021. М.М. Шпинер, В.Б. Пастернак, Я.М. Володарский и В.В. Шемякин. Устройство для определения координат источника сигналов акустической эмиссии. / Авторское свидетельство по кл. G 01 N 29/04. – 1991. - Бюл. №1.
61. А.С. №1539652. В.Н. Бачегов, Г.А. Калинов, О.Н. Пустовой. Способ определения координат источников акустической эмиссии. / Авторское свидетельство по кл. G 01 N 29/04. – 1990. - Бюл. №4.
62. О.Н. Слепцов, А.М. Жирков. Локализация источников АЭ методом последовательных приближений // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, - 1990. - №3. – С.23-29.
63. В.К. Анишев. Однозначное определение координат источников АЭ в

листовых материалах // Дефектоскопия, - 1990. - №7. – С.47-63.

64. В.В. Данилин, К.Б. Кузнецов, В. Д. Адамов, С. Н. Пичков. Система и результаты АЭ диагностирования технического состояния коллекторов парогенераторов энергоблоков с реакторами типа ВВЭР-1000 // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1994. - №1. – С.61-65.

65. Прибор акустико-эмиссионный АФ-15. Руководство по эксплуатации. Щ02.739.018 РЭ. - Кишинев. - 1983. - 150 с.

66. Ройзман В.П., Ковтун І.І. Горошко А.В. О возможности плоскостной локации мест расположения источников акустической эмиссии // Збірник праць міжнародної конференції “Надійність машин і прогнозування їх ресурсу”. – Івано-Франківськ: Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу. – 2000. – С.351-357.

67. Ройзман В.П., Ковтун І.І. Горошко А.В. О возможности плоскостной локации дефектов паяных соединений печатных плат радиоэлектронной техники методом акустической эмиссии // Труды междунар. конференции “Системные проблемы качества, математического моделирования и информационных технологий”. Част. 6. – М.: НИИ Автоэлектроника. – 2000. - С.86-89.

68. Привалов И.И. Аналитическая геометрия: Практ. пособие.-31-е изд., стер. – Киев: Изд-во УСХА, 1991. – 277 с.

69. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.

70. Измерения в промышленности. Справ. изд. В 3-х кн. Кн. 1. Теоретические основы. Пер. с нем./Под ред. Профоса П. -2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. 492 с.

71. Измерения в электронике: Справочник/В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др.; Под ред. В.А. Кузнецова.- М.: Энергоатомиздат, 1987.- 512 с.: ил.

72. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. В 2-х книгах. Кн. 2 / Под ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. - 352 с., ил. - С.189-196.
73. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Том 1. Однократное рассеяние и теория переноса. Физическая акустика. Под ред. Мэзона У. Том 1. 3 Дифракция акустических шумов на упругих телах. – М.: Наука, 1979. –239 с.
74. Справочник по персональным ЭВМ / Под. ред. Малинковского Б.Н. - М. - 1992. - 380 с.
75. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC / Под. ред. У. Томкинса. - 1992. - 246 с.
76. Григорьев В.А. Микропроцессор 1-486. 1993. - т.2: Аппаратная архитектура. - 378 с.
77. Абель П. Язык ассемблера для IBM PC и программирования: Пер. с англ. - М.: Высшая шк., - 1992. - 236 с.
78. Джонс Ж., Хорроу К. Решение задач в системе Турбо Паскаль: Пер. с англ. - М.: Высшая шк., 1991. - 198 с.
79. Методические указания. Прибор акустико-эмиссионный АФ-15. Методика поверки МИ 572-84. Кишинев. – 1986.
80. Грешников В.А., Брагинский А.П. Об анализе сигналов акустической эмиссии // Дефектоскопия. - 1980. - №5. - С.101-106.
81. Иванов В.И., Белов В.М. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. - М.: Машиностроение. 1981. - 184 с.
82. Белов В.М. АЭ контроль сварных соединений труб с трубными дисками // Акустическая эмиссия материалов и конструкций: 1 Всесоюз. конф. - Ростов-на-Дону: Рост. ун-т. - 1984. -Ч. II. - С.77-79.
83. Лазерная сварка металлов / Григорьянц А.Г., Шагалов И.Н./ Под ред. А.Г. Григорьянца. - М.: Высш. шк., - 1988. - 207 с.
84. Волоченко В.М. Контроль качества сварки. - М.: Машиностроение, 1975. -

328 с.

85. Земзин В.Н. Разрушение сварных швов // Сварочное производство. - 1982. - №3. - С.4-7.

86. Шкуратовский Г. Д., Шинкарев Б. М. Сварочные работы: Справ. Рабочего.- К.: Будивэльнык, 1988. - 320 с.

87. Иванов В.И. Методы и аппаратура контроля с использованием акустической эмиссии. - М: Машиностроение, - 1980. - С.42-47.

88. Мелехин Б.П., Минц Р.И., Куглер А.М. Влияние механизмов пластической деформации цинка на акустическую эмиссию // Изв. вузов. Цветная металлургия. -1971. - №3. - С.128-131.

89. Болотин Ю.В., Белов В.М. Контроль качества шва методом АЭ в процессе электронно-лучевой сварки // Свароч. пр-во. - 1976. - №4. - С.29-31.

90. Ржевкин В.Р., Тишкин А.П., Бойкова К.И., Кузнецов С.Ю. Акустическая эмиссия при разрушении сварных соединений разнородных сталей. // Акустическая эмиссия гетерогенных материалов. - Л.: Академия наук СССР, Ордена Ленина Физико-Технический институт им. Иоффе. - 1986. - С.130-135.

91. Ройзман В.П., Горошко А. В. Методи і засоби акустико-емісійної діагностики технічного стану деталей і вузлів машин // Збірник наукових праць 8-ої міжнародної науково-технічної конференції-виставки "Неруйнівний контроль та діагностика неоднорідних об'єктів" серії "Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів". - Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. – 2003. - С.40-47.

92. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М., 1986. - 365 с.

93. Справочник по сопротивлению материалов. /Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.; Отв. ред. Писаренко Г.С. - 2-е изд., перераб. и доп. - Киев: Наук. думка, 1988. - 736 с.

94. Ройзман В.П., Горошко А. В., Лебедь А.В., Петрашук С. А. Механическая прочность в радиоэлектронике // Труды второй междунар. научно-практической конференции "Современные информационные и электронные

технологии" (СИЭТ-2001). – Одесса: Одесский национальный политехнический университет, ОАО „НЕПТУН”. - 2001. - С.221-222.

95. Недосека А.Я. Основы расчёта и диагностики сварных конструкций. - К.: Издательство "ИНДПРОМ", 1998. - 640 с.

96. ДСТУ 282594. Розрахунки та випробування на міцність. Основні терміни та визначення.

97. Калоша В.К., Лобко С.И., Чичкова Т.С. Математическая обработка результатов эксперимента. - Минск.: Высш. шк., 1982. - 285 с.

98. Яцерицын П.И., Махаринский Е.И. Планирование эксперимента в машиностроении. - Минск.: Высш. шк., 1985. - 286 с.

99. М.Л. Бернштейн. Структура деформированных металлов. - М.: Металлургия. - 1977. - 268 с.

100. Imanara T., Sana M., Shimizu O. Dislocation attenuation and acoustic emission during deformation in copper single crystal // Crystals lattice Defects. -1973. - Vol.4.

101. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронов В.К. Физ. основы пластической деформации. - М., 1982. - 465 с.

102. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. - М.: Металлургия, 1986. - 231 с.

103. Иванов А.В., Мелькер А.И. Физика твердого тела. - М., 1986 - т.28. 242 с.

104. Коэн М., Вуцкевич М.Р. // Физика прочности и пластичности. - М.: Металлургия. - 1972. - С.258-268.

105. Ройзман В.П., Ковтун І.І. Горошко А.В. Неруйнівний контроль і прогнозування характеристик міцності і пластичності матеріалів методом акустичної емісії // Збірник праць міжнародної конференції “Надійність машин і прогнозування їх ресурсу”. Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу. – 2000. – С.120-127.

106. Г.А. Бигус, М.Н. Ермакова, А.Г. Андреев. Методика и результаты акустико-эмиссионного обследования потенциально опасных участков магистральных газопроводов // Техническая диагностика и неразрушающий

контроль - 1997. - №3. - С.53-55.

107.В.А. Неумоин, В.В. Данилин, С.Н. Пичков. Методология моделирования разрушения сварных сосудов давления при создании систем АЭ-диагностики // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1994. - №1. - С.31-34.

108.А.Я. Недосека, М.А. Овсиенко, Л.Ф. Харченко, М.А. Яременко. Опыт использования акустико-эмиссионного метода при диагностировании объектов химической промышленности // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1997. - №1. - С.45-48.

109.Н.Г. Висиловский, М.Б. Кельрих, С.П. Максимов. Возможности и проблемы использования акустико-эмиссионного метода в Украине // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1999. - №1. - С.82 - 85.

110.J. Liška, M. J., Cvrček, M. The Tools for Objective Evaluation of Emission Sources Detected during Acoustic Emission Test // 23rd European Conference on Acoustic Emission Testing, Vienna, 6-8 May 1998.

111.NDIS 2412-1980. Acoustic emission testing of spherical pressure vessels made of high tensile strength steel and classification of test results.

112.Филоненко С.Ф., Бабак В.П. Исследование разрушения мембран в системе регулирования подачи топлива методом АЭ // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. - 1998. - №1. - С.136 – 141.

113.Эльманович В.Н., Тароваров А.И. Акустико-эмиссионный контроль сварных труб // Повыш. эксплуат. надежн. нефтезавод. оборудования / Всес. науч.-иссл. и констр.-технолог.ин-т оборуд. нефтепер. и нефтехим. пром.- М.: - 1991. -С.40-46.

114.РД-03-131-97. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. – М.: Изд-во стандартов, 1996. - 40 с.

115.Расчет и испытания на прочность. Применение метода акустической эмиссии для контроля сосудов, работающих под давлением, и трубопроводов. Методические рекомендации. МР 204-86. - Г.: ВНИИНМАШ, 1986. ДНАОП

0.00-1.07-94.

116.Паспорта та інструкція заводу виготовлювача по експлуатації пересувного автомобільного газозаправника ПАГЗ-2800-32.

117.Ю. А. Нечаев, Б. П. Пилин. Опыт применения акустико-эмиссионной диагностики на предприятиях нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1994. - №1. - С.56 - 60.

118.Л. П. Волков, А. Ф. Зверев, Ф. В. Козлецкий, А. Н. Леонов. Акустическая шумовая диагностика течей // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1994. - №1. - С.39 – 56.

119.Ройзман В.П., Ковтун І.І. Горошко А.В., Цасюк В.В. Локация развивающихся прочностных дефектов в технических изделиях // Труды третьей междунар. научно-практической конференции "Современные информационные и электронные технологии" (СИЭТ-2002). – Одесса: Одесский национальный политехнический университет, ОАО „НЕПТУН”. – 2002. - С.146.

Додаток А

Види дефектів паяних з'єднань

Таблиця А.1

Види дефектів паяних з'єднань

Найменування	Короткий опис
Відсутність припою	В з'єднанні повністю відсутній припій
Недогріта пайка	Недостатній прогрів при отриманні з'єднання
Холодна пайка	В процесі кристалізації відбулось механічне зміщення виводу
Зерниста пайка	Присутність в припої забруднень, що викликають зернистість
Залишки припою	Збільшена кількість припою, що ускладнює контроль ПЗ
Нестача припою	Недостатня кількість припою для створення надійного з'єднання
Незмочувана ділянка	Припій відштовхується від контактної площадки
Незмочуваний вивід	Відсутність припою на виводі
Бурулька припою	Гострі піки на поверхні пайки
Проколи	Невеликі отвори на поверхні галтели
Пустоти	Великі отвори в пайці, що мають вихід на поверхню
Заглиблення	Отвори або інші порушення в пайці, при яких проглядається дно з'єднання
Включення мастила	Краплі мастила в з'єднанні
Містки припою	Небажані з'єднання між виводами
Кульки припою	Наявність припою на поверхні плати у вигляді кульок різного діаметру
Бризки припою	Наявність на поверхні плати бризок припою
Внутрішні пустоти	Пустоти всередині пайки, що не мають виходу на її поверхню
Бульбашки	Пустоти всередині з'єднання, що викликають скривлення галтели
Бруд та сторонні частинки	Поверхня пайки забруднена, що обмежує можливість її контролю
Залишки флюсу	Залишки флюсу на поверхні пайки, що знижують якість з'єднання
Неякісні виводи	Виводи коротші, довші, неправильно зігнуті (сформовані), некомпланарні
Непропай	Повне або часткове незаповнення паяльного зазору припоєм
Неспай	Повна або часткова відсутність зчеплення паяльного матеріалу з припоєм
Пористість в паяному з'єднанні	Усадочна, паяльна, дифузійна
Ерозія при пайці	Розчинення основного матеріалу в контакт з рідким припоєм
Підріз при пайці	Локальна ерозія
Розрив пайки	Відрив фольги від плати при перегріві, розрив контакту
Перемички припою	Замикання контакту між елементами в момент пайки
Нестача або надлишок припою	Наявність сторонніх домішок в припої, які накопичуються в паяльній ванні під час пайки
Незмочуваність	Зменшення площі розтікання припою при пайці (залежить від стану, підготовки поверхні під пайку)
Відшарування пайки від контактних ділянок	Відрив припою разом з площадкою при перегріві від плати
Холодні пайки	Зміщення деталей під час застигання припою відносно один одного

Додаток Б

Похибки локації джерел сигналів акустичної емісії

Таблиця Б.1

Теоретичні відносні похибки визначення лінійних координат джерел АЕ

РЧП τ , мкс	Швидкість поширення хвиль АЕ v , мм/мкс											
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
10	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7
20	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8
50	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9
100	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7	1,0
200	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1	1,0	1,1
300	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2
400	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
500	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3
600	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3
700	2,5	2,3	2,1	2,0	1,8	1,7	1,6	1,6	1,5	1,4	1,4	1,3
800	2,8	2,5	2,3	2,1	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,5	1,4	1,3
Максимальна відносна похибка визначення лінійних координат ε , %												

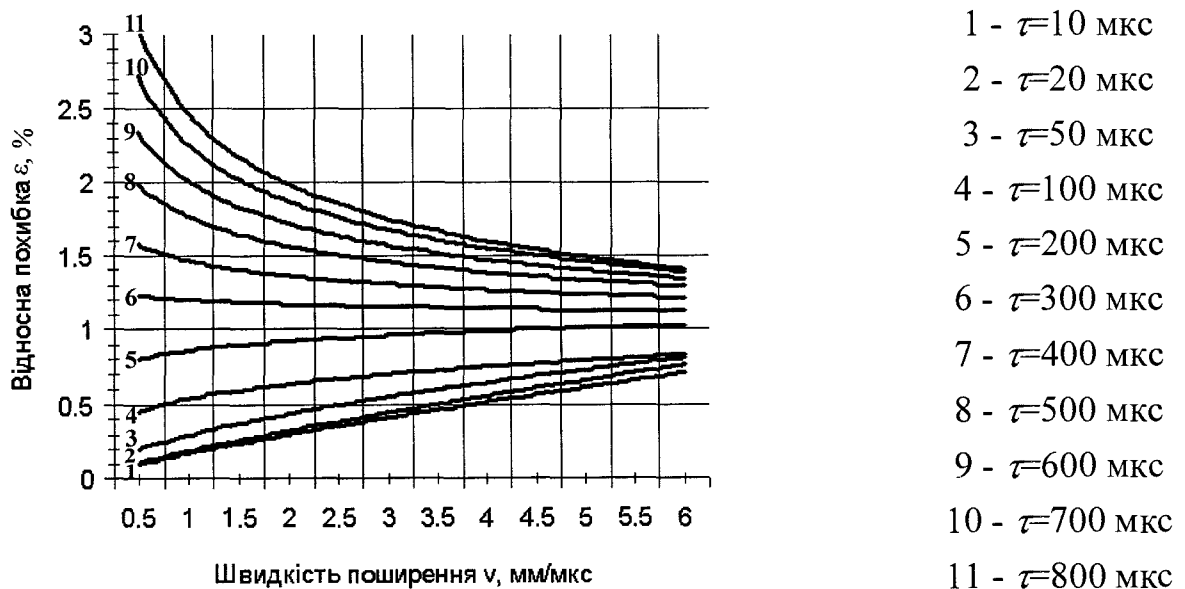


Рис. Б.1. Залежність відносної похибки визначення лінійних координат джерела АЕ від швидкості поширення хвиль АЕ для різних значень РЧП

Таблиця Б.2

Розрахункові відносні похибки визначення координат джерел АЕ

Відстань між датчиками L , мм	Швидкість поширення хвиль АЕ v , мм/мкс	Вид локації		
		Лінійна	Площинна	Просторова
50-100	1-3	6,2	43,6	68
	3-6	12,7	88,1	138
100-1000	1-3	2,8	13,1	30
	3-6	2,4	13,7	26
1000-5000	1-3	2,3	16,6	25
	3-6	1,1	7,8	11
Відносна похибка ε , %				

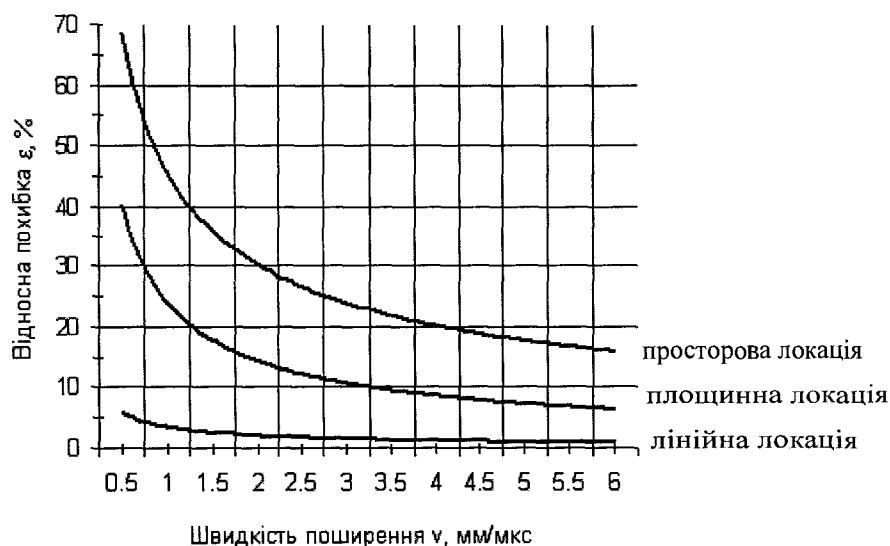


Рис. Б.2. Залежність максимальної відносної похибки визначення координат джерела АЕ від швидкості поширення хвиль АЕ:

Таблиця Б.3

Експериментальні відносні похибки визначення координат джерел АЕ

Відстань між ПЕП L , мм	Швидкість поширення v , мм/мкс	Вид локації		
		Лінійна	Площинна	Просторова
50-100	1-3	7,0	10,8	92,6
	3-6	7,0	10,3	81,9
	1-3	6,7	11,1	85,7
	3-6	7,3	12,8	94,8
	1-3	7,3	12,7	73,5
	3-6	7,0	9,6	71,3
	1-3	8,7	11,5	74,4
	3-6	7,5	6,9	83,0
	1-3	7,7	12,0	74,9
	3-6	7,3	7,9	92,7
	1-3	8,1	13,8	87,1
	3-6	6,3	7,0	59,8

Продовження таблиці Б.3

Відстань між ПЕП L , мм	Швидкість поширення v , мм/мкс	Вид локації		
		Лінійна	Лінійна	Лінійна
50-100	1-3 / 3-6	8,4 / 5,2	10,8 / 9,3	79,9 / 90,1
	1-3 / 3-6	7,5 / 8,6	11,9 / 10,2	98,0 / 67,4
	1-3 / 3-6	7,8 / 8,1	13,6 / 9,2	69,6 / 82,1
	1-3 / 3-6	7,7 / 5,7	13,2 / 9,6	88,2 / 67,3
	Середнє значення	7,2 / 7,0	11,9 / 10,1	84,2 / 77,6
	100-1000	1-3 / 3-6	3,3 / 3,0	4,7 / 4,7
1-3 / 3-6		2,5 / 2,9	5,9 / 4,5	29,2 / 22,5
1-3 / 3-6		2,4 / 2,6	6,1 / 4,1	34,5 / 21,3
1-3 / 3-6		3,1 / 2,7	7,0 / 4,5	25,2 / 24,3
1-3 / 3-6		2,6 / 2,9	6,3 / 5,9	31,3 / 22,4
1-3 / 3-6		3,1 / 3,0	4,6 / 5,8	28,1 / 23,7
1-3 / 3-6		3,1 / 2,8	4,8 / 5,7	24,5 / 28,7
1-3 / 3-6		3,1 / 2,6	7,6 / 4,5	31,3 / 28,2
1-3 / 3-6		3,0 / 2,7	6,3 / 4,9	29,6 / 24,5
1-3 / 3-6		2,9 / 2,8	5,8 / 6,3	25,3 / 19,8
Середнє значення		2,9 / 2,7	5,8 / 5,2	28,5 / 25,6
1000-2400		1-3 / 3-6	2,0 / 1,8	5,3 / 4,8
	1-3 / 3-6	1,9 / 2,0	5,4 / 4,5	7,7 / 9,9
	1-3 / 3-6	2,1 / 1,7	5,6 / 4,8	7,9 / 7,5
	1-3 / 3-6	2,1 / 2,2	5,5 / 4,3	10,2 / 8,8
	1-3 / 3-6	2,2 / 2,2	5,2 / 4,8	10,5 / 8,4
	1-3 / 3-6	1,9 / 1,4	5,3 / 4,7	8,8 / 7,7
	1-3 / 3-6	2,1 / 1,8	4,9 / 4,8	11,9 / 6,9
	1-3 / 3-6	2,1 / 1,9	5,7 / 5,9	10,6 / 9,2
	1-3 / 3-6	1,9 / 2,4	4,9 / 4,8	11,5 / 9,5
	1-3 / 3-6	2,2 / 1,9	5,2 / 4,5	10,5 / 8,6
	Середнє значення	2,2 / 2,1	5,5 / 4,8	9,9 / 8,8
	Відносна похибка ϵ , %			

Додаток В

Технічні характеристики приладу АФ-15

Таблиця В.1

Основні параметри і характеристики приладу АФ-15

Назва параметрів і характеристики	Дані за технічними умовами
Кількість каналів	2
Сумарний рахунок АЕ, імп	$10^0 - 10^6$
Швидкість рахунку АЕ (інтенсивність осциляцій), імп/с	$10^0 - 10^6$
Загальна кількість імпульсів АЕ, імп	$10^0 - 10^3$
Активність АЕ (інтенсивність подій), імп/с	$10^0 - 10^3$
Динамічний діапазон реєстрації амплітуди сигналів АЕ, мВ	150-5000
Діапазон робочих частот підсилюючого тракту, кГц	20-2000
Частота зрізу ФВЧ, кГц	20; 200; 500; 1000
Частота зрізу ФНЧ, кГц	200; 500; 1000; 2000
Ослаблення сигналу фільтрами, дБ/октаву, не менше	24
Коефіцієнт підсилення основного підсилювача, дБ:	
- максимальний	60
- мінімальний	9
Дискретність установки коефіцієнту підсилення, дБ	1
Максимальна амплітуда вихідної напруги підсилювача для середніх частот фільтрів, В, не менше	5
Коефіцієнт підсилення попереднього підсилювача, дБ, не менше	40
Ефективне значення власних шумів попереднього підсилювача, мкВ, не більше	7
Період тактових імпульсів, с, на вибір	0,1; 1; 10; 30
Період генератору розгортки, на вибір	10с; 1хв; 1год; 8год
Максимальна амплітуда вихідної напруги калібратора, В, не менше:	
- в безперервному режимі	1
- в імпульсному	5
Діапазон тривалості радіоімпульсу калібратора, мкс	40-50
Частота заповнення радіоімпульсів калібратора, кГц	300; 600
Порогова напруга для формування імпульсів і подій, мВ	100 ± 10
Діапазон виміру різниці часу приходу імпульсів АЕ, мкс	8-800
Похибка виміру різниці часу приходу імпульсів АЕ, мкс, не більше	± 3
Відносна нестабільність реєстрації основних параметрів (амплітуда, швидкість рахунку, активність) АЕ від імітатору, дБ, не більше	3
Порогова чутливість приладу до амплітуди зсуву акустичних сигналів, м, не менше	10^{-14}
Максимальна частота синхронізації з навантаженням, кГц, не менше	5

Додаток Г

Пакет прикладних програм збору та обробки сигналів акустичної емісії

Г.1. Програма збору даних сигналів акустичної емісії Acoust.com

```

; Модуль чтения данных акустического теста (ASCII)
; Ввод данных производится по прерываниям IRQ3, IRQ4, IRQ5,
; IRQ7.
; IRQ3
; Возникает асинхронно в момент фиксации события
; Функции :
; - Чтение портов
; - Сохранение данных в буфере
; - Ведение счетчика прерываний
; - Вывод на экран динамики работы

; IRQ5
; Возникает периодически по тактам ГТИ прибора
; Функции :
; - Чтение портов
; - Сохранение данных в буфере
; (- Ведение счетчика прерываний)
; - Вывод на экран динамики работы
; - Проверка потери прерывания по линии IRQ3
; ( Счетчик прерываний IRQ3 должен быть равен количест-
; ву
; событий за такт ГТИ)

; Основной цикл
; - Проверка буфера клавиатуры
; - Проверка флага потери прерывания
; - Проверка флага заполнения буфера
; - Проверка флага неготовности буфера
; - Сохранение заполненного буфера на диск

; Формат команды
; ako3st.exe FileName Scale Takt
; где FileName - имя файла данных
; Scale - множитель осцилляций
; Takt - период ГТИ

.Model Tiny
.Code
; Stack 100
ORG 100H

Start: jmp init

; Переменные и константы
Size_Buf = 16*1024 ; Размер буфера накопления данных ( в Kb
)
Seg_Adr_A = 8000h ; Сегментный адрес первого буфера нако-
пления данных
Seg_Adr_B = 9000h ; Сегментный адрес второго буфера нако-
пления данных
Cur_Seg_Adr dw Seg_Adr_A; Текущий сегментный адрес
Cur_Off_Adr dw 0
Next_Seg_Adr dw Seg_Adr_B; Следующий/предыдущий сегмент-
ный адрес
Next_Off_Adr dw 0

Size_Data_Irq3 = 11 ; Количество байт, считываемых по IRQ3
Size_Data_Irq4 = 11 ; Количество байт, считываемых по IRQ4
Size_Data_Irq5 = 11 ; Количество байт, считываемых по IRQ5
Size_Data_Irq7 = 11 ; Количество байт, считываемых по IRQ7

Buf_Err = 1 ; Признак ошибки буфера
Buferr_Err db 0 ; Флаг ошибки ( оба буфера заполнены
; т.е. предыдущий буфер не успел
освободиться
; к моменту заполнения текущего.

Count_Irq4 dw 0 ; Счетчик количества прерываний по IRQ4
(BCD)
Count_Lost_Irq4 dw 0 ; Количество случаев потери IRQ4

; Имя файла данных и его Handle
FileDat db 30 dup(?)
Handle dw ?

Line = 80h ; Начало адреса командной строки

; Видео-память для отображения динамики
VidMemSeg dw 0b800h
VidMemOff3 dw 24*160 + 4*2
Character3 dw 0233h,0220h
VidMemOff4 dw 24*160 + 4*2
Character4 dw 0234h,0220h

VidMemOff5 dw 24*160 + 2*2
Character5 dw 0235h,0220h
VidMemOff7 dw 24*160 + 4*2
Character7 dw 0237h,0220h

; Порты для чтения
Adr4_Port1 dw 330h ; Амплитуда
Adr4_Port2 dw 331h ; Координата мл. часть
Adr4_Port3 dw 332h ; Мл. часть -> ст. часть координаты

Adr5_Port1 dw 224h ; Осцилляции мл. часть
Adr5_Port2 dw 225h ; События мл. часть
Adr5_Port3 dw 226h ; Мл. часть -> Ст. часть событий
; Ст. часть -> Ст. часть осцилляций

Adr3_Port1 dw 220h
Adr3_Port2 dw 221h
Adr3_Port3 dw 222h

Adr7_Port1 dw 230h
Adr7_Port2 dw 231h
Adr7_Port3 dw 232h

Exit_Test db 0 ; Флаг завершения теста

;.....

; Макросы

; Сохранение регистров в стеке
PushReg macro reg
irp r,<reg>
push r
endm

; Восстановление регистров из стека
PopReg macro reg
irp r,<reg>
pop r
endm

; Mov для сегментных регистров
MovSeg macro seg1,seg2
push seg2
pop seg1
endm

; Установить новый адрес обработчика прерываний, сохранив
старый
ChangeHandler macro Vector

```

```

mov ax,35&Vector
int 21h
mov old&Vector&o,bx
mov old&Vector&s,es
lea dx,New&Vector
mov ax,25&Vector
int 21h
endm

; Восстановить старый адрес обработчика прерывания
RestoreHandler макро Vector
push ds
mov dx,old&Vector&o
mov ax,old&Vector&s
mov ds,ax
mov ax,25&Vector
int 21h
pop ds
endm
;.....
; Обработка прерывания 09h (IRQ1)
;.....
New09h: push ax
; Получить символ
in al,60h
; На отпускание клавиш не реагирую
test al,10000000b
jnz Exit_Irq1
; Допустим снэк-код 01h (Esc)
сmp al,01h
jne Exit_Irq1 ;old
mov byte ptr es:Exit_Test,1

Exit_Irq1: mov ax,20h
out 20h,ax
pop ax
iret

old: pop ax ; Для отладки
old09h: db 0eah
old09ho dw 0
old09hs dw 0
;.....
; Обработка прерывания 0ch (IRQ4)
;.....
New0ch: PushReg <ax,bx,dx,cx,di,es,ds>
MovSeg ds,cs

; Читать порты
mov dx,Adr4_Port1
;int 3
in al,dx
mov bl,al
inc dx
in al,dx
mov cl,al
inc dx
in al,dx

; Сформировать значения амплитуды и координаты в
bl,dx
mov ch,al
and ch,00001111b
mov dx,cx

; Поместить значения в буфер
mov ax,Cur_Seg_Adr
mov es,ax
mov di,Cur_Off_Adr
; Проверить наличие места в буфере
mov cx,Size_Buf
sub cx,di
сmp cx,Size_Data_Irq4
jge @put_data
; Места нет. Попытка взять следующий буфер
сmp Next_Off_Adr,0
je @change_buf
mov Bufer_Err,Buf_Err
jmp Exit_Irq4
@change_buf: mov cx,Next_Seg_Adr
mov Cur_Seg_Adr,cx

mov Cur_Off_Adr,0
mov Next_Seg_Adr,ax
mov Next_Off_Adr,di
mov es,cx
xor di,di

@put_data: ; Поместить признак IRQ4
mov al,34h
stosb
mov ax,2020h
stosw
; Поместить амплитуду (bl)
xor ah,ah
mov cx,4
amp: shl bl,1
rcl ah,1
loop amp
mov al,ah
add al,30h
stosb
mov cx,4
shr bl,cl
mov al,bl
add al,30h
stosb
mov al,20h
stosb
; Поместить координату (dx)
mov al,dh
add al,30h
stosb
xor bl,bl
mov cx,4
koor: shl dl,1
rcl bl,1
loop koor
mov al,bl
add al,30h
stosb
mov cx,4
shr dl,cl
mov al,dl
add al,30h
stosb
mov ax,0a0dh
stosw
mov Cur_Off_Adr,di

; Показать динамику
mov ax,VidMemSeg
mov es,ax
mov di,VidMemOff4
mov ax,Character4
mov es:[di],ax
mov bx,Character4[2]
mov es:[di+2],bx
mov Character4,bx
mov Character4[2],ax

; Увеличить счетчик прерываний (BCD)
mov ax,Count_Irq4
add al,1
daa
mov byte ptr Count_Irq4,al
adc ah,0
mov al,ah
daa
mov byte ptr Count_Irq4+1,al

Exit_Irq4: mov ax,20h
out 20h,ax
PopReg <ds,es,di,cx,dx,bx,ax>
iret
old0ch: db 0eah
old0cho dw 0
old0chs dw 0
New0bh: PushReg <ax,bx,dx,cx,di,es,ds>
MovSeg ds,cs

mov dx,Adr3_Port1

```

```

in al,dx
  mov bl,al
  inc dx
  in al,dx
  mov cl,al
  inc dx
  in al,dx

  mov ch,al
  and ch,00001111b
  mov dx,cx

  mov ax,Cur_Seg_Adr
  mov es,ax
  mov di,Cur_Off_Adr

  mov cx,Size_Buf
  sub cx,di
  cmp cx,Size_Data_Irq3
  jge @put_Data1
  cmp Next_Off_Adr,0
  je @change_buf1
  mov Buf_Err,Buf_Err
  jmp Exit_Irq3
@change_buf1: mov cx,Next_Seg_Adr
  mov Cur_Seg_Adr,cx
  mov Cur_Off_Adr,0
  mov Next_Seg_Adr,ax
  mov Next_Off_Adr,di
  mov es,cx
  xor di,di
@put_data1:
  mov al,33h
  stosb
  mov ax,2020h
  stosw
  xor ah,ah
  mov cx,4
amp1:  shl bl,1
  rcl ah,1
  loop amp1
  mov al,ah
  add al,30h
  stosb
  mov cx,4
  shr bl,cl
  mov al,bl
  add al,30h
  stosb
  mov al,20h
  stosb

  mov al,dh
  add al,30h
  stosb
  xor bl,bl
  mov cx,4
koor1: shl dl,1
  rcl bl,1
  loop koor1
  mov al,bl
  add al,30h
  stosb
  mov cx,4
  shr dl,cl
  mov al,dl
  add al,30h
  stosb
  mov ax,0a0dh
  stosw
  mov Cur_Off_Adr,di

  mov ax, VidMemSeg
  mov es,ax
  mov di, VidMemOff3
  mov ax,Character3
  mov es:[di],ax
  mov bx, Character3[2]
  mov es:[di+2],bx
  mov Character3,bx
  mov Character3[2],ax

Exit_Irq3: mov ax,20h
  out 20h,ax
  PopReg <ds,es,di,cx,dx,bx,ax>
  iret
old0bh:  db 0eah
old0bho dw 0
old0bhs dw 0

New0fh: PushReg <ax,bx,dx,cx,di,es,ds>
  MovSeg ds,cs

  mov dx,Adr7_Port1

  in al,dx
  mov bl,al
  inc dx
  in al,dx
  mov cl,al
  inc dx
  in al,dx

  mov ch,al
  and ch,00001111b
  mov dx,cx

  mov ax,Cur_Seg_Adr
  mov es,ax
  mov di,Cur_Off_Adr
  mov cx,Size_Buf
  sub cx,di
  cmp cx,Size_Data_Irq7
  jge @put_data2
  cmp Next_Off_Adr,0
  je @change_buf2
  mov Buf_Err,Buf_Err
  jmp Exit_Irq7
@change_buf2: mov cx,Next_Seg_Adr
  mov Cur_Seg_Adr,cx
  mov Cur_Off_Adr,0
  mov Next_Seg_Adr,ax
  mov Next_Off_Adr,di
  mov es,cx
  xor di,di
@put_data2: mov al,37h
  stosb
  mov ax,2020h
  stosw
  xor ah,ah
  mov cx,4
amp2:  shl bl,1
  rcl ah,1
  loop amp2
  mov al,ah
  add al,30h
  stosb
  mov cx,4
  shr bl,cl
  mov al,bl
  add al,30h
  stosb
  mov al,20h
  stosb

  mov al,dh
  add al,30h
  stosb
  xor bl,bl
  mov cx,4
koor2: shl dl,1
  rcl bl,1
  loop koor2
  mov al,bl
  add al,30h
  stosb
  mov cx,4
  shr dl,cl
  mov al,dl
  add al,30h
  stosb
  mov ax,0a0dh
  stosw
  mov Cur_Off_Adr,di

```

```

mov ax, VidMemSeg
mov es,ax
mov di, VidMemOff7
mov ax,Character7
mov es:[di],ax
mov bx,Character7[2]
mov es:[di+2],bx
mov Character7,bx
mov Character7[2],ax

Exit_Irq7: mov ax,20h
           out 20h,ax
           Popreg <ds,es,di,cx,dx,bx,ax>
           iret
old0fh: db 0eah
old0fho dw 0
old0fhs dw 0

;.....
; Обработка прерывания 0dh (IRQ5)
;.....
New0dh:  PushReg <ax,bx,dx,cx,di,es,ds>
         MovSeg ds,cs
         ; Читать порты
         mov dx,Adr5_Port1
         in al,dx
         mov bl,al
         inc dx
         in al,dx
         mov cl,al
         inc dx
         in al,dx
         ; Сформировать значения событий и осцилляций в
         dx,bx
         mov ch,al
         and ch,00001111b
         mov dx,cx
         mov cl,4
         shr al,cl
         mov bh,al
         push dx

         ; Поместить значения в буфер
         mov ax,Cur_Seg_Adr
         mov es,ax
         mov di,Cur_Off_Adr
         ; Проверить наличие места в буфере
         mov cx,Size_Buf
         sub cx,di
         cmp cx,Size_Data_Irq5
         jge put_data
         ; Места нет. Попытка взять следующий буфер
         cmp Next_Off_Adr,0
         je change_buf
         mov Buferr_Err,Buf_Err
         jmp Exit_Irq5
change_buf: mov cx,Next_Seg_Adr
           mov Cur_Seg_Adr,cx
           mov Cur_Off_Adr,0
           mov Next_Seg_Adr,ax
           mov Next_Off_Adr,di
           mov es,cx
           xor di,di

put_data:  ; Поместить признак IRQ5
           mov al,35h
           stosb
           mov al,20h
           stosb
           ; Поместить осцилляции (bx)
           mov al,bh
           add al,30h
           stosb
           xor ah,ah
           mov cx,4
osc:       shl bl,1
           rcl ah,1
           loop osc
           mov al,ah
           add al,30h

           stosb
           mov cx,4
           shr dl,cl
           mov al,dl
           add al,30h
           stosb
           mov cx,4
           shr dl,cl
           mov al,dl
           add al,30h
           stosb
           mov ax,0a0dh
           stosw
           mov Cur_Off_Adr,di

           ; Показать динамику
           mov ax,VidMemSeg
           mov es,ax
           mov di,VidMemOff5
           mov ax,Character5
           mov es:[di],ax
           mov bx,Character5[2]
           mov es:[di+2],bx
           mov Character5,bx
           mov Character5[2],ax

           ; Проверить потерю IRQ4
           pop dx
           cmp dx,Count_Irq4
           je clear_count

;int 4
;mov ax,Count_Irq4
           inc Count_Lost_Irq4
clear_count:mov Count_Irq4,0

Exit_Irq5: mov ax,20h
           out 20h,ax
           PopReg <ds,es,di,cx,dx,bx,ax>
           iret
old0dh: db 0eah
old0dho dw 0
old0dhs dw 0
;.....
ErrCmdLineMsg db 10,13,"Формат командной строки :
",10,13,10,13
           db "ako3st.exe /FileName /Scale /Takt",10,13,'$'
ErrFileMsg   db 10,13,"Ошибка создания файла",10,13,'$'
ErrWrFile    db 10,13,"Ошибка записи в файл",10,13,'$'
Int_Msg      db 10,13,"Потеря прерываний IRQ4 - "
Count_Ascii  db " ",10,13,'$'
ErrorWrBufMsg db 10,13,"Ошибка формирования буфера записи",10,13,'$'

init:       MovSeg ds,cs

           ; Анализ командной строки
           mov ah,62h ; Получить адрес текущего блока PSP
(в BX)
           int 21h
           mov es,bx
           mov di,Line
           ; - 1 В строке должно быть как минимум 7 байт
           xor cx,cx
           mov cl,byte ptr es:[di]
           cmp cx,7
           jge CmdCheck2

```

```

ErrCmdLine: lea dx,ErrCmdLineMsg
             jmp go_on
ErrFile:    lea dx,ErrFileMsg
             jmp go_on
ErrWr:     lea dx,ErrWrFile
go_on:     mov ah,9
           int 21h
           mov ax,4c01h
           int 21h

CmdCheck2: ; - 2 Поиск первого '/' (имя файла)
           dec cx
           add di,2
           mov al,'/'
           repne scasb
           cmp cx,0
           je ErrCmdLine
           ; Выборка имени файла
           lea si,FileDat
GetFileName: mov bl,es:[di]
             cmp bl,'/'
             je CmdCheck3
             cmp bl,''
             je CmdCheck3
             mov [si],bl
             inc si
             inc di
             loop GetFileName
             jmp ErrCmdLine

CmdCheck3: mov byte ptr [si],0
           ; - 3 Выборка множителя осцилляций периода ГТИ
           repne scasb
           cmp cx,0
           je ErrCmdLine
           mov di,es:[di]
           repne scasb
           cmp cx,0
           je ErrCmdLine
           mov dh,es:[di] ; в dx - два байта : множитель и пери-
од
           ; Записать разделители, множитель осцилляций и период
ГТИ в буфер
           mov ax,Cur_Seg_Adr
           mov es,ax
           xor di,di
           mov al,'#'
           stosb
           mov ax,dx
           stosw
           mov ax,0a0dh
           stosw
           mov al,'#'
           stosb
           mov ax,0a0dh
           stosw
           mov Cur_Off_Adr,di
           ; Создать файл
           mov ah,3ch
           mov cx,0
           lea dx,FileDat
           int 21h
           je ErrFile
           mov Handle,ax
           ; Переназначить вектора для IRQ3, IRQ5, IRQ1, IRQ7
           ChangeHandler 09h
           ChangeHandler 0ch
           ChangeHandler 0dh
           ChangeHandler 0bh
           ChangeHandler 0Fh
           ; Запрограммировать прибор
           mov dx,337h
           mov al,9bh
           out dx,al
           mov dx,333h
           out dx,al
           jmp $+2

mov dx,227h
mov al,9bh
out dx,al
mov dx,223h
out dx,al
jmp $+2

mov dx,237h
mov al,9bh
out dx,al
mov dx,233h
out dx,al
jmp $+2

; Разрешить обработку по IRQ3 и IRQ5
mov dx,21h
in al,dx
xor al,00111010b ; Разрешить обработку IRQ3 и IRQ5
out dx,al

; Основной цикл
again:
; Проверить флаг ошибки буфера ( первый буфер
уже полный
; ( а второй еще не успел записаться на диск )
cmp Bufer_Err,1
je exit_err

cmp Exit_Test,1
je exit

; Проверить готовность буфера к записи на диск
cmp Next_Off_Adr,0
je again

; Запись данных на диск
mov bx,Handle
xor dx,dx
mov cx,Next_Off_Adr
mov ax,Next_Seg_Adr
mov ds,ax
mov ah,40h
int 21h
MovSeg ds,cs
jnc exit_main_loop
jmp ErrWr
exit_main_loop:mov Next_Off_Adr,0

jmp again

exit: ; Записать буфера
mov bx,Handle
xor dx,dx

mov cx,Next_Off_Adr
mov ax,Next_Seg_Adr
mov ds,ax
mov ah,40h
int 21h
MovSeg ds,cs
jnc next_buf
jmp ErrWr

next_buf: mov cx,Cur_Off_Adr
mov ax,Cur_Seg_Adr
mov ds,ax
mov ah,40h
int 21h
MovSeg ds,cs
jnc exit_err
jmp ErrWr

exit_err: ; Восстановить обработчики по IRQ3, IRQ5, IRQ1, IRQ7
RestoreHandler 0ch
RestoreHandler 0dh
RestoreHandler 09h
RestoreHandler 0bh
RestoreHandler 0Fh
; Восстановить старую маску контроллера прерыва-
ний
mov dx,21h
in al,dx

```



```

xor al,00111000b
out dx,al

; Закреть файл
mov bx,Handle
mov ah,3eh
int 21h

; Напечатать статистику работы :
; - количество случаев потери прерываний
; - неготовность буфера

mov ax,Count_Lost_Irq
cmp ax,0
je next_check
lea bx,Count_Ascii
call BIN_TO_ASCII
mov ah,9
lea dx,Int_Msg
int 21h

next_check: cmp Bufer_Err,0
je last_exit
lea dx,ErrorWrBufMsg
int 21h

last_exit: mov ax,4c00h
int 21h

; Процедура преобразования двоичного числа в код ASCII
; на входе
; в AX - преобразуемое число
; в BX - начальный адрес буфера строки

BIN_TO_ASCII proc near
push dx
push si
push ax

; Запробелить буфер
mov cx,6
fill: mov byte ptr[bx],' '
inc bx
loop fill

mov si,10
or ax,ax
jns dvd
neg ax

dvd: xor dx,dx
div si
add dx,30H
dec bx
mov [bx],dl
inc cx
or ax,ax

jnz dvd

pop ax
or ax,ax
jns &exit
dec bx
mov byte ptr[bx],' '
inc cx

&exit: pop si
pop dx
ret
BIN_TO_ASCII endp
end Start

```

Г.2. Програми обробки даних сигналів акустичної емісії

Г.2.1. Програма первинної обробки даних сигналів акустичної емісії Report.exe.

```

uses crt;
label
1,
8;
var
atten3,atten4,atten7,avamp3,avamp4,avamp7,samp3,samp4,samp7,db3,db4,db7,ctim : real;
s : string[9];
squan3,squan4,squan7,act3,act4,act7,maxact3,maxact4,maxact7,x,y,z : integer;
i : byte;
inname : string[14];
outname : string[14];
f1 : text;
f2 : text;
begin
writeln('Source file name'); readln(inname);
writeln('Attenuation SYSTEM 3'); readln(atten3);
writeln('Attenuation SYSTEM 4'); readln(atten4);
writeln('Attenuation SYSTEM 7'); readln(atten7);
{$I-}
assign(f1,inname);reset(f1);
{$I+}
if IOresult<>0 then
writeln('No file name')
else
begin
outname:= inname+'d';
assign(f2,outname);rewrite(f2);
writeln(f2,'Experiment #',inname);
readln(f1);
readln(f1);
end;
i:= 0; ctim:= 0; samp3:=0; samp4:=0; samp7:=0; squan3:=0; squan4:=0;

```

```

squan7:= 0; act3:=0; maxact3:=0; act4:=0; maxact4:=0; act7:=0; maxact7:=0;
dB3:=0; dB4:=0; dB7:=0;
1: readln(f1,x,y,z);
   case x of
3:  begin samp3:=samp3+y; squan3:=squan3+1; act3:=act3+1;
      goto 1;
      end;
4:  begin samp4:=samp4+y; squan4:=squan4+1; act4:=act4+1;
      goto 1;
      end;
7:  begin samp7:=samp7+y; squan7:=squan7+1; act7:=act7+1;
      goto 1;
      end;
5:  begin
      ctim:=ctim+1;
      if ctim = 10 then
      begin
      if maxact3<act3 then maxact3:=act3;
      if maxact4<act4 then maxact4:=act4;
      if maxact7<act7 then maxact7:=act7;
      act3:=0; act4:=0; act7:=0; ctim:=0;
      end;
      goto 1;
      end;
      else goto 8;
8:  begin
      if squan3<>0 then
      begin
      samp3:=(150+50*(samp3-1))/(exp((80-atten3)*ln(10)/20));
      avamp3:=samp3 / squan3;
      dB3:=(20*ln(avamp3/0.01)/ln(10));
      end;
      writeln(f2,'ACOUSTIC EMISSION SIGNALS PARAMETERS');
      writeln(f2,'_____');
      writeln(f2,'SYSTEM 3');
      writeln(f2,'Total quantity = ',squan3,' signals');
      writeln(f2,'Maximum activity = ',maxact3,' signals/second');
      writeln(f2,'Average amplitude = ',avamp3:7:3,' mV, ',dB3:7:3,' dB');
      writeln(f2,'Total amplitude = ',samp3:7:3,' mV');
      if squan4<>0 then
      begin
      samp4:=(150+50*(samp4-1))/(exp((80-atten4)*ln(10)/20));
      avamp4:=samp4 / squan4;
      dB4:=(20*ln(avamp4/0.01)/ln(10));
      end;
      writeln(f2,'_____');
      writeln(f2,'SYSTEM 4');
      writeln(f2,'Total quantity = ',squan4,' signals');
      writeln(f2,'Maximum activity = ',maxact4,' signals/second');
      writeln(f2,'Average amplitude = ',avamp4:7:3,' mV, ',dB4:7:3,' dB');
      writeln(f2,'Total amplitude = ',samp4:7:3,' mV');
      if squan7<>0 then
      begin
      samp7:=(150+50*(samp7-1))/(exp((80-atten7)*ln(10)/20));
      avamp7:=samp7 / squan7;
      dB7:=(20*ln(avamp7/0.01)/ln(10));
      end;
      writeln(f2,'_____');
      writeln(f2,'SYSTEM 7');
      writeln(f2,'Total quantity = ',squan7,' signals');
      writeln(f2,'Maximum activity = ',maxact7,' signals/second');
      writeln(f2,'Average amplitude = ',avamp7:7:3,' mV, ',dB7:7:3,' dB');
      writeln(f2,'Total amplitude = ',samp7:7:3,' mV');
      writeln(f2,'_____');
      close(f2);
      end;
      begin
      writeln('ACOUSTIC EMISSION SIGNALS PARAMETERS');
      writeln('_____');
      writeln('SYSTEM 3');
      writeln('Total quantity = ',squan3,' signals');
      writeln('Maximum activity = ',maxact3,' signals/second');
      writeln('Average amplitude = ',avamp3:7:3,' mV, ',dB3:7:3,' dB');
      writeln('Total amplitude = ',samp3:7:3,' mV');
      writeln('_____');
      writeln('SYSTEM 4');
      writeln('Total quantity = ',squan4,' signals');
      writeln('Maximum activity = ',maxact4,' signals/second');
      writeln('Average amplitude = ',avamp4:7:3,' mV, ',dB4:7:3,' dB');
      writeln('Total amplitude = ',samp4:7:3,' mV');
      writeln('_____');
      writeln('SYSTEM 7');

```



```

writeln('Total quantity = ',squan7,' signals');
writeln('Maximum activity = ',maxact7,' signals/second');
writeln('Average amplitude = ',avamp7:7:3,' mV, ',dB7:7:3,' dB');
writeln('Total amplitude = ',samp7:7:3,' mV');
writeln('_____');
end;
close(f1);
end;
end;
end;

```

Г.2.2. Програма лінійної локації Graph.mcd.

Обзор ASCII файлов с расширением .txt
 Данные акустической эмиссии Данные нагружения

 
 D:\...\Sad.txt D:\...\Sad.txt

Введите коэффициент ослабления D D = 12 дБ
 Расстояние между датчиками L = 120 мм

$i := 0, 1.. \text{rows}(A) - 1$

Частота генератора тактовых импульсов GTI = 10
 Шаг определения активности Step = 100
 Максимальная нагрузка разрушения P, H P = 22400
 Система регистрации IRQ = 3

Скорость распространения АЭ сигнала установленная в АФ-15 Vae = 2,5 мм/мкс
 Скорость распространения АЭ сигнала в данном материале V = 2 мм/мкс

Определение времени испытания

```

Takt := t-0
      for i ∈ 0, 1.. rows(A) - 1
        t- t + 1 if Ai,0 = 5
      t

```

Время испытания

$$T := \frac{\text{Takt}}{\text{GTI}} \quad T = 106$$

(с)

Построение зависимости амплитуды сигналов АЭ от времени испытания

```

Time := t-0
      cntr-0
      for i ∈ 0.. rows(A) - 1
        if Ai,0 = 5
          t- t + 1
          if cntr > 0
            inter- t - 1
            stp- 1
            cntr
            pls- i - cntr
            for i ∈ pls.. pls + cntr
              inter- inter + stp
              B0,i- inter
              GTI
              B1,i- inter
              GTI
            cntr- 0
            B0,i- t
            GTI
            B1,i- t
            GTI
          cntr- cntr + 1 otherwise
        B

```

```

Amplitude := for i ∈ 0.. rows(A) - 1
              if Ai,0 = 5
                B0,i- 0
                B1,i- 0
              if Ai,0 = IRQ
                B0,i- 0
                B1,i- [ 150 + 50 * (Ai,1 - 1) ]
                    [ (80 - D) ]
                    [ 10 20 ]

```

Масштабирование графика нагрузки

$$\begin{aligned}
 Y &:= \max(\text{Amplitude}) \\
 Y &= 1.991 \\
 V_Load &:= B^{<1>} \\
 T_Load &:= B^{<0>} \\
 X_Scld &:= \frac{\max(T_Load) \cdot GTI}{T} & Y_Scld &:= \frac{\max(V_Load)}{Y} \\
 \text{Time_load} &:= \frac{T_Load}{X_Scld} & \text{Load} &:= \frac{V_Load}{Y_Scld}
 \end{aligned}$$

Построение зависимости активности сигналов АЭ от времени испытания

```

Time_activity := takt--0
                j--0
                B_j--0
                for i ∈ 0..rows(A) - 1
                    if A_{i,0} = 5
                        takt-- takt + 1
                        if takt = Step * GTI
                            j--j + 1
                            B_j--j * Step
                            takt--0
                        if takt ≠ 0 if i = rows(A) - 1
                            j--j + 1
                            B_j--T
                B

Activity := cntr--0
           takt--0
           j--0
           B_j--0
           for i ∈ 0..rows(A) - 1
               if A_{i,0} = 5
                   takt-- takt + 1
                   if takt = Step * GTI
                       j--j + 1
                       B_j-- cntr / Step
                       takt--0
                       cntr--0
                   if takt ≠ 0 if i = rows(A) - 1 otherwise
                       j--j + 1
                       B_j-- cntr * GTI / takt
                   cntr-- cntr + 1 if A_{i,0} = IRQ
           B
    
```

Масштабирование графика нагрузки для графика активности

$$\begin{aligned}
 X_Scld1 &:= \frac{\max(T_Load)}{T} & Y_Scld1 &:= \frac{\max(V_Load)}{\max(\text{Activity})} \\
 \text{Time_load1} &:= \frac{T_Load}{X_Scld1} & \text{Load1} &:= \frac{V_Load}{Y_Scld1}
 \end{aligned}$$

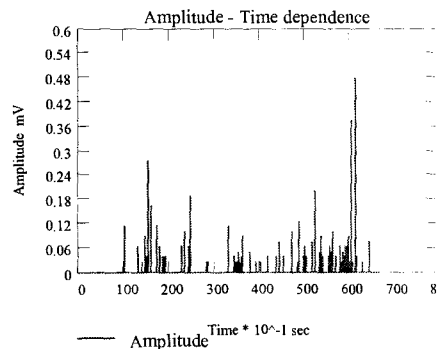
Построение зависимости суммарного счета сигналов АЭ от времени испытания

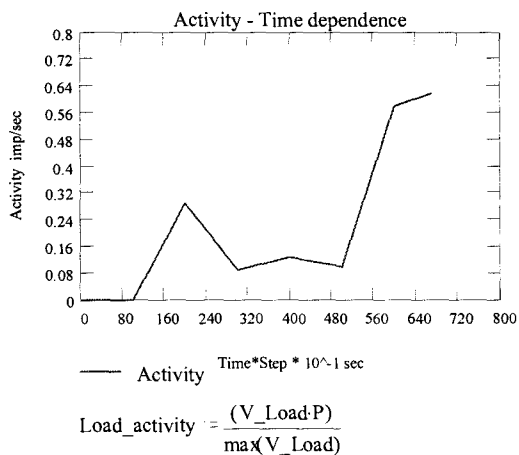
```

Sumquantity := cntr--0
              t--0
              j--0
              B_j--0
              for i ∈ 0..rows(A) - 1
                  if A_{i,0} = 5
                      t--t + 1
                      if t = Step
                          j--j + 1
                          B_j--cntr
                          t--0
                      B_j--cntr if i = rows(A) - 1 otherwise
                  cntr--cntr + 1 if A_{i,0} = IRQ
              B
    
```

Масштабирование графика нагрузки для графика суммарного счета

$$\begin{aligned}
 Y_Scld2 &:= \frac{\max(V_Load)}{\max(\text{Sumquantity})} \\
 \text{Load2} &:= \frac{V_Load}{Y_Scld2}
 \end{aligned}$$





Суммарный счет

```

N := t ← 0
    for i ∈ 0, 1.. rows(A) - 1
        t ← t + 1 if Ai,0 = IRQ
    t

```

N = 632 imp

```

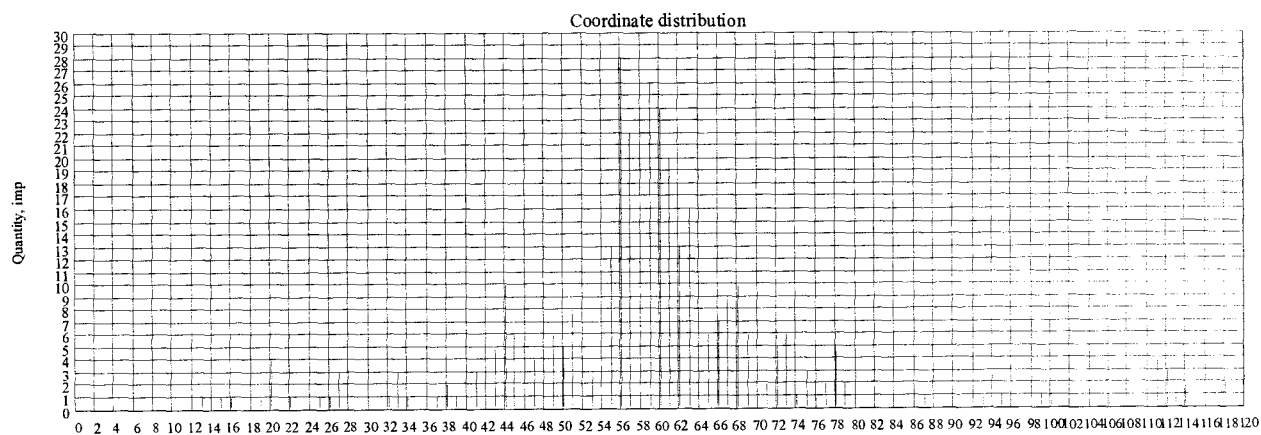
Distribution := for b ∈ 0.. 1
    for k ∈ 0.. 99
        Ck,b ← 0
    for i ∈ 0, 1.. rows(A) - 1
        if Ai,0 = IRQ
            t ← Ai,1
            Ct,1 ← Ct,1 + 1
            Ct,0 ←  $\left[ \frac{150 + 50 \cdot (A_{i,1} - 1)}{(80 - D) \cdot 10^{20}} \right]$ 
        C

```

```

Histogram := for b ∈ 0.. 1
    for k ∈ 0.. L
        Ck,b ← 0
    for i ∈ 0, 1.. rows(A) - 1
        if  $0 \leq \text{floor} \left[ \frac{L + 2 \cdot A_{i,2} \cdot V}{2 \cdot \text{Vae}} \right] \leq L$  if Ai,0 = IRQ
            t ←  $\text{floor} \left[ \frac{L - 2 \cdot A_{i,2} \cdot V}{2 \cdot \text{Vae}} \right]$ 
            Ct,1 ← Ct,1 + 1
            Ct,0 ← t
        C

```



Г.2.3. Програма площинної локації 2Dgraph.mcd.

Програма 2Dgraph.mcd також здійснює локацію в акустопрозорому середовищі.


D:\..\Sad.txt

Введите коэффициенты ослабления D_x и $D_y D_z$

$D_x = 10, D_y = 10,$

Прибор с датчиками вдоль оси X

Прибор с датчиками вдоль оси Y

$Dtractx := 80 - D_x$

$Dtracty := 80 - D_y$

$Dtractx = 70$

$Dtracty = 70$

$K_x := 10^{20} \quad K_x = 3.162 \cdot 10^3$

$K_y := 10^{20} \quad K_y = 3.162 \cdot 10^3$

Введите расстояние между датчиками по осям x и y

$X = 110 Y = 105$

Скорость распространения АЭ сигнала установленная в АФ-15 "3" $C_{ae_3} = 2.632$ мм/мкс

Скорость распространения АЭ сигнала установленная в АФ-15 "4" $C_{ae_4} = 2.43$ мм/мкс

Скорость распространения АЭ сигнала в данном материале $C = 2.5$ мм/мкс

Расстояние от датчиков до исследуемой детали $L = 30$ мм

Расстояние от центра координат до места установки датчиков по осям x и y

$$x = 0.. X Xant := \left(\frac{X}{2} \right)$$

$$y = 0.. Y Yant := \left(\frac{Y}{2} \right)$$

Количество столбцов в массиве $cols(A) = 3$ Количество строк в массиве $rows(A) = 683$

Ряд значений переменной i определяющей номер строки массива A

$i = 0, 1.. rows(A) - 1$

$max(A) = 984$

```
T := | t ← 0
      | for i ∈ 0, 1.. rows(A) - 1
      |   t ← t + 1 if Ai,0 = 5
      | t
```

Время испытания T (10^{-1} с).

T = 649

Временной шаг плоскостной локации

$i = 0, 1.. rows(A) - 1$

$max(A) = 879$

```
T := | t ← 0
      | for i ∈ 0, 1.. rows(A) - 1
      |   t ← t + 1 if Ai,0 = 5
      | t
```

Время испытания T (10^1 с).

T = 163

Временной шаг плоскостной локации

Step = T - 1

Start = FRAME * Step

Finish := Start + Step

```
Finish := Start + Step
Start_i := | i ← 0
            | t ← 0
            | while t < Start
            |   | t ← t + 1 if Ai,0 = 5
            |   | i ← i + 1
            | i
```

```
Finish_i := | i ← 0
            | t ← 0
            | while t < Finish
            |   | i ← i + 1
            |   | if Ai,0 = 5
            |   |   | t ← t + 1
            |   |   | break if t = T
            | i
```

Start_i = 0

Finish_i = 397

Построение массива плоскостной локации "

Zone := for $x \in 0..X$ for $y \in 0..Y$ $B_{x,y} := 0$ for $i \in \text{Start}_i.. \text{Finish}_i$ if $A_{i,0} = 3$ $x_{ae} := A_{i,2}$ $\text{amp}_0 := \left(\frac{A_{i,1}}{Kx} \right) \cdot 100$ $i := i + 1$ if $A_{i,0} = 4$ $y_{ae} := A_{i,2}$ $\text{amp}_1 := \left(\frac{A_{i,1}}{Ky} \right) \cdot 100$ $\Delta x := \frac{(-X + 2 \cdot x_{ae}) \cdot C}{Cae_3}$ $\Delta y := \frac{(-Y + 2 \cdot y_{ae}) \cdot C}{Cae_4}$

$$x0 := \sqrt{\frac{\left[\left[1 - \left(\frac{2 \cdot Y_{ant}}{\Delta y} \right)^2 \right] \cdot \left[\left(\frac{\Delta x}{2} \right)^2 - (X_{ant})^2 - l^2 \right] - \left[\left(\frac{\Delta y}{2} \right)^2 - (Y_{ant})^2 - l^2 \right] \right]}{\left[1 - \left(\frac{2 \cdot X_{ant}}{\Delta x} \right)^2 \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot Y_{ant}}{\Delta y} \right)^2 \right] - 1}}$$

$$y0 := \sqrt{\frac{\left[\left[1 - \left(\frac{2 \cdot X_{ant}}{\Delta x} \right)^2 \right] \cdot \left[\left(\frac{\Delta y}{2} \right)^2 - (Y_{ant})^2 - l^2 \right] - \left[\left(\frac{\Delta x}{2} \right)^2 - (X_{ant})^2 - l^2 \right] \right]}{\left[1 - \left(\frac{2 \cdot X_{ant}}{\Delta x} \right)^2 \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot Y_{ant}}{\Delta y} \right)^2 \right] - 1}}$$

 $x := \text{floor} \left(x0 + \frac{X}{2} \right)$ $y := \text{floor} \left(y0 + \frac{Y}{2} \right)$ $B_{x,y} := \max(\text{amp})$ if $y \leq Y$ if $x \leq X$ $i := i - 1$ otherwiseif $A_{i,0} = 4$ $y_{ae} := A_{i,2}$ $\text{amp}_0 := \left(\frac{A_{i,1}}{Ky} \right) \cdot 100$ $i := i + 1$ if $A_{i,0} = 3$ $x_{ae} := A_{i,2}$ $\text{amp}_1 := \left(\frac{A_{i,1}}{Kx} \right) \cdot 100$ $\Delta x := \frac{(-X + 2 \cdot x_{ae}) \cdot C}{Cae_3}$ $\Delta y := \frac{(-Y + 2 \cdot y_{ae}) \cdot C}{Cae_4}$

$$x0 := \sqrt{\frac{\left[\left[1 - \left(\frac{2 \cdot Y_{ant}}{\Delta y} \right)^2 \right] \cdot \left[\left(\frac{\Delta x}{2} \right)^2 - (X_{ant})^2 - l^2 \right] - \left[\left(\frac{\Delta y}{2} \right)^2 - (Y_{ant})^2 - l^2 \right] \right]}{\left[1 - \left(\frac{2 \cdot X_{ant}}{\Delta x} \right)^2 \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot Y_{ant}}{\Delta y} \right)^2 \right] - 1}}$$

$$y0 := \sqrt{\frac{\left[\left[1 - \left(\frac{2 \cdot X_{ant}}{\Delta x} \right)^2 \right] \cdot \left[\left(\frac{\Delta y}{2} \right)^2 - (Y_{ant})^2 - l^2 \right] - \left[\left(\frac{\Delta x}{2} \right)^2 - (X_{ant})^2 - l^2 \right] \right]}{\left[1 - \left(\frac{2 \cdot X_{ant}}{\Delta x} \right)^2 \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot Y_{ant}}{\Delta y} \right)^2 \right] - 1}}$$

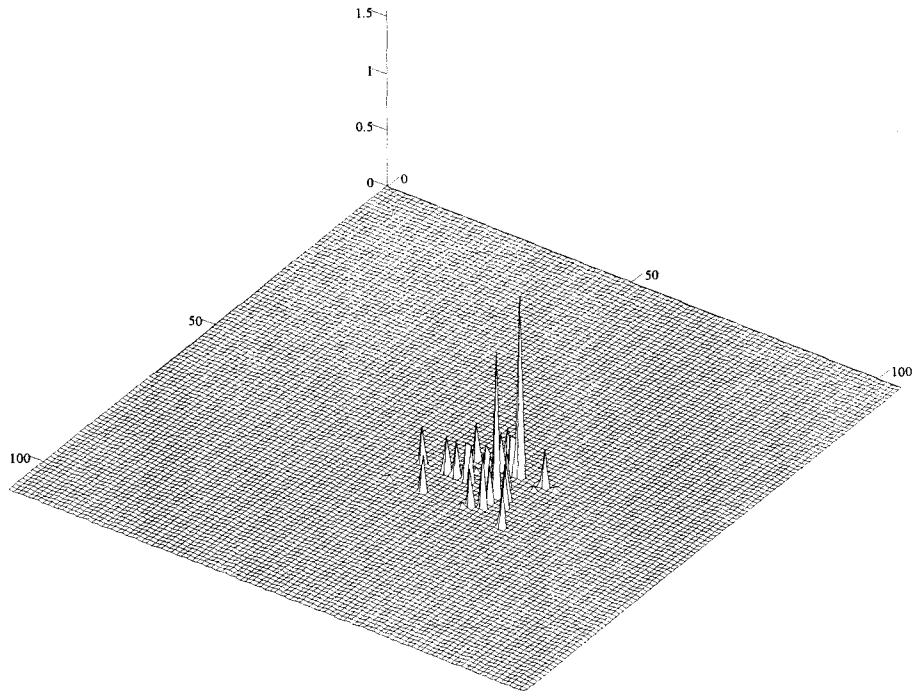
 $x := \text{floor} \left(x0 + \frac{X}{2} \right)$ $y := \text{floor} \left(y0 + \frac{Y}{2} \right)$ $B_{x,y} := \max(\text{amp})$ if $x \leq X$ if $y \leq Y$ $i := i - 1$ otherwise

B

Информация для просмотра массива "Zone" в режиме анимации

For frame

from 0 to := floor $\left(\frac{T}{\text{Step}} \right) - 1$
to := 185



Количество сигналов АЭ

```

N := n - 0
-----
      for x ∈ 0.. X
        for y ∈ 0.. Y
          n ← n + 1 if Zonex,y > 0
      n
  
```

N = 35

```

Points := j - 0
-----
      for x ∈ 0.. X
        for y ∈ 0.. Y
          if Zonex,y > 0
            Aj,0 ← x
            Aj,1 ← y
            j ← j + 1
      A
  
```

Определение места нахождения опасных дефектов с вероятностью

$P = 0.003$

Начальный доверительный интервал

$\text{box} = 10$

for_box₁ := Y for_box₀ := X

Определение доверительных интервалов с вероятностью

$$P = 3 \cdot 10^{-3}$$

```

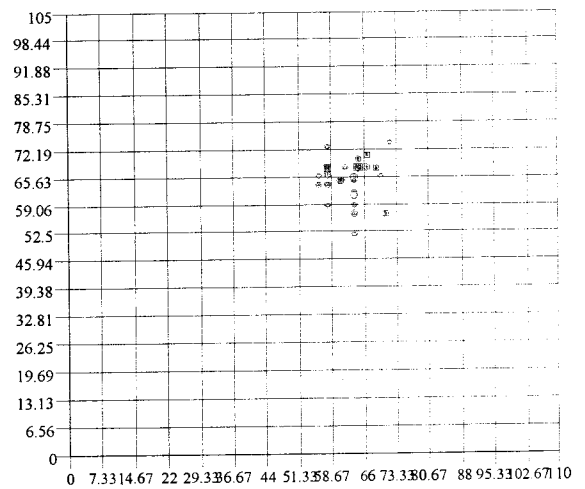
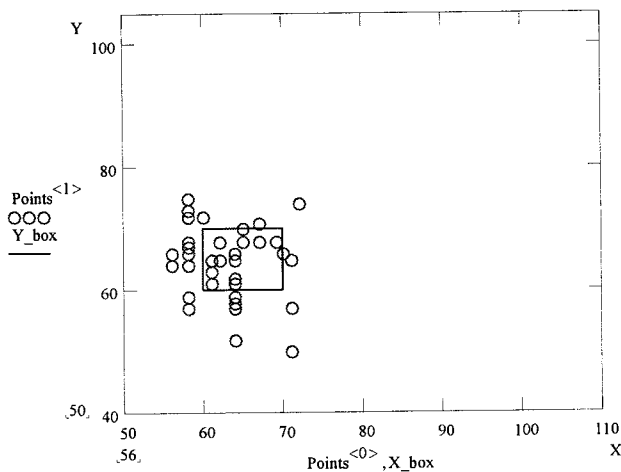
X_box := P0 - 0
n ← 0
t ← 0
box ← box
while box < min(for_box)
  y ← 0
  while y ≤ Y - box
    x ← 0
    while x ≤ X - box
      n ← 0
      for j ∈ y..y + box
        for i ∈ x..x + box
          n ← n + 1 if Zonei,j > 0
      p ←  $\frac{n \cdot \text{box}^2}{N \cdot X \cdot Y}$ 
      if p ≥ P
        P0 ← p
        x_box0,t ← x
        x_box1,t ← x
        x_box2,t ← x + box
        x_box3,t ← x + box
        x_box4,t ← x
        t ← t + 1
        x ← x + box
      y ← y + box
    break if P0 ≥ P
  box ← box + 1
x_box

```

```

Y_box := P0 - 0
n ← 0
t ← 0
box ← box
while box < min(for_box)
  y ← 0
  while y ≤ Y - box
    x ← 0
    while x ≤ X - box
      n ← 0
      for j ∈ y..y + box
        for i ∈ x..x + box
          n ← n + 1 if Zonei,j > 0
      p ←  $\frac{n \cdot \text{box}^2}{N \cdot X \cdot Y}$ 
      if p ≥ P
        P0 ← p
        y_box0,t ← y
        y_box1,t ← y + box
        y_box2,t ← y + box
        y_box3,t ← y
        y_box4,t ← y
        t ← t + 1
        y ← y + box
      break if P0 ≥ P
    box ← box + 1
y_box

```



Г.2.4. Програма просторової локації 3Dgraph.mcd.

Обзор ASCII файлов с расширением .txt



D:\..\Sad.txt

Введите коэффициенты ослабления D1 и D2

Введите коэффициенты ослабления D_x и D_y D_z $D_x = 10$, $D_y = 10$, $D_z = 10$

Прибор с датчиками вдоль оси X Прибор с датчиками вдоль оси Y Прибор с датчиками вдоль оси Z

 $D_{tractx} := 80 - D_x$ $D_{tracty} := 80 - D_y$ $D_{tractz} := 80 - D_z$ $D_{tractx} = 70$ $D_{tracty} = 70$ $D_{tractz} = 70$ $\frac{D_{tractx}}$ $\frac{D_{tracty}}$ $\frac{D_{tractz}}$ $K_x := 10^{20} \quad K_x = 3.162 \cdot 10^3$ $K_y := 10^{20} \quad K_y = 3.162 \cdot 10^3$ $K_z := 10^{20} \quad K_z = 3.162 \cdot 10^3$ Скорость распространения АЭ сигнала установленная в АФ-15 "3" $C_{ae_3} = 2.632$ мм/мксСкорость распространения АЭ сигнала установленная в АФ-15 "4" $C_{ae_4} = 2.43$ мм/мксСкорость распространения АЭ сигнала установленная в АФ-15 "7" $C_{ae_4} = 2.43$ мм/мксСкорость распространения АЭ сигнала в данном материале $C = 2.5$ мм/мкс

```

T := t - 0
    for i ∈ 0, 1.. rows(A) - 1
        t ← t + 1 if  $A_{i,0} = 5$ 
    t

```

Start := FRAME.Step

Finish := Start + Step

Start = 0

Finish = 14

```

Start_i := i - 0
t := 0
while t < Start
    t ← t + 1 if  $A_{i,0} = 5$ 
    i ← i + 1
i

```

```

Finish_i := i - 0
t := 0
while t < Finish
    i ← i + 1
    if  $A_{i,0} = 5$ 
        t ← t + 1
        break if t = T
i

```

Построение массива пространственной локаци

```

Data := for c ∈ 0..2
  cnt_c ← 0
  cnt_r ← 0
  r ← -1
  for i ∈ Start_i..Finish_i
    if A_{i,0} ≠ 5
      if A_{i,0} = 3
        xae ← A_{i,2}
        amp_1 ← (A_{i,1} / K_x) · 100
        Δx ← (-X + 2 · xae) · C / Cae_3
        Δx ← 0.001 if Δx = 0
        cnt_0 ← cnt_0 + 1
        cnt_r ← cnt_r + 1
      if A_{i,0} = 4
        yae ← A_{i,2}
        amp_1 ← (A_{i,1} / K_y) · 100
        Δy ← (-Y + 2 · yae) · C / Cae_4
        Δy ← 0.001 if Δy = 0
        cnt_1 ← cnt_1 + 1
        cnt_r ← cnt_r + 1
      if A_{i,0} = 7
        zae ← A_{i,2}
        amp_1 ← (A_{i,1} / K_z) · 100
        Δz ← (-Z + 2 · zae) · C / Cae_7
        Δz ← 0.001 if Δz = 0
        cnt_2 ← cnt_2 + 1
        cnt_r ← cnt_r + 1
      if cnt_r = 3
        min(cnt) ≠ 0
        r ← r + 1
        B_{0,r} ← Δx
        B_{1,r} ← Δy
        B_{2,r} ← Δz
        B_{3,r} ← max(amp)
        for c ∈ 0..2
          cnt_c ← 0
        cnt_r ← 0
      if A_{i,0} = 5
        for c ∈ 0..2
          cnt_c ← 0
          cnt_r ← 0
  B
  
```

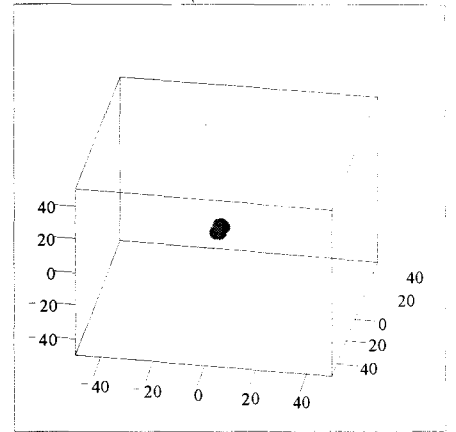
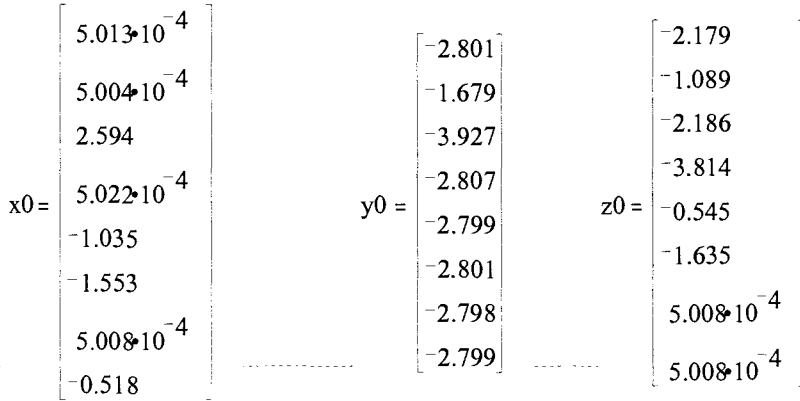
$$i := 0..cols(Data) - 1$$

$$\Delta x_i := Data_{0,i} \quad \Delta y_i := Data_{1,i} \quad \Delta z_i := Data_{2,i}$$

$$\begin{aligned}
 x_0 &:= \frac{\frac{(\Delta x_i)^2 - 4 \cdot X_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2}{4} + \frac{(\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2}{4} + \frac{(\Delta x_i)^2 - 4 \cdot X_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2}{4}}{(\Delta x_i)^2} \\
 &\quad \frac{(\Delta x_i)^2 - 4 \cdot X_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2}{(\Delta x_i)^2} + 2 \cdot \frac{(\Delta x_i)^2 - 4 \cdot X_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2}{(\Delta x_i)^2} \\
 y_0 &:= \frac{\frac{(\Delta x_i)^2 - 4 \cdot X_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2}{4} + \frac{(\Delta x_i)^2 - 4 \cdot X_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2}{4} + \frac{(\Delta x_i)^2 - 4 \cdot X_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2}{4}}{(\Delta x_i)^2} \\
 &\quad \frac{(\Delta x_i)^2 - 4 \cdot X_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2}{(\Delta x_i)^2} + 2 \cdot \frac{(\Delta x_i)^2 - 4 \cdot X_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2}{(\Delta x_i)^2} \\
 z_0 &:= \frac{\frac{(\Delta x_i)^2 - 4 \cdot X_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2}{4} + \frac{(\Delta x_i)^2 - 4 \cdot X_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2}{4} + \frac{(\Delta x_i)^2 - 4 \cdot X_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2}{4}}{(\Delta x_i)^2} \\
 &\quad \frac{(\Delta x_i)^2 - 4 \cdot X_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2}{(\Delta x_i)^2} + 2 \cdot \frac{(\Delta x_i)^2 - 4 \cdot X_{ani}^2 (\Delta y_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Y_{ani}^2 (\Delta x_i)^2 - 4 \cdot Z_{ani}^2 (\Delta y_i)^2}{(\Delta x_i)^2}
 \end{aligned}$$

```

x0 := | for i ∈ 0.. cols(Data) - 1
      | p_i ← x0_i
      | p_i ← -p_i if Δx_i < 0
      | p
y0 := | for i ∈ 0.. cols(Data) - 1
      | p_i ← y0_i
      | p_i ← -p_i if Δy_i < 0
      | p
z0 := | for i ∈ 0.. cols(Data) - 1
      | p_i ← z0_i
      | p_i ← -p_i if Δz_i < 0
      | p
    
```



Г.2.5. Програма просторової локації на сферичних об'єктах 3Dgraph_sphere.mcd.

Обзор ASCII файлов с расширением .txt



Введите коэффициенты ослабления D_x и D_y, D_z $D_x = 10, D_y = 10, D_z = 10$
 Прибор с датчиками вдоль оси X Прибор с датчиками вдоль оси Y Прибор с датчиками вдоль оси Z
 $D_{tractx} := 80 - D_x$ $D_{tracty} := 80 - D_y$ $D_{tractz} := 80 - D_z$
 $D_{tractx} = 70$ $D_{tracty} = 70$ $D_{tractz} = 70$

$\frac{D_{tractx}}$	$\frac{D_{tracty}}$	$\frac{D_{tractz}}$
$K_x := 10^{20} K_x = 3.162 \cdot 10^3$	$K_y := 10^{20} K_y = 3.162 \cdot 10^3$	$K_z := 10^{20} K_z = 3.162 \cdot 10^3$

 Введите расстояние между датчиками по осям x, y, z $X = 200, Y = 200, Z = 200$

$$R := \frac{X}{\pi} \quad R = 63.662$$

Радиус сферы $Cae_3 = 2.632 \text{ мм/мкс}$
 Скорость распространения АЭ сигнала установленная в АФ-15 "3" $Cae_4 = 2.43 \text{ мм/мкс}$
 Скорость распространения АЭ сигнала установленная в АФ-15 "4" $Cae_7 = 2.5 \text{ мм/мкс}$
 Скорость распространения АЭ сигнала установленная в АФ-15 "7" $C = 3 \text{ мм/мкс}$
 Скорость распространения АЭ сигнала в данном материале
 Расстояние от центра координат до места установки датчиков по осям x, y и z

```

x = 0.. X      y = 0.. Y      z = 0.. Z
Xant := (X/2)  Yant := (Y/2)  Zant := (Z/2)
T := t - 0
      for i ∈ 0, 1.. rows(A) - 1
      t ← t + 1 if A_{i,0} = 5
      t
    
```

Временной шаг пространственной локации

Step := T - 1

Start := FRAME · Step

Finish := Start + Step

Start =

Finish =

Start = 0

Finish = 196

Start_i :=

i ← 0

t ← 0

while t < Start

t ← t + 1 if $A_{i,0} = 5$

i ← i + 1

i

Finish_i :=

i ← 0

t ← 0

while t < Finish

i ← i + 1

if $A_{i,0} = 5$

t ← t + 1

break if t = T

i

Start_i = 0

Finish_i = 614

Построение массива пространственной локации "Zone"

```

Data := for c ∈ 0..2
  cnt_c ← 0
  cntr ← 0
  r ← -1
  for i ∈ Start_i..Finish_i
    if  $A_{i,0} = 3$ 
      xae ←  $A_{i,2}$ 
      amp_1 ←  $\left(\frac{A_{i,1}}{Kx}\right) \cdot 100$ 
       $\Delta x = \frac{(-X + 2 \cdot xae) \cdot C}{Cae_3}$ 
      cnt_0 ← cnt_0 + 1
      cntr ← cntr + 1
    if  $A_{i,0} = 4$ 
      yae ←  $A_{i,2}$ 
      amp_1 ←  $\left(\frac{A_{i,1}}{Ky}\right) \cdot 100$ 
       $\Delta y = \frac{(-Y + 2 \cdot yae) \cdot C}{Cae_4}$ 
      cnt_1 ← cnt_1 + 1
      cntr ← cntr + 1
    if  $A_{i,0} = 7$ 
      zae ←  $A_{i,2}$ 
      amp_1 ←  $\left(\frac{A_{i,1}}{Kz}\right) \cdot 100$ 
       $\Delta z = \frac{(-Z + 2 \cdot zae) \cdot C}{Cae_7}$ 
      cnt_2 ← cnt_2 + 1
      cntr ← cntr + 1
    if cnt_r = 3
      min(cnt) ≠ 0
      r ← r + 1
      B_{0,x} ← Δx
      B_{1,x} ← Δy
      B_{2,x} ← Δz
      B_{3,x} ← max(amp)
      for c ∈ 0..2
        cnt_c ← 0
      cntr ← 0
    if  $A_{i,0} = 5$ 
      for c ∈ 0..2
        cnt_c ← 0
      cntr ← 0

```

B

$$x0_i := R \cdot \sin\left(\frac{\Delta x_i}{2 \cdot R}\right)$$

$$y0_i := R \cdot \sin\left(\frac{\Delta y_i}{2 \cdot R}\right)$$

$$z0_i := R \cdot \sin\left(\frac{\Delta z_i}{2 \cdot R}\right)$$

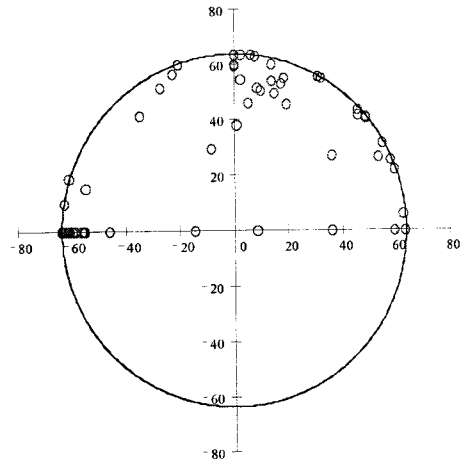
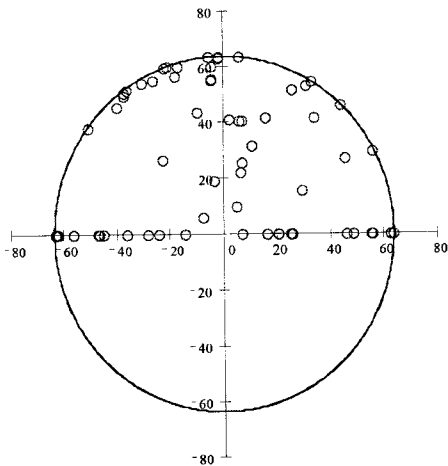
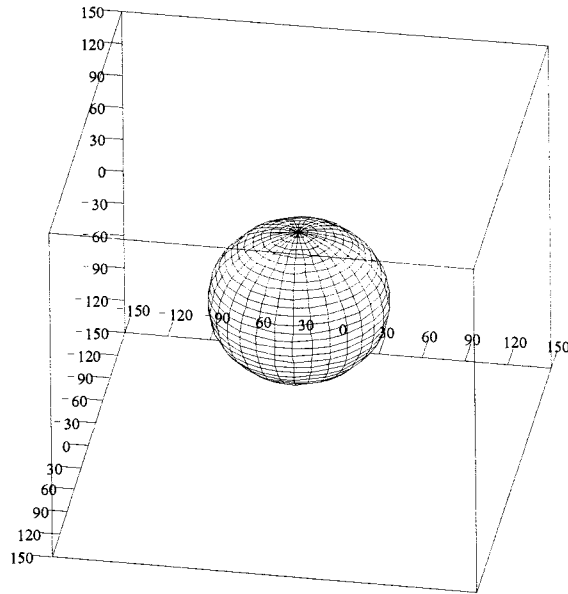
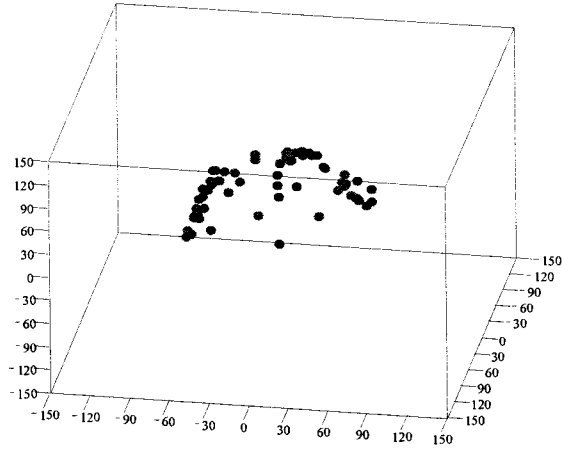
$$u := 0..N$$

$$\phi_u := u \cdot \frac{\pi}{N}$$

$$y := 0..N$$

$$\theta_y := y \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{N}$$

$$X_{u,y} := R \cdot \sin(\phi_u) \cdot \cos(\theta_y) \quad Y_{u,y} := R \cdot \sin(\phi_u) \cdot \sin(\theta_y) \quad Z_{u,y} := R \cdot \cos(\phi_u)$$



Статистична обробка матеріалів експериментів

Д.1. Статистична обробка результатів випробувань паяних з'єднань на відрив

За матеріалами випробувань на відрив отримано три групи значень руйнуючих навантажень, позначимо їх як $P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1n}$ для групи бездефектних ПЗ, $P_{21}, P_{22}, \dots, P_{2n}$ для групи ПЗ з дефектом «холодна пайка» і $P_{31}, P_{32}, \dots, P_{3n}$ для групи ПЗ з дефектом «неспай». Визначимо середні значення руйнуючих навантажень, отриманих в трьох серіях експериментів за формулою:

$$\bar{P}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{ji}, \quad (\text{Д.1})$$

де j - номер серії експериментів ($j = 1$ для групи бездефектних ПЗ, $j = 2$ для групи ПЗ з дефектом «холодна пайка»); i - номер випробування; n - кількість випробувань.

Для групи бездефектних ПЗ $\bar{P}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{1i} = \frac{1}{20} \cdot 2324 = 116,2H$, для групи ПЗ з дефектом «холодна пайка» $\bar{P}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{2i} = \frac{1}{20} \cdot 891 = 44,5H$, для групи ПЗ з дефектом «неспай» $\bar{P}_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{3i} = \frac{1}{20} \cdot 1518 = 75,9H$.

Отримані середні значення руйнуючих навантажень служать оцінками для істинних значень руйнуючих навантажень P_1, P_2 і P_3 трьох серій експериментів та оцінкою реального розкиду міцності ПЗ. Так як випробування проводились у однакових умовах, ми припускаємо, що точність вимірів у всіх серіях однакова, крім того передбачається, що похибки вимірів підпорядковуються нормальним законам з параметрами $(0; \sigma)$. Тоді для оцінки дисперсії у всіх серіях вимірів ми можемо використовувати емпіричні дисперсії:

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_{ji} - \bar{P}_j)^2. \quad (\text{Д.2})$$

Для групи бездефектних ПЗ $S_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_{1i} - \bar{P}_1)^2 = \frac{576,8}{20-1} = 30,36 \text{ Н}^2$, для групи ПЗ з дефектом «неспай» $S_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_{2i} - \bar{P}_2)^2 = \frac{9845}{20-1} = 518,16 \text{ Н}^2$, і для групи ПЗ з дефектом «неспай» $S_3^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_{3i} - \bar{P}_3)^2 = \frac{9845}{20-1} = 518,16 \text{ Н}^2$.

«холодна пайка» $S_3^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_{3i} - \bar{P}_3)^2 = \frac{18641,8}{20-1} = 981,15 \text{ Н}^2$, або ще краще,

$$S = \sqrt{\frac{S_1^2(n-1) + S_2^2(n-1) + S_3^2(n-1)}{n+n+n-3}} = \sqrt{\frac{30,36 \cdot (20-1) + 981,15 \cdot (20-1) + 518,16 \cdot (20-1)}{(20+20+20-3)}} = 22,58 \text{ Н},$$

$$S_{1-2} = \sqrt{\frac{S_1^2(n-1) + S_2^2(n-1)}{n+n-2}} = \sqrt{\frac{30,36 \cdot (20-1) + 981,15 \cdot (20-1)}{(20+20-2)}} = 22,49 \text{ Н},$$

$$S_{1-3} = \sqrt{\frac{S_1^2(n-1) + S_3^2(n-1)}{n+n-2}} = \sqrt{\frac{30,36 \cdot (20-1) + 518,16 \cdot (20-1)}{(20+20-2)}} = 16,56 \text{ Н}.$$

Далі ставиться питання про те, чи можна вважати, що істинні значення величин P_1' , P_2' і P_1' , P_3' різняться, як і їх емпіричні середні, т.б. дефекти ПЗ дійсно призводять до зміни (зниження) границі міцності ПЗ, або ж навпаки, ці значення не відрізняються. Для рішення цього питання висувається нуль гіпотеза про рівність істинних значень. При цій гіпотезі середні \bar{P}_1 , \bar{P}_2 і \bar{P}_3 мають нормальний розподіл з параметрами відповідно $\left(P_1'; \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)$, $\left(P_2'; \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)$ і $\left(P_3'; \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)$, тут σ - середньоквадратична похибка ви-

значення руйнуючих зусиль в обох серіях вимірів. Розглянемо середні \bar{P}_1 і \bar{P}_2 . Так як середні незалежні, то і їх різниця також має нормальний розподіл з параметрами $P_1' - P_2' = 0$ і $\sigma \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{n}}$.

При цьому нормована різниця з найпростішим нормальним розподілом, дорівнює $\frac{\bar{P}_1 - \bar{P}_2}{\sigma \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{n}}}$, але оскільки невідоме точне значення σ , скористаємося неза-

лежною від цієї нормованої різниці величиною $\frac{S^2(n+n-2)}{\sigma^2} = \frac{S_1^2(n-1)}{\sigma^2} + \frac{S_2^2(n-1)}{\sigma^2}$, що має X -розподіл з $k=n+n-2$ степенями вільності і визначимо нормовану різницю як відношення

$$t = \frac{|\bar{P}_1 - \bar{P}_2|}{\sigma \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{n}}} \div \frac{S}{\sigma} = \frac{|\bar{P}_1 - \bar{P}_2|}{S \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{n}}}, \quad (\text{Д.3})$$

яке має розподіл Ст'юдента з кількістю степеней вільності $k=n+n-2$.

$$t = \frac{|116,2 - 44,5|}{22,49 \sqrt{\frac{1}{20} + \frac{1}{20}}} = 10,1.$$

Критичне значення $t_{кр}$ критерію Ст'юдента було знайдено з таблиць [97, 98] з

заданою імовірністю довіри $P=0,95$ і кількістю степеней вільності $k=20+20-2=38$.

Перевіркою на “нуль-гіпотезу” отримано: $t=10,1 > t_{кр}=2,028$.

Розглянемо середні \bar{P}_1 і \bar{P}_3 . Аналогічно,

$$t = \frac{|116,2 - 75,9|}{15,56 \sqrt{\frac{1}{20} + \frac{1}{20}}} = 8,2.$$

Критичне значення $t_{кр}$ критерію Ст'юдента було знайдено з таблиць [97, 98] з заданою імовірністю довіри $P=0,95$ і кількістю степеней вільності $k=20+20-2=38$.

Перевіркою на “нуль-гіпотезу” отримано: $t_p=8,2 > t_{кр}=2,028$. Це показує, що зниження значення руйнуючих навантажень ПЗ з дефектом “холодна пайка” є не випадковим і з імовірністю довіри 95% знижує міцність ПЗ в середньому на $\Delta\bar{P} = \frac{\bar{P}_2 - \bar{P}_1}{\bar{P}_1} \cdot 100\% = \frac{116,2 - 44,5}{116,2} \cdot 100\% \approx 62\%$, зниження значення руйнуючих навантажень

ПЗ з дефектом “неспай” є також не випадковим і з імовірністю довіри 95% знижує міцність ПЗ в середньому на $\Delta\bar{P} = \frac{\bar{P}_2 - \bar{P}_1}{\bar{P}_1} \cdot 100\% = \frac{116,2 - 75,9}{116,2} \cdot 100\% \approx 35\%$.

Д.2. Статистична обробка результатів випробувань важелів S 48.167230

За матеріалами випробувань ми маємо дві групи значень руйнуючих навантажень (додаток 3.1), позначимо їх як $P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1n}$ для групи бездефектних важелів і $P_{21}, P_{22}, \dots, P_{2n}$ для групи дефектних. Визначимо середні значення руйнуючих навантажень, отриманих в двох серіях експериментів за формулою

$$\bar{P}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{ji}, \quad (\text{Д.4})$$

де j - номер серії експериментів ($j = 1$ для групи бездефектних ПЗ, $j = 2$ для групи важелів з дефектом); i - номер випробування; n - кількість випробувань.

Для групи бездефектних важелів $\bar{P}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{1i} = \frac{487614,4}{14} = 34829,6H$, для групи

важелів з дефектом $\bar{P}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{2i} = \frac{182299,8}{6} = 30383,3H$.

Так як випробування проводились у однакових умовах, ми припускаємо, що точність вимірів у всіх серіях однакова, крім того передбачається, що похибки вимірів

підпорядковуються нормальним законам з параметрами $(0; \sigma)$. Тоді для оцінки дисперсії у всіх серіях вимірів ми можемо використовувати емпіричні дисперсії, визначаючи їх за формулою (Д.2). Для групи бездефектних важелів

$$S_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_{1i} - \bar{P}_1)^2 = \frac{4622016,96}{14-1} = 355539,77 \text{ Н}^2, \text{ для групи важелів з дефектом}$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_{2i} - \bar{P}_2)^2 = \frac{8539533,34}{6-1} = 1707906,67 \text{ Н}^2, \text{ або ще краще,}$$

$$S = \sqrt{\frac{S_1^2(n-1) + S_2^2(n-1)}{n+n-2}} = \sqrt{\frac{355539,77 \cdot (14-1) + 1707906,67 \cdot (6-1)}{(14+6-2)}} = 338,58 \text{ Н.}$$

Далі ставиться питання про те, чи можна вважати, що істинні значення величин P_1', P_2' різняться, як і їх емпіричні середні, т.б. дефекти дійсно призводять до зміни (зниження) границі міцності ПЗ, або ж навпаки, ці значення не відрізняються. Для розв'язку цього питання висувається нуль гіпотеза про рівність істинних значень. За цією гіпотезою середні \bar{P}_1 і \bar{P}_2 мають нормальний розподіл з параметрами відповідно

$$\left(P_1'; \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \text{ і } \left(P_2'; \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right), \text{ тут } \sigma - \text{ середньоквадратична похибка визначення руйнуючих зу-}$$

силь в обох серіях вимірів. Розглянемо середні \bar{P}_1 і \bar{P}_2 . Так як середні незалежні, то і

їх різниця також має нормальний розподіл з параметрами $P_1' - P_2' = 0$ і $\sigma \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{n}}$. При

цьому нормована різниця з найпростішим нормальним розподілом, дорівнює

$$\frac{\bar{P}_1 - \bar{P}_2}{\sigma \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{n}}}, \text{ але оскільки невідоме точне значення } \sigma, \text{ скористаємося незалежною від цієї}$$

нормованої різниці величиною $\frac{S^2(n+n-2)}{\sigma^2} = \frac{S_1^2(n-1)}{\sigma^2} + \frac{S_2^2(n-1)}{\sigma^2}$, що має X - розподіл з

$k=n+n-2$ степенями вільності і за формулою (Д.3) визначимо нормовану різницю, яка

має розподіл Ст'юдента з кількістю степеней вільності $k=n+n-2$.

$$t = \frac{|34829,6 - 30083,3|}{338,58 \sqrt{\frac{1}{14} + \frac{1}{6}}} = 26,92.$$

Критичне значення $t_{кр}$ критерію Ст'юдента було знайдено з таблиць [97, 98] з заданою імовірністю довіри $P=0,95$ і кількістю степеней вільності $k=20+20-2=38$.

Перевіркою на "нуль-гіпотезу" отримано: $t_p=26,92 > t_{кр}=2,028$. Це показує, що зниження значення руйнуючих навантажень важелів з дефектами є не випадковим і

становить $\Delta \bar{P} = \frac{\bar{P}_1 - \bar{P}_2}{\bar{P}} \cdot 100\% = \frac{34829,6 - 30083,3}{30083,3} \cdot 100\% \approx 13\%$ з імовірністю довіри 95%.

$$\Delta \bar{P} = \frac{\bar{P}_1 - \bar{P}_2}{\bar{P}_1} \cdot 100\% = \frac{34829,6 - 30083,3}{34829,6} \cdot 100\% \approx 13\% \text{ з імовірністю довіри } 95\%.$$

Д.3. Статистична обробка результатів випробувань ємностей кулеподібних ПАГЗ-2800-32.23.01.000

За матеріалами випробувань ми маємо дві групи значень сумарного рахунку сигналів АЕ, позначимо їх як $N_{11}, N_{12}, \dots, N_{1n}$ для групи посудин із задовільним технічним станом і $N_{21}, N_{22}, \dots, N_{2n}$ для групи посудин з дефектам. Визначимо середні значення сумарного рахунку сигналів АЕ, отриманих в обох серіях експериментів за формулою

$$\bar{N}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{ji}, \quad (\text{Д.5})$$

де j - номер серії експериментів ($j = 1$ для групи бездефектних посудин, $j = 2$ для групи посудин з дефектами); i - номер випробування; n - кількість випробувань.

Для групи бездефектних посудин $\bar{N}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{1i} = \frac{1}{18} \cdot 1930 = 107,2$ імп., для групи

посудин з дефектами $\bar{N}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{2i} = \frac{1}{2} \cdot 2744 = 1372$ імп.

Так як випробування проводились у однакових умовах ми будемо вважати, що точність вимірів в обох серіях однакова, крім того передбачається, що помилки вимірів підпорядковуються нормальним законам з параметрами $(0; \sigma)$. Тоді для оцінки дисперсії в обох серіях вимірів ми можемо використовувати емпіричні дисперсії по аналогії з формулою (Д.2)

$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_{ji} - \bar{N}_j)^2$. Для групи бездефектних посудин

$S_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_{1i} - \bar{N}_1)^2 = \frac{164514}{18-1} = 9677,3$ імп.², де $S_1 = 98$ - середньоквадратичне відхилення.

В розрахунках необхідно враховувати ці реально існуючі відхилення, тому критичне значення сумарного рахунку сигналів АЕ $N_{\Sigma} = 107$ імп., а верхня межа приймається більшою на величину S_1 , т.б. $N_{кр} = N_{\Sigma} + S_1 = 107 + 98 = 205$ імп. Для інженерних розрахунків можна прийняти $N_{кр} = 200$ імп, тоді можлива помилка піде в запас міцності.

Додаток Е

Результати механічних випробувань контактних
ділянок конденсаторів КМ-5В і К10-9

Таблиця Е.1

Руйнуючі навантаження при розтязі конденсаторів КМ-5В і К10-9

№ п/п	Руйнуючі навантаження, Н				
	КМ-5В		К10-9		
	На платах	дротяні виводи 0,38 мм	На платах	дротяні виводи 0,2 мм	дротяні виводи 0,12 мм
1	5	10	46	7	2,5
2	5	13	19	9	1,5
3	10	09	58	4	1,5
4	23	14	22	2,5	1
5	17	10	13	8	1
6	52	9	15	7	1
7	34	8	15	2,5	1
8	33	6	22	1	1
9	31	7	32	6	1
10	33	8	12	7	1
11	40	11	10	2,5	1
12	27	11	37	2,5	1
13	46	10	5	9	1
14	29	25	28	2,5	1,5
15	32	7	5	10	1
16	38	8	25	2,5	1
17	15	12	21	4	1
18	35	7	8	6	1,5
19	47	9	26	7	1
20	21	11	25	8	1
21	34	9	27	6	1
22	27	2	30	7	1
23	34	8	35	8	1
24	26	3	29	9	1
25	44	9	06	8	1
26	58	5	40	7	1
27	31	8	05	$P_{cp}=5,5$	1
28	16	10	05		1
29	24	13	22		$P_{cp}=1,1$
30	30	9	35		
31	44	5	37		
32	35	9	05		
33	60	15	05		
34	38	16	22		
35	38	8	23		
36	65	14	35		
37	52	11	50		
38	26	8	27		
39	25	6	27		
40	42	10	22		
41	5	10	24		
42	22	9	41		
43	22	10	$P_{cp}=23,71$		
44	23	$P_{cp}=9,0$			
45	37				
46	42				
47	23				
	$P_{cp}=31,8$				

Таблиця Е.2

Руйнуючі навантаження при розтязі конденсаторів КМ-5В

№ п/п	ПОС61	Сплав Розе	Без прогріву	З прогрівом	З прогрівом	З прогрівом
	$t=(220-270)^{\circ}\text{C}$	$t=(94-120)^{\circ}\text{C}$		до 150°C	до 200°C	до 250°C
	$P_{руйн}$, Н	$P_{руйн}$, Н	$P_{руйн}$, Н	$P_{руйн}$, Н	$P_{руйн}$, Н	$P_{руйн}$, Н
1	55	34	21	6	41	16
2	50	45	18	45	60	13
3	20	35	59	16	74	16
4	24	49	5	68	30	16
5	57	06	12	18	70	24
6	60	31	3	15	30	21
7	73	54	30	105	61	23
8	35	30	50	5	64	15
9	42	19	36	12	30	10
10	20	44	25	67	90	20
11	38	35	70	39	55	28
12	90	33	30	45	45	15
13	110	38	25	30	45	25
14	77	18	23	100	45	18
15	67	27	55	20	42	16
16	42	39	20	80	85	10
17	45	22	72	89	38	14
18	57	47	21	36	95	17
19	55	38	15	26	40	35
20	70	38	20	10	90	25
21	63	42	47	30	60	17
22	80	41	35	18	23	15
23	$P_{cp}=59,7$	28	20	27	40	13
24		36	30	31	85	10
25		38	25	55	56	30
26		50	$P_{cp}=30,6$	30	13	43
27		48		25	31	21
28		40		35	28	11
29		45		87	20	18
30		$P_{cp}=36,2$		57	35	26
31				56	75	13
32				48	62	11
33				21	45	37
34				41	48	32
35				55	47	30
36				65	55	33
37				20	60	45
38				50	38	20
39				23	42	43
40				25	62	31
41				40	50	46
42				28	21	10
43				40	35	45
44				18	30	25
45				25	22	31
46				25	35	$P_{cp}=22,9$
47				31	30	
48				53	$P_{cp}=47,6$	
				$P_{cp}=40,3$		

Додаток Ж

Порівняльні акустичні характеристики деяких середовищ

Таблиця Ж.1

Порівняльні акустичні характеристики деяких середовищ, які є складовими друкованої плати.

Середовище	Густина $\rho \cdot 10^3, \text{кг} / \text{м}^3$	Швидкість поширення хвиль $\nu \cdot 10^3 \text{ м} / \text{с}$			Коефіцієнт затухання $\delta, \text{м}^{-1}$
		повздовжніх	поперечних	поверхневих	
Текстоліт	1,2-1,3	2,63	—	—	>100
Свинець	11,4	2,16	0,70	0,63	1-10
Мідь	8,9	4,66	2,26	2,12	10-100

Таблиця Ж.2

Затухання ультразвукових хвиль в декотрих рідинах і повітрі при 20°C.

Середовище	Частота $f, \text{МГц}$	Коефіцієнт затухання $\frac{\delta}{f^2}, 10^2, \text{м}^{-1}, \text{МГц}^{-2}$
Повітря	1,1-1,4	1670-2000
Вода	7-250	2,5
Глицерин	0,5-4	250
Гас	6-21	170
Кислота оцтова	0,5	9000
Масило трансформаторне	1-5	130
Ртуть	20-50	1,2-1,3
Спирт етиловий	1-220	5,4

Результати досліджень технічного стану важелів S 48.167230

3.1. Розрахунок найбільшого допустимого неруйнівного навантаження

Розрахуємо значення неруйнівного навантаження $P_{мест}$, при якому максимальні нормальні напруження у матеріалі важеля дорівнюють $\sigma_{мест}=480$ МПа. Для цього будемо розглядати поперечний переріз більшого отвору (розріз А-А на рис. 5.1), в якому і виникають максимальні напруження розтягу. На рис. 3.1 представлений поперечний переріз важеля і схема прикладення навантаження. Слід відмітити, що для розрахунків використовувались реальні розміри важелів, виміряні безпосередньо перед випробуваннями. Як виянилось, реальні розміри дещо відрізняються від вказаних замовником, наприклад ширина полки важелів дорівнює 7,5 мм замість 8,3 мм.

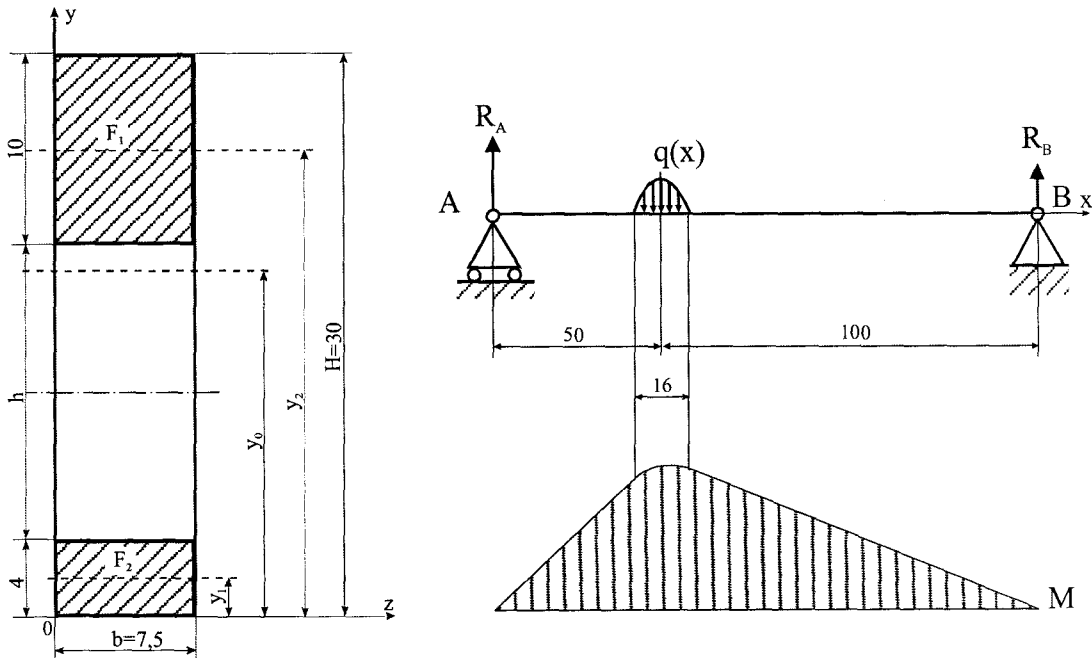


Рис. 3.1. Поперечний переріз однієї полиці важеля і схема прикладення навантаження

Для розрахунків скористаємося відомими з опору матеріалів підходом [92, 93], розглядаючи важіль як балку. Максимальні напруження, що виникають у небезпечному перерізі, зв'язані з навантаженням формулою

$$\sigma = \frac{M_{max}}{J_{\Sigma}} y_0, \quad (3.1)$$

де M_{max} – максимальний момент сили P , J_{Σ} – загальний момент інерції, y_0 – відстань до нейтральної вісі.

Відстань до нейтральної вісі і загальний момент інерції важеля відповідно дорівнюють $y_0 = \frac{(10 \cdot 7,5) \cdot 2,5 + (4 \cdot 7,5) \cdot 2}{(10 \cdot 7,5) + (4 \cdot 7,5)} = 18,43 \text{ мм}$ $J_{\Sigma} = 24001 \text{ мм}^3$.

З рівняння суми моментів відносно т. A знаходимо реакції опор $R_B = \frac{1}{3}P$, $R_A = \frac{2}{3}P$.

Так як навантаження прикладається не в точці, а через ролик діаметром 16 мм, навантаження P буде розподілене по діаметру отвору і максимальний момент буде дорівнювати $M = \frac{2}{3}P \cdot 50 \text{ мм} - \frac{1}{2}P \cdot 3 \text{ мм}$. Тут другий доданок є наслідком розподіленого навантаження і знижує максимальний момент в порівнянні з навантаженням, прикладеним в точці, на 9%, отже правомірним буде для інженерних розрахунків не враховувати факт розподілу сили (можлива помилка піде в запас міцності), тому всі подальші розрахунки велись в припущенні дії точкової сили.

Залежність прикладеного навантаження від механічного напруження для даної схеми навантаження має вигляд:

$$P = 39,07 \text{ мм}^2 \cdot \sigma. \quad (3.2)$$

Значенню максимального нормального напруження $\sigma_{mecm} = 480 \text{ МПа}$ у матеріалі важеля при заданій схемі навантаження відповідає зусилля $P_{mecm} = 19000 \text{ Н}$.

3.2. Порівняння руйнуючих навантажень важелів

Середнє значення руйнуючого навантаження для важелів, які були зруйновані безперервним навантаженням - $\bar{P}_1 = 34941 \text{ Н}$, а для важелів, які піддавались попередньому навантаженню, дорівнює $\bar{P}_2 = \frac{350282}{10} = 35028 \text{ Н}$. Далі постало питання про те, чи можна вважати, що істинні значення вимірених величин P'_2 і P'_1 співпадають, не дивлячись на розходження їх емпіричних оцінок \bar{P}_2 і \bar{P}_1 . Для розв'язання цього пи-

тання пропонується нуль гіпотеза про рівність істинних значень.

Обчислимо емпіричні дисперсії вибірок.

Для попередньо навантажуваних важелів $S_2^2 = \frac{5977861}{10-1} = 664206,7 \text{ Н}^2$, для важелів,

що випробовувались безперервним навантаженням $S_1^2 = 672145,8 \text{ Н}^2$.

Тепер за формулою (Д.2) визначимо оцінку дисперсії в обох серіях експери-

ментів $S = \sqrt{\frac{S_1^2(n-1) + S_2^2(n-1)}{n+n-2}} = \sqrt{\frac{664206,7(10-1) + 672345,8(10-1)}{10+10-2}} = 1832,1 \text{ Н}$, а за нею нор-

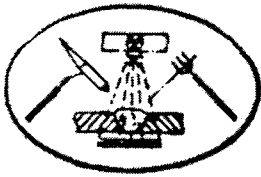
мовану різницю

$$t = \frac{|35028 - 34941|}{1832,1 \sqrt{\frac{1}{10} + \frac{1}{10}}} = 0,11.$$

Використовуючи таблиці [97, 98] з імовірністю довіри $P=0,95$ і кількістю степеней вільності $k=10+10-2=18$ встановлено, що $t < t_{кр}$, так як $0,11 < 2,1$, і це свідчить з надійністю $P=0,95$ про несуттєве розходження середніх.

Таким чином, попереднє навантаження важелів до $P_{тест} = 19000 \text{ Н}$ не приводить до зниження їх міцності і рівень $P_{тест}$ є неруйнівним.

3.3. Висновок про результати радіографічного контролю



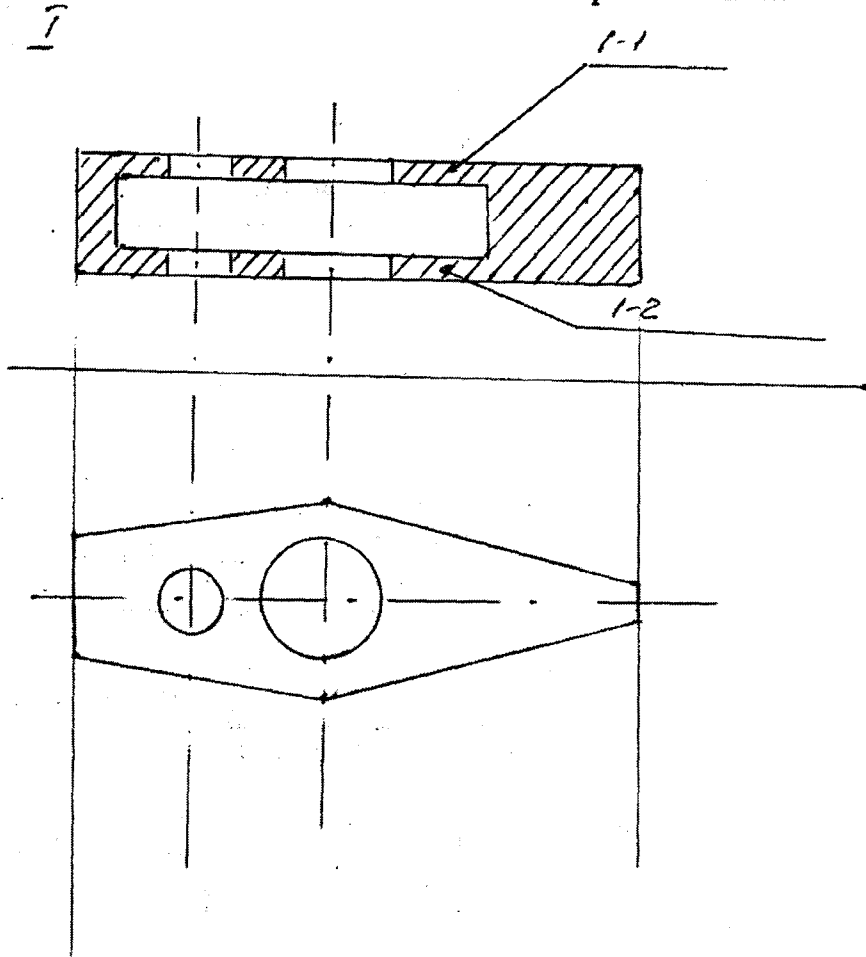
КП "Зварювальна лабораторія"
Ас. "Подільськпромонтаж"
Корпорація "Укрмонтажспецбуд"

ВИСНОВОК № 025189 про результати радіографічного контролю

Замовник <i>ПЕТУС</i>	Об'єкт контролю, номер лінії, креслення, вузла <i>Кросштансели № 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10</i>
Клас з'єднань Категорія трубопроводу Діаметр, товщина <i>Е=5мм</i>	Апарат <i>Г-192/120</i> , параметри контролю <i>f-400</i> тип плівки <i>Кодак</i>
Об'єм контролю <i>100 %</i>	Схеми контролю швів трубопроводу По ГОСТ 7512-82, кресл. 5 <i>згідно вип. 02</i>
Нормативно-технічні документи (НТД) <i>СНП III-18 Ж</i>	Звані стики по зовнішньому огляду відповідають вимогам ГОСТ 16037-80

№ п/п	Прізвище і клеймо зварника	Номер зварного з'єднання по схемі	Номер знімка	Розмір знімка, координати	Чутливість контролю мм, %	Виявлені дефекти (умови позначення) по ГОСТ 7512-82	Оцінка годен, не годен	Примітки
1	<i>з-з виробн.</i>	1-1	3815	240x100	0,2	—	ГОДЕН	
		1-2	3816	—	—	—	ГОДЕН	
2		2-1	3817	—	—	—	ГОДЕН	
		2-2	3818	—	—	<i>2Аа 1,4</i>	НЕ ГОДЕН	
3		3-1	3819	—	—	—	ГОДЕН	
		3-2	3820	—	—	<i>2Аа 1,1</i>	НЕ ГОДЕН	
4		4-1	3821	—	—	<i>4Аа 1,1</i>	НЕ ГОДЕН	
		4-2	3822	—	—	—	ГОДЕН	
5		5-1	3823	—	—	<i>3Аа 1,2</i>	НЕ ГОДЕН	
		5-2	3824	—	—	—	ГОДЕН	
6		6-1	3825	—	—	—	ГОДЕН	
		6-2	3826	—	—	—	ГОДЕН	
7		7-1	3827	—	—	—	ГОДЕН	
		7-2	3828	—	—	—	ГОДЕН	
8		8-1	3829	—	—	—	ГОДЕН	
		8-2	3830	—	—	—	ГОДЕН	
9		9-1	3831	—	—	—	ГОДЕН	
		9-2	3832	—	—	—	ГОДЕН	
10		10-1	3833	—	—	—	ГОДЕН	
		10-2	3834	—	—	—	ГОДЕН	

Схема зварних стиків



1. Номера стиків доповнюють буквами для стиків: P1, P2 – після первинного та вторинного ремонту, Д – додаткового контролю, К/П – пробних, контрольних.

2. За вимогами НТД – вказують клас зварного з'єднання згідно ГОСТ 23055 – 78 і (або) сумарний бал якості згідно СНиП 3.05.84.

Контроль виконав

Віктор

Дефектоскопіст
КП "Зварювальна лабораторія"
А. ШВЕЦЬ

Висновок видав

Віктор

(І.Б., дата, підпис)
Дефектоскопіст
КП "Зварювальна лабораторія"
А. ШВЕЦЬ

Начальник лабораторії 26.04.2002р

Г. Терешкевич

(І.Б., дата, підпис)
Інженер-дефектоскопіст
КП "Зварювальна лабораторія"
Г. ТЕРЕШКЕВИЧ

3.4. Кореляція між накопиченою енергією сигналів акустичної емісії і руйнуючим напруженням важелів

Розрахуємо коефіцієнт кореляції для σ і E_{AE} за формулою

$$r_{\sigma E} = \frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(\sigma_i - \bar{\sigma})}{S_E S_\sigma}, \quad (3.3)$$

де n – об'єм вибірки, E_i , σ_i – емпіричні значення, \bar{E} , $\bar{\sigma}$ – середньоарифметичні значення і S_E , S_σ – середньоквадратичні відхилення вибірки для E та σ відповідно.

Визначимо середньоквадратичне відхилення вибірки за формулою

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (3.4)$$

де n – кількість вимірів, x_i – емпіричні значення, отримані в ході експерименту, \bar{x} – середньоарифметичне значення.

За матеріалами випробувань, представленими в табл. 3.1, з об'ємом вибірки $n=20$, знаходимо: $\bar{E}=17,83$ мВ², $\bar{\sigma}=846,45$, середньоквадратичні відхилення вибірки

$$S_E = \sqrt{\frac{9562,97}{19}} = 22,4, \quad S_\sigma = \sqrt{\frac{265295,57}{19}} = 118,16.$$

Коефіцієнт кореляції, розрахований за цими даними дорівнює $r_{E\sigma} = \frac{1}{19} \cdot \frac{19814,58}{22,4 \cdot 52,7} = 0,88$, що, у відповідності з [97, 98], свідчить про наявність високої степені тісноти зв'язку. Отже, прийняття ступеневої залежності між E і σ та формула (5.4) є правомірним.

Тепер оцінимо можливе розходження залежності (5.4) з експериментальними даними, що важливо для визначення точності прогнозування межі міцності. Для цього визначимо середньоквадратичне відхилення $S_{\sigma E}$ за формулою

$$S_{\sigma E} = \sqrt{S_\sigma^2(1-r_{\sigma E}^2)} = \sqrt{13962,92(1-0,77)} = 56,67. \quad (3.5)$$

Тепер, знаючи $S_{\sigma E}$, знаходимо інтервал довіри значень σ за формулою

$$\Delta = t_{na} S_{E\sigma}, \quad (3.6)$$

де t_{na} – критерій Стюдента при імовірності довіри $\alpha=0,95$ $\Delta \approx \pm 118,44$ МПа.

Тепер за інтервалом довіри оцінимо розкид максимального напруження руй-

нування, отриманих за допомогою методу АЕ

$$\gamma = \frac{\Delta}{\bar{\sigma}} 100\% = \frac{118,44}{846,45} 100\% = \pm 14\%$$

Таблиця 3.1

Значення механічних характеристик, а також сумарного рахунку і накопиченої енергії сигналів АЕ при випробуванні партії важелів безпечним навантаженням

Номер важеля	Руйнуюче навантаження, Н	Межа текучості, МПа	Сумарний рахунок АЕ, імп	Накопичена енергія АЕ, мВ ² с
1	33320	724	17	2
2	29750	647	60	62
3	28014	609	56	60
4	30790	669	39	42
5	31150	677	29	40
6	35570	772	2	1
7	35150	764	9	3
8	35400	770	4	2
9	33820	735	16	1
10	34240	744	13	1
11	31250	679	27	33
12	34890	759	6	3
13	34360	747	11	4
14	35240	766	3	1
15	31800	691	20	27
16	35210	765	0	0
17	35320	768	0	0
18	33650	732	12	3
19	35150	764	0	0
20	34790	756	0	0

Додаток К

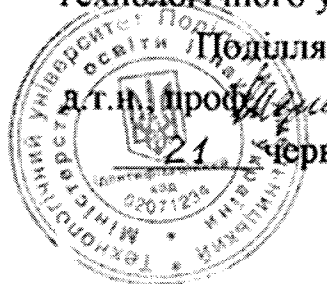
Результати акустико-емісійних випробувань ємностей кулеподібних ПАГЗ-2800-32.23.01

Таблиця К.1

Результати акустико-емісійних випробувань ємностей кулеподібних ПАГЗ-2800-32.23.01

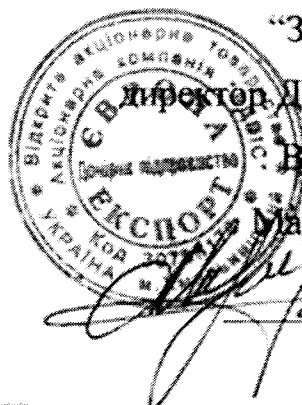
Номер п/п	Посудина №	A_{cp} , мкВ	A_{Σ} мкВ	\dot{N} , імп/с	ΣN
1	12656705	32	4419	3	136
2	12656706	1680	2698282	396	1606
3	12656707	1082	50838	11	47
4	12656708	39	1117	2	29
5	12656710	120	19444	13	162
6	12656711	571	19985	11	35
7	12656712	122	10467	8	86
8	12656713	138	207743	397	1138
9	12656714	1380	304950	16	221
10	12656715	524	70186	19	140
11	12656716	3030	45447	5	15
12	12656717	11	9021	18	82
13	12656718	2755	214871	34	78
14	12656719	1334	89356	20	221
15	12656720	833	30813	8	37
16	12656721	212	1274	6	6
17	12656722	50	3858	3	18
18	12656723	227	2720	1	12
19	12656724	59	9272	52	223
20	12656729	154	58757	7	382

“Затверджую”

Проректор з наукової роботи
Технологічного університету

Поділля
д.т.н. проф. Каплун В.Г.
21 червня 2002 р.

“Затверджую”



Директор ДП “Європа-експорт”

В.АТ “Адвіс”

Мартинюк Є. М.

21 червня 2002 р.

АКТ

впровадження результатів наукових досліджень з розробки неруйнівного контролю, діагностування і прогнозування міцності важелів S 48.167230 методом акустичної емісії

Кафедрою прикладної механіки Технологічного університету Поділля відпрацьована методика досліджень і отримані практичні результати із застосування методу акустичної емісії (АЕ) як засобу неруйнвної технічної діагностики і прогнозування міцності важелів АЕ. Порядок контролю наступний.

- 1) Тестування кожного важеля проводяться статичним навантаженням на згин до неруйнвного навантаження тестування, що знаходиться з врахуванням коефіцієнту запасу міцності ($n=1,5...1,8$) і не перевищує границю пропорційності матеріалу важелів, з одночасною реєстрацією параметрів сигналів АЕ. Для кожного з тестованих важелів визначаються значення накопиченої енергії сигналів АЕ, зареєстрованих при тестуванні деталей.
- 2) Якщо рівень накопиченої енергії зареєстрованих сигналів АЕ перевищує допустиме значення $E=3,4 \text{ мВ}^2$, важіль визнається таким, що містить небезпечні міцнісні дефекти.
- 3) При необхідності, для дефектних важелів проводиться прогнозування їх міцності для застосування в менш відповідальних конструкціях. Для прогнозування використовується емпіричний вираз $\sigma = A \cdot E^{-b}$, де A і b – константи, визначені за статистичною обробкою матеріалів досліджень, E – значення накопиченої енергії.

Впроваджена методика дозволяє здійснювати контроль важелів набагато ефективніше інших відомих методів неруйнвного контролю, оскільки вказаний метод реагує лише на небезпечні дефекти, що знижують міцність важелів, завдяки чому кількість бракованих важелів в порівнянні з результатами інших методів знижується на половину. Крім того, за допомогою неруйнвного діагностування методом АЕ можна спрогнозувати міцність дефектних важелів і застосувати їх для експлуатації в менш навантажених умовах.

Розроблена кафедрою прикладної механіки Технологічного університету
Поділля методика АЕ-діагностики була впроваджена підприємством АДВІС
для контролю, діагностування і прогнозування міцності важелів S 48.167230.

Керівник роботи – д. т. н., проф. Ройзман В. П.

Відповідальні виконавці: доц., к.т.н. Ковтун І. І., Горошко А. В.

Начальник КТВ ДП “Європа-експорт”



Томчишина Л. К.

“Затверджую”

Проректор з наукової роботи
Технологічного університету

Поділля

д.т.н., проф.  Каплун В.Г.
_____ грудня 2001 р.

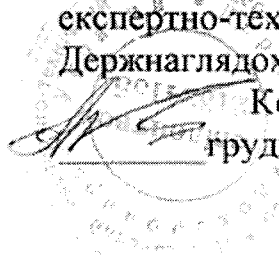
“Затверджую”

начальник Подільського
експертно-технічного центру

Держнаглядохоронпраці

Коваль А. Д.

_____ грудня 2001 р.

**АКТ**

впровадження результатів держбюджетної теми № 3Б-2000
“Розробка комплексу лінійної, площинної, об’ємної локації
сигналів акустичної емісії та його застосування для
неруйнівного контролю, діагностики та прогнозування
міцності матеріалів, деталей та електронних систем
нафтогазового обладнання”

Кафедрою прикладної механіки Технологічного університету Поділля
разом з Подільським експертно-технічним центром (ЕТЦ)
Держнаглядохоронпраці в ході виконання договору про співдружність
по визначенню технічного стану повітрозбірника В-6,3 ГОСТ 9028-59 та
ємностей кулеподібних ПАГЗ-2800-32.23.01.000 пересувного автомобільного
газозаправника ПАГЗ-2800-32, впроваджена неруйнівна технічна діагностика
зазначених об’єктів за допомогою методу акустичної емісії (АЕ) із
застосуванням лінійної, площинної та просторової локації дефектів та методу
електротензометрії.

АЕ та тензометричний контроль повітрозбірника виконували з метою
визначення небезпечних дефектів та оцінки їх небезпечності. Особливо
ретельній АЕ-діагностиці та тензометричному контролю підлягало нижнє
днище і місце дренажного отвору, що найбільш пошкоджене корозією. Під час
випробування внутрішнім тиском 12 атм, сигнали АЕ мали невелику амплітуду,
низьку активність і під час витримки випробувального тиску не з’являлись, а
напруження в найнебезпечніших місцях дорівнювали $\sigma_b=180-200$ кГс/см², що
набагато нижче допустимих, (значення яких для даного матеріалу $\sigma_d=1480$
кГс/см²), був зроблений висновок що у контрольованому матеріалі
повітрозбірника немає небезпечних дефектів, що узгоджується з результатами
ультразвукового та капілярного контролю, проведеного спеціалістами
Подільського ЕТЦ Держнаглядохоронпраці.

АЕ-діагностика двадцяти ємностей кулеподібних проводилась після
попереднього контролю ультразвуковим та капілярним методами. Посудини
навантажували внутрішнім тиском до 400 атм. За результатами діагностики
технічний стан посудин №705, 707, 708, 710, 711, 712, 714, 715, 716, 717, 718,
719, 720 721, 722 та 723 був визнаний задовільним.

При піднятті тиску в ємності №724 до 320 атм зафіксована безперервна АЕ, характер якої вказував на виникнення течії. Дані локації АЕ показали, що сигнали йдуть з місця заглушки у нижній частині посудини. Наступний візуальний огляд виявив течію в заглушці, що була недостатньо затиснута, причому течію неможливо було визначити за зменшенням тиску з допомогою контрольного манометра.

Ємність №729, що відзначилась високою активністю зареєстрованих сигналів при тиску, більшому 100 атм (максимальна активність—7 імп/с) з високим значенням накопиченої амплітуди за час випробування (58,757 мВ), рекомендовано додатково перевірити іншими методами контролю з метою кінцевого прийняття рішення про придатність ємності для подальшої експлуатації.

Упродовж випробування посудини №713 та №706 при наростаючому тиску була зареєстрована дискретна акустична емісія “вибухового типу” з наростаючою активністю та амплітудою. При повторному випробуванні цих ємностей зареєстровано близько 1000 сигналів АЕ, що значно більше від середнього значення (51 подія) зареєстрованих подій АЕ при випробуванні посудин, що були визнані бездефектними, з сумарною амплітудою сигналів 125,353 мВ проти 17,151 мВ відповідно. Під час витримки тиску активність сигналів зростала, і сигнали належали одному джерелу, тому все свідчило про те, що в матеріалі посудин є дефекти, що розвиваються. Локація АЕ-сигналів виявила найбільшу густину АЕ-джерел біля верхньої заглушки, де встановлений манометр, а також в районі стикового зварного шву. Зважаючи на характер АЕ-сигналів, ємність рекомендували для подальшого обстеження вказаних місць підвищеної акустичної активності іншими методами неруйнівного контролю, зокрема для проведення радіографічного контролю зварних швів.

Розроблена кафедрою прикладної механіки Технологічного університету Поділля методика АЕ-діагностики була впроваджена Подільським ЕТЦ Держнаглядхоронпраці для контролю за технічним станом посудин, працюючих під тиском. Методика дає можливість підвищити ефективність і зменшити трудомісткість неруйнівного контролю, а також спростити процес контролю іншими неруйнівними методами завдяки визначенню небезпечних місць у матеріалі виробів.

Керівник роботи – д. т. н., проф. Ройзман В. П.

Відповідальні виконавці: доц., к.т.н. Ковтун І. І., Горошко А. В.

Начальник відділу діагностики Подільського
ЕТЦ Держнаглядхоронпраці

Килимник О. М.