

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій та радіотехніки

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва спеціальності

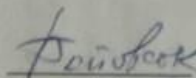
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему Діагностування міцності компаундованих конструкцій електронної техніки при термоциклюванні

ДРТР. 2019078.01.01.ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група ТР_м-19-1


підпис

В.В. Батовський
Ініціали, прізвище

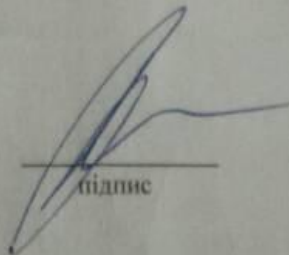
Керівник: д-р техн. наук, проф.


підпис

Ю.М. Бойко
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, проф.


підпис

Ю.М. Бойко
Ініціали, прізвище

5 12 2020 р.

Хмельницький, 2020

Хмельницький національний університет

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікації та радіотехніки

Освітній рівень другий (магістерський)

Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Освітня-професійна програма Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою

Д.т.н. проф. Бойко Ю.М.
« 7 » 09 2020р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Батовському В'ячеславу Валерійовичу

1 Тема роботи: Діагностування міцності компаундованих конструкцій електронної техніки при термоциклюванні

керівник роботи Бойко Юлій Миколайович, д.т.н, професор.

Затверджено наказом по університету від «1» вересня 2020р. № 118.

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 05.12.2020р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: полягає у розробці методик діагностування міцності компаундованих конструкцій електронної техніки при термоциклюванні.

Предметом дослідження є міцність компаундованих конструкцій електронної техніки при термоциклюванні.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити):

1 Загальна характеристика матеріалів компаундованих конструкцій та їх фізико-механічні властивості під дією термоциклювання.

2 Розробка прикладних програм збору та обробки даних електротензометрії та акустичної емісії.

3 Діагностика міцності компаундованих конструкцій електронної техніки методом електротензометрії.

4 Діагностика міцності компаундованих конструкцій електронної техніки методом акустичної емісії.

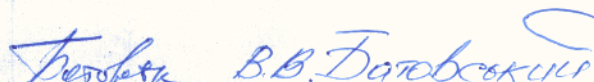
Завдання отримав Батовський

Науковий керівник Бойко Юлій


КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Вступ. Загальна характеристика матеріалів компаундованих конструкцій та їх фізико-механічні властивості під дією термоциклювання	21.09.2020	Вик.
2	Розробка прикладних програм збору та обробки даних електротензометрії та акустичної емісії	12.10.2020	Вик.
3	Діагностика міцності компаундованих конструкцій електронної техніки методом електротензометрії	30.10.2020	Вик.
4	Діагностика міцності компаундованих конструкцій електронної техніки методом акустичної емісії	13.11.2020	Вик.
5	Висновки. Презентаційні матеріали за результатами виконання дипломної роботи.	05.12.2020	Вик.

Студент


 Підпис Ініціали, прізвище

Керівник роботи


 Підпис Ініціали, прізвище

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Загальна характеристика матеріалів компаундованих конструкцій при термоциклюванні.....	10
1.1 Проблеми міцності герметизованих конструкцій	10
1.2 Характеристика різновидів герметизуючих компаундів	12
1.4 Висновки до розділу 1	18
2 Розробка прикладних програм збору та обробки даних електротензометрії та акустичної емісії	20
2.1 Модуль читання даних акустичної емісії	23
2.2 Оброблення та візуалізація даних акустичної емісії.....	29
2.3 Висновки до розділу 2	34
3 Діагностика міцності компаундованих конструкцій електронної техніки методом електротензометрії	35
3.1 Коротка методика тензометрування компаундованих конструкцій і експериментальна установка	36
3.2 Дослідження впливу відпалу на величину залишкових напружень в компаундованих конструкціях	39
3.3 Вимірювання внутрішніх напружень шляхом тензометрування компаунда	47
3.4 Оцінка міцності компаунда герметизованого модуля	49
3.5 Можливі шляхи зниження внутрішніх напружень.....	51
3.6 Висновки до розділу 3	53
4 Діагностика міцності компаундованих конструкцій електронної техніки методом акустичної емісії	54

4.1	Забезпечення працездатності датчика акустичної емісії АЕ П113 при термоциклюванні	57
4.2	Перевірка можливості використання хвилеводів	59
4.3	Розробка і виготовлення допоміжних пристосувань для підвищення ефективності та достовірності проведених випробувань	61
4.4	Визначення робочої смуги частот сигналів АЕ, що випромінюються при руйнуванні зразків кераміки і компаунда.	62
4.5	Акустико-емісійне дослідження компаундованих керамічних конденсаторів в умовах термоциклювання	66
4.6	Розробка способу неруйнівного діагностування і контролю міцності нероз'ємних з'єднань кераміки і компаунда при термоциклюванні від +60 °С до –50°С.	70
4.7	Висновки до розділу 4	73
	Висновки	74
	Перелік джерел посилання	76
	Додаток А Презентаційні матеріали за результатами виконання дипломної роботи	84
	Додаток Б Матеріали апробації наукових результатів отриманих у дипломній роботі	96

ВСТУП

Велика частина сучасних конструкцій, які застосовуються у виробництві електронної техніки різного рівня конструктивної складності, представляє собою складальні одиниці, деталі яких виготовлені із неметалевих матеріалів із полімерною структурою. До таких матеріалів відносяться кераміка, пластики, компаунди, скло, клеї, лаки тощо.

Беручи до уваги, що номенклатура таких полімерів дуже велика, слід зазначити, що правильний підбір цих матеріалів для конкретного виробу електронної техніки (ВЕТ) є достатньо складним завданням. Складність такого завдання полягає у відсутності або неточності фізико-механічних характеристик обраних матеріалів. Особливо актуальною проблема стає при підборі матеріалів сполучних елементів конструкцій в роз'ємних чи нероз'ємних вузлах з'єднання. Яскравим прикладом такого з'єднання є конструкції заполімеризовані компаундом, який виконує роль захисної оболонки від зовнішніх атмосферних та механічних впливів. Оскільки компаунд нерозривно зв'язаний із конструкцією електронного вузла між ним і елементами герметизованої конструкції відбувається механічна взаємодія. В більшості випадків механічна взаємодія виникає в умовах перепадів температури при термоциклюванні, яка має місце як процесі виробництва так і в процесі експлуатації виробу.

Як це було показано в попередніх роботах виконаних в лабораторії статичної та динамічної міцності Хмельницького національного університету [1-16] механічна взаємодія та нерівномірність розподілу температурного поля в конструкції викликають появу внутрішнього тиску на межі герметизований елемент і герметик та появу механічних напружень, як в тілі електронних компонентів так і в тілі герметика, тобто компаунді. Слід відмітити, що такі напруження не рідко виявляються руйнівними для конструкції.

Об'єкт дослідження – конструкції електронної техніки герметизовані компаундом.

Предмет дослідження – міцність компаундованих конструкцій електронної техніки при термоциклованні.

Мета дослідження – розробка методик діагностування міцності компаундованих конструкцій електронної техніки при термоциклованні.

Задачі дослідження:

1. Загальна характеристика матеріалів компаундованих конструкцій та їх фізико-механічні властивості під дією термоцикловання.
2. Розробка прикладних програм збору та обробки даних електротензометрії та акустичної емісії.
3. Діагностика міцності компаундованих конструкцій електронної техніки методом електротензометрії.
4. Діагностика міцності компаундованих конструкцій електронної техніки методом акустичної емісії.

В якості методів дослідження використані експериментальні методи дослідження напружено-деформованого стану та дефектоскопії об'єктів, що знаходяться під дією як механічних навантажень на розтяг та згин, так і під дією температурних навантажень, зокрема перепадів температур. До використаних методів відносяться метод електротензометрії та метод акустичної емісії. Крім вказаних для оцінки ступеня руйнування об'єктів дослідження використано візуальний метод.

Наукова новизна отриманих результатів:

- визначено характер руйнування компаундованих електронних модулів, який полягає у розтріскуванні герметизуючого компаунда, в основному, від дії напружень розтягу, тому що міцність компаунда на розтяг може бути в 60 разів нижче його міцності на стиск;

- здійснено розділення сигналів акустичної емісії, що випромінюються компаундною і керамічною складовими конструкції

компаундованого керамічного конденсатора, новизна чого полягає у відборі частотних діапазонів випромінювання інформативних параметрів акустичної емісії, зокрема сумарного рахунку;

- визначено показник оцінювання міцності стану компаундованої конструкції, яким є прояв ефекту Кайзера після перших двох термоциклів, поява акустичної емісії на n -му термоциклі є попередженням катастрофічного руйнування конструкції через 5-10 циклів.

Робота була виконана у відповідності до науково-дослідної роботи ЗБ-2020 «Неруйнівний контроль, діагностування та прогнозування технічного стану електронних систем методом акустичної емісії в виробках військової і невійськової техніки».

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено пакет програмного забезпечення зчитування та оброблення параметрів сигналів акустичної емісії для графічного представлення двовимірних та тривимірних часових залежностей амплітуди, активності, сумарного рахунку, потужності та енергії подій акустичної емісії від навантаження та лінійної координати, побудову гістограм амплітудного розподілу сигналів АЕ та розподілу амплітуд і сумарного рахунку по лінійній координаті;

- розроблено методику тензометрування та визначення внутрішніх напружень в компаунді і компонентах герметизованих електронних модулів, які виникають після їх сполучення;

- встановлено температурні межі працездатності датчиків АЕ, які складаються із сталевих, керамічних, пластмасових деталей, також здатних випромінювати сигнали АЕ при термоциклювання в діапазоні від $+ 50^{\circ} \text{C}$ до -50°C ;

- проведено відбір хвилеводу, який служить для передачі сигналів АЕ від досліджуваного об'єкта в термокамері до датчика П113 поза

термокамерою, що дозволило розширити межі температурного діапазону за рахунок збільшення додатних температур до $+90^{\circ}\text{C}$ і від'ємних до -60°C ;

- для усунення перешкод, пов'язаних з утворенням і розтріскуванням льоду при переході від додатних температур до від'ємних, була створена вакуумна установка, розрядження, якої перешкоджає утворенню льоду на тестованому зразку і хвилеводі;

- здійснено розділення сигналів акустичної емісії, що випромінюються компаундною і керамічною складовими конструкції керамічного компаундованого конденсатора, по частоті, зокрема робоча смуга частот сигналів АЕ відповідає: для кераміки К-15 – 650-1000 кГц; для компаунда ЕК-242 - 130-300 кГц;

- запропоновано спосіб неруйнівного діагностування і контролю міцності та попередження небезпечних станів нероз'ємних з'єднань різних композиційних матеріалів на прикладі конструкції компаундованих керамічних конденсаторів, які працюють в умовах термоциклирования від $+60^{\circ}\text{C}$ до -50°C .

Апробація результатів дослідження відбулась публікацією наукової статті «Діагностування міцності компаундованих конструкцій електронної техніки при термоциклованні» в журналі «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», № 1, 2020 р.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ КОМПАУНДОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ТЕРМОЦИКЛЮВАННІ

1.1 Проблеми міцності герметизованих конструкцій

Велика частина сучасних конструкцій, які застосовуються у виробництві електронної техніки різного рівня конструктивної складності, представляє собою складальні одиниці, елементи яких виготовлені із неметалевих матеріалів із полімерною структурою. До таких матеріалів відносяться кераміка, пластики, компанди, скло, клеї, лаки тощо.

Беручи до уваги, що номенклатура таких полімерів дуже велика, слід зазначити, що правильний підбір цих матеріалів для конкретного виробу електронної техніки (ВЕТ) є достатньо складним завданням. Складність такого завдання полягає у відсутності або неточності фізико-механічних характеристик обраних матеріалів.

Особливо актуальною проблема стає при підборі матеріалів елементів конструкцій що сполучаються в роз'ємних чи нероз'ємних вузлах з'єднання. Яскравим прикладом такого з'єднання є конструкції заполімеризовані компаундом, який виконує роль захисної оболонки від зовнішніх атмосферних та механічних впливів. Оскільки компаунд нерозривно зв'язаний із конструкцією електронного вузла між ним і елементами герметизованої конструкції відбувається механічна взаємодія. В більшості випадків механічна взаємодія виникає в умовах перепадів температури при термоциклюванні, яка має місце як процесі виробництва так і в процесі експлуатації виробу.

Як це було показано в попередніх роботах виконаних в лабораторії статичної та динамічної міцності Хмельницького національного університету [1-16] механічна взаємодія та нерівномірність розподілу температурного поля в конструкції викликають появу внутрішнього тиску на межі герметизований елемент і герметик та появу механічних напружень, як в тілі

електронних компонентів так і в тілі герметика, тобто компаунді. Слід відмітити, що такі напруження не рідко виявляються руйнівними для конструкції.

На відміну від перших герметизованих конструкцій у виробництві електронної техніки, які володіли значними розмірами та відповідно міцністю, в сучасних výroбах тенденція до зменшення габаритних розмірів виробів електронної техніки привела до загострення цієї проблеми. Оскільки такі конструкції поряд із малою масою та розмірами володіють низькою міцністю і здатністю протистояти зовнішньому впливу.

В цій ситуації почали з'являтися роботи [17-19] присвячені прикладним розрахункам на міцність та розробці методів механічних та температурних випробувань виробів.

В теперішній час завдяки технологічним досягненням вимірювання малих деформацій та напружень в герметизованих конструкціях стало можливим із використанням методів, які раніше застосовувались тільки для крупногабаритних досліджень, наприклад у машинобудівній промисловості [20-23].

Використання композитних матеріалів герметиків із відомими фізико-механічними властивостями має важливе значення для забезпечення надійності та ефективності герметизації [24-29]. Існує цілий ряд робіт [30-38] присвячених дослідженням фізичних і зокрема механічних характеристик існуючих матеріалів – герметиків. В роботах [29, 38, 39, 40] також показані розробки нових видів герметиків із характеристиками, які повністю відповідали б експлуатаційним вимогам до герметизованих конструкцій.

Встановлення значень вказаних характеристик виконується двома шляхами:

- 1) експериментальним (тестуванням на зразках матеріалів) [29, 41];
- 2) теоретично (розрахунками за допомогою розроблених математичних моделей) [40, 42, 43].

Слід відмити серед багатьох фізико-механічних характеристик коефіцієнт лінійного теплового розширення [43, 44]. Саме його значення є критичним при виникненні механічної взаємодії сполучених матеріалів, навіть не стільки його значення як різниця значень для різних матеріалів. Чим більшою буде ця різниця тим більші напруження будуть виникати у всіх сполучених матеріалах через те що вони всі будуть намагатись досягнути деформації під дією температури, але в різному ступені. Тобто будуть створювати внутрішні напруження розтягу або стиску, які в залежності від границі міцності кожного матеріалу можуть бути руйнівними.

1.2 Характеристика різновидів герметизуючих компаундів

Електроізоляційні компаунди в основному складаються з тих же речовин, які входять до складу лакової основи електроізоляційних лаків, але на відміну від лаків не містять розчинників. У момент застосування при нормальній і підвищеній температурі компаунди перебувають в рідкому стані і тверднуть після охолодження або в результаті відбуваються в них хімічних процесів.

Крім того, до складу компаундів можуть входити активні розчинники, що знижують в'язкість компаунда, пластифікатори, отверджувачі, ініціатори та інгібітори, призначення яких ті ж, що і в лаках. До складу компаунда можуть також входити наповнювачі - неорганічні і органічні порошкоподібні або волокнисті матеріали, що застосовуються для зменшення усадки, поліпшення теплопровідності, зменшення температурного коефіцієнта розширення і зниження вартості. Як наповнювачі застосовують пилоподібний кварц, тальк, слюдяну пил, азбестове і скляне волокно і ряд інших.

Електроізоляційні лаки і компаунди широко застосовуються в електроізоляційної та кабельної техніки, у виробництві електричних машин,

турбо- і гідрогенераторів, апаратів, трансформаторів, розподільних пристроїв, в високочастотній техніці.

Вибір електроізоляційних лаків або компаундів для тієї чи іншої конструкції ґрунтується на знанні технічних вимог для даної конструкції і умов її роботи, на фізичних і електричних характеристиках лаків і компаундів, які визначаються відповідними ГОСТами і технічними умовами (ТУ).

Електроізоляційні компаунди за своїм призначенням і виконуваних функцій поділяються на дві основні групи: просочувальні і заливальні. Просочувальні компаунди служать для заповнення пір, капілярів і повітряних включень в електроізоляційних матеріалах, використовуваних головним чином для обмоток електричних машин, котушок апаратів, трансформаторів і інших електротехнічних конструкцій. Після просочення підвищується електрична міцність матеріалу і всієї конструкції в цілому, поліпшуються теплопровідність, тепловіддача обмоток, що дозволяє збільшити потужність електричних машин і апаратів при тих же габаритах, збільшуються механічна міцність, вологостійкість, термін служби всієї конструкції.

По відношенню до нагрівання електроізоляційні компаунди діляться на термопластичні і терморективні.

Термопластичні компаунди – тверді при нормальній температурі, при нагріванні розм'якшуються, стають пластичними і переходять в рідкий стан, при охолодженні знову тверднуть. Розплавлення і затвердіння компаундів цієї групи можна проводити багаторазово. Для виготовлення цих компаундів часто застосовують нафтові бітуми в поєднанні з рослинними і мінеральними маслами, каніфоллю і деякими термопластичними полімерами.

Терморективні компаунди в момент їх застосування знаходяться в рідкому стані, а потім тверднуть в результаті відбуваються в них хімічних реакцій. Отвердіння компаундів цієї групи відбувається під дією затверджувача або каталізатора. Після затвердіння компаунд стає твердим,

неплавким і не розчинним в звичайних розчинниках. Як і лаки, ці компаунди діляться на компаунди гарячого і холодного затвердіння. Компаунди гарячого затвердіння переходять в твердий стан при спеціальній термічній обробці, а компаунди холодного затвердіння переходять в твердий стан під дією затверджувачів.

За хімічним складом електроізоляційні компаунди діляться на компаунди, що виготовляються на основі нафтових бітумів, рослинних або мінеральних масел і канифолі, і компаунди на основі синтетичних смол. У компаунди, що виготовляються на основі різних нафтових бітумів, іноді додають лляне або мінеральне масло і канифоль. Компаунди на основі синтетичних смол виготовляються на основі поліефірних, епоксидних, епоксидно-поліефірних кремнійорганічних та інших смол і їх композицій.

Просочувальні і заливальні термопластичні компаунди виготовляють, як було згадано, на основі бітумів, канифолі і масел. Вони використовуються для заливання кабельних муфт, різних місць з'єднань вивідних кінців обмотки електричних машин з підводять проводами і в інших електротехнічних конструкціях. Перед застосуванням компаунди розігрівають до рідкого стану і заливають на необхідні вузли та деталі. До заливних електроізоляційних компаундів відносяться бітумні компаунди МБ-70, МБ-90, маслоканифольні МК-45 і інші, які застосовуються для заливки сполучних, відгалужувальних і кінцевих муфт, закладення силових і контрольних кабелів. Компаунд МБ-55 застосовується для заливки конденсаторних високовольтних вводів.

Високі електричні і механічні властивості термореактивних компаундів, які після затвердіння не розм'якшуються і не впливають під дією нагрівання, дозволили створити монолітну і литу ізоляцію. Такий тип ізоляції дає можливість отримання виробів у вигляді малогабаритних блоків (котушки, апарати, радіосхеми).

Герметична або лита ізоляція добре цементує витки обмотки,

забезпечуючи високі механічну і електричну міцності, вологостійкість, малі термічні коефіцієнти розширення і теплопровідності.

Лита ізоляція застосовується: для вимірювальних трансформаторів струму від 220 В до 35 Кв; для вимірювальних трансформаторів напруги до 15 кВ; для якорів і котушок спеціальних електричних машин; в радіоблок, випрямлячах, ізоляторах, електронних схемах і т.п.

Для заводів електротехнічної промисловості випускається широка номенклатура термореактивних компаундів.

На основі поліефірних ненасичених смол випускаються компаунди КГМС-1,2; КП-10, КП-18, КП-23, КП-34 і ін. Компаунди КГМС застосовуються для просочення котушок трансформаторів і для інших намотувальних виробів, що працюють при температурах від -60 до 120оС. Компаунди КП, що володіють високою цементуючою здатністю, можуть бути використані для машин не вологостійкого виконання, але завдяки швидкому висиханню вони можуть застосовуватися в механізованих процесах просочення і поточних лініях виробництва електричних машин. Найбільш вологостійким і Нагревостойкость є компаунд КП-34.

Поліуретанові компаунди призначаються для герметизації електричної апаратури, для заливки різних деталей, що працюють при температурах від -80 до + 60оС. До цієї групи належить, наприклад, компаунд К-30, який використовується, коли не пред'являються високі вимоги до електричних властивостях. Більш високими електричними властивостями володіє заливний компаунд К-31, але по еластичності і демпфівальним властивостями він дещо поступається компаунду К-30.

Метакрилові компаунди МБК після полімеризації є полімери різного ступеня твердості: МБК-1 володіє найбільшою твердістю, МБК-2 - середньої твердістю, МБК-3 - гумоподібний еластичний. Ці компаунди мають високу вологостійкість, не розтріскуються в шарах великої товщини і не взаємодіють з міддю і іншими металами, тому вони застосовуються в якості

просочувальних і заливальних компаундів для багат шарових і багатшарових обмоток. Інтервал робочих температур для компаундів МБК від -60 до + 120оС. Висока вологостійкість цих компаундов дозволяє застосовувати їх для водопогружених електродвигунів та інших електротехнічних конструкцій, що працюють в умовах високої вологості.

Епоксидні компаунди після затвердіння утворюють композиції з високими електричними і механічними властивостями. Різноманіття рецептур епоксидних компаундів завдяки великій кількості різних затверджувачів, пластифікаторів, наповнювачів і можливості варіацій їх в складах визначає і широкий спектр різних фізико-технічних властивостей цих композицій. Компаунди на основі епоксидних смол і їх композицій готують як просочувальні, так і заливальні, гарячого і холодного затвердіння, з наповнювачем і без наповнювача. Епоксидні смоли і компаунди на їх основі широко застосовують не тільки в електротехнічній промисловості, а й у інших областях техніки - будівельної, автомобільної, авіаційної, космічної та ін. Цьому, зокрема, сприяють їх високі адгезійні властивості (здатність, що клеїть) до різних матеріалів і мала усадка при твердінні в обсязі (0,5-2%) в поєднанні з високими фізико-хімічними і механічними характеристиками.

Наведемо приклад деяких марок епоксидних компаундів, які можна використовувати в практиці електромонтажних та ремонтних робіт.

Велика кількість рецептур для приготування компаундів гарячого затвердіння розроблено на смолі ЕД-6. Це компаунди Д-1, Д-2, Д-3, Д-4. Компаунд Д-4, наприклад, - заливний (з наповнювачем), гарячого затвердіння. Як затвердіння застосовують малеїновий ангідрид, для пластифікаторів використовують поліефір N1, а для наповнювача пилоподібний кварц. Заливку компаундом проводять при 70-100 °С. Полімеризують компаундують вироби поступово: 1) 80-90 °С протягом 10-24ч; 2) 120 °С протягом 12 год. Компаунд Д-4 має хороші електричні характеристики, високу твердість, механічну міцність, високі волого, водо- і

тропікоустойчість, морозостійкість. Епоксидний компаунд К-168 готують на основі смоли ЕД-6, пластифікують поліефіром МГФ-9. В якості затверджувача застосовують гексаметилендіамін. При 20 °С компаунд отверджується за 24 год. Після введення затверджувача компаунд слід використовувати протягом 20 хв. Компаунд може застосовуватися як з наповнювачем, так і без нього. Застосовується у виробках з робочою температурою від -60 до + 120 °С для просочення, обгортання, склеювання і герметизації вузлів і деталей апаратури, для захисту від дії вологи і грибкової цвілі. Отвердіння компаунда проводять при кімнатній температурі.

При роботі з епоксидними компаундами слід пам'ятати, що в неотверженого стані смоли, а також пари отверджувачів, наприклад, поліетиленполіамін є токсичними речовинами, тому необхідно захищати від попадання смоли відкриті ділянки шкіри обличчя і рук, а технологічний процес проводити під витяжкою. Затверділі епоксидні композиції не токсичні.

Кремнійорганічні компаунди набули поширення завдяки їх високій нагрівостійкості. Широко застосовуються кремнійорганічні еластичні заливальні компаунди на основі кремнійорганічних каучуків. Ізоляція, виконана із застосуванням кремнійорганічних матеріалів надійно працює до температури 180-200°C а іноді і вище, має високі електричними властивостями. Компоненти кремнійорганічних каучуків малотоксичні. До цих матеріалів відносяться компаунди марки КЛ, еластосіли, герметики типу ВГО і ін. Основні характеристики компаундів марки КЛ-4 наступні: $\rho_v = 1012$ Ом · м; $\epsilon = 3.5$, $\text{tg}\delta = 0.005$ на частоті 106 Гц; межа міцності на розтяг не менше 0.1- 0.3 МПа, відносне подовження 100%, діапазон робочих температур від -60 до + 200 °С. Компаунд КЛТ-30 при близьких до КЛ-4 електричних характеристиках може працювати до + 300 °С; має відносне подовження при розриві 150% і $\delta_p = 150$ Па. До цієї ж групи належать компаунди «Виксинт» (марки V-1-18, V-2-28, К-18, ПК-68 і ін.). Герметики

Виксинт, СКТН-10 або силікон М-4 і ін. Забезпечують надійну вологозахист.

При герметизації деталей в металеві, керамічні, пластмасові та ін. Корпусу гідрофобізуючої корпусу і вивідні ізолятори. Згадані вище компаунди Виксинт марок У-1, У-2, У-4 випускаються у вигляді паст, які в ряді випадків використовуються для зовнішніх покриттів ізоляторів ліній передач високої напруги, ізоляторів на лініях залізниць і вводів високої напруги на підстанціях та інших спорудах, працюючих в умовах забрудненої атмосфери. Рідкі пасти можуть наноситися з пульверизатора, видавлюватиметься зі спеціальних пневматичних пістолетів, стисненим газом або видавлюватиметься вручну з тьюбиків. Пасту можна наносити також зануренням в неї виробів або пензлем.

Обмазувальні компаунди (пасти, замазки, мастики) застосовують у всіх випадках, коли необхідно створення герметизуючого ізоляційного шару з гарною адгезією до наноситься поверхні, механічною міцністю і високими електроізоляційними властивостями. Обмазувальні компаунди складаються з сполучного лаку або компаунда і наповнювачів, в якості яких зазвичай використовують тонкоподрібнений азбест, тальк, крейда, окис заліза. До таких компаунд відносяться компаунди 4401 (на олійно-бітумному лаку) і 4402 (на олійно-гліфталеvim і нітролаку). Ці компаунди сушаться при температурі 80-90 °С Випускаються також склади холодного затвердіння.

1.4 Висновки до розділу 1

1. Показана проблема міцності конструкцій, які представляють собою складальні одиниці виконані сполученням різнорідних композитних матеріалів в роз'ємних чи нероз'ємних вузлах з'єднання та показана необхідність розробки експериментальних методів діагностики міцності в сполученій системі герметизуючий матеріал – герметизована конструкція в

умовах термоциклювання.

2. Проведено огляд та подано загальну характеристику різновидів компаундів, які використовуються для герметизації конструкцій електронної техніки різного призначення. Виявлено складність правильного підбору цих матеріалів для конкретного виробу електронної техніки. Складність такого завдання полягає у відсутності або неточності фізико-механічних характеристик обраних матеріалів особливо в умовах перепадів температур.

2 РОЗРОБКА ПРИКЛАДНИХ ПРОГРАМ ЗБОРУ ТА ОБРОБКИ ДАНИХ ЕЛЕКТРОТЕНЗОМЕТРІЇ ТА АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Для проведення досліджень із використанням методу електротензометрії та методу акустичної емісії був створений вимірювальний комплекс структурна схема якого показана на рис. 2.1. Робота по створенню вимірювального комплексу та всі наведені в представленій роботі експериментальні та теоретичні дослідження були проведені в лабораторії статичної та динамічної міцності в електроніці, яка знаходиться в Хмельницькому національному університеті в 3-100. Як зазначалось у вступі науково-дослідна робота проводилась в рамках виконання державної бюджетної теми ЗБ-2020 «Неруйнівний контроль, діагностування та прогнозування технічного стану електронних систем методом акустичної емісії в виробках військової і невійськової техніки».

Як показано на рис. 2.1 комплекс складається із двох систем: системи тензометричного контролю та системи акустико-емісійного контролю. Система тензометричного контролю була побудована на основі тензометричної станції 8АНЧ-26, первинними перетворювачами в якій служать тензодатчики ТД. Система акустико-емісійного контролю була побудована на основі акустико-емісійного приладу АФ-15, первинними перетворювачами в якій служать п'єзоелектричні датчики акустичної емісії ДАЕ.

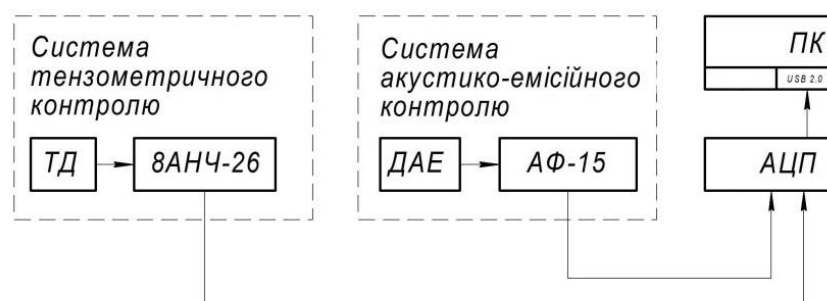


Рисунок 2.1 – Блок-схема вимірювального комплексу для експериментального дослідження виробів електронної техніки

У складі комплексу вимірювальні прилади з'єднані із персональним комп'ютером ПК. Передача даних в ПК здійснюється через універсальний АЦП з USB 2.0 інтерфейсом.

Дані які поступають від двох різних систем можуть записуватись в пам'ять персонального комп'ютера як по черзі так і паралельно.

Для збору та оброблення даних електротензометрії використовується стандартна програма Power Graph, яка дозволяє отримувати графіки осцилограми на екрані монітора.

В процесі створення комплексу суттєвій модифікації було піддано прилад АФ-15. Ця частина була створена іншими виконавцями державної бюджетної теми та була призначена для з'єднання серійного вимірювального приладу акустичної емісії АФ-15 із персональним комп'ютером, що як показано в [45-47] включало модифікацію субблоків приладу АФ-15, зокрема субблоків амплітуди, лінійної координати та суматора та також розробку паралельного інтерфейсу вводу/виводи даних для передачі оцифрованих параметрів акустичної емісії в персональний комп'ютер. Проведена робота дозволила підвищити кількість параметрів акустичної емісії, що можуть бути зареєстровані приладом АФ-15 за одиницю часу і таким чином збільшити ефективність роботи приладу на 90 %.

Невід'ємною складовою створення вимірювального комплексу АЕ була розробка програмного забезпечення збору та обробки даних АЕ. Саме розробка програмного забезпечення була головною метою представленого розділу, яка передбачала створення наступних програм:

- програму читання та буферизації даних акустичної емісії;
- пакет програм обробки даних акустичної емісії.

Пакет програм обробки даних включав наступні програми:

- програма побудови двовимірних залежностей параметрів АЕ від навантаження;
- програма побудови гістограми амплітудного розподілу сигналів АЕ
- пакет програм побудови тривимірних залежностей параметрів сигналів

АЕ від навантаження і лінійної координати.

В свою чергу пакет програм побудови тривимірних залежностей параметрів сигналів АЕ від навантаження і лінійної координати включав наступні програми:

- програму побудови тривимірної залежності амплітуд сигналів АЕ від навантаження і лінійної координати;
- програму побудови тривимірної залежності активності сигналів АЕ від навантаження і лінійної координати;
- програма підтримки побудови тривимірної залежності потужності сигналів АЕ від навантаження і лінійної координати;
- програму побудови тривимірної залежності енергії сигналів АЕ від навантаження і лінійної координати.

До вказаних пакетів програм були висунуті різні вимоги. Програма читання даних має бути розроблена такою щоб забезпечувала максимально можливу швидкість зчитування та буферизації даних, які поступають в персональний комп'ютер від приладу АФ-15, при чому система не здійснює складне оброблення інформації. Пакет програм оброблення інформації не є обмеженим швидкістю он-лайн реєстрації даних і тому повинен бути націлений на максимальну якість опрацювання та представлення опрацьованої інформації у зручному та для подальшого аналізу вигляді, в більшості у вигляді наочних двохвимірних та трьохвимірних графіків акустичної емісії, які будемо називати акустограмами. Візуалізація даних у вигляді графіків здійснюється в системі автоматичного проектування AutoDesk Auto Cad, для чого програми оброблення даних видають графічний файл в форматі DXF, який потім імпортується в Auto Cad.

Також можливим є використання інших програм, наприклад MathCad, в які вчитуються і якими обробляються масиви даних, отримані за допомогою програми запису даних.

2.1 Модуль читання даних акустичної емісії

Програмне забезпечення читання даних акустичної емісії, які видаються модифікованим приладом АФ-15 організовано у вигляді 4-х модулів, 3 з яких обробляють переривання IRQ1, IRQ3 і IRQ5, а 4-й – здійснює основний цикл.

Переривання IRQ1 формується командою ESC і його основним призначенням є закінчення виконання програми.

Переривання IRQ3 формується реєстрацією подій, чію достовірність підтверджує прилад АФ-15.

Переривання IRQ5 формується періодично і генерується тактами ГТІ генератора тактових імпульсів приладу АФ-15.

Основний цикл виконує послідовність функцій при завершенні програми.

Послідовність функцій виконуваних цими модолями показана на рис. 2.2.

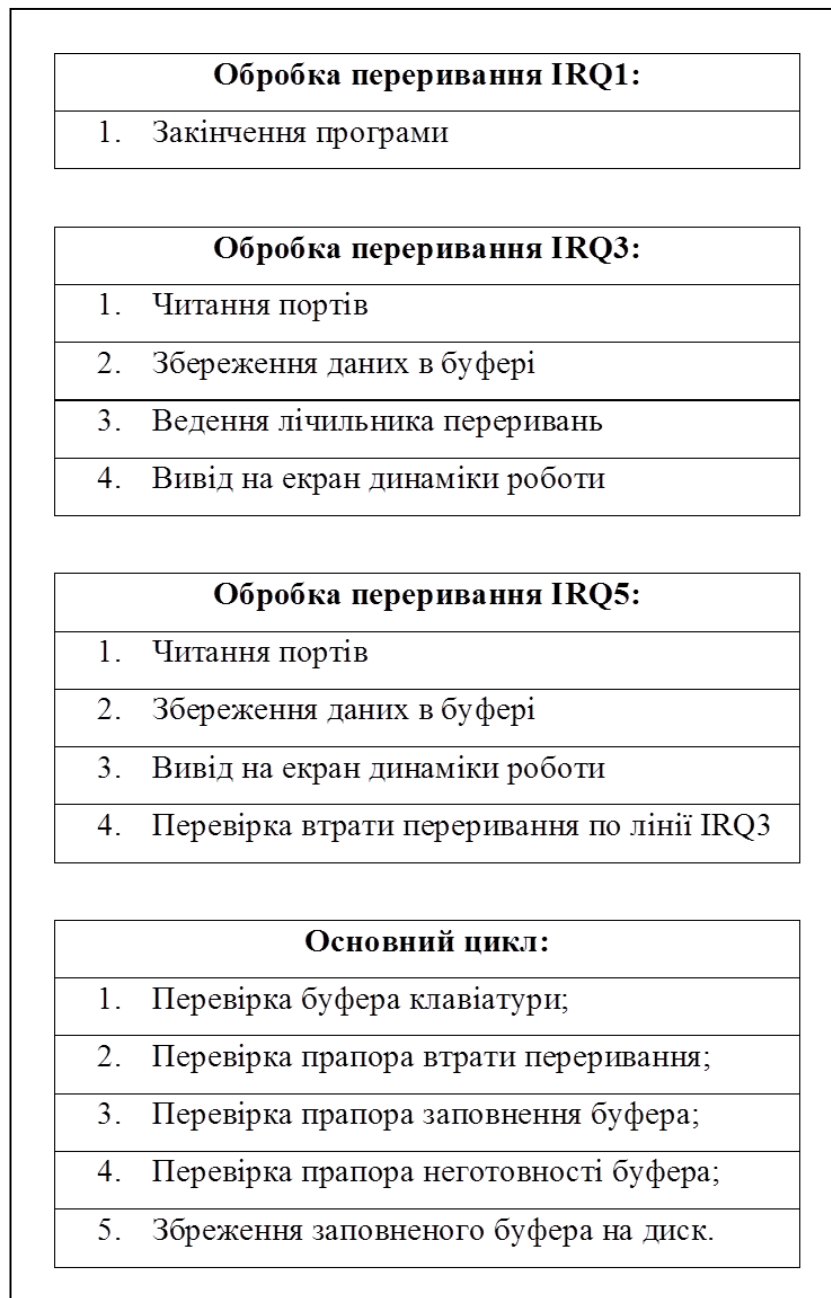


Рисунок 2.2 – Функціональний алгоритм програми читання даних АЕ

Далі представлено детальну структуру модулів в функціональному порядку програми читання даних.

Спочатку дії програми проводиться ряд необхідних установок рис. 2.3.

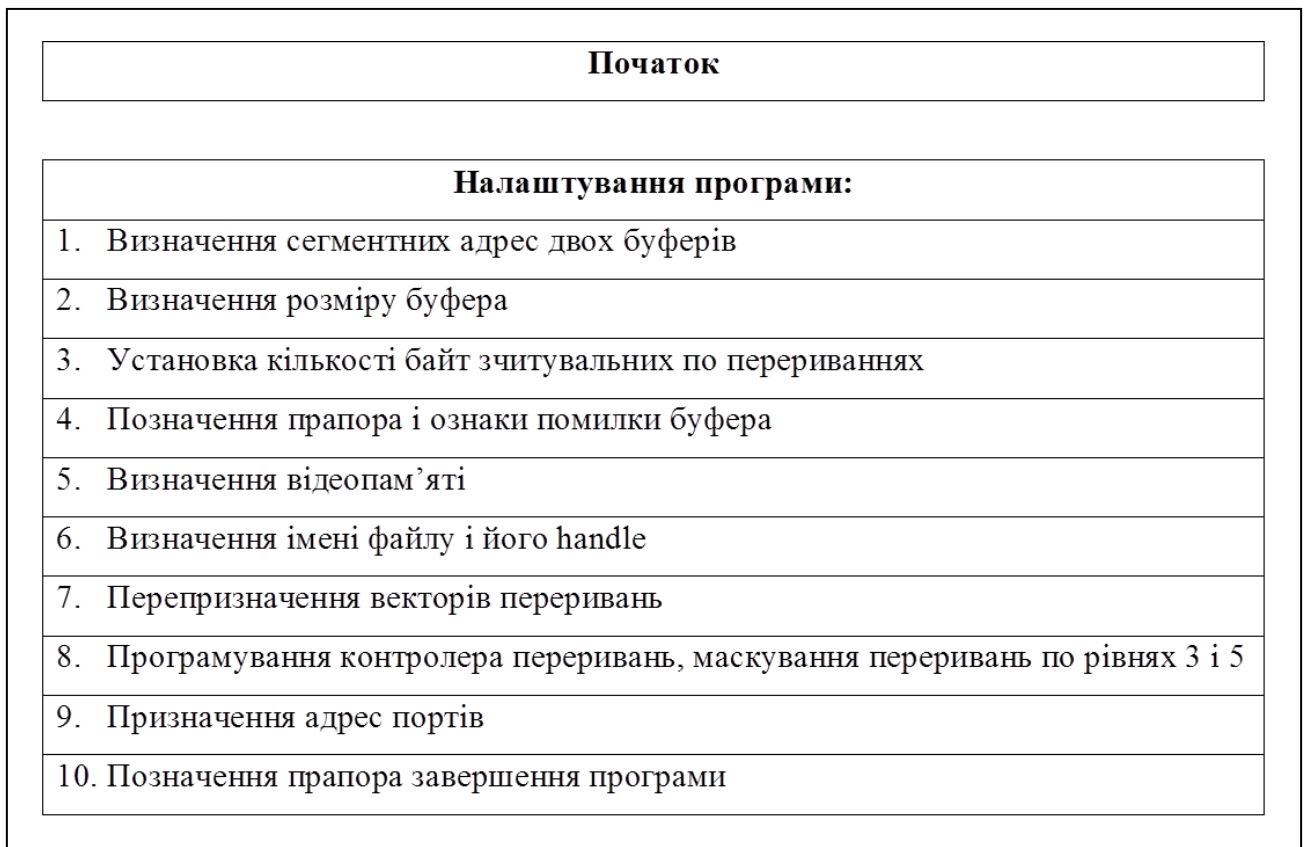


Рисунок 2.3 – Алгоритм налаштування програми

Збір даних здійснюється з використанням двох буферів сформованих ОЗП ПК, характеристики яких представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Використання буферів даних в ОЗП ПК

Буфер	Адреса	Розмір
1	8000H	16x1024
2	9000H	16x1024

Буфери отримують дані по чергово по сегментовим або плинним адресам `Seg_Adr_A` та `Cur_Seg_Adr` із зсувом адреси `Cur_Off_Adr`. Після заповнення буферу А дані приходять до буферу В `Seg_Adr_B` або до `Next_Seg_Adr`, де вони розміщуються як у першому буфері і він тепер є поточним `Cur_Seg_Adr`, а буферу А надається адреса `Next_Seg_Adr` і дані з нього зберігаються на жорсткому диску ПК. Після цього буфер готовий до

завису нових даних і так процес виконується циклічно. Представлена організація запису даних та достатній розмір буферів дозволяють прийом параметрів АЕ в режимі максимальної інтенсивності передачі даних із АФ-15 без втрат.

У випадку заповнення і не готовності будь якого буфер видається прапор помилки і програма завершує дію та видає повідомлення про неготовність буфера.

Для демонстрації динаміки переривань "3" і "5" на екрані використовується відеопам'ять із адресою 0b800H.

Ім'я файлу для запису даних АЕ може мати довжину до 30 символів. Номер файлу визначається системою.

Оскільки дані акустичної емісії надходять до ПК через модуль вводу-виводу РІО-48 для 6-ти портів присвоєні адреси представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Адреси присвоєні для зчитування даних в модулі РІО-48

Адреси 6-ти портів модуля РІО-48		
Adr3_Port1 = 220H	Adr3_Port2 = 221H	Adr3_Port3 = 222H
Adr5_Port1 = 224H	Adr5_Port2 = 225H	Adr5_Port3 = 226H

В програмі також представлені макроси показані на рис. 2.4.

Після виконання налаштувань та опису макросів програма починає оброблення переривань.

Макроси:
1. Збереження регістрів в стеку
2. Відновлення регістрів із стека
3. Переміщення сегментних регістрів
4. Установка і відновлення векторів переривань

Рисунок 2.4 – Макроси

Характеристика модуля оброблення переривань IRQ1 представлена в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Оброблення переривань IRQ1

Переривання	Мітка	Перевірка	Функція
IRQ1	New09H	Снак-код 01H	Завершення

Оброблення переривань IRQ3 відбувається асинхронно після визначення приладом АФ-15 істинності подій. Переривання генерується субблоком координат. Характеристика оброблення переривань IRQ3 представлена в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Оброблення переривань IRQ3

Переривання	Мітка	Перевірка	Функція	Лічильник
IRQ3	NewobH	три порти РІО-48 220, 221, 222H	Формування значень амплітуди і координати	Переривання за період ГТІ

Після оброблення переривань в буфері формуються дані в ASCII кодi в форматi:

$$3 \quad XX \quad XXX, \quad (2.1)$$

де 3 – ознака переривання, XX – амплітуда, XXX – координата джерела АЕ.

Оброблення переривання IRQ5 є періодичним із періодом який генерується приладом АФ-15 в генераторі тактових імпульсів. Характеристика оброблення переривань IRQ3 представлена в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Оброблення переривань IRQ5

Переривання	Мітка	Перевірка	Функція	Період
IRQ3	NewodH	Інші три порти PIO-48 224, 225 і 226H	Формування значень кількості подій і осциляцій	Задається ГТІ

Інформація в буфері представлена у форматі:

$$5 \text{ XXX YYY}, \quad (2.2)$$

де 5 – ознака переривання, XXX – кількість осциляцій, YYY – кількість подій зареєстрованих в акустико-емісійному приладі АФ-15.

Достовірністю кількості зафіксованих переривань рівня IRQ3, тобто кількості зафіксованих подій, здійснюється порівнянням із кількістю подій генерованою самим приладом АФ-15, тобто його субблоком суматора.

У випадку коли переривання втрачено програма видасть звіт про наявність та кількість переривань, які були втрачені. Ця процедура здійснює контроль роботи модуля вводу-виводу PIO-48.

На відміну від попередніх модулів які працюють тільки у випадку надходження відповідного переривання основний цикл працює постійно.

Спочатку програма перевіряє наявність прапора помилки буфера. У випадку наявності прапора програма закінчує роботу генерує помилку із відповідним повідомленням. При відсутності прапора, програма перевіряє буфера на його готовність до здійснення запису даних на жорсткий диск. Якщо буфер поки що не заповнений цикл знову повторюється в протилежному разі відбувається запис даних із буфера на диску в файлі із використанням відповідного Handle.

Програма закінчує функціонування за перериванням IRQ1. Після цього переривання здійснюється запис даних на жорсткому диску, відновлюються

старі вектори переривань, відновлюється стара маска контролера переривань, закривається файл і відбувається друк статистики про роботу програми.

Після здійснення збору і запису даних у файлі текстового формату настає черга обробки файлу з метою візуалізації даних.

2.2 Оброблення та візуалізація даних акустичної емісії

Програмний модуль читання і запису даних параметрів акустичної емісії формує структурований текстовий файл, в якому дані знаходяться у визначеному порядку у відповідності до обробленого переривання IRQ3 (2.1) або IRQ5 (2.2).

Подальше оброблення даних призначено для графічного представлення – візуалізації процесу розвитку параметрів АЕ. Цей процес може бути реалізований із використанням таких стандартних програм як MathCad або Auto Cad [48].

Розглянемо використання програми автоматичного проектування Autodesk Auto Cad. Задача програми оброблення даних на цьому етапі полягає у розпакуванні текстового файлу і формуванні файлу графічного формату. Графічний формат використовується для побудови двох- і трьох-мірних графіків

Серед можливих форматів представлення інформацію в AutoCAD для вводу або виводу графічної інформації пропонується розглянути наступні формати імпорту та експорту даних (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Характеристика файлових форматів імпорту та експорту даних

Формат	Опис
DWG	Основний файловий формат системи AutoCAD
DXF	Формат призначений для обміну описом графічної інформації представлений в ASCII кодi. Структура файлу як у DWG формату
DXB	Формат представлений в двійковому форматі і призначений для обміну описом графічної інформації
SCR	Формат пакетного файлу призначений для ззовнішнього керування системою AutoCAD

Порівняльний аналіз вказаних форматів показав наступне. Використання DWG формату неможливо, оскільки даний формат захищено авторським правом. DXB формат представляє дані в двійковому кодi, а це означає необхідність додаткового перекодування із ASCII коду. SCR формат є досить громіздким і створення такого файлу в автоматичному режимі є ускладненим.

Таким чином, було прийнято використовувати файл у форматі DXF.

Розглянемо загальну структуру файлу в форматі DXF. Файл складається із 4-х основних секцій (блоків): 1) Header, 2) Table, 3) Blocks, 4) Entities.

Header, Table та Blocks описують налаштування, зокрема версію AutoCAD, габарити графічного документу, тип ліній тощо. Entities описує інформацію про графічну частину.

При чому перші три секції копіюються в тіло графічного файлу із створеного заздалегідь файлу `hdr.dxf`. В той час як секція Entities формується програмою із графічних даних. Ввод графічних даних в AutoCad виконується командою `DXFIN`.

Програма формування 2D графіків призначена для побудови таких залежностей як:

- часові залежності розвитку амплітуди, активності, сумарною амплітуди, потужності сигналів АЕ від навантаження;
- залежності вказаних параметрів від лінійної координати.

Програма створення графічного файлу має модульну структуру, яка складається із двох модулів: керуючого та виконавчого. Структура програми показана на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Структурна схема програми побудови 2D графіків

Модуль керування здійснює послідовний вибір підпрограм із переліку виконавчого модуля для формування графічних файлів вказаних залежностей. Така організація структури програми дає можливість оптимізації використання простору ОЗП ПК, при цьому зберігаючи багатофункціональність програми.

Виконавчий модуль складається із наступних підпрограм: Початок;

Амплітуда; Активність; Сумарний рахунок; Навантаження; Кінець.

Кожна підпрограма має своє призначення.

Початок – видає на екрані запит оператора для визначення початкових налаштувань оброблення даних:

- часовий інтервал аналізу;
- крок розрахунку активності та максимальної амплітуди АЕ;
- попередній масштаб екранного відображення параметрів АЕ.

Далі блок виконує копіювання вмісту файлу `hdr.dxf`, яки складає 3 перші секції DXF файлу. Після цього програма встановлює коефіцієнти масштабування графіків на осі Y, що призначено для забезпечення зручності візуального представлення графіка і уникнення перекривання графіками один одного, оскільки у відповідності до алгоритму програми графіки показуються по черзі на екрані по вертикалі.

Підпрограми Амплітуда, Активність та Сумарний рахунок виконують формування 2D залежностей параметрів АЕ від навантаження та наносять осі із підписами.

Підпрограма навантаження здійснює побудову часової залежності навантаження, яка додається до всіх графіків.

Підпрограма кінець завершує роботу всієї програми і дописує ознаку завершення файлу DXF формату.

Крім вказаних програм розроблена програма формування амплітудного розподілу сигналів акустичної емісії і дозволяє отримувати гістограми залежності кількості прийнятих сигналів АЕ від їх амплітуди.

Для побудови 3D залежностей параметрів сигналів АЕ був створений пакет інших програм, які теж були орієнтовані на використання системи автоматичного проектування AutoCad.

Перелік тривимірних графічних залежностей від часу та лінійної координати включає наступні параметри акустичної емісії:

- 1) амплітуда;

- 2) активність;
- 3) потужність;
- 4) енергія.

Програми реалізують вибірку із сформованого файлу текстового формату та обробку трьох значень: часу; лінійної координати та амплітуди сигналів АЕ.

Функціонування програми починається із запиту про довжину об'єкта дослідження (мм, см) та крок, з яким опрацьовуються параметри АЕ для формування графіків. Також виконується запис із файла `hdr.dxf`.

Наступним етапом відбувається формування графічного файлу в форматі `dxf`, в якому час, лінійна координата і параметри АЕ відкладаються по окремим осям: X – час; Y – лінійна координата; Z – амплітуда, потужність, енергія або активність. Також по осям в площині ZX відкладається часова залежність навантаження.

В системі AutoCad імпортований файл представляє собою 3D графік – «видавлену сітку», який складається із 4-кутних непрозорих полігонів типу `3DFACE`. Команда орбіт в системі AutoCad дозволяє підібрати потрібний ракурс вигляду графіка.

Слід відмітити, що саме демонстраційні можливості програми AutoCad стали вирішальною перевагою при виборі програми для аналізу і демонстрації акустограм. Також може бути рекомендовано використання іншої програми комп'ютерної графіки із сімейства AutoDesk – `3DS Max`, яка володіє набагато ширшими можливостями візуалізації.

Таким чином завдяки виконаній роботі було створено програмне забезпечення, яке в поєднанні із створеною апаратною частиною вимірального комплексу дозволило реалізувати 2-канальну реєстрацію та обробку параметрів сигналів акустичної емісії та виконати всі дослідження представлені в наступних розділах.

2.3 Висновки до розділу 2

1. Розроблено пакет програмного зчитування та буферизації даних, які представляють такі параметри акустичної емісії як амплітуда, кількість подій та осциляцій та лінійна координата подій акустичної емісії. Зазначені параметри надходять із субблоків амплітуд, суматора та лінійних координат модифікованого приладу акустичної емісії АФ-15 та подаються на вхід та зчитуються із виходу модуля програмованого інтерфейсу РІО-48.

2. Розроблено пакет прикладних програм для оброблення та графічного представлення зареєстрованих параметрів сигналів акустичної емісії із застосуванням системи автоматичного проектування AutoCad компанії AutoDesk. Пакет програм здійснює графічне представлення у вигляді двовимірних часових залежностей амплітуди, активності, сумарного рахунку, потужності та енергії подій акустичної емісії від навантаження, побудову гістограм амплітудного розподілу сигналів АЕ та розподілу амплітуд і сумарного рахунку по лінійній координаті.

3. Розроблено пакет прикладних програм для оброблення та графічного представлення зареєстрованих параметрів сигналів акустичної емісії з їх представленням у вигляді тривимірних залежностей параметрів сигналів акустичної емісії від навантаження і лінійної координати, а саме амплітуд, активності потужності та енергії подій акустичної емісії.

3 ДІАГНОСТИКА МІЦНОСТІ КОМПАУНДОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОТЕНЗОМЕТРІЇ

При сучасному рівні розвитку технології виробництва полімерів завдання надійного виготовлення їх сполучення з металом залежить від зменшення до безпечної величини напружень, що виникають в полімері при з'єднанні з металом.

З цією метою створюються так звані узгоджені з'єднання, в яких коефіцієнти температурного розширення (КТР) компаунду і металу близькі один до одного у всьому інтервалі температур від кімнатної до температури спаювання.

Так як повного збігу КТР обох матеріалів досягти неможливо, важливо відпрацювати такий режим полімеризації, який би знижував внутрішнє напруження до безпечної величини.

Однак в процесі виготовлення, зберігання і експлуатації спостерігається підвищений вихід бракованих виробів через розгерметизацію і розтріскування герметизованих конструкцій.

У зв'язку з тим, що значна кількість зазначених дефектів відбувалося в умовах заводського зберігання, тобто при кімнатній температурі, тиску і вологості і при відсутності зовнішніх впливів, виникло припущення, що розтріскування компаунда відбувається через значні внутрішні (залишкові) напруження в конструкції виробів, що виникають і накопичуються в процесі їх виготовлення і старіння. Тому було прийнято рішення виміряти ці напруження після деяких технологічних етапів і перевірити ефективність прийнятого режиму полімеризації для зниження величини зазначених напружень.

Серед методів вимірювання тиску (деформацій) найбільш підходящими є поляризаційний і електротензометричний.

Перший - зручний для роботи лише з оптично прозорими тілами,

можливості другого - значно ширше. З огляду на те, що напруження в компаундах корпусів герметичних модулів з'являються внаслідок взаємодії компаунда з герметизованим компонентом, доцільно вимірювати напруження не тільки в компаунді, але і в компонентах.

По викладеним вище міркуванням для вимірювання деформацій в компаунді і герметизованих елементах конструкції використано метод електротензометрії, який був істотно доопрацьований стосовно специфіки досліджуваних виробів.

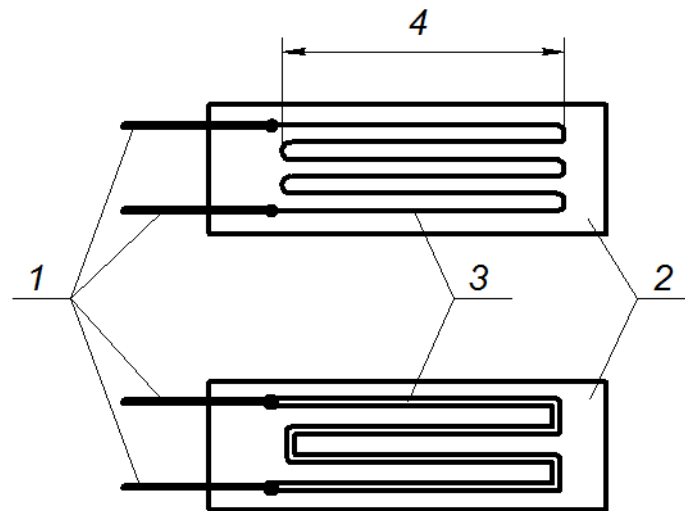
Детальний опис методу електротензометрії, застосовуваної апаратури, технологій препарування а також дослідження, пов'язані з його доопрацюванням, викладені в попередніх роботах виконаних у лабораторії [49-51].

У даному розділі представлені матеріали по дослідженню причин розтріскування компаундів, проаналізовані отримані результати, дані висновки і рекомендації щодо усунення дефектів і проведення пов'язаних з цим робіт.

3.1 Коротка методика тензометрування компаундованих конструкцій і експериментальна установка

Для вимірювання залишкових напружень в компаунді використовувалися дровові тензорезистори двохпетлеві з базою 10 мм, чотирьох-петелеві з базою 5 мм, а також малобазні безпетлеві з базою 1 і 2 мм.

Чутливі елементи петлевих тензорезисторів виконані у вигляді петлеобразної решітки і показані на рис. 3.1.



1 – виводи; 2 – основа; 3 – чутливий елемент; 4 – база

Рисунок 3.1 – Петлеві дротяні і фольгові тензорезистори

Для вимірювання деформації ці резистори наклеювалися на поверхню компаунду.

З огляду на малі габарити і неможливість в ряді випадків використовувати по цій причині тензорезистори звичайних розмірів для вимірювання тиску в компаунді були використані малобазні тензорезистори по спеціально доопрацьованій технології препарування досліджуваних виробів.

Поверхню компаунду препарувати таким чином, що чутливий елемент тензорезистора розташовувався паралельно кромці корпусу герметизованого модуля.

Тензорезистори вимірювали поздовжні деформації, які в нашому випадку повинні бути постійними, незалежними від розміру модуля і приблизно рівними поперечним деформаціям.

З метою зменшення струму живлення малобазних тензорезисторів були внесені зміни в посилюючу апаратуру і використані різні нестандартні прилади.

Принципова електрична схема вимірювання деформацій складається з

двохплечового моста, в якому R_1 активний тензорезистор, а R_2 , R_3 , R_4 - магазини опорів, що знаходяться в приладах або в окремих корпусах (рис. 3.2).

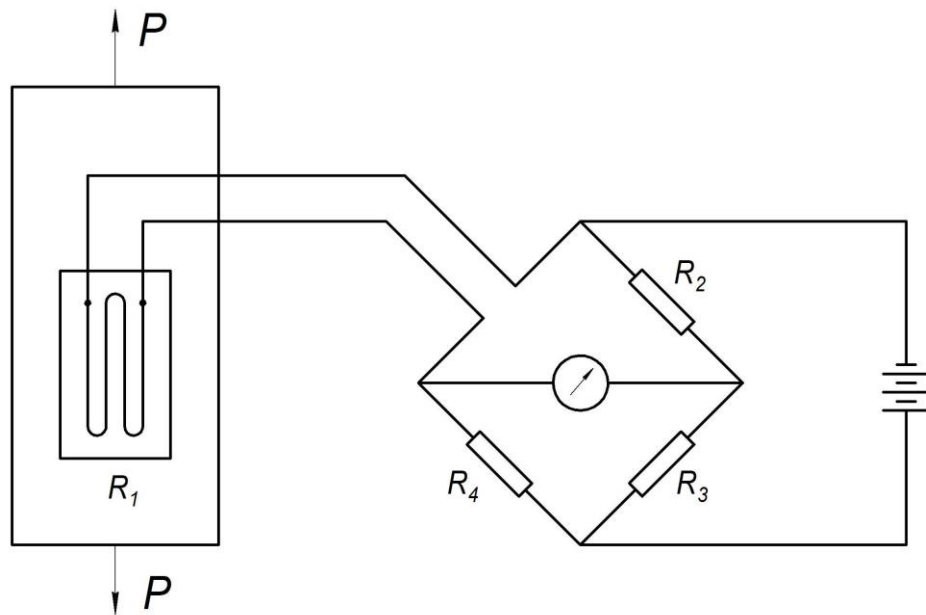


Рисунок 3.2 – Принципова електрична схема вимірювання деформацій

В одну з діагоналей моста включалось джерело живлення, а з іншої – знімався розбаланс попередньо відбалансованого моста, тобто фіксувалися зміни опору активного датчика, які були прямо пропорційні деформації компаунда в місці наклейки тензорезистора.

Для визначення залишкових напружень вимірювання опору датчика проводилися двічі – до розрізання герметика і після його розрізання вздовж осі, коли система герметик-модуль розмикалася і звільнялася від взаємних впливів, що створюють внутрішні напруження в єдиній конструкції.

Величину відносної деформації визначали з виразу:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R_S}, \quad (3.1)$$

де ε – відносна деформація деталі в місці розташування на ній тензорезистора;

ΔR – відносна зміна опору тензорезистора;

S – теплочутливість тензорезистора.

Беручи до уваги, що виміряні деформації не перевищують межі пропорційності досліджуваних матеріалів, можна за законом Гука знайти залишкові напруження:

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (3.2)$$

де σ – напруження;

ε – відносна деформація;

E – модуль пружності першого роду для розглянутого матеріалу.

Для розрізання герметика була створена спеціальна установка, що складається з опорної плити, на якій змонтований електродвигун постійного струму ДРВ 300 з числом обертів від 0 до 7500 за хвилину. Цей двигун через ремінну передачу приводив в обертання стоматологічний гнучкий валик, що закінчується спеціальним тримачем, на якому кріпилися тонкі (товщиною 0,2-0,3 мм) абразивні або алмазні диски.

Обороти електродвигуна, а отже і ріжучих дисків, регулювалися випрямлячем ВСА - 5.

Корпус герметизованого модуля злегка затискався по торцях в лещатах, встановлених на опорній плиті, а різання велося при 6000/7000 об/хв дисків і дуже малій подачі, щоб не викликати нагрівання деталі, що розрізається.

3.2 Дослідження впливу відпалу на величину залишкових напружень в компаундованих конструкціях

Відштамповані вироби з компаунда були розбиті на дві групи (по десять штук в кожній), одна з яких була піддана відпалу за заводською технологією. Обидві групи були препаровані тензорезисторами, а потім

здійснено вимір залишкових напружень після розрізання компаунда по твірній. Результати цього експерименту наведені в таблицях №1 та №2.

Таблиця 3.1 – Виміри залишкових напружень після розрізання компаунда

Номер тензорезистора	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	σ , кг/см ²
1	+0,35	+50,8
2	-0,1	-14,5
3	-3,25	-471
4	-4,2	-610
5	-5,5	-798
6	-2,2	-319
7	-2,4	-348
8	-7,6	-1100
9	-6,1	-885

Таблиця 3.2 – Залишкові напруження після розрізання компаунда після технологічного відпалу

Номер тензорезистора	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	σ , кг/см ²
1	+0,25	+36,2
2	-0,4	-58
3	0	0
4	+0,1	+14,5
5	-0,105	-15,2
6	+0,05	+7,25
7	-0,5	-72,5
8	-1	-145

Дані таблиць 3.1 і 3.2 свідчать, що відпал істотно знижує залишкові напруження.

Після герметизації модулів були підготовлені дві групи виробів по 20-25 штук в кожній, причому перша з них була препарована тензорезисторами до відпалу, а друга - після відпалу за заводською технологією.

Так як герметизованні з'єднання представляють єдину статично невизначену систему, то знаходження внутрішніх напружень, що виникають в результаті з'єднання компаунда з металом, можна здійснити, вимірявши опір тензорезистора в з'єднанні герметик-конструкція і при звільненні їх один від одного.

Таким чином залишкові деформації і напруження в компаунді, які також характеризують деформації і напруження в сполученні деталь-компаунд визначали наступним чином: спочатку вимірювали опір тензорезисторів, наклеєних по колу компаунда, потім розрізали компаунд, звільняючи, таким чином, модуль від зв'язку з компаундом; після розрізання компаунда знову вимірювали опір тензорезистора, який повинен був змінитися якщо конструкція звільняючись від зв'язку змінювала свої лінійні розміри.

Ця зміна опору і характеризувала внутрішні напруження в з'єднанні компаунд-модуль. Результати експерименту представлені в таблицях 3.3 і 3.4.

Таблиця 3.3 – Внутрішні напруження в компаунді від взаємодії з конструкцією модуля до відпалу

Номер тензорезистора	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	σ , кг/см ²
1	0	0
2	+0,4	+58
3	-0,2	-29
4	0	0
5	-0,5	-72,5
6	+3	+435
7	+1,05	+153
8	+0,25	+36,5
9	-1	-145
10	-5,5	-798
11	-9,5	-1300
12	0	0
13	+0,5	+72,5
14	-17,45	-2520
15	0	0
16	-44,5	-645

Таблиця 3.4 – Внутрішні напруження в компаунді від взаємодії з конструкцією модуля після відпалу

Номер тензорезистора	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	σ кг/см ²
1	0	0
2	-10,8	-1565
3	0	0
4	0	0
5	+0,6	+87
6	-0,05	-7,25
7	+0,1	+14,5
8	+5	+363
9	-1	+145
10	+1,65	+250
11	0	0
12	-7,5	-1090
13	+0,3	+43,5
14	+0,15	+21,7
15	+0,25	+36,3
16	+0,3	+43,5
17	-15,1	-2185
18	-22,85	-3320
19	0	0

Далі вирішено було перевірити наявність залишкових напружень в матеріалі компаунда шляхом розрізання останньої уздовж твірної як показано по викладеній вище методиці.

Результати цього експерименту наведені в таблицях 3.5 і 3.6.

Таблиця 3.5 – Залишкові напруження в невідпалених компаундах після розрізання

Номер тензорезистора	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	σ кг/см ²
1	+3	+435
2	-0,5	-72,5
3	-0,6	-87
4	-0,85	-123
5	-1	-145
6	-1,75	-252
7	-1,85	-268
8	-7,7	-1116
9	-0,6	-87

Таблиця 3.6 – Залишкові напруження в відпалених компаундах після розрізання

Номер тензорезистора	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	σ кг/см ²
1	-0,1	-14,5
2	-0,1	-14,5
3	-0,45	-65,3
4	-0,25	-36,3
5	+0,4	+58
6	+0,25	+36,2
7	-1,6	-232
8	0	0
9	-0,6	-87
10	-0,5	-72,5
11	-0,25	+36,2

Перш ніж аналізувати отримані дані наведемо взяті з літератури [23, 29, 39] деякі характеристики міцності компаундів (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Деякі характеристики компаундів

Найменування матеріалу	Модуль пружності E (кг/см ²)	Границя міцності при розтязі σ_B^p (кг/см ²)	Границя міцності при стиску σ_B^c (кг/см ²)	Коефіцієнт температурного розширення α (від 20 до 100° С)	Границя текучості σ_T (кг/см ²)
Сплав 29	(1,8-1,9)10 ⁶	4500-5000	4500-5000	(45-50)10 ⁻⁷	3860
Сплав 29НК	1,48 10 ⁶			(46-52)10 ⁻⁷	3860
ЭС-5	0,625 10 ⁶	380-500	8500	(49±1)10 ⁻⁷	-
Сплав ЭС-8	0,645 10 ⁶	770	10800	(48±1)10 ⁻⁷	-
Сплав №46	0,63 10 ⁶	905	10900	(47±1)10 ⁻⁷	-
Сплав С-49-2	0,63 10 ⁶	300-900	5000-20000	(52±1)10 ⁻⁷	

Як видно з таблиці, міцність сплавів на розтяг приблизно в 12 разів нижче їх міцності на стиск і, таким чином, слід, по можливості, не допускати дій розтягуючих зусиль на компаунд. Дані представлені в таблицях 4.3 – 4.6 свідчать про великий розкид деформацій в компаунді, а також про можливості дії розтягуючих зусиль на компаунд.

Дійсно, деформації кришки зі знаком «+» свідчать про збільшенні опору датчика після розрізання компаунда, означають, що довжина і ширина компаунда збільшилися тобто до розбивки компаунда діяли напруження розтягу і, отже, прагнучи розширитися конструкція модуля розтягувала компаунд, викликаючи в ньому небажані напруження розтягу. Деформації кришки зі знаком «-» свідчать про те, що компаунд стискав модуль викликаючи в ньому окружні напруження стиску.

Розглядаючи отримані величини відносних деформацій і вважаючи в першому наближенні, що в компаунді виникають деформації того ж порядку, можна орієнтовно вважати, що за величиною напруження в компаунді в стільки разів менше напруження модуля, у скільки разів модуль пружності компаунда менше модуля пружності матеріалу модуля.

Таким чином, можна вважати, що напруження розтягу в компаунді іноді можуть досягати 150 кг/см^2 , а стиску – 1500 кг/см^2 .

Порівнюючи дані таблиць 3.3 і 3.4, а також 3.5 і 3.6 можна прийти до висновку, що прийнятий режим відпалу, зменшуючи залишкові напруження в компаунді не настільки значно впливає на величину внутрішніх напружень від взаємодій компаунда з металом після операції полімеризації.

Порівняння коефіцієнтів температурного розширення сполучення матеріалів зокрема пари 29НК ($\alpha = 46-52 \times 10^{-7}$) і компаунда С-49-2 ($\alpha = 52 \pm 1 \times 10^{-7}$) показує, що можливі випадки коли α компаунда більше α металу і при охолодженні після сполучення компаунд, прагнучи зменшити свої розміри на більшу величину, ніж 29НК, буде відчувати розтяг з боку конструкції герметизованого модуля.

Щоб уникнути напруження розтягу необхідно контролювати величини коефіцієнта температурного розширення партій 29 НК і компаунда, що йдуть на виготовлення герметичних модулів і відповідно до отриманих даних підбирати узгоджувальні партії, де α компаунда $< \alpha$ металу.

Інший шлях зниження напруження розтягу в компаунді складається в ретельному відпрацюванні режиму відпалу після операцій сполучення, не допускаючи тривалих перерв між цими операціями.

3.3 Вимірювання внутрішніх напружень шляхом тензометрування компаунда

Для перевірки викладених у попередньому розділі міркувань про величини і знаки напружень в компаунді, було прийнято рішення про безпосереднє тензометрування компаунду, незважаючи на труднощі реалізації цього рішення, пов'язані зі складністю кріплення тензорезисторів на компаунді і необхідністю від'єднання частини компаунда без пошкодження тензорезистора і компаунда.

Тензорезистори НБ-1 наклеювалися на злегка затерту поверхню компаунда за схемою, в напрямку для вимірювання поздовжніх напружень, які в нашому випадку теоретично рівні поперечним і однакові для всіх точок компаунда.

Після закінчення технологічного процесу наклеювання тензорезисторів на компаунд, останні заливалися шаром парафіну, в якому після охолодження продряпували вузьку (шириною 0,3 мм) канавку.

У цю канавку наливалася плавикова кислота, яка і витравлювала компаунд по ходу канавки.

Вимірювання опору тензорезистора проводилися двічі: до нанесення парафіну на компаунд і після випадання витравленої частини компаунда з модуля. Зміна опору датчика і характеризувала величину внутрішніх деформацій (напружень), що існували в компаунді, спаяному з металом. Вимірювання напруження в компаунді описаним чином виконувалось після операції спаювання до відпалу і після відпалу, а також на повністю готових модулях, тобто після заключної операції з виготовлення виробу, а також на модулях, взятих із заводського складу.

Результати тензометрування компаунда представлені в таблицях 3.8–3.10. Паралельно з цим відбувався вимір внутрішнього напруження в компаундах готових модулів шляхом розрізання компаунда.

Таблиця 3.8 – Внутрішні напруження в компаунді модуля після операції спаювання до відпалу

Номер датчика	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	σ кг/см ²
1	-0,5	-99
2	-29	-1800
3	-1	-63
4	+1,3	+82
5	+1,5	+94

Таблиця 3.9 – Внутрішні напруження в компаунді модулів після операції спаювання і після відпалу

Номер датчика	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	σ кг/см ²
1	-14	-870
2	+0,6	+38
3	+0,4	+25
4	-0,8	-50
5	-1,2	-75
6	-7	-440
7	+1,3	+82

Таблиця 3.10 – Внутрішні напруження в компаунді модулів після закінчення технологічного процесу їх виготовлення

Номер датчика	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	σ кг/см ²
1	+0,8	+50
2	-8	-500
3	+0,5	+33
4	+1,4	+89
5	-11	-690
6	+1,6	+100

3.4 Оцінка міцності компаунда герметизованого модуля

Для оцінки міцності компаунда модуля необхідно порівняти виміряні напруження з допустимими.

Для крихких матеріалів, яким є компаунд, допустиме напруження на розтяг зазвичай знаходять за формулою

$$[\sigma]_p = \frac{\sigma_B^P}{n}, \text{ або } [\sigma]_p = \frac{\varepsilon^B \sigma_B^P}{K_\sigma \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}, \quad (3.3)$$

де n – коефіцієнт запасу міцності;

$[\sigma]_p$ – допустиме напруження на розтяг;

σ_B^P – границя міцності на розтяг;

ε^B – масштабний фактор - коефіцієнт, що враховує зменшення границі міцності зі збільшенням розмірів деталі;

K_σ – ефективний коефіцієнт концентрації напружень;

K_1 – коефіцієнт, що враховує точність визначення діючих на деталь зусиль і напружень, а також точність розрахункових схем;

K_2 – коефіцієнт, що враховує однорідність матеріалу і якість технології виготовлення деталі;

K_3 – коефіцієнт, що враховує підвищення запасу міцності для відповідальної деталі з метою збільшення терміну служби і надійності її в експлуатаційній умовах.

Аналогічна формула існує для призначення величини допустимих напружень на стиск.

Коефіцієнти, що входять у вираз для допустимого напруження, від яких залежить коефіцієнт запасу зазвичай знаходять дослідним шляхом і в даному випадку вони невідомі.

У німецькій електровакуумній промисловості до другої світової війни допустиме напруження компаунда на розтяг становило 1/20 границі міцності. В даний час, звичайно, до цієї цифри слід поставитися критично з огляду на

більш досконалі конструкції і технології спаювання. Тим не менш ефективний коефіцієнт концентрації напружень навряд чи може бути прийнятий менше, ніж 2, тому що огляд компаундів готових виробів під мікроскопом показує наявність досить глибоких подряпин, вибоїн, відколів, а іноді навіть мікротріщин на компаунді.

Слід врахувати також вплив кінцевого ефекту, де має місце концентрація місцевих напружень на кінцях сполучень і де з цієї причини напруження можуть бути в 2-3 рази вище, ніж в середині компаунда. Якщо до цього додати неоднорідність матеріалу, розкид міцності, закладених навіть в технічних умовах на поставку (табл. 3.7), похибки вимірювань, недостатню вивченість проблеми в цілому, відповідальність виробів, то слід призначати допустимі напруження не більше ніж 1/3 - 1/5 від границі міцності компаунда на розтяг, тобто коефіцієнт запасу міцності повинен лежати в межах 3-5.

Таким чином, допустимі напруження на розтяг для компаундів ЕС-5 і С-49-2, розраховані за коефіцієнтом запасу міцності, що дорівнює 3 не повинно перевищувати 100 кг/см^2 , а за коефіцієнтом запасу міцності, що дорівнює 5 - не більше 60 кг/см^2 .

Так як компаунд набагато краще опирається стиску, то приймаючи для стиску коефіцієнт запасу міцності рівний 3 знаходимо для компаунда ЕС – 5:

$$[\sigma]_c = \frac{\sigma_B^c}{n} = \frac{8500}{3} = 2830 \text{ кг/см}^2;$$

для компаунда С-49-2:

$$[\sigma]_c = (1700-7000) \text{ кг/см}^2.$$

Якщо тепер порівняти виміряні напруження (табл. 3.5-3.10), то видно, що в деяких випадках вони перевершують допустимі, причому найбільшу небезпеку представляють напруження розтягу. Великий розкид величин вимірюваних на обмеженому числі виробів напружень дозволяє припустити, що в усьому обсязі виробів, що випускаються заводом, можуть існувати внутрішні напруження ще більшої величини, що перевершують навіть

границю міцності компаунда на розтяг, які і приведуть до руйнування компаунда в модулі.

3.5 Можливі шляхи зниження внутрішніх напружень

Проведені дослідження дозволяють намітити кілька шляхів для ліквідації розтріскування компаунда.

1. Огляд під мікроскопом готових виробів, а також модулів після полімеризації компаунда показав, що у різних екземплярів виробів поверхню компаунда оброблено не однаковою мірою: на деяких екземплярах були видні глибокі ризики, відколи, а іноді і мікротріщини, що може бути наслідком низької якості компаунда, ударів при транспортуванні і недостатньо високого класу чистоти поверхні.

Звідси впливає необхідність контролю стану поверхні компаунда до сплачування або перед зварюванням з модулем і відбракуванням компаунда, що має значні концентрації напружень.

2. З огляду на викладене в першому пункті, а також можливість втрати стійкості або згину компаунда при його установці з перекосом, через згинальні моменти, що можуть виникнути під час зварювання корпусів, а також в експлуатаційних умовах, доцільно збільшити товщину компаунда.

3. Розгляд температурних коефіцієнтів розширення матеріалів, наведених у таблиці 3.7, показує, що в наслідок розкиду їх характеристик нерідкі випадки сполучення таких пар, в яких при охолодженні утворюються напруження розтягу в компаундній частині.

Звідси впливає необхідність введення на заводі контролю КТР партій модулів, або металу, а також КТР призначеного на вварки компаунда з тим, щоб утворювати сполучені пари, які розрізняються КТР не більше $1 \cdot 10^{-7}$, причому для виключення напруження розтягу має виконуватися вимога, щоб КТР металу був більше КТР компаунда. Слід зазначити, що реалізація цього

напрямку, ймовірно, буде важкою з огляду на те, що за паспортними даними КТР компаунда С-49-2 дорівнює $(52 \pm 1 \cdot 10^{-7})$, а 29 НК – $(46-52) \cdot 10^{-7}$.

4. Порівняння міцності і КТР матеріалів, представлених в таблиці 3.7, показує, що для сплаву 29 НК більш відповідним є №46, у якого границя міцності на розтяг в 3 рази вище, ніж границя міцності на розтяг у компаунда ЕС-5 і С -49-2, а температурний коефіцієнт лінійного розширення менше на $(4-5) \cdot 10^{-7}$ ніж у компаундів С -49-2 і ЭС-5.

5. Величина напружень, що виникають в сполученнях залежить не тільки від абсолютних величин КТР сполучених матеріалів, але і від режиму теплової обробки готових сполучень. Вибираючи режим відпалу в одній і тій же комбінації сполучених матеріалів можна отримувати різні напруження не тільки за величиною, а й за знаком і, таким чином, керувати розподілом напружень навіть в погано узгоджених парах.

Відпрацювання режиму відпалу може проводитися за допомогою поляриметра з піччю, який відрізняється від звичайного тим, що на шляху поляризованого світла між поляризатором і аналізатором знаходиться горизонтальна трубчаста піч. Обидва торці печі закриваються прозорими кварцовими пластинами. Такий пристрій дозволяє вимірювати напруження в компаунді, вміщеному в піч, в будь-який момент при охолодженні сполучень (або, якщо необхідно, нагріву) і відпрацьовувати режим відпалу, домагаючись безпечного рівня напруження.

6. Хоча прийнятий в даний час режим відпалу після сполучення і не знижує до необхідної величини рівень внутрішнього напруження в компаундах, становище ускладнюється тим, що між операціями сполучення і відпалу може утворитися значна часова перерва, протягом якої має місце, а, можливо, і наростає дія високих напружень.

Звідси бажана по можливості менша часова перерва між операціями сполучення і наступного відпалу.

7. Чи існують і інші, можливо менш прийнятні в даному випадку, шляхи

зниження внутрішніх напружень при здійсненні сполучень:

- а) застосування компаундного припою у вигляді суспензії з металевим порошком, із досить близьким КТР;
- б) спай компаунда з іншим, пластичним металом, здатним деформуватися при зміні температури;
- в) металізація поверхні компаунда, тобто отримання тонкого, здатного деформуватися прошарку металу;
- г) поступовий перехід від металу до основного компаунду за допомогою проміжних компаундів з різними КТР.

3.6 Висновки до розділу 3

1. Розроблено методику тензометрування, виготовлено установку і проведені вимірювання внутрішніх напружень в корпусах і компаунді електронних герметизованих модулів.

2. Внутрішні напруження в компаунді і модулях, що виникають після сполучення мають великий розкид за величиною і можуть бути стискаючими або розтягуючими через великий розкид температурних коефіцієнтів розширення сполучених матеріалів.

3. Розтріскування компаунда модулів відбувається, в основному, від дії напружень розтягу, тому що міцність компаунда С-49-2 на розтяг може бути в 60 разів нижче його міцності на стиск.

4. Поверхня компаундів готових модулів має велике число сильних концентраторів напружень, які істотно знижують їх міцність.

5. Застосовувані в даний час режими відпалу значно зменшують внутрішні напруження в компаундах, але не знижують до необхідного рівня напруження в компаундованих модулях.

4 ДІАГНОСТИКА МІЦНОСТІ КОМПАУНДОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Відомі роботи [52-63] з акустико-емісійного дослідження складових керамічних конденсаторів під впливом механічних навантажень, таких як розтяг і згин. В результаті цих робіт були отримані методики неруйнівного контролю та діагностування міцності матеріалів складових керамічних конденсаторів.

Однак, як було зазначено вище, поломки самих конденсаторів відбуваються в основному не від механічних, а від термічних навантажень, особливо при перепадах температур. Тому в даній роботі вирішувалося завдання діагностування міцності готових виробів в експлуатаційних умовах, тобто при термоциклюванні від $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Конденсатори типу К 15-5 представляють собою керамічний диск, заполімеризований компаундом (рис. 4.1). Через різницю в коефіцієнтах лінійного розширення кераміки і компаунда при зміні температури в поєднанні кераміка-компаунд виникають температурні напруження, які при особливо несприятливих поєднаннях цих коефіцієнтів і механічних характеристик обох матеріалів можуть призвести до розтріскування компаунда або кераміки і руйнування конструкції з'єднання.

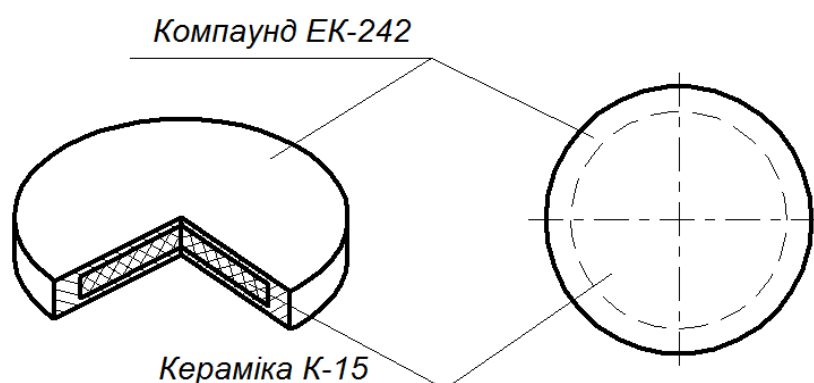


Рисунок 4.1 – Конструкція керамічного компаундованого конденсатора
К 15-5

З попередніх робіт інших авторів [17-19] встановлено, що руйнування кераміки в конструкції К 15-5 при термоциклюванні відбувається від її розтягування в напрямку поздовжніх осей дисків і по ділянкам, нахиленим до торців дисків під кутом 45° , через стиск в радіальних напрямках від дії компаунда.

Візуальним оглядом конденсаторів, які зруйнувалися при термоударі, було встановлено, що розтріскування кераміки відбувається в шарах, що прилягають до компаунду, з розташуванням тріщин в площинах, паралельних торцевим або нахиленим до них під кутом 45° . На рис. 4.2, 4.3 наведені фотографії розтріскування конденсаторів.

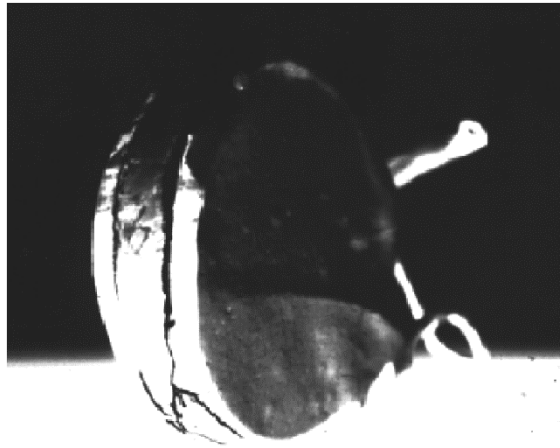


Рисунок 4.2 – Вид руйнування кераміки конденсатора

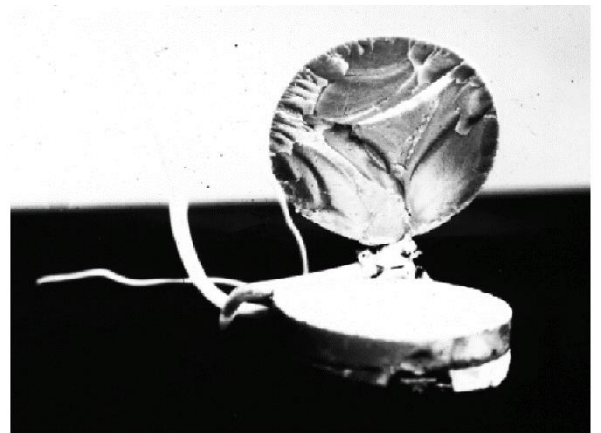
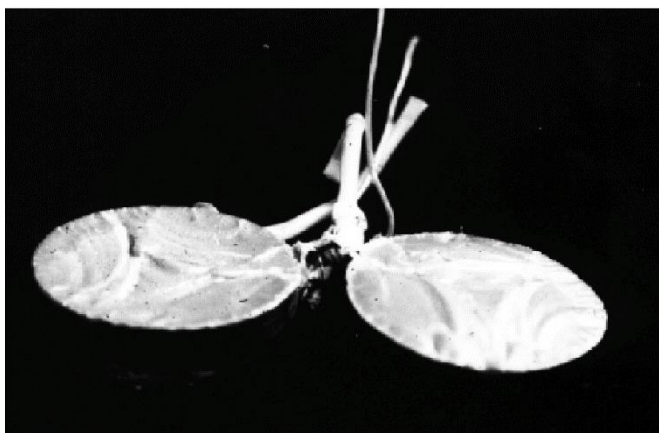


Рисунок 4.3 – Рельєф поверхні руйнування конденсатора

Також було виявлено [18], що значення напружень і деформацій в кераміці і компаунді значно залежать від розкиду фізико-механічних характеристик α , μ , E , як кераміки, так і компаунда. Так наприклад, можливий розкид коефіцієнтів лінійного розширення для кераміки і компаунда α_1 і α_2 може перебувати в межах від -30% до + 50%. Що призводить до розкиду розрахункових значень напружень більш ніж на 300%. Наявність цих та багатьох інших важко прогнозованих факторів ускладнює розрахунок міцнісного стану з'єднання.

Більш того, якщо на отримані розрахунковим шляхом поля напружень, що виникають в кераміці і компаунді, накласти реальну структуру матеріалу, то можна визначити, використовуючи коефіцієнт інтенсивності напружень [17], що в місцях максимальних напружень починають розвиватися дефекти розміром до 4мкм.

У даній ситуації для забезпечення міцності як окремих особливо відповідальних деталей, так і партій виробів, слід було вдатися до створення методики неруйнівного контролю міцності нероз'ємних з'єднань різних композиційних матеріалів кераміки і компаунда на основі методу акустичної емісії, який відображаючи фізико-механічні властивості матеріалів, дозволяє стежити за станом їх мікроструктури і фіксувати її порушення ще на ранніх етапах розвитку.

При розробці методики неруйнівного діагностування і контролю міцності натурних конденсаторів в зазначених експлуатаційних умовах довелося знайти відповіді на наступні питання.

1. Які температурні межі працездатності датчиків АЕ, які складаються із сталевих, керамічних, пластмасових деталей, також здатних випромінювати сигнали АЕ при термоциклюванні?

2. Як позбутися сигналів АЕ, що випромінюються утворюєтьсям на конденсаторі і датчику льоду при переході від позитивних температур до від'ємних і назад?

3. Як розділити сигнали АЕ, що випромінюються керамічною основою

конденсатора, від сигналів, що випромінюються компаундною оболонкою, як при нормальних, так і при негативних температурах?

4.1 Забезпечення працездатності датчика акустичної емісії АЕ П113 при термоциклюванні

До проведення випробувань компаундованих керамічних конденсаторів при термоциклюванні необхідно було перевірити роботу датчиків акустичної емісії в умовах низьких від'ємних і високих додатних температур, при яких вони самі можуть стати джерелами сигналів АЕ, бо містять у своїй конструкції деталі з різнорідних матеріалів: металу, пластмаси, кераміки, компаунда, з відмінними значеннями коефіцієнтів лінійного розширення.

З цією метою датчик П113, підключений до комп'ютерного вимірювального комплексу ВК АЕ, містився в термокамеру Файтрон 3526/51. Джерелом сигналів АЕ служив імітатор сигналів АЕ СМА-04 (рис. 4.4).

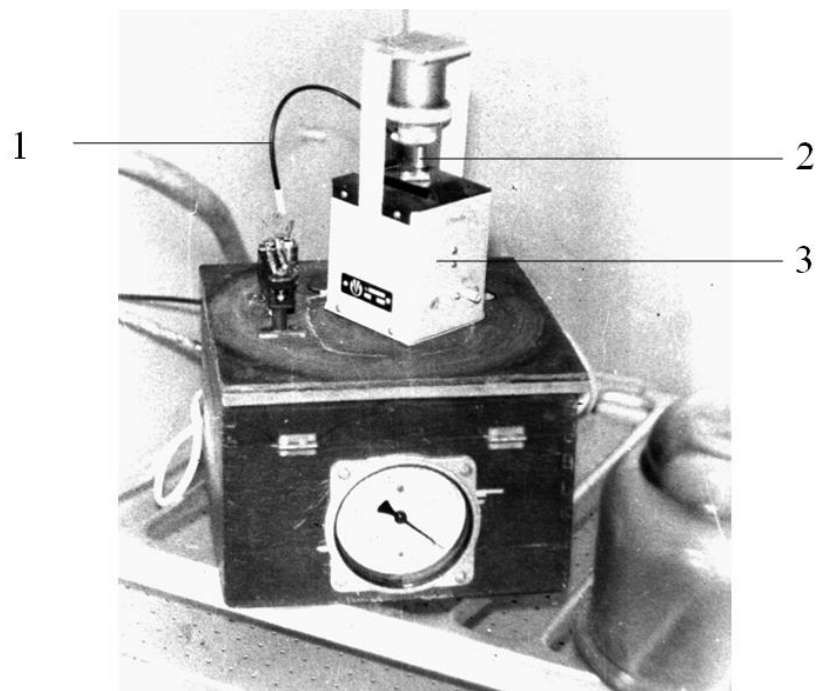


Рисунок 4.4 – Апаратура для перевірки працездатності датчика АЕ П113:

1 - кабель датчика АЕ, 2 - датчик АЕ, 3 - імітатор сигналів АЕ СМА-04

Випробування показали, що датчик П113 працює в інтервалі температур від $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, графік залежності чутливості датчика від температури показаний на рис. 4.5.

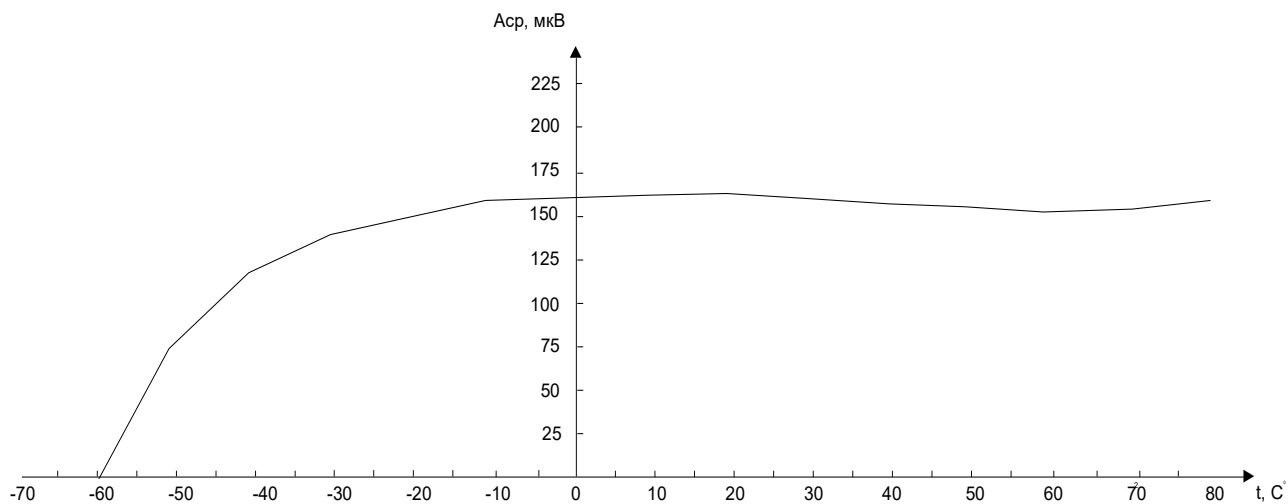


Рисунок 4.5 – Залежність чутливості датчика П113 від температури

Однак при температурах від $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ на показання датчика впливали перешкоди, пов'язані з різницею в коефіцієнтах лінійного розширення матеріалів складових частин самого датчика рис. 6.

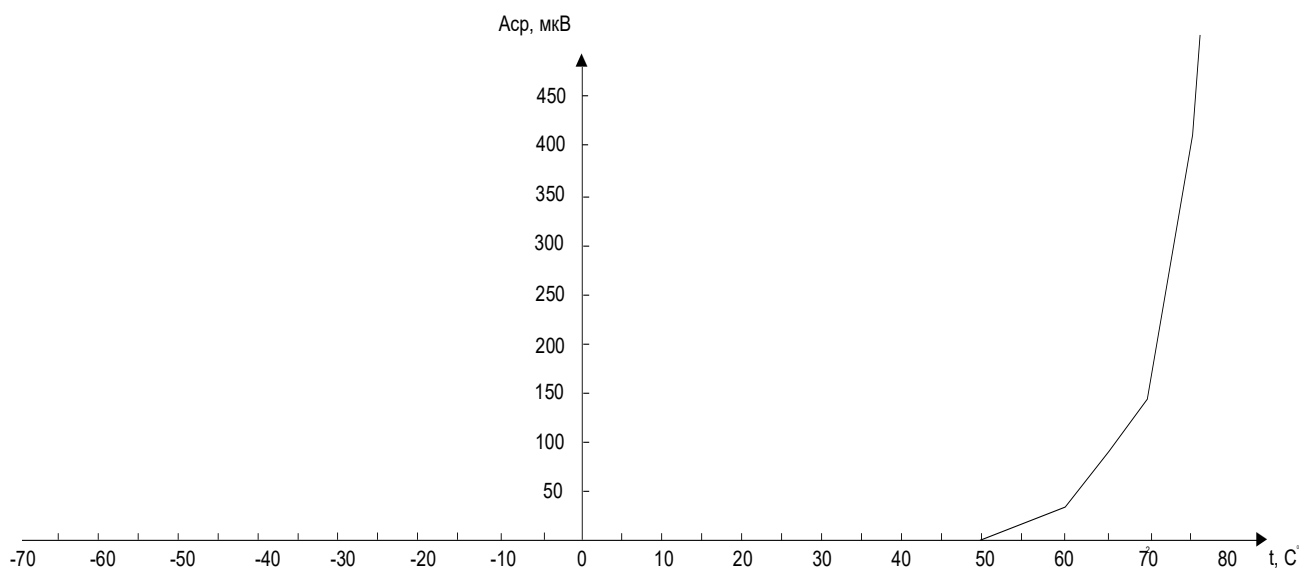


Рисунок 4.6 – Залежність появи сигналів АЕ датчика від температури

При переході до від'ємних температур через це ж, а також і через обмерзання в районі $+ 5^{\circ} \text{C}$ також виникали помилкові сигнали АЕ.

Щоб не піддавати датчики дії несприятливих для них температур, було вирішено випробувати передачу сигналів АЕ через хвилеводи.

4.2 Перевірка можливості використання хвилеводів

При проведенні експерименту з використанням хвилеводів з різних матеріалів для випробувань користувалися рекомендаціями, викладеними в монографії [64].

Випробуванню піддавалися такі хвилеводи: кварцові, свинцеві, титанові, бронзові і залізні.

З цих хвилеводів найбільш ефективним виявився сталевий розміром $500 \times 25 \times 30 \text{ мм}$ (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 - Визначення коефіцієнтів загасання для хвилеводів з різних матеріалів на проходження сигналів АЕ при частотах $0,02-2,0 \text{ МГц}$ і вхідному сигналі випромінювача 300 мВ

Тип хвилеводу	Розмір хвиле вода	Сигнал на виході, мВ	Коефіцієнт затування, К
Кварц	$l = 500, d = 10$	126	0,42
Свинець	$l = 500, d = 10$	30	0,1
Титан	$l = 500, d = 10$	129	0,43
Бронза	$l = 500, d = 10$	90	0,3
Сталь	$l = 500, d = 10$	210	0,7
Сталь	$l = 500, b = 30, h = 25$	240	0,8

Апаратура для випробувань хвилеводів показана на рис. 4.7.

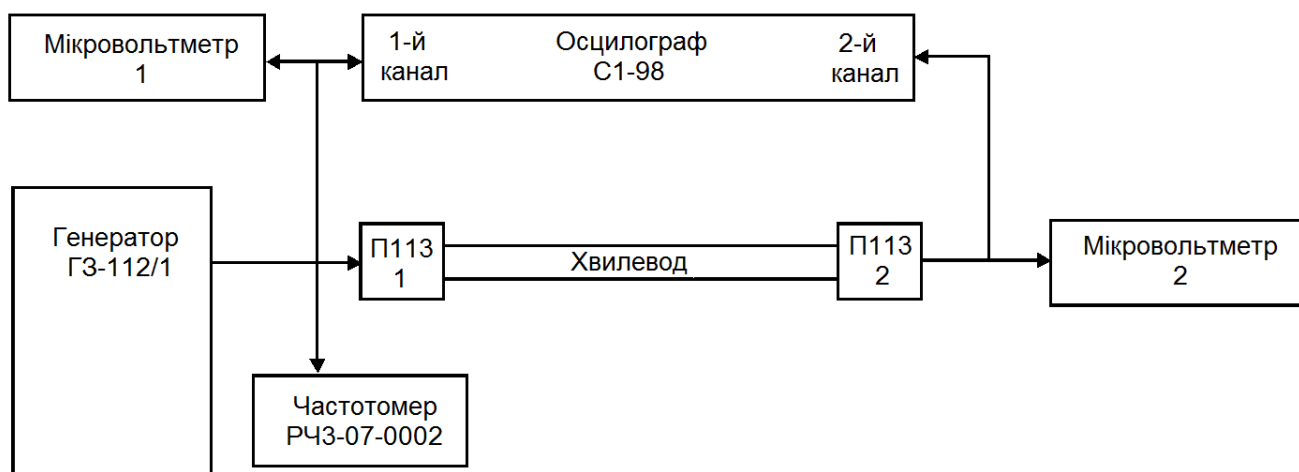


Рисунок 4.7 – Блок-схема установки для вимірювання коефіцієнта згасання сигналу АЕ в хвилеводі

Експеримент проводився в нормальних умовах за допомогою генератора ГЗ-112/1, використаного для збудження перетворювача-датчика П113 (1). Другий перетворювач П113 (2) виконував роль приймача сигналів АЕ.

Перетворювачі кріпилися до торців хвилеводу через контактний шарклей ВК-1.

Радіоімпульси з генератора подавалися на перетворювач П113 (1), що працює в режимі випромінювання. Останній порушував у хвилеводі сигнали АЕ, які сприймалися перетворювачем П113 (2).

Контроль радіоімпульсів, які подавалися з генератора здійснювався: по напрузі - мікрівольтметром (1), по частоті - частотоміром, за формою сигналу - осцилографом (канал 1). Вихідні сигнали перевірялися: за рівнем - мікрівольтметром (2), за формою - осцилографом (канал 2).

Використання осцилографа дозволяло порівнювати форму сигналів на вході і виході, зрушення фаз, коефіцієнт загасання, що вносяться хвилеводами і контактними шарами.

Параметри хвилеводу підбиралися таким чином, щоб в ньому порушувалися тільки поздовжні хвилі.

Коефіцієнт проходження визначався за формулою:

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

де K - коефіцієнт проходження,

$U_{\text{вих}}$ - показання мікрвольтметр на виході системи,

$U_{\text{вх}}$ - показання мікрвольтметра на вході системи.

Випробування показали, що при переході від позитивних температур до від'ємних і назад все ж виникають перешкоди за рахунок обмерзання хвилеводу і контактних шарів. Для усунення обмерзання проводилися випробування при зануренні хвилеводу з перетворювачем в ванну зі спиртом. Однак цей метод виявився неефективним, тому що спирт розчиняє контактний шар, через що втрачається акустична зв'язок.

Проте застосування хвилеводів дозволяє розширити межі температурного діапазону за рахунок збільшення додатних температур до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ і від'ємних до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, якщо не враховувати АЕ при утворенні льоду.

4.3 Розробка і виготовлення допоміжних пристосувань для підвищення ефективності та достовірності проведених випробувань

Для усунення перешкод, пов'язаних з утворенням і розтріскуванням льоду при переході від додатних температур до від'ємних і назад, було вирішено поставити експеримент в вакуумі. Для цього була виготовлена невелика вакуумна установка (рис. 4.8), всередині якої розміщувався випробуваний об'єкт із закріпленими на ньому датчиком АЕ і датчиком температури.

Ця установка містилася в термокамеру Файтрон. Вакуумний насос забезпечував підтримку рівня розрідження в камері (740 мм.рт.ст.), при якому був відсутній лід.

Термоциклювання здійснювалося при температурах від $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і назад, по термодатчику, установленому всередині вакуумної камери. При

цих умовах не з'являлося обмерзання і датчик нормально працював у всьому діапазоні температур від $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

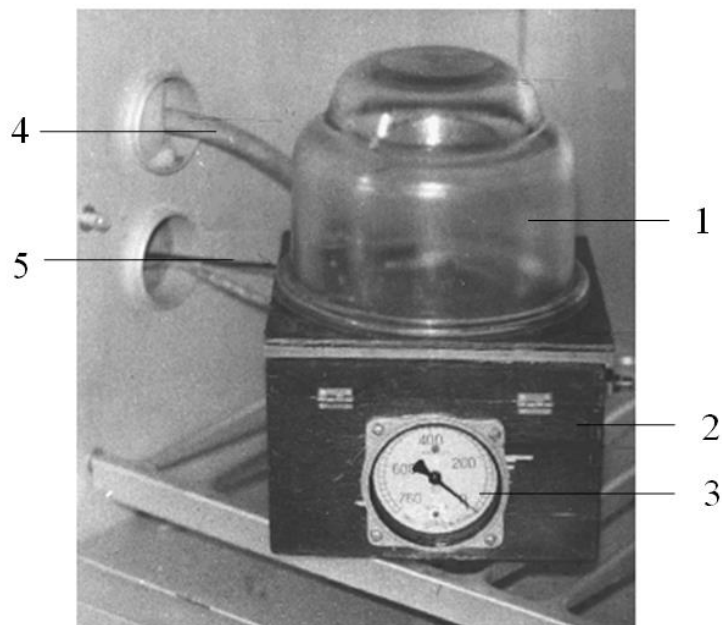


Рисунок 4.8 – Вакуумна установка: 1 - вакуумна камера, 2 - основа вакуумної камери, 3 - вакуумметр, 4 - вакуумний шланг, 5 - кабель датчика АЕ

Нажаль, цей метод вимагав багато часу на проведення термоциклювання, тому що перехід від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ у вакуумній камері відбувався протягом 180-190 хв.

Звичайно, при бажанні цей процес можна було б прискорити, вводячи в вакуумну камеру нагрівальну і охолоджуючу системи, однак це вимагало б подолання нових труднощів.

4.4 Визначення робочої смуги частот сигналів АЕ, що випромінюються при руйнуванні зразків кераміки і компаунда.

При проведенні цього експерименту зразки кераміки К-15 і компаунда ЕК-242 встановлювалися консольно в спеціальному тестовому пристосуванні (рис. 4.9).

температурі піддавалися по 30 зразків кераміки і компаунда при різних смугах пропускання частот вимірювального комплексу ВК АЕ.

Проведені випробування показали, що для дослідження керамічної складової краще використовувати датчик П113 (0,5-1,0) і смугу робочих частот комплексу АЕ - 650-1000 кГц, а для дослідження компаундною складової - датчик П113 (0,2-0,5) з смугою робочих частот комплексу АЕ - 130-300 кГц.

Аналогічним чином проводилися випробування на руйнування 30 зразків кераміки і компаунда при від'ємних температурах. При охолодженні зразків, починаючи з температури $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ з'являлися сигнали акустичної емісії, що доходять до суми подій, що дорівнює 200 одиницям для керамічних зразків, і 120 - для компаундних. Ці сигнали при сталій температурі зникали через 5-6 сек. Навантаження і руйнування зразків проводилося до досягнення температури $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ після припинення сигналів акустичної емісії, викликаних впливом від'ємних температур. Тут також як і при кімнатній температурі виявилось, що для контролю керамічних зразків краще використовувати датчик П113 (0,5-1,0) з пропускнуою здатністю 650-1000 кГц, а для компаундних - датчик П113 (0,2-0,5) з пропускнуою здатністю 130-300 кГц.

Таким чином, результати проведених в різних температурних умовах випробувань, представлені в таблиці 4.2 і таблиці 4.3 дозволили встановити, що для запису і дослідження сигналів АЕ, що йдуть від керамічної і компаундної частини конденсатора у всьому діапазоні експлуатаційних температур найкраще користуватися двома датчиками: П113 (0,5-1,0) і П113 (0,2-0,5), кожен з яких включений автономно, через фільтр, до окремого приладу АЕ.

Таблиця 4.2 - Результати випробувань зразків кераміки К-15 і компаунда ЕК-242 на руйнування

Умови випробувань	Датчик П113 (0,5-1,0 МГц)		Датчик П113 (0,2-0,5 МГц)	
	Сума подій (мінімум-максимум)			
	Кераміка	Компаунд	Кераміка	Компаунд
При кімнатній температурі	8-114	1-10	1-52	42-350
При температурі -50°C	1-67	1-33	2-37	1-79

Таблиця 4.3 - Частотне розділення сигналів АЕ складових конденсатора К15-5

Матеріал	Кераміка К-15	Компаунд ЕК-242
Робоча смуга частот (кГц)	650-1000	130-300

Надалі виявилось можливим замість двох датчиків АЕ використовувати один - широкосмуговий П113 (0,2-2,0 МГц), сигнали якого передавалися на два прилади АФ-15, один з яких (у складі ВК АЕ) налаштовувався на смугу частот 650-1000 кГц і контролював керамічну частину конденсатора, а другий - на пропускання смуги частот 150-300 кГц і контролював компаундну частину.

Після вирішення проблем, пов'язаних із забезпеченням роботи датчиків АЕ в діапазоні температур + 60 °С - -50 °С, розділенням сигналів АЕ, що випромінюються від керамічної і компаундної, складових конденсатора і позбавленням від льоду приступили до запису корисних сигналів акустичної емісії при термоциклюванні натурних конденсаторів К15-5. Ці конденсатори мають номінальну постійну напруга 50 кВ, номінальну ємність 470пФ, допустиму реактивну потужність 10 Вт, масу 80г.

4.5 Акустико-емісійне дослідження компаундованих керамічних конденсаторів в умовах термоциклювання

Перші 10 конденсаторів піддалися термоциклювання у вакуумній камері при температурах $+60\text{ }^{\circ}\text{C} \dots -50\text{ }^{\circ}\text{C}$ із застосуванням хвилеводу, датчика П113 (0,2-2,0 МГц) і двох акустико-емісійних приладів АФ-15 у складі ВК АЕ (рис. 4.10).

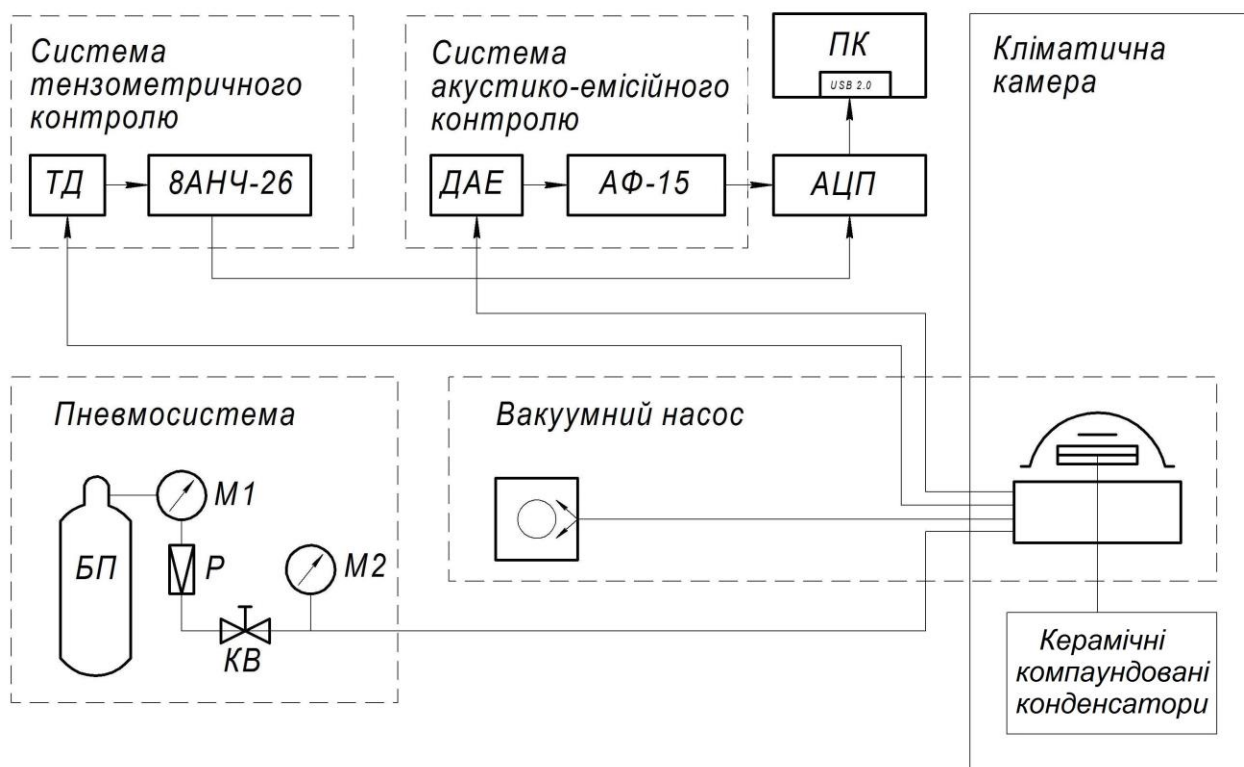


Рисунок 4.10 – Апаратура для випробування керамічних компаундованих конденсаторів К 15-5 термоциклюванням

Цей експеримент показав, що для всіх конденсаторів в області додатних температур сигнали АЕ відсутні і з'являються лише при температурі $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ і нижче. Це дало підставу подальші випробування проводити в діапазоні від кімнатних температур до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ без застосування вакуумної камери і хвилеводів, а виникачі сигнали АЕ від обмерзання

датчика і конденсатора при температурі близько $+ 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ просто не враховувати і не реєструвати, що значно спростило експеримент і скоротило час на його проведення.

У подальших експериментах з'єднаний кабелем датчик АЕ через попередній підсилювач САА-06 підключався до двох приладів АФ-15, один з яких був налаштований на прийом сигналів АЕ лише компаундної частини, а інший – керамічної частини конденсатора. Обидва прилади синхронізувалися за часом.

Термоударам в термокамері піддавалися 30 штук конденсаторів К15-5. Середні значення параметрів АЕ (суми осциляцій, сума подій, максимальні амплітуди при перших трьох термоударах зведено в таблицю 4.4. та рис. 4.11.

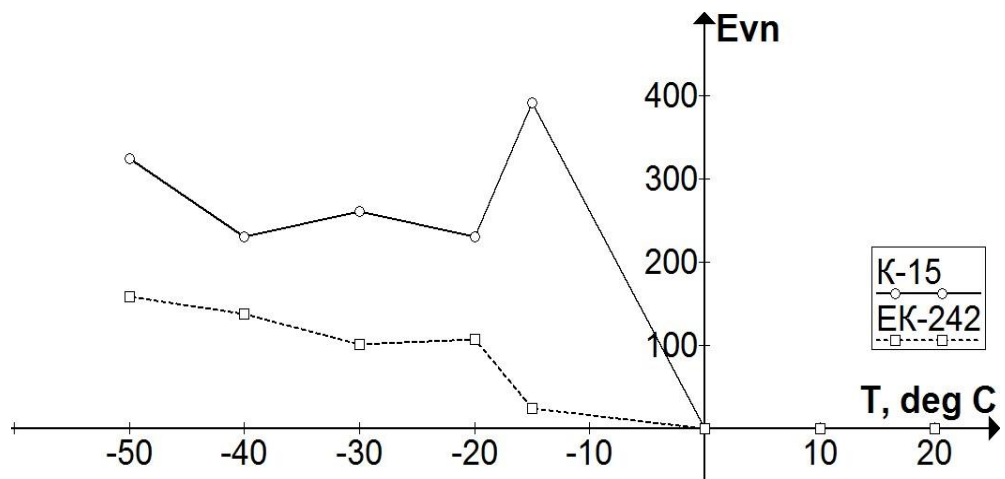
Аналіз матеріалів, що містяться в цих таблицях, показує, що сигнали АЕ набагато сильніше проявляються в керамічної частини конденсатора, ніж в компаундній, вони відсутні у всьому діапазоні додатних температур і починають з'являтися приблизно з температури $-12 - -15 \text{ }^{\circ}\text{C}$, досягаючи максимуму при найбільшому значенні негативної температури $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Слід зазначити, що після витримки протягом 10-15 секунд при заданій температурі сигнали припинялися у всіх 30 конденсаторів. При зміні температури від $- 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до кімнатної сигнали АЕ не виявлялися.

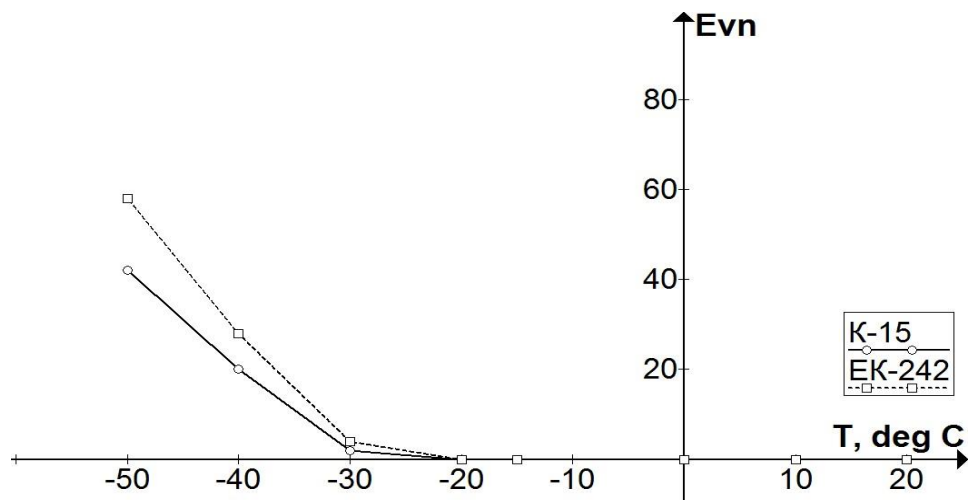
При другому термоударі сигнали АЕ не спостерігалось приблизно до $-30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а при більш низьких температурах їх прояв було в 5-10 разів слабшим, ніж при першому термоударі. Це свідчить про прояв ефекту Кайзера, а значить, про малість хибних сигналів і про міцність випробовуваних конденсаторів.

Таблиця 4.4 - Середні значення параметрів сигналів АЕ, отримані при термоциклюванні партії конденсаторів К 15-5

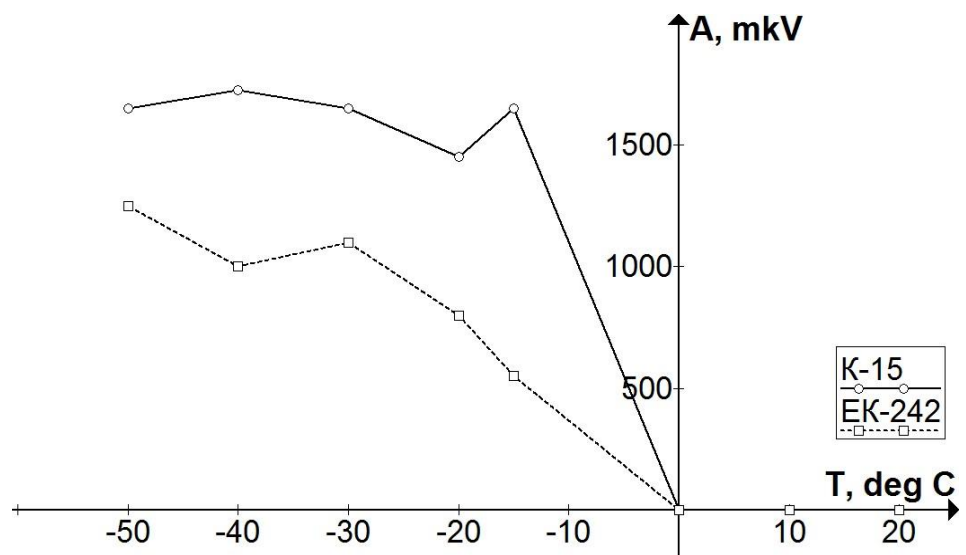
Т°С	Складові конденсатора К 15-5					
	Кераміка К-15			Компаунд ЭК-242		
	Сума осциля- цій, імп.	Сума подій, імп.	Макси- мальна амплітуда, мкВ	Сума осциля- цій, імп.	Сума подій, імп.	Макси- мальна амплітуда, мкВ
1-й термоудар						
+20	0	0	0	0	0	0
+10	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
-15	1773	392	1650	193	25	550
-20	1678	231	1450	356	107	800
-30	1312	261	1650	472	101	1100
-40	1920	230	1725	651	138	1000
-50	2360	324	1650	835	158	1250
2-й термоудар						
+20	0	0	0	0	0	0
+10	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
-15	0	0	0	0	0	0
-20	0	0	0	0	0	0
-30	2	2	50	20	4	100
-40	50	20	100	86	28	150
-50	382	42	200	338	58	200
3-й термоудар						
+20 - -50	0	0	0	0	0	0



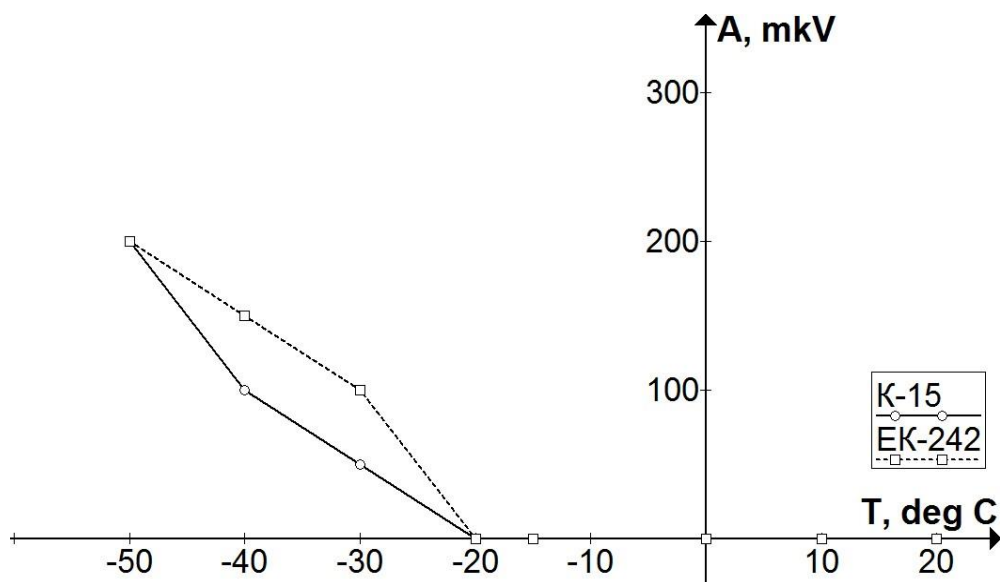
a)



б)



B)



г)

Рисунок 4.11 – Параметри акустичної емісії виміряні протягом двох температурних циклів: загальна кількість подій для циклу 1 (а) та 2 (б); максимальна амплітуда для циклу 1 (в) та 2 (г)

4.6 Розробка способу неруйнівного діагностування і контролю міцності нероз'ємних з'єднань кераміки і компаунда при термоциклюванні від +60 °С до –50°С.

Випробування 30 керамічних компаундують конденсаторів при термоциклюванні від + 60°С до –50°С в 100 циклах виявили ряд фактів, які були використані при розробці методики неруйнівного діагностування і контролю міцності нероз'ємних з'єднань кераміки і компаунда.

Для більшості тестованих конденсаторів, які витримали випробування без руйнування, акустична емісія мала характер описаний в п.5.1.7. Після сильного прояву сигналів АЕ при першому термоциклі і приблизно в 10 разів слабше при другому, при третьому і наступних термоциклах сигнали АЕ практично не виникали до кінця випробувань, що свідчило про прояві ефекту Кайзера і міцність нероз'ємного з'єднання кераміки та компаунда, що так

само було підтверджено контролем їх електричних параметрів.

Однак на одному з конденсаторів на 69-му термоциклів з'явилися сигнали АЕ при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, а ще через 3 термоудара сплески АЕ мали місце також і при зростанні температури від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ще через 4 термоудара електричні параметри цього конденсатора істотно відхилилися від обумовлених в технічних умовах і він був визнаний дефектним, а на 81-му термоциклі він зруйнувався.

Також було виявлено два дефектних конденсатора, у яких при першому термоударі в ході зниження температури до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ сигнали АЕ виявлялися спочатку як у нормальних конденсаторів, проте при зростанні температури від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ спостерігалися сплески сигналів АЕ кераміки, що викликало припущення про наявність тріщини. При продовженні термоциклів один з них зруйнувався на 4-му термоударі, а інший – на 8-му.

З отриманих матеріалів випливає, що реєструючи сигнали АЕ при випробуванні нероз'ємного з'єднання кераміка - компаунд, можна сказати міцним чи ні є це з'єднання. Критерієм міцності в даному випадку є прояв ефекту Кайзера при термоциклюванні виробів. Це лягло в основу способу неруйнівного діагностування і контролю міцності нероз'ємних з'єднань кераміки і компаунда на прикладі конструкцій керамічних компаундованих конденсаторів К 15-5, експлуатованих в умовах термоциклювання від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Діагностика і контроль міцності конструкцій нероз'ємних з'єднань кераміки і компаунда, що працюють в умовах термоциклювання, проводиться безпосередньо в процесі експлуатації при установці датчика АЕ П113, з пропускною здатністю 0,2-2,0 МГц, на досліджуваний об'єкт, у разі коли є необхідність контролювати відразу декілька конструкцій, датчик АЕ підключається до хвилеводу, якому забезпечується акустичний контакт з усіма контрольованими об'єктами. Далі датчик АЕ підключається до вимірювального приладу АЕ і в діапазоні частот, зазначених у табл. 5.3,

проводиться реєстрація параметрів сигналів АЕ. При цьому:

1) прояв ефекту Кайзера, тобто відсутність сигналів АЕ після перших двох термоударів свідчить про нормальний міцний стан конструкції;

2) якщо на n-му термоциклі знову з'являються сигнали АЕ, співрозмірні із сигналами, отриманими при першому циклі, то це є попередженням про початок процесу катастрофічного руйнування і така конструкція буде зруйнована через 5-10 циклів;

3) якщо при підвищенні температури від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ з'являються сплески сигналів АЕ, то це свідчить про наявність і розвиток тріщини в конструкції.

В останніх двох випадках конструкція визнається дефектною.

В якості вимірювального приладу АЕ, використовуваного для контролю міцності конструкцій може бути застосований портативний акусто-емісійний прилад ПАЕВ-1. При цьому робоча смуга частот приладу перебудовується на частоти контролю нероз'ємного з'єднання кераміки та компаунда, зазначені в табл. 5.3.

4.7 Висновки до розділу 4

1. Встановлено температурні межі працездатності датчиків АЕ, які складаються із сталевих, керамічних, пластмасових деталей, також здатних випромінювати сигнали АЕ при термоциклюванні. Датчик П113 працездатний в діапазоні від $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Проведено відбір хвилеводу, який служить для передачі сигналів АЕ від досліджуваного об'єкта в термокамері до датчика П113 поза термокамерою, що дозволило розширити межі температурного діапазону за рахунок збільшення додатних температур до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ і від'ємних до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Для усунення перешкод, пов'язаних з утворенням і розтріскуванням льоду при переході від додатних температур до від'ємних, була створена вакуумна установка. Розрядження, рівне 740 мм.рт.ст., що створюється в установці, перешкоджало утворенню льоду на тестованому зразку і хвилеводі.

4. Здійснено розділення сигналів АЕ, що випромінюються компаундною і керамічною складовими конструкції конденсатора К 15-5, по частоті. Робоча смуга частот сигналів АЕ відповідає: для кераміки К-15 – 650-1000кГц; для компаунда ЕК-242 - 130-300кГц.

5. Запропоновано спосіб неруйнівного діагностування і контролю міцності та попередження небезпечних станів нероз'ємних з'єднань різних композиційних матеріалів на прикладі конструкції компаундованих керамічних конденсаторів К 15-5, які працюють в умовах термоциклювання від $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Показником міцного стану конструкції є прояв ефекту Кайзера після перших двох термоциклів, поява АЕ на n-му термоциклі є попередженням катастрофічного руйнування конструкції через 5-10 циклів.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено пакет програмного забезпечення зчитування та буферизації параметрів сигналів акустичної емісії, які надходять із субблоків амплітуд, суматора та лінійних координат модифікованого приладу акустичної емісії АФ-15 та подаються на вхід та зчитуються із виходу модуля програмованого інтерфейсу РІО-48 та оброблення параметрів сигналів акустичної емісії із застосуванням системи автоматичного проектування AutoCad компанії AutoDesk для графічного представлення у вигляді двовимірних та тривимірних часових залежностей амплітуди, активності, сумарного рахунку, потужності та енергії подій акустичної емісії від навантаження та лінійної координати, побудову гістограм амплітудного розподілу сигналів АЕ та розподілу амплітуд і сумарного рахунку по лінійній координаті.

2. Розроблено методику тензометрування та визначення внутрішніх напружень в компаунді і компонентах герметизованих електронних модулів, які виникають після їх сполучення і мають великий розкид за величиною та можуть бути стискаючими або розтягуючими через великий розкид температурних коефіцієнтів розширення сполучених матеріалів. Визначено, що розтріскування компаунда модулів відбувається, в основному, від дії напружень розтягу, тому що міцність компаунда на розтяг може бути в 60 разів нижче його міцності на стиск.

3. Встановлено, що застосовувані в даний час режими відпалу значно зменшують внутрішні напруження в компаундах, але не знижують до необхідного рівня напруження в компаундованих модулях. Також виявлено, що поверхня компаундів готових модулів має велике число сильних концентраторів напружень, які істотно знижують їх міцність.

4. Встановлено температурні межі працездатності датчиків АЕ, які складаються із сталевих, керамічних, пластмасових деталей, також здатних

випромінювати сигнали АЕ при термоциклюванні. Датчик П113 працездатний в діапазоні від $+50^{\circ}\text{C}$ до -50°C . Проведено відбір хвилеводу, який служить для передачі сигналів АЕ від досліджуваного об'єкта в термокамері до датчика П113 поза термокамерою, що дозволило розширити межі температурного діапазону за рахунок збільшення додатних температур до $+90^{\circ}\text{C}$ і від'ємних до -60°C .

5. Для усунення перешкод, пов'язаних з утворенням і розтріскуванням льоду при переході від додатних температур до від'ємних, була створена вакуумна установка. Розрядження, рівне 740 мм.рт.ст., що створюється в установці, перешкоджало утворенню льоду на тестованому зразку і хвилеводі.

6. Здійснено розділення сигналів акустичної емісії, що випромінюються компаундною і керамічною складовими конструкції керамічного компаундованого конденсатора, по частоті. Робоча смуга частот сигналів АЕ відповідає: для кераміки К-15 – 650-1000кГц; для компаунда ЕК-242 - 130-300кГц.

7. Запропоновано спосіб неруйнівного діагностування і контролю міцності та попередження небезпечних станів нероз'ємних з'єднань різних композиційних матеріалів на прикладі конструкції компаундованих керамічних конденсаторів К 15-5, які працюють в умовах термоциклювання від $+60^{\circ}\text{C}$ до -50°C . Показником міцного стану конструкції є прояв ефекту Кайзера після перших двох термоциклів, поява АЕ на n-му термоциклі є попередженням катастрофічного руйнування конструкції через 5-10 циклів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Камбург В. Г. Моделирование температурных полей в сложных микромодулях, герметизируемых компаундом / В. Г. Камбург, С. А. Григоренко, И. И. Ковтун // Вісник Технологічного університету Поділля. – Хмельницький : ХНУ, 2000. – Част.3. – Спец. випуск. №6. – С.10-13
2. Камбург В. Г. Влияние температуры на механическую прочность пассивных электронных компонентов, герметизируемых компаундом / В. Г. Камбург, И. И. Ковтун, С. А. Григоренко // Надежность и качество. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. – С.348-351.
3. Ройзман В. П. Розрахунок напружень в системі компаунд-електронний елемент при термоударах / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, С. А. Петрашук // Вісник Технологічного університету Поділля. – Хмельницький : ТУП, 2002. – №1. – С. 189-195
4. Ройзман В. П. Ідентифікація фізико-механічних характеристик полімерних матеріалів / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, С. А. Петрашук // Вісник Технологічного університету Поділля. – Хмельницький : ТУП, 2002. – №.4 – Ч.1. – С.18-25
5. Ройзман В. П. Забезпечення термоміцності пасивних електронних елементів в вузлах з загальною герметизацією компаундом / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, С. А. Петрашук // Вісник Технологічного університету Поділля. – Хмельницький : ТУП, 2002. – №.6 – Ч.1. - С.234-237.
6. Ройзман В. П. Термопрочность компаундированных пассивных электронных элементов / В. П. Ройзман, И. И. Ковтун, С. А. Петрашук // Современные информационные и электронные технологии : тр. третьей междунар. науч.-практ. конференции (СИЭТ 2002). – Одесса: ОАО «Нептун», 2002. – С.145

7. Петрашук С. А. Забезпечення міцності і надійності при термоударах електронних елементів, герметизованих компаундом / С. А. Петрашук, І. І. Ковтун // Підвищення якості, надійності та довговічності технічних систем і технологічних процесів : зб. праць IV міжнар. наук.-техн. конф., 4-11 грудня 2005 р., Шарм ель Шейх, Єгипет. – Хмельницький : ХНУ, 2005. – С. 124-129:

8. Петрашук С. А. Визначення фізико-механічних характеристик полімерних матеріалів методом ідентифікації / Петрашук С. А., Ройзман В. П., Ковтун І. І. // Підвищення якості, надійності та довговічності технічних систем і технологічних процесів : зб. праць VI міжнар. наук.-техн. конф., Хургада, Єгипет. – Хмельницький : ХНУ, 2007. – С. 140-145.

9. Royzman Vilen P. Strength and air-tightness of compounded resistors under thermal impact / Vilen P. Royzman, Svitlana A. Petrashchuk, Igor I. Kovtun // Proceedings of Int. Conf. on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering. COUPLED PROBLEMS. – Ishia, Italy, 2009. – P. 124-131.

10. Petrashchuk Svitlana. Theoretical and experimental evaluation of strain in compounded electronic components under thermal impact / Svitlana Petrashchuk, Igor Kovtun // Science and education : proceedings of International conference, 12 – 22 February 2010, Colombo, Sri Lanka. – Kh.: KHNU, 2010. – С. 79-84.

11. Kovtun I. I. Developing model for stress analysis in sealed electronic units under thermal impact / I. I. Kovtun, S. A. Petrashchuk // Science and education : proceedings of International scientific seminar, 13-20 December 2011 Dubai, UAE. – Kh.: KHNU, 2011. – С. 58-61

12. Royzman V. Calculation of mechanical stresses in adjoint system of electronic component and compound and strength assessment / V. Royzman, S. Petrashchuk, I. Kovtun, A. Lokoshchenko // Journal of Vibroengineering. - Vilnius, 2013. – Vol. 15, Issue 1. – P. 65-71. ISSUE 1. ISSN 1392-8716 (Scopus)

13. Petrashchuk S. Solving Problem of Thermal Conduction for Providing Strength of Electronic Units on Thermal Impacts / S. Petrashchuk, I. Kovtun, A. Voznyak // Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy – Technical and Technological Equipment : MATEC Web Conf, 2016. – Vol. 72, 5 p.

14. Kovtun I. Thermal stress in encapsulated electronic packages / I. Kovtun , S. Petrashchuk, J. Boiko // Proceedings Proc. International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo 2019), Odessa, Ukraine, 2019.

15. Kovtun, I. Stress estimation for encapsulated electronic packages subjected to thermal impacts / Kovtun, I., Petrashchuk, S., Boiko, J. / Proceeding of International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, 2018.

16. Strength of electronic components encapsulated with compound under thermal impacts / J. Boiko, S. Petrashchuk, I. Kovtun, O. Repyuk // Visnyk Universytetu «Ukraina». Informatics, Computer Science and Cybernetics. – Kyiv, 2019. – № 2 (23). – С. 142-150

17. 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.

18. Горбунов Н.И., Цасюк В.В., Орлов Л.Г., Баскин Б.Л. Акустическая эмиссия в процессе деформирования наполненных компаундов на основе эпоксидного связующего // XIV научно-технический межвузовский семинар. - Хмельницкий. - 1988. - С. 73-75.

19. Баскин Б.Л., Горбунов Н.И., Цасюк В.В., Хавкин М.И. Использование акустической эмиссии для контроля керамических элементов высоковольтных конденсаторов // Сб. материалов научно-технического семинара.: Контроль, техническая диагностика и прогнозирование в приборостроении. Тез. докл. -Ленинград. - 1989. - С. 82-83.

20. С.Т. Robertson, “Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics”, Prentice Hall, 2003.

21. Гормаков А.Н., Воронина Н.А. Конструирование и технология электронных устройств приборов. Печатные платы. – Учебное пособие.– Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 164 с.

22. Баканов, Г.Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств / Г.Ф. Баканов, С.С. Соколов, В.Ф. Суходольский. – Academia, 2007. – 368 с.

23. Б.С. Касаткин Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений : Справ. пособие / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов и др.; Отв. ред. Б. С. Касаткин. - Киев : Наук. думка, 1981. - 583 с.

24. Пинчук Л. С. Герметология - Минск: Навука і тэхніка, 1992. – 215 с.

25. Галушко А.И. Внутренние напряжения в герметизирующих компаундах радиоэлектронной аппаратуры. - М.: Советское радио, 1974. - 104 с.

26. Волков В. А. Сборка и герметизация микроэлектронных устройств. - М.: Радио и связь, 1982.- 144 с.

27. Герметизация радиоэлектронной и электротехнической аппаратуры полимерными материалами: Материалы краткосроч. науч.-техн. семинара, 16-17 мая. / Под ред. И. М. Эрлиха. - Л.: ЛДНТП, 1989. - 92 с.

28. Эрлих И. М. Кремнийорганические компаунды для герметизации РЭА: Материалы экспресс-семинара, 15 мая. / Под науч. ред. К. А. Бояджи. - Л.: ЛДНТП, 1991. - 86 с.

29. Готман П. Е., Березин В. Б., Хайкин А. М. Электротехнические материалы: Справочник. - М.: Энергия, 1969. - 544 с.
30. Савинский П.А. Новые герметизирующие материалы, свойства и применение. - Л.: ЛДНТП, 1971. - 18 с.
31. Electronic packaging materials science III: Symposia proc., held Nov.30-Dec.4, 1987 Boston (Ma) Ed.:R.Jaccodine et al. - Pittsburg (Pa): Materials res.soc.. - 1988. - XI, 479 с.
32. Кожевникова И. И. Разработка и исследование эпоксидных заливочных компаундов электротехнического назначения с низкими внутренними напряжениями: Автореф. дис. . канд. техн. наук: 05.09.02 / Ленинград. политехнич. ин-т. - Л., 1990. - 15 с.
33. Герметизация РЭС. Герметизирующие материалы: Учеб. пособие для конструкт.-технолог. фак: Ч.2. – Минск, 1996. - 34с.
34. Фридман Е.И. Герметизация радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1978. – 360 с.
35. Кузнецов О.А., Погалов А.И., Сергеев В.С. Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1990. – 144 с.
36. Гуль В. Е., Кулезяев В. Н. Структура и механические свойства полимеров. - М.: Высшая школа, 1986. - 312 с.
37. Черняк К. И. Эпоксидные компаунды и их применение. - Л.: Судостроение, 1967. - 400 с.
38. Котрубенко Б. П. О ТКР некоторых компаундов, используемых для герметизации.// Микропривод и приборы сопротивления. - Кишинев. - 1967. - с. 280 - 282.
39. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования / Под редакцией Р. Г. Варламова . - М.: Сов. Радио, 1980. - 480 с.
40. Современные композиционные материалы: Пер. с англ. /Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока - М.: Мир, 1970. - 672 с.

41. Металлы и сплавы для электровакуумных приборов. /А.С. Гладков, В.М. Амосов, Ч.В. Копецкий, В.А. Куркин / Под ред. А.И.Шокина. - М.: Энергия, 1969. - 599 с.
42. Тернер С. Механические испытания пластмасс: Пер. с англ. - М.: Машиностроение, 1979. - 144 с.
43. Цасюк В.В. Расчетно-экспериментальные методы исследования механической прочности изделий электронной техники: Дис... канд. Техн. Наук: 05.27.04. - Хмельницкий, 1991. - 236 с.
44. Кан К. Н., Николаевич А. Ф., Шанников В. М. Механическая прочность эпоксидной изоляции. - Л.: Энергия. - 1973. - 148 с.
45. Ройзман В.П, Ковтун И.И. Программно аппаратный комплекс акустической эмиссии // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - Хмельницький. - 1997. - №1. - С. 25-29.
46. Ковтун І.І. Програмно-апаратний комплекс акустичної емісії. // Збірник матеріалів конференції “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”. - Хмельницький. - 1997. - С. 33.
47. Ройзман В. П. Локація небезпечних дефектів методом акустичної емісії / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, А. В. Горошко // Вісник Технологічного університету Поділля. – Ч. 1. – 2002. – № 1. – С. 195–200.
48. Джамп Д. AutoCAD. Программирование: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1992. - 336 с.
49. Бойко Ю. М. Вплив технології формування виводів дискретних компонентів на передачу деформацій від об'єднувальної плати / Ю. М. Бойко, І. І. Ковтун, С. В. Петрашук, Р. А. Тертичний // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. Радіотехніка, електроніка та телекомунікації – Хмельницький : ХНУ, 2018. – №5. – С. 73-78.

50. Ройзман В. П. Забезпечення завадостійкості дротяних малобазних тензорезисторів для вимірювання дійсних значень деформацій виробів електронної техніки / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, О. К. Білик // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - Хмельницький, 2018. – № 6, т. 1. - С. 234-239.

51. Ройзман В. П. Забезпечення завадостійкості дротяних малобазних тензорезисторів для вимірювання дійсних значень деформацій виробів електронної техніки / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, О. К. Білик // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - Хмельницький, 2018. – № 6, т. 1. - С. 234-239.

52. Стокс Р.Дж. Микроскопические аспекты разрушения керамики // Разрушение. - М.: Мир. - 1976. -№ 7. - С. 129-220.

53. Gerberrich W.W. Alteridge D.C.Lessar S.F. Acoustic emission investigation of microscopic ductile fracture // Met.Trans. -1975. - Vol.A. -N2. - S. 52-56.

54. Эванс А.Г., Лэнгдон Т.Г. Конструкционная керамика. - М.: Металлургия, 1980. - 256 с.

55. Evans A.G., Linzer M. Failure prediction in structural ceramics using acoustic emission // J. Amer. Ceram. Soc. - 1973. - 56. - N 11. - P. 575-581.

56. Баскин А.В., Данилов В.В., Хохлова Е.В., Зернов В.Н. Излучение АЭ при микродеформировании корундной керамики // Акустическая эмиссия гетерогенных материалов. - Л. - Академия наук СССР, Ордена Ленина Физико-Технический институт им. Иоффе. - 1986. - С. 82-87.

57. Freiman S.W., McKinney J.R., Smith H.L. Slow crack growth in polycrystalline ceramics // Fracture Mech. Ceram. - New York-London. - 1974. - 2. - P.639-676.

58. Jax P., Hums D. Festekellung und uberwachung beginnender ribbildung und des ribwstums in keramischen werkstoffen mit hilfe der schallemissionsanalyse // Ber. Dtsch. Keram. Ges. - 1974. - 26. - S. 625-630.

59. Баскин Б.Л., Горбунов Н.И., Цасюк В.В., Хавкин М.И. Использование акустической эмиссии для контроля керамических элементов высоковольтных конденсаторов // Сб. материалов научно-технического семинара.: Контроль, техническая диагностика и прогнозирование в приборостроении. Тез. докл. - Ленинград. - 1989. - С. 82-83.

60. Брагинский А.П. Механизмы повреждаемости и прочность гетерогенных материалов // Акустическая эмиссия гетерогенных материалов. - Л. - Академия наук СССР, Ордена Ленина Физико-Технический институт им. Иоффе. - 1986. - С. 123-128.

61. Вайнберг В.Е., Лупашку Р.Г., Кантор А.Ш., Кушнир А.М. Интенсивность акустической эмиссии при трещинообразовании // Проблемы прочности. - 1975. - №9. С. 92-94.

62. Библик И.В., Милешкин М.Б., Музыка Е.И., Палатник М.И. Акусто-эмиссионная диагностика степени поврежденности и прочности полимерных композитных материалов // Акустическая эмиссия гетерогенных материалов. - Л. - Академия наук СССР, Ордена Ленина Физико-Технический институт им. Иоффе. - 1986. - С. 28.

63. Бережинский Л.Т., Панасюк В.В., Стащук Н.Г. Взаимодействие жестких линейных включений и трещин в деформируемом теле. - Киев, 1983. - 238 с.

64. Трипалин А.С., Буйло С.И. Акустическая эмиссия. // Физико-механические аспекты. - Издательство Ростовского университета, - 1986.

ДОДАТОК А

**ПРЕЗЕНТАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИКОНАННЯ
ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ**

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра
телекомунікацій та радіотехніки

Спеціальність
172 Телекомунікації та радіотехніка

МАГІСТЕРСЬКА ДИПЛОМНА РОБОТА

Діагностування міцності компаундованих конструкцій електронної техніки при термоциклюванні

Батовський В.В.

Магістрант, гр. ТРМ-19-2

Слайд 2

Мета, предмет та об'єкт дослідження

Мета дослідження:

Діагностування міцності компаундованих конструкцій електронної техніки при термоциклюванні.

Наукова новизна отриманих результатів:

- визначено характер руйнування компаундованих електронних модулів, який полягає у розтріскуванні герметизуючого компаунда, в основному, від дії напружень розтягу, тому що міцність компаунда на розтяг може бути в 60 разів нижче його міцності на стиск;
- здійснено розділення сигналів акустичної емісії, що випромінюються компаундною і керамічною складовими конструкції компаундованого керамічного конденсатора, новизна чого полягає у відборі частотних діапазонів випромінювання інформативних параметрів акустичної емісії, зокрема сумарного рахунку;
- визначено показник оцінювання міцності стану компаундованої конструкції, яким є прояв ефекту Кайзера після перших двох термоциклів, поява акустичної емісії на n-му термоциклі є попередженням катастрофічного руйнування конструкції через 5-10 циклів.

Об'єкт дослідження:

Однорідні металеві та композитні нематалеві матеріали, які служать основою у виробництві несівних елементів конструкцій виробів електронної техніки.

Предмет дослідження:

Технічний стан виробів електронної техніки що працюють в умовах механічних навантажень.

Завдання дослідження

1. Загальна характеристика матеріалів компандованих конструкцій та їх фізико-механічні властивості під дією термоциклювання.
2. Розробка прикладних програм збору та обробки даних електротензометрії та акустичної емісії.
3. Діагностика міцності компандованих конструкцій електронної техніки методом електротензометрії.
4. Діагностика міцності компандованих конструкцій електронної техніки методом акустичної емісії.

Робота виконувалась в межах науково-дослідної роботи ЗБ-2020 «Неруйнівний контроль, діагностування та прогнозування технічного стану електронних систем методом акустичної емісії в виробів військової і невійськової техніки».

Блок-схема вимірювального комплексу для експериментального дослідження виробів електронної техніки



ТД – тензодатчик;
 8АНЧ-26 – тензометрична станція;
 ДАЕ – датчик акустичної емісії;
 АФ-15 – прилад акустико-емісійний;
 ПК – персональний комп'ютер;
 АЦП – аналого-цифровий перетворювач

Модуль читання даних акустичної емісії

Слайд 5

Функціональний алгоритм програми

Обробка переривання IRQ1:
1. Закінчення програми
Обробка переривання IRQ3:
1. Читання портів
2. Збереження даних в буфері
3. Ведення лічильника переривань
4. Вивід на екран динаміки роботи
Обробка переривання IRQ5:
1. Читання портів
2. Збереження даних в буфері
3. Вивід на екран динаміки роботи
4. Перевірка втрати переривання по лінії IRQ3
Основний цикл:
1. Перевірка буфера клавіатури;
2. Перевірка прапора втрати переривання;
3. Перевірка прапора заповнення буфера;
4. Перевірка прапора неготовності буфера;
5. Збереження заповненого буфера на диск.

Алгоритм налаштування програми

Початок
Налаштування програми:
1. Визначення сегментних адрес двох буферів
2. Визначення розміру буфера
3. Установа кількості байт зчитувальних по перериваннях
4. Позначення прапора і ознаки помилки буфера
5. Визначення відеопам'яті
6. Визначення імені файлу і його handle
7. Перепризначення векторів переривань
8. Програмування контролера переривань, маскування переривань по рівнях 3 і 5
9. Призначення адрес портів
10. Позначення прапора завершення програми

Макроси:
1. Збереження регістрів в стеку
2. Відновлення регістрів із стека
3. Переміщення сегментних регістрів
4. Установа і відновлення векторів переривань

ASCII код:

3 XX XXX

3 – ознака переривання,
 XX – амплітуда,
 XXX – координата джерела AE

5 XXX YYY

5 – ознака переривання,
 XXX – кількість осциляцій,
 YYY – кількість подій

Оброблення та візуалізація даних акустичної емісії

Слайд 6

Структурна схема програми
побудови графіків

Характеристика файлових форматів імпорту та експорту даних

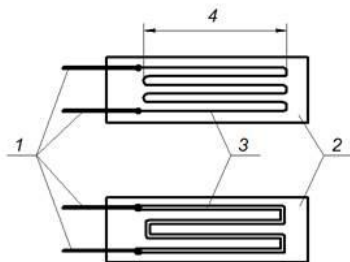
Формат	Опис
DWG	Основний файловий формат системи AutoCAD
DXF	Формат призначений для обміну описом графічної інформації представлений в ASCII коді. Структура файлу як у DWG формату
DXB	Формат представлений в двійковому форматі і призначений для обміну описом графічної інформації
SCR	Формат пакетного файлу призначений для зовнішнього керування системою AutoCAD

Графічні залежності від часу та лінійної координати наступних параметрів акустичної емісії:

1. амплітуда;
2. активність;
3. потужність;
4. енергія.

Методика тезометрування компаундованих конструкцій і експериментальна установка

Петлеві дротяні і фольгові тензорезистори



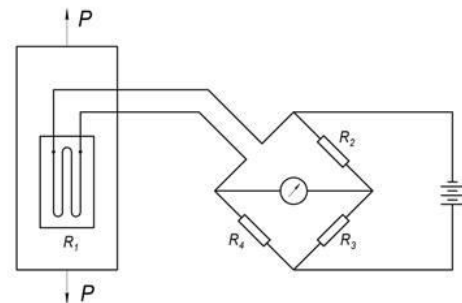
- 1 – виводи;
- 2 – основа;
- 3 – чутливий елемент;
- 4 – база

Величина відносної деформації:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{RS}$$

ε – відносна деформація деталі в місці розташування на ній тензорезистора;
 ΔR – відносна зміна опору тензорезистора;
 S – теплочутливість тензорезистора

Принципова електрична схема вимірювання деформацій



Напруження:

$$\sigma = \varepsilon E$$

σ – напруження;
 ε – відносна деформація;
 E – модуль пружності першого роду дослідженого матеріалу

Виміри залишкових напружень в компаунді

Після розрізання компаунда

Номер тензорезистора	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	σ кг/см ²
1	-0,35	+50,8
2	-0,1	-14,5
3	-3,25	-471
4	-4,2	-610
5	-5,5	-798
6	-2,2	-319
7	-2,4	-348
8	-7,6	-1100
9	-6,1	-885

Після технологічного відпалу

Номер тензорезистора	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	σ кг/см ²
1	+0,25	+36,2
2	-0,4	-58
3	0	0
4	+0,1	+14,5
5	-0,105	-15,2
6	+0,05	+7,25
7	-0,5	-72,5
8	-1	-145

Внутрішні напруження в компаунді від взаємодії з конструкцією модуля

Слайд 9

До відпалу

Номер тензорезистора	$\epsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma, \text{кг/см}^2$
1	0	0
2	+0,4	+58
3	-0,2	-29
4	0	0
5	-0,5	-72,5
6	+3	+435
7	+1,05	+153
8	+0,25	+36,5
9	-1	-145
10	-5,5	-798
11	-9,5	-1300
12	0	0
13	+0,5	+72,5
14	-17,45	-2520
15	0	0
16	-44,5	-645

Після відпалу

Номер тензорезистора	$\epsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma, \text{кг/см}^2$
1	0	0
2	-10,8	-1565
3	0	0
4	0	0
5	+0,6	+87
6	-0,05	-7,25
7	+0,1	+14,5
8	+5	+363
9	-1	+145
10	+1,65	+250
11	0	0
12	-7,5	-1090
13	+0,3	+43,5
14	+0,15	+21,7
15	+0,25	+36,3
16	+0,3	+43,5
17	-15,1	-2185
18	-22,85	-3320
19	0	0

Залишкові напруження в компаундах після розрізання

Слайд 10

В невідпалених компаундах

Номер тензорезистора	$\epsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma, \text{кг/см}^2$
1	+3	+435
2	-0,5	-72,5
3	-0,6	-87
4	-0,85	-123
5	-1	-145
6	-1,75	-252
7	-1,85	-268
8	-7,7	-1116
9	-0,6	-87

У відпалених компаундах

Номер тензорезистора	$\epsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma, \text{кг/см}^2$
1	-0,1	-14,5
2	-0,1	-14,5
3	-0,45	-65,3
4	-0,25	-36,3
5	+0,4	+58
6	+0,25	+36,2
7	-1,6	-232
8	0	0
9	-0,6	-87
10	-0,5	-72,5
11	-0,25	+36,2

Внутрішні напруження в компаунді електронного модуля Слайд 11

Після операції спаювання до відпалу

Номер датчика	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	σ кг/см ²
1	-0,5	-99
2	-29	-1800
3	-1	-63
4	+1,3	+82
5	+1,5	+94

Після операції спаювання і після відпалу

Номер датчика	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	σ кг/см ²
1	-14	-870
2	+0,6	+38
3	+0,4	+25
4	-0,8	-50
5	-1,2	-75
6	-7	-440
7	+1,3	+82

Після закінчення технологічного процесу їх виготовлення

Номер датчика	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	σ кг/см ²
1	+0,8	+50
2	-8	-500
3	+0,5	+33
4	-1,4	+89
5	-11	-690
6	+1,6	+100

Слайд 12

Оцінка міцності компаунда герметизованого модуля

Допустиме напруження на розтяг для крихких матеріалів

$$[\sigma]_p = \frac{\sigma_B^p}{n}$$

$$[\sigma]_p = \frac{\varepsilon^B \sigma_B^p}{K_\sigma \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}$$

n – коефіцієнт запасу міцності;

$[\sigma]_p$ – допустиме напруження на розтяг;

σ_B^p – границя міцності на розтяг;

ε^B – масштабний фактор - коефіцієнт, що враховує зменшення границі міцності зі збільшенням розмірів деталі;

K_σ – ефективний коефіцієнт концентрації напружень;

K_1 – коефіцієнт, що враховує точність визначення діючих на деталь зусиль і напружень, а також точність розрахункових схем;

K_2 – коефіцієнт, що враховує однорідність матеріалу і якість технології виготовлення деталі;

K_3 – коефіцієнт, що враховує підвищення запасу міцності для відповідальної деталі з метою збільшення терміну служби і надійності її в експлуатаційній умовах.

Можливі шляхи зниження внутрішніх напружень в компаунді

Слайд 13

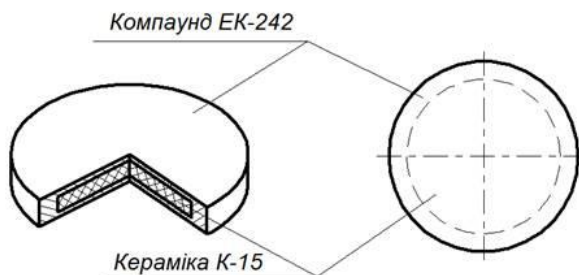
1. Контроль стану поверхні компаунда і відбраковуванням компаунда, що має значні концентрації напружень
 2. З метою зменшення можливості втрати стійкості або згину компаунда доцільно збільшити товщину компаунда.
 3. Введення контролю коефіцієнту теплового розширення (КТР) партій модулів, або металу, а також КТР призначеного на вварки компаунда з тим, щоб утворювати сполучені пари, які розрізняються за КТР не більше ніж на $1 \cdot 10^{-7}$, причому для виключення напруження розтягу має виконуватися вимога, щоб КТР металу був більше КТР компаунда.
 4. Вибір режим відпалу і, таким чином, керування розподілом напружень навіть в погано узгоджених парах.
 5. Зменшення часової перерви між операціями сполучення і наступного відпалу, що запобігає наростанню внутрішніх напружень.
6. Інші шляхи зниження внутрішніх напружень при здійсненні сполучень:
- а) застосування компаундного припою у вигляді суспензії з металевим порошком, із досить близьким КТР;
 - б) спай компаунда з іншим, пластичним металом, здатним деформуватися при зміні температури;
 - в) металізація поверхні компаунда, тобто отримання тонкого, здатного деформуватися прошарку металу;
 - г) поступовий перехід від металу до основного компаунду за допомогою проміжних компаундів з різними КТР.

Діагностика міцності керамічного компаундованого конденсатора К 15-5

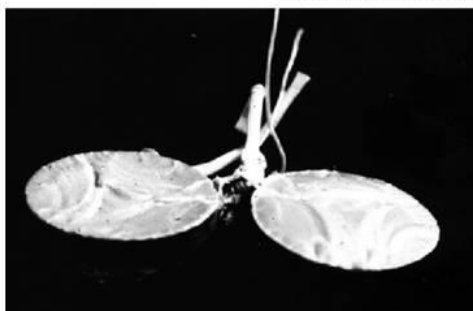
Слайд 14

Конструкція керамічного компаундованого конденсатора К 15-5

Вид руйнування кераміки конденсатора



Рельєф поверхні руйнування конденсатора



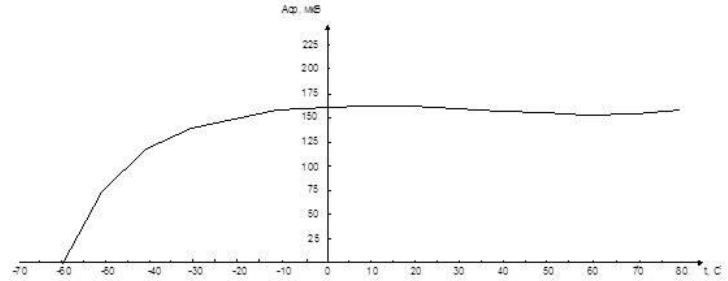
Забезпечення працездатності датчика акустичної емісії АЕ П113 при термоциклюванні

Залежність чутливості датчика П113 від температури

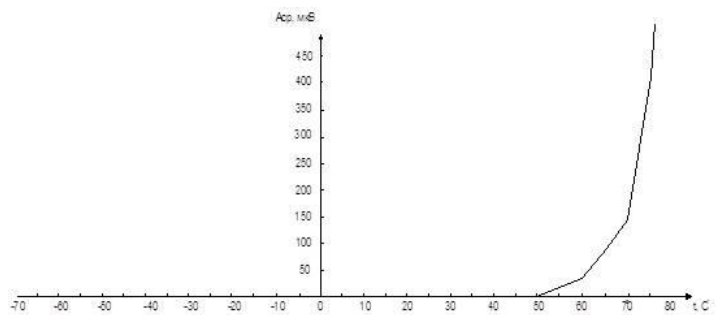
Апаратура для перевірки працездатності датчика АЕ П113:



- 1 - кабель датчика АЕ,
- 2 - датчик АЕ,
- 3 - імітатор сигналів АЕ СМА-04



Залежність появи сигналів АЕ датчика від температури



Перевірка можливості використання хвильоводів

Визначення коефіцієнтів загасання для хвильоводів з різних матеріалів на проходження сигналів АЕ при частотах 0,02-2,0МГц і вхідному сигналі випромінювача 300мВ

Тип хвильовода	Розмір хвильовода	Сигнал на вих оді, мВ	Коефіцієнт загасання, К
Кварц	$l = 500, d = 10$	126	0,42
Свинець	$l = 500, d = 10$	30	0,1
Титан	$l = 500, d = 10$	129	0,43
Бронза	$l = 500, d = 10$	90	0,3
Сталь	$l = 500, d = 10$	210	0,7
Сталь	$l = 500, b = 30, h = 25$	240	0,8

Коефіцієнт проходження:

$$K = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}$$

K - коефіцієнт проходження,
 $U_{\text{вих}}$ - показання мікрвольтметра на виході системи,
 $U_{\text{вх}}$ - показання мікрвольтметра на вході системи

Блок-схема установки для вимірювання коефіцієнта загасання сигналу АЕ в хвильоводі



Вакуумна установка:

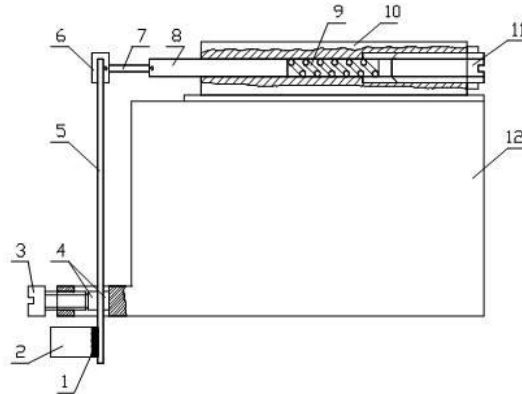


- 1 - вакуумна камера,
- 2 - основа вакуумної камери,
- 3 - вакуумметр,
- 4 - вакуумний шланг,
- 5 - кабель датчика АЕ

Слайд 17

Визначення робочої смуги частот сигналів АЕ, що випромінюються при руйнуванні зразків кераміки і компаунда

Пристрій для навантаження зразків кераміки К-15 і компаунда ЕК-242



- 1 - акустичний шар,
- 2 - датчик акустичної емісії П113,
- 3 - гвинт,
- 4 - фторопластова прокладка,
- 5 - випробуваний зразок,
- 6 - фторопластова петля,
- 7 - тяга, 8 - сердечник,
- 9 - пружина, 10 - електромагніт,
- 11 - регулювальний гвинт, 12 - основа

Результати випробувань зразків кераміки К-15 і компаунда ЕК-242 на руйнування

Умови випробувань	Датчик П113 (0,5-1,0 МГц)		Датчик П113 (0,2-0,5 МГц)	
	Сума подій (мінімум-максимум)			
	Кераміка	Компаунд	Кераміка	Компаунд
При комнатній температурі	8-114	1-10	1-52	42-350
При температурі -50°C	1-67	1-33	2-37	1-79

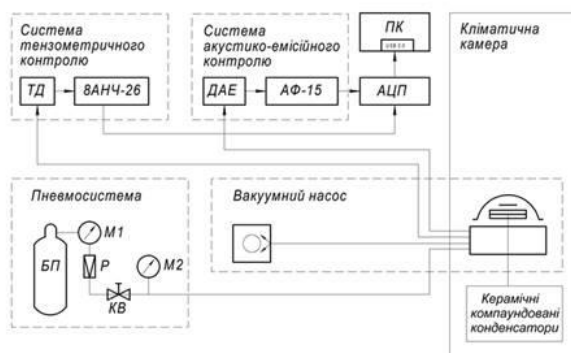
Частотне розділення сигналів АЕ складових конденсатора К15-5

Матеріал	Кераміка К-15	Компаунд ЕК-242
Робоча смуга частот (кГц)	650-1000	130-300

Слайд 18

Акустична емісія при термоциклюванні компаундованих конденсаторів

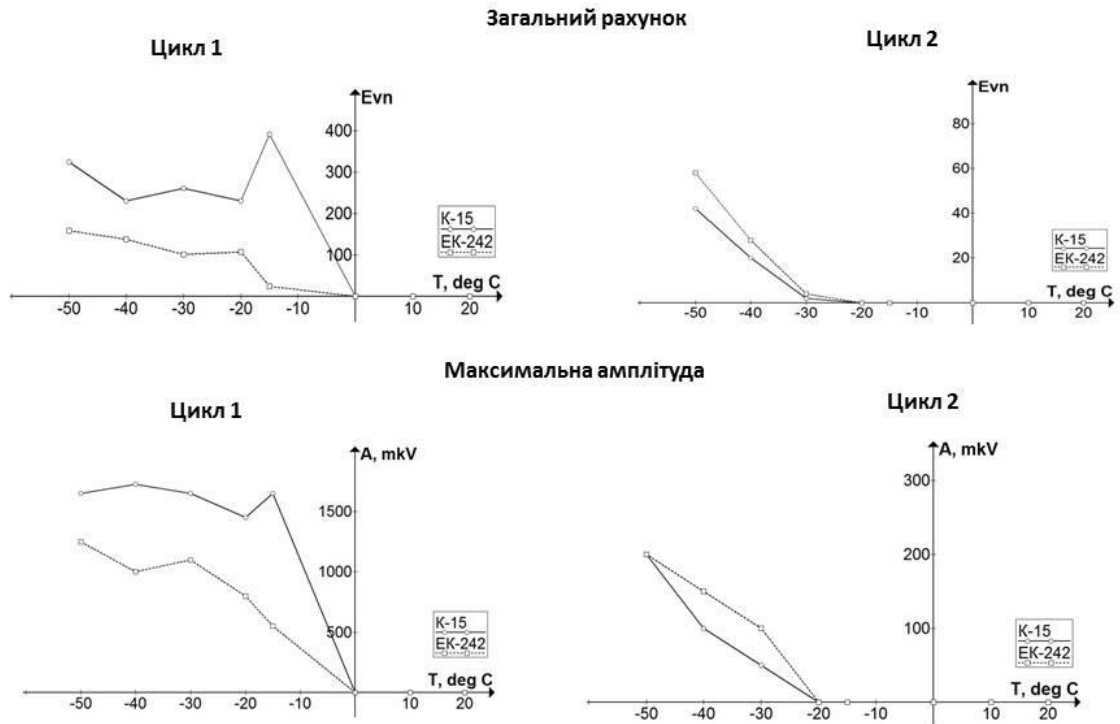
Апаратура для випробування керамічних компаундованих конденсаторів К 15-5 термоциклірованням



Середні значення параметрів сигналів АЕ, отримані при термоциклюванні партії конденсаторів К 15-5

Т:°С	Складові конденсатора К 15-5					
	Кераміка К-15			Компаунд ЕК-242		
	Сума осциляцій, імп.	Сума подій, імп.	Максимальна амплітуда, мкВ	Сума осциляцій, імп.	Сума подій, імп.	Максимальна амплітуда, мкВ
1-й термоудар						
+20	0	0	0	0	0	0
+10	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
-15	1773	392	1650	193	25	550
-20	1678	231	1450	356	107	800
-30	1312	261	1650	472	101	1100
-40	1920	230	1725	651	138	1000
-50	2360	324	1650	835	158	1250
2-й термоудар						
+20	0	0	0	0	0	0
+10	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
-15	0	0	0	0	0	0
-20	0	0	0	0	0	0
-30	2	2	50	20	4	100
-40	50	20	100	86	28	150
-50	382	42	200	338	58	200
3-й термоудар						
+20	0	0	0	0	0	0
-50						

Параметри акустичної емісії виміряні протягом двох температурних циклів



Спосіб неруйнівного діагностування і контролю міцності нероз'ємних з'єднань кераміки і компаунда при термоциклюванні від +60 °С до –50 °С

1. Прояв ефекту Кайзера, тобто відсутність сигналів акустичної емісії після перших двох термоударів свідчить про нормальний міцний стан конструкції;
2. Якщо на n-му термоциклі знову з'являються сигнали акустичної емісії, співрозмірні із сигналами, отриманими при першому циклі, то це є попередженням про початок процесу катастрофічного руйнування і така конструкція буде зруйнована через 5-10 циклів;
3. Якщо при підвищенні температури від –50 °С до –10 °С з'являються сплески сигналів акустичної емісії, то це свідчить про наявність і розвиток тріщини в конструкції.

В останніх двох випадках конструкція визнається дефектною.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено пакет програмного забезпечення зчитування та буферизації параметрів сигналів акустичної емісії, які надходять із субблоків амплітуд, суматора та лінійних координат модифікованого приладу акустичної емісії АФ-15 та подаються на вхід та зчитуються із виходу модуля програмованого інтерфейсу РІО-48 та оброблення параметрів сигналів акустичної емісії із застосуванням системи автоматичного проектування AutoCad компанії AutoDesk для графічного представлення у вигляді двовимірних та тривимірних часових залежностей амплітуди, активності, сумарного рахунку, потужності та енергії подій акустичної емісії від навантаження та лінійної координати, побудову гістограм амплітудного розподілу сигналів АЕ та розподілу амплітуд і сумарного рахунку по лінійній координаті.
2. Розроблено методику тензометрування та визначення внутрішніх напружень в компаунді і компонентах герметизованих електронних модулів, які виникають після їх сполучення і мають великий розкид за величиною та можуть бути стискаюми або розтягуючими через великий розкид температурних коефіцієнтів розширення сполучених матеріалів. Визначено, що розтріскування компаунда модулів відбувається, в основному, від дії напружень розтягу, тому що міцність компаунда на розтяг може бути в 60 разів нижче його міцності на стиск.
3. Встановлено, що застосовувані в даний час режими відпалу значно зменшують внутрішні напруження в компаундах, але не знижують до необхідного рівня напруження в компаундованих модулях. Також виявлено, що поверхня компаундів готових модулів має велике число сильних концентраторів напружень, які істотно знижують їх міцність.
4. Встановлено температурні межі працездатності датчиків АЕ, які складаються із сталевих, керамічних, пластмасових деталей, також здатних випромінювати сигнали АЕ при термоцилюванні. Датчик П113 працездатний в діапазоні від + 50 ° С до -50 ° С. Проведено відбір хвилеводу, який служить для передачі сигналів АЕ від досліджуваного об'єкта в термокамері до датчика П113 поза термокамерою, що дозволило розширити межі температурного діапазону за рахунок збільшення додатних температур до + 90 ° С і від'ємних до -60 ° С.
5. Для усунення перешкод, пов'язаних з утворенням і розтріскуванням льоду при переході від додатних температур до від'ємних, була створена вакуумна установка. Розрядження, рівне 740 мм.рт.ст., що створюється в установці, перешкоджало утворенню льоду на тестованому зразку і хвилеводі.
6. Здійснено розділення сигналів акустичної емісії, що випромінюються компаундною і керамічною складовими конструкції конструкції керамічного компаундованого конденсатора, по частоті. Робоча смуга частот сигналів АЕ відповідає: для кераміки К-15 – 650-1000кГц; для компаунда ЕК-242 - 130-300кГц.
7. Запропоновано спосіб неруйнівного діагностування і контролю міцності та попередження небезпечних станів нероз'ємних з'єднань різних композиційних матеріалів на прикладі конструкції компаундованих керамічних конденсаторів К 15-5, які працюють в умовах термоцилювання від + 60 °С до -50 °С. Показником міцного стану конструкції є прояв ефекту Кайзера після перших двох термоциклів, поява АЕ на n-му термоциклі є попередженням катастрофічного руйнування конструкції через 5-10 циклів.

ДОДАТОК Б
**МАТЕРІАЛИ АПРОБАЦІЇ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ОТРИМАНИХ
У ДИПЛОМНІЙ РОБОТІ**

Міжнародний науковий журнал

**ВИМІРЮВАЛЬНА ТА
ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА
В ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПРОЦЕСАХ**

2020, № 1

**International scientific-technical
journal**

**MEASURING AND COMPUTING
DEVICES IN TECHNOLOGICAL
PROCESSES**

2020, Issue 1

**Хмельницький 2020
Khmelnytskyi 2020**

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
ВИМІРЮВАЛЬНА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

Затверджений як фахове видання (перереєстрація), група «Б»
Наказ МОН 28.12.2019 №1643

Засновано в травні 1997 р.

Виходить 2 рази на рік

Хмельницький, 2020, № 1 (65)

Засновник і видавець: Хмельницький національний університет
(до 2005 р. — Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький)

Наукова бібліотека України ім. В.І. Вернадського <http://nbuv.gov.ua/j-tit/vott>

Журнал включено до наукометричних баз:

РИНЦ http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37653
Index <http://jml2012.indexcopernicus.com/p24781565,3.html>
Copernicus h-індекс 49,97
Google Scholar http://scholar.google.com.ua/citations?user=nwN_nusAAAAJ&hl=uk - індекс 9

Національна бібліотека України ім. В.І. Вернадського <http://nbuv.gov.ua/j-tit/vott>

Головний редактор **Мартинюк В. В.**, д. т. н., професор, завідувач кафедри телекомунікацій та комп'ютерно-інтегрованих технологій Хмельницького національного університету

Заступник головного редактора **Бойко Ю. М.**, д. т. н., професор кафедри телекомунікацій та радіотехніки, начальник науково-дослідної частини Хмельницького національного університету

Відповідальний секретар **Кравчик Ю. В.**, к. е. н., старший викладач кафедри економіки, менеджменту та адміністрування Хмельницького національного університету

Ч л е н и р е д к о л е г і ї

Бармак О. В., д.т.н., **Бедратюк Л. П.**, д.фіз.-мат.н., **Бубулис Алгимантас**, д.т.н. (Литва), **Васілевський О. М.**, д.т.н., **Говорущенко Т. О.**, д.т.н., **Калачинський Томаш**, PhD (Польща), **Косенков В. Д.**, к.т.н., **Коробко Є. В.**, д.т.н. (Білорусь), **Кулаков П. І.**, д.т.н., **Кухарчук В. В.**, д.т.н., **Кучерук В. Ю.**, д.т.н., **Лампасі Алессандро**, PhD, (Італія), **Лукасевіч Марцін**, PhD, (Польща), **Мрозинський Адам**, PhD, (Польща), **Мусяль Януш**, PhD, (Польща), **Ортігейра Мануель Дуарте**, PhD, (Португалія), **Походило Є. В.**, д.т.н., **Психалінос Костас**, PhD, (Греція), **Ройзман В. П.**, д.т.н., **Савенко О. С.**, к.т.н., **Семенко А. І.**, д.т.н., **Сорокатиї Р. В.**, д.т.н., **Сурду М. М.**, д.т.н., **Шарпан О. Б.**, д.т.н.

Технічний редактор Кравчик Ю. В., к. е. н.

**Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 10 від 28.05.2020**

Адреса редакції: Україна, 29016,
м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11,
Хмельницький національний університет
редакція журналу «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»

☎ 067-347-74-57

e-mail: mscientificjournal@gmail.com

web: <http://journals.khnu.km.ua/index.php/MeasComp>

Зареєстровано Міністерством України у справах преси та інформації.
Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія КВ № 23279-13119ПР від 24 травня 2018 року (перереєстрація)

© Хмельницький національний університет, 2020
© Редакція журналу «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», 2020

ЗМІСТ

МЕТРОЛОГІЯ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ, СЕРТИФІКАЦІЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

УАНЕНКО О., ТКАЧУК А., ТКАЧУК R. AUTOMATED TESTING SYSTEM FOR IMPLANTS TO REGULATE INTRAOCULAR PRESSURE	5
ПОЛОВИНКО І. І., КАШУБА А. І. КОЛІРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ КОСМОЗНІМКІВ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ВІДБИТОГОТА РОЗСІЯНОГО СВІТЛА	11
МАЩЕНКО В. А. МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОГО КОЕФІЦІЄНТА ПУАССОНА ПОЛІМЕРНОГО АУКСЕТИКА ЗА ДОПОМОГОЮ ТРЬОХ ТИПІВ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ	16
ЛАТЕНКО В. І., МИРОНОВ Р. Д., ОРНАТСЬКИЙ І. А., ЛОГВИНЕНКО Д. М. АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ОПОРОМ РЕЗИСТИВНОГО ТЕРМОДАТЧИКА	23
КОВТУН І. І., БОЙКО Ю. М., БАТОВСЬКИЙ В. В. ДІАГНОСТУВАННЯ МІЦНОСТІ КОМПАУНДОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ПРИ ТЕРМОЦИКЛЮВАННІ	28
КАРПОВА Л. В., ГОРОШКО А. В., ПИРОЖОК В. В. СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ КЕРАМІЧНИХ РЕЗИСТОРІВ З ПОЛІМОДАЛЬНОЮ ЩІЛЬНІСТЮ РОЗПОДІЛУ	34
КОРЕЦЬКА Л. О., ФОРКУН І. В., МЕДЗАТИЙ Д. М. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЗОВАНОГО ЗАСОБУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ПАПЕРУ	41

ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

MARTYNYUK V. V., FORKUN Y. V., FORKUN I. V., NOVAK T. O. ARCHITECTURE OF SOLAR PANEL INTELLIGENT MONITORING SYSTEM BY MEANS OF INDUSTRIAL CONTROLLER	46
БЕДРАТЮК Л. П., БЕДРАТЮК Г. І. АНАЛІЗ ЯКОСТІ МЕТОДІВ МАСШТАБУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ З ДОПОМОГОЮ МОМЕНТНИХ ІНВАНІАНТІВ	51
ГРЕСЬ О. В., РОЗОРИНОВ Г. М., ПІЛЬКЕВИЧ Ю. Г., КОСТЯК М. Ю., ПАРХУЦЬ Л. Т. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ПОТОКОВОГО ШИФРУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ ДИСКРЕТНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ	60

ПЯТИН І. С., БОЙКО Ю. М. МЕТОДИКА ПОЛЯРНОГО КОДУВАННЯ В 5G МОБІЛЬНИХ ЗАСОБАХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ З БАГАТОПОЗИЦІЙНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ	67
БАРМАК О. В., КАЛИТА О. Д., МАНЗЮК Е. А. АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ МІМІЧНИХ ПРОЯВІВ ЕМОЦІЙ	77
ПРЕЙЗНЕР Є. Е., ЯШИНА О. М. МЕТОДИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В СФЕРІ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я	84
ОНИСЬКО А. І., СЕМЕНИШИНА І. В., КРУПСЬКИЙ Я. В. ЗАСТОСУВАННЯ НОВИХ ПРОГРАМНИХ ПРОДУКТІВ В УПРАВЛІННІ ПРОЕКТАМИ	88
СТЕЦЮК М. В., ГОРОШКО А. В., САВЕНКО Б. О. МОДЕЛЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИВУЧОСТІ ТА ВІДМОВСТІЙКОСТІ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В УМОВАХ РУЙНУЮЧОГО ВПЛИВУ ЗЛОВМИСНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	97
КАШТАЛЬЯН А. С., САВЕНКО Б. О., БЕЛЬФЕР Р. Е. МОДЕЛІ ПРИМАНОК В КОРПОРАТИВНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ З ВРАХУВАННЯМ ТИПІВ ЗЛОВМИСНИХ АТАК	104
МАРТИНЮК В. В., РАДЕЛЬЧУК Г. І., КАШТАЛЬЯН А. С., ВЕРЖБИЦЬКИЙ Я. В. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ МОБІЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТИКОВИХ ПЛЯШОК У ДИЗЕЛЬНЕ ПАЛИВО	111
ТУРОВСЬКИЙ О. Л. ОЦІНКА МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ РАДІОТЕХНІЧНОГО ПРИСТРОЮ В ХОДІ СТЕЖЕННЯ ЗА НЕСУЧОЮ ЧАСТОТОЮ	116
ЯНОВИЦЬКИЙ О. К., БАЙДИЧ Л. Е., ФОРКУН І. В. АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІОНІВ ВОДНЮ	123
ФЕДУЛА М. В., КЛЬОЦ Ю. П., ФОРКУН Ю. В. ПРОЕКТУВАННЯ СЕНСОРНИХ ЛЮДИНО-МАШИННИХ ІНТЕРФЕЙСІВ З ФІЛЬТРАЦІЄЮ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ	127
ЛУЖАНСЬКИЙ В. І., КАШТАЛЬЯН А. С., КЛЬОЦ Ю. П. КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕПЛОФІЗИЧНОГО КОНСТРУЮВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОНОГО МОДУЛЯ КАСЕТНОГО ТИПУ З МІКРОСХЕМАМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ	131

УДК 620.172.21:621.396.6.019.5
DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-5

КОВТУН І. І., БОЙКО Ю. М., БАТОВСЬКИЙ В. В.
Хмельницький національний університет

ДІАГНОСТУВАННЯ МІЦНОСТІ КОМПАУНДОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ПРИ ТЕРМОЦИКЛУВАННІ

Стаття присвячена розробці методу діагностування міцності компандованих конструкцій електронної техніки при термоциклуванні. Об'єктом дослідження представлено керамічні конденсатори полімеризовані компаундом. Через різницю в коефіцієнтах лінійного розширення між керамікою та компаундом під впливом термоударів з'єднання кераміки і компаунду зазнає термічних напружень, що при несприятливому поєднанні цих коефіцієнтів та механічних характеристик обох матеріалів може спричинити розтріскування компаунду або кераміки та руйнування всієї конструкції. В рамках представленого дослідження було визначено температурні межі роботи датчиків акустичної емісії, проведено відбір хвилеводу акустичної емісії, що дозволило розширити межі температурного діапазону вимірювань, створена вакуумна установка, яка перешкоджала утворенню льоду на тестовому зразку і хвилеводі, здійснено розділення сигналів акустичної емісії, що випромінюються компаундною і керамічною складовими конструкції та запропоновано спосіб неруйнівного діагностування і контролю міцності та попередження небезпечних станів нероз'ємних з'єднань різних композиційних матеріалів в умовах термоциклування від +60 °С до -50 °С.

Ключові слова: керамічний компаундований конденсатор, акустична емісія, термоциклування, неруйнівна діагностика.

KOVTUN I., BOIKO J., BATOVSKY V.
Khmelnitskyi National University

STRENGTH DIAGNOSTICS OF COMPOUNDED STRUCTURES IN ELECTRONICS UNDER THERMAL IMPACTS

The assembly of ceramic compounded capacitor, such as K 15-5, represents a ceramic disc polymerized by compound. Due to difference in linear expansion coefficients between ceramics and compound when subjected to thermal impacts ceramic-compound joint undergoes a thermal stresses, which under unfavorable combination of these coefficients and mechanical characteristics of both materials may cause cracking of compound or ceramics and destruction of the joint structure. The following tasks were accomplished in the current research. Thermal limits have been specified for operation of acoustic emission sensors made as an assembly of different materials, such as steel, ceramics, plastics, which are also capable of emitting acoustic emission signals during thermal cycling. The waveguide is selected and used for transmitting acoustic emission signals from the object in the thermal chamber to the acoustic emission sensor outside the thermal chamber, what expanded the temperature range by increasing positive temperatures up to +90 deg C and negative temperatures down to -60 deg C. To eliminate hindrances associated with formation and cracking of ice during transition from positive temperatures to negative and reverse, the vacuum chamber was created. The frequency separation of acoustic emission is accomplished for ceramic and compound parts of capacitor. The frequency bands are: 650-1000 kHz for ceramic component K-15 using sensor P113 (0.5-1.0 MHz); 130-300 kHz for compound component using sensor P113 (0.2-0.5 MHz). The method has been designed for non-destructive strength diagnostics of non-detachable assemblies of ceramics and compound, such as capacitors K-15-5, subjected to thermal impacts in the temperature range from +60 to -50 deg C. Manifestation of the Kaiser effect after first two thermal impacts indicates of compliance with acceptable strength condition of tested assembly, appearance of acoustic emission on N-th thermal cycle detects beginning of destructive process and indicates that such assembly will be destroyed in 5-10 cycles.

Keywords: ceramic compounded capacitor, acoustic emission, thermal impact, non-destructive diagnostics.

Вступ. Конденсатори типу К 15-5 представляють собою керамічний диск полімеризований компаундом (рис. 1). Через різницю в коефіцієнтах лінійного розширення кераміки і компаунда при зміні температури в з'єднанні кераміка-компаунд виникають температурні напруження, які при особливо несприятливих поєднаннях цих коефіцієнтів і механічних характеристик обох матеріалів можуть призвести до розтріскування компаунда або кераміки і руйнування всієї конструкції.

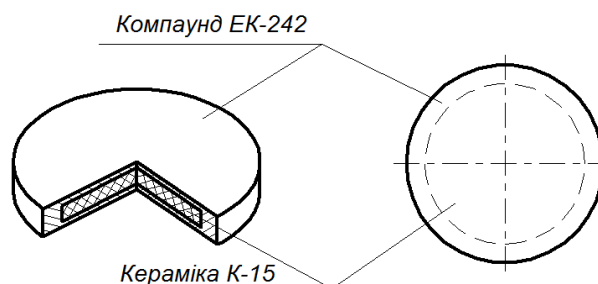


Рис. 1. Конструкція керамічного компаундованого конденсатора К 15-5

З попередніх робіт інших авторів [1–3] встановлено, що руйнування кераміки в конструкції К 15-5 при термоциклюванні відбувається від її розтягування в напрямку поздовжніх осей дисків і по ділянкам, нахиленим до торців дисків під кутом 45° , через стиск в радіальних напрямках від дії компаунда. Візуальним оглядом конденсаторів, які зруйнувалися при термоударі, було встановлено, що розтріскування кераміки відбувається в шарах, що прилягають до компаунду, з розташуванням тріщин в площинах, паралельних торцевим або нахиленим до них під кутом 45° . На рис. 2 наведені фотографії розтріскування конденсаторів.



Рис. 2. Рельєф поверхні руйнування конденсатора

Також було виявлено [4, 5], що значення напружень і деформацій в кераміці і компаунді значно залежать від розкиду фізико-механічних характеристик α , μ , E , як кераміки, так і компаунда. Так наприклад, можливий розкид коефіцієнтів лінійного розширення для кераміки і компаунда α_1 і α_2 може перебувати в межах від -30% до $+50\%$. Що призводить до розкиду розрахункових значень напружень більш ніж на 300% . Наявність цих та багатьох інших важко прогнозованих факторів ускладнює розрахунок міцнісного стану з'єднання.

У даній ситуації для забезпечення міцності як окремих особливо відповідальних деталей, так і партій виробів, слід було вдатися до створення методики неруйнівного контролю міцності нероз'ємних з'єднань різних композиційних матеріалів кераміки і компаунда на основі методу акустичної емісії (АЕ), який відображаючи фізико-механічні властивості матеріалів, дозволяє стежити за станом їх мікроструктури і фіксувати її порушення ще на ранніх етапах розвитку [6, 7].

Відомі роботи [8, 9] з акустико-емісійного дослідження складових керамічних конденсаторів під впливом механічних навантажень, таких як розтяг і згин. В результаті цих робіт були отримані методики неруйнівного контролю та діагностування міцності матеріалів складових керамічних конденсаторів.

Однак, як було зазначено вище, поломки самих конденсаторів відбуваються в основному не від механічних, а від термічних навантажень, особливо при перепадах температур. Тому в даній роботі вирішувалося завдання діагностування міцності готових виробів в експлуатаційних умовах, тобто при термоциклюванні від $+60^\circ\text{C}$ до -50°C .

При розробці методики неруйнівного діагностування і контролю міцності натурних конденсаторів в зазначених експлуатаційних умовах довелося знайти відповіді на наступні питання.

1. Які температурні межі працездатності датчиків АЕ, які складаються із сталевих, керамічних, пластмасових деталей, також здатних випромінювати сигнали АЕ при термоциклюванні?

2. Як позбутися сигналів АЕ, що випромінюються утворенням на конденсаторі і датчику льоду при переході від додатних температур до від'ємних і навпаки?

3. Як розділити сигнали АЕ, що випромінюються керамічною основою конденсатора, від сигналів, що випромінюються компаундною оболонкою, як при нормальних, так і при від'ємних температурах?

Забезпечення працездатності датчика акустичної емісії АЕ П113 при термоциклюванні. До проведення випробувань компаундованих керамічних конденсаторів при термоциклюванні необхідно було перевірити роботу датчиків акустичної емісії в умовах низьких від'ємних і високих додатних температур, при яких вони самі можуть стати джерелами сигналів АЕ, бо містять у своїй конструкції деталі з різнорідних матеріалів: металу, пластмаси, кераміки, компаунда, з відмінними значеннями коефіцієнтів лінійного розширення.

З цією метою датчик П113, підключений до комп'ютерного вимірювального комплексу акустичної емісії [10], поміщався у термокамеру Файтрон 3526/51. Джерелом сигналів АЕ служив імітатор сигналів АЕ СМА-04. Випробування показали, що датчик П113 працездатний в інтервалі температур від $+50^\circ\text{C}$ до -50°C графік залежності чутливості датчика від температури показаний на рис. 3.

Однак при температурах від $+50^\circ\text{C}$ до $+85^\circ\text{C}$ на показання датчика впливали перешкоди, пов'язані з різницею в коефіцієнтах лінійного розширення матеріалів складових частин самого датчика рис. 4.

При переході до від'ємних температур через це ж, а також і через обмерзання в районі $+5^\circ\text{C}$ також виникали помилкові сигнали АЕ. Щоб не піддавати датчики дії несприятливих для них температур, було вирішено випробувати передачу сигналів АЕ через хвилеводи.

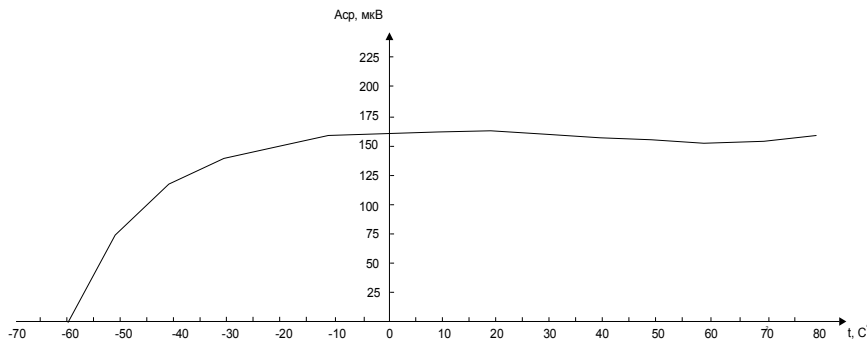


Рис. 3. Залежність чутливості датчика П113 від температури

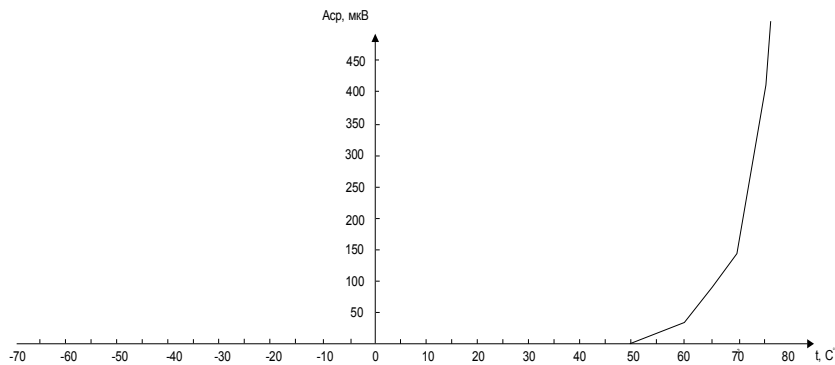


Рис. 4. Залежність появи сигналів АЕ датчика від температури

Перевірка можливості використання хвилеводів. Випробуванню піддавалися такі хвилеводи: кварцові, свинцеві, титанові, бронзові і залізні. З цих хвилеводів найбільш ефективним виявився сталевий розміром 500×25×30 мм (табл. 1).

Таблиця 1.

Визначення коефіцієнтів загасання для хвилеводів з різних матеріалів на проходження сигналів АЕ при частотах 0,02–2,0 МГц і вхідному сигналі випромінювача 300 мВ

Тип хвилеводу	Розмір хвилеводу	Сигнал на виході, мВ	Коефіцієнт затухання, К
Кварц	$l = 500, d = 10$	126	0,42
Свинець	$l = 500, d = 10$	30	0,1
Титан	$l = 500, d = 10$	129	0,43
Бронза	$l = 500, d = 10$	90	0,3
Сталь	$l = 500, d = 10$	210	0,7
Сталь	$l = 500, b = 30, h = 25$	240	0,8

Експеримент проводився в нормальних умовах за допомогою генератора ГЗ-112/1 використаного для збудження перетворювача-датчика П113 (1). Другий перетворювач П113 (2) виконував роль приймача сигналів АЕ. Перетворювачі кріпилися до торців хвилеводу через контактний шар-клей ВК-1.

Контроль радіоімпульсів, які подавалися з генератора здійснювався: за напругою – мікровольтметром, по частоті – частотоміром, за формою сигналу – осцилографом (канал 1). Вихідні сигнали перевірялися: за рівнем – мікровольтметром, за формою – осцилографом (канал 2).

Використання осцилографа дозволяло порівнювати форму сигналів на вході і виході, зміщення фаз, коефіцієнт загасання, що вносяться хвилеводами і контактними шарами.

Параметри хвилеводу підбиралися таким чином, щоб в ньому виникали тільки поздовжні хвилі. Коефіцієнт проходження K визначався відношенням показань мікровольтметра на виході та вході системи.

Випробування показали, що при переході від додатних температур до від'ємних і назад все ж виникають перешкоди за рахунок обмерзання хвилеводу і контактних шарів. Для усунення обмерзання проводилися випробування при зануренні хвилеводу з перетворювачем в ванну зі спиртом. Однак цей метод виявився неефективним, тому що спирт розчиняє контактний шар, через що втрачається акустична зв'язок.

Проте застосування хвилеводів дозволяє розширити межі температурного діапазону за рахунок збільшення додатних температур до +90 °С і від'ємних до –60 °С, якщо не враховувати АЕ при утворенні льоду.

Допоміжні пристосування підвищення достовірності проведених випробувань. Для усунення перешкод, пов'язаних з утворенням і розтріскуванням льоду при переході від додатних температур до від'ємних і назад, було вирішено поставити експеримент в вакуумі. Для цього була виготовлена невелика

вакуумна установка, всередині якої розміщувався випробуваний об'єкт із закріпленими на ньому датчиком АЕ і датчиком температури. Ця установка поміщалася в термокамеру Файтрон. Вакуумний насос забезпечував підтримку рівня розрідження в камері (740 мм рт.ст.), при якому був відсутній лід.

Термоциклювання здійснювалося при температурах від +60 °С до -50 °С і назад, по термодатчику, установленому всередині вакуумної камери. При цих умовах не з'являлося обмерзання і датчик нормально працював у всьому діапазоні температур від +60 °С до -50 °С.

На жаль, цей метод вимагав багато часу на проведення термоциклювання, тому що перехід від -50 °С до +60 °С у вакуумній камері відбувався протягом 180–190 хв. Звичайно, при бажанні цей процес можна було б прискорити, вводючи в вакуумну камеру нагрівальну і охолоджуючу системи, однак це вимагало б подолання нових труднощів.

Визначення робочої смуги частот сигналів АЕ при руйнуванні зразків кераміки і компаунда.

При проведенні цього експерименту зразки кераміки К-15 і компаунда ЕК-242 встановлювалися консольно в спеціальному тестовому пристосуванні (рис. 5).

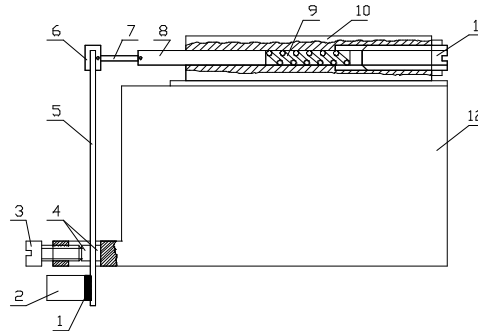


Рис. 5. Пристрій для навантаження зразків кераміки К-15 і компаунда ЕК-242:

1 – акустичний шар, 2 – датчик акустичної емісії П113, 3 – гвинт, 4 – фторопластова прокладка, 5 – випробуваний зразок, 6 – фторопластова петля, 7 – тяга, 8 – сердечник, 9 – пружина, 10 – електромагніт, 11 – регулювальний гвинт, 12 – основа

На один кінець випробувального зразка через акустичне мастило кріпилися датчики АЕ з різними смугами пропускання сигналів АЕ. Інший кінець зразка кріпився до сердечника електромагніту, який втягувався через пружину. Датчик П113 підключався через попередній підсилювач до комп'ютерного вимірювального комплексу АЕ. Зібрана система, що складається з навантажувального пристосування, із закріпленим в ньому зразком кераміки або компаунда і датчиком АЕ П113 містилася в вакуумну камеру, в якій створювалося розрідження, рівне 740 мм.рт.ст. Апаратура запису сигналів АЕ налаштовувалася таким чином, щоб пропускати лише сигнали, що лежать в заданій смузі частот. Потім дистанційно через трансформатор на електромагніт подавалася напруга і сердечник втягувався. Це призводило до деформації і руйнування випробуваного зразка, а апаратура при цьому реєструвала сигнали АЕ. Таким випробуванням на руйнування в вакуумі при кімнатній температурі піддавалися по 30 зразків кераміки і компаунда при різних смугах пропускання частот вимірювального комплексу АЕ. Проведені випробування показали, що для дослідження керамічної складової краще використовувати датчик П113 (0,5–1,0) і смугу робочих частот комплексу АЕ – 650–1000 кГц, а для дослідження компаундною складовою – датчик П113 (0,2–0,5) з смугою робочих частот комплексу АЕ – 130–300 кГц.

Аналогічні результати були отримані при випробуваннях у відємних температурах. При охолодженні зразків, починаючи з температури -35 °С з'являлися сигнали акустичної емісії, що доходять до суми подій, що дорівнює 200 одиницям для керамічних зразків, і 120 – для компаундних. Ці сигнали при сталій температурі зникали через 5–6 с. Навантаження і руйнування зразків проводилося до досягнення температури -50 °С після припинення сигналів акустичної емісії, викликаних впливом відємних температур.

Надалі виявилось можливим замість двох датчиків АЕ використовувати один – широкосмуговий П113 (0,2–2,0 МГц), сигнали якого передавалися на два прилади АФ-15, один з яких налаштовувався на смугу частот 650–1000 кГц і контролював керамічну частину конденсатора, а другий – на пропускання смуги частот 150–300 кГц і контролював компаундну частину.

Акустична емісія конденсаторів К15-5 при їх термоциклюванні. Запис корисних сигналів акустичної емісії здійснювався при термоциклюванні натурних конденсаторів К15-5. Ці конденсатори мають номінальну постійну напругу 50 кВ, номінальну ємність 470 пФ, допустиму реактивну потужність 10 Вт, масу 80 г.

Перші 10 конденсаторів піддалися термоциклюванню у вакуумній камері при температурах +60 °С -50 °С із застосуванням хвилеводу, датчика П113 (0,2–2,0 МГц) і двох акустико-емісійних приладів АФ-15 у складі вимірювального комплексу АЕ.

Цей експеримент показав, що для всіх конденсаторів в області додатних температур сигнали АЕ відсутні і з'являються лише при температурі -14 °С і нижче. Це дало підставу подальші випробування

проводити в діапазоні від кімнатних температур до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ без застосування вакуумної камери і хвилеводів, а виникаючі сигнали АЕ від обмерзання датчика і конденсатора при температурі близько $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ просто не враховувати і не реєструвати, що значно спростило експеримент і скоротило час на його проведення. У подальших експериментах з'єднаний кабелем датчик АЕ через попередній підсилювач підключався до двох приладів акустичної емісії, один з яких був налаштований на прийом сигналів АЕ лише компаундної частини, а інший – керамічної частини конденсатора. Обидва прилади синхронізувалися за часом.

Термоударам в термокамері піддавалися 30 штук конденсаторів К15-5. Середні значення параметрів АЕ (суми подій, максимальні амплітуди) при перших трьох термоударах представлено у вигляді графічних залежностей на рис. 6.

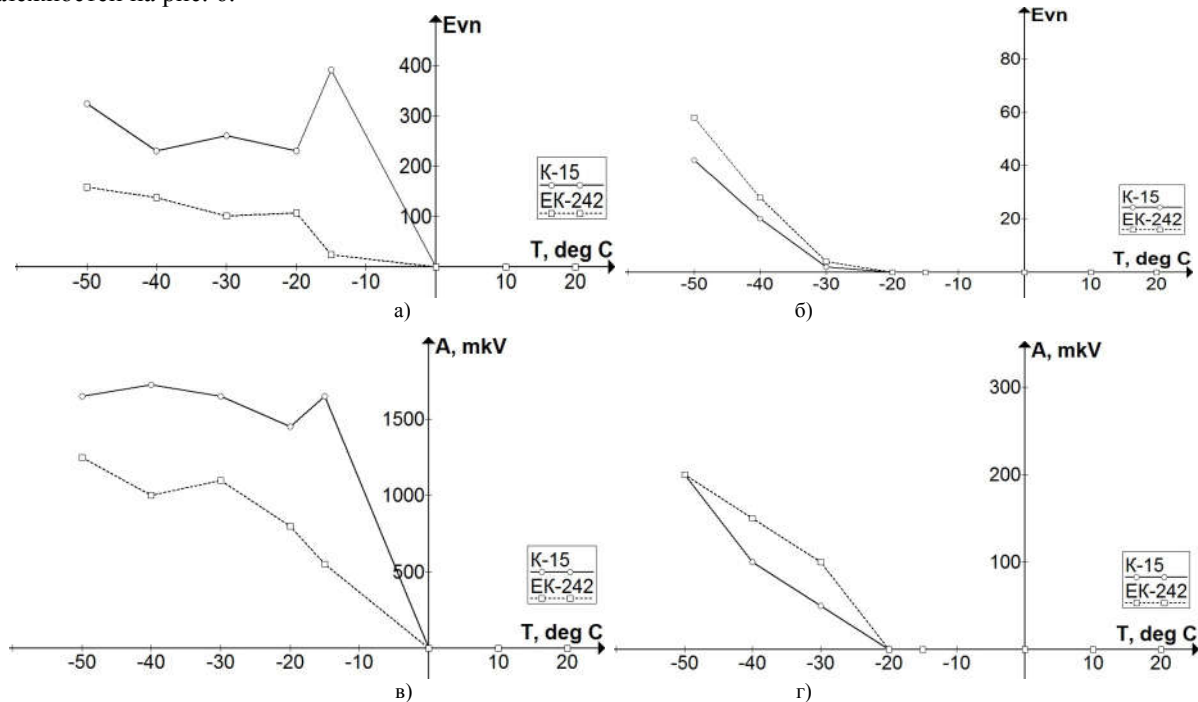


Рис. 6. Параметри акустичної емісії виміряні протягом двох температурних циклів: загальна кількість подій для циклу 1 (а) та 2 (б); максимальна амплітуда для циклу 1 (в) та 2 (г)

Аналіз матеріалів, що містяться на графіках, показує, що сигнали АЕ набагато сильніше проявляються в керамічній частині конденсатора, ніж в компаундній, вони відсутні у всьому діапазоні додатних температур і починають з'являтися приблизно з температури $-12 \dots -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, досягаючи максимуму при найбільшому значенні від'ємної температури $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Слід зазначити, що після витримки протягом 10–15 с при заданій температурі сигнали припинялися у всіх 30 конденсаторів. При зміні температури від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до кімнатної сигнали АЕ не з'являлися. При другому термоударі сигнали АЕ не спостерігалися приблизно до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при більш низьких температурах їх прояв був в 5–10 разів слабшим, ніж при першому термоударі. Це свідчить про прояв ефекту Кайзера, а значить, про малість хибних сигналів і про міцність випробовуваних конденсаторів [11–15].

Висновки. Встановлено температурні межі працездатності датчиків АЕ, які складаються із сталевих, керамічних, пластмасових деталей, також здатних випромінювати сигнали АЕ при термоциклованні. Датчик П113 працездатний в діапазоні від $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Проведено відбір хвилеводу, який служить для передачі сигналів АЕ від досліджуваного об'єкта в термокамері до датчика П113 поза термокамерою, що дозволило розширити межі температурного діапазону за рахунок збільшення додатних температур до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ і від'ємних до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для усунення перешкод, пов'язаних з утворенням і розтріскування льоду при переході від додатних температур до від'ємних, була створена вакуумна установка. Розрядження, рівне 740 мм рт.ст., що створюється в установці, перешкоджало утворенню льоду на тестовому зразку і хвилеводі.

Здійснено розділення сигналів АЕ, що випромінюються компаундною і керамічною складовими конструкції конденсатора К 15-5, по частоті. Робоча смуга частот сигналів АЕ відповідає: для кераміки К-15 – 650–1000 кГц; для компаунда ЕК-242 – 130–300 кГц.

Запропоновано спосіб неруйнівного діагностування і контролю міцності та попередження небезпечних станів нероз'ємних з'єднань різних композиційних матеріалів на прикладі конструкції компаундованих керамічних конденсаторів К15-5, які працюють в умовах термоцикловання від $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Показником міцного стану конструкції є прояв ефекту Кайзера після перших двох термоциклів, поява АЕ на n-му термоциклі є попередженням катастрофічного руйнування конструкції через 5–10 циклів.

Література

1. Silin R. I. Improving Reliability of Machine Units and Details by Acoustic Emission Diagnosing / R. I. Silin, V. P. Royzman, I. I. Kovtun // Proceedings of 11th World Congress in Mechanism and Machine Science, Tianjin, China. – Tianji, 2004. – P. 2217–2221.
2. H. Ardebili, J. Zhang and M. G.Pecht. Encapsulation Technologies for Electronic Applications (Second Edition). United States, USA: William Andrew, Elsevier Inc., 2019, 508 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811978-5.00007-9>
3. E. J. R. Phua, M. Liu, B. Cho, Q. Liu, S. Amini, X. Hu, and C. LipGan. (2018, Mar.). Novel high temperature polymeric encapsulation material for extreme environment electronics packaging. *Materials & Design*, Vol. 141, pp.202-209. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.12.029>.
4. Koripella, Chowdary Ramesh. Mechanical behavior of ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology*, 1991, 14.4: 718-724.
5. Young, Amanda Lynn, et al. "Mechanical vs. electrical failure mechanisms in high voltage, high energy density multilayer ceramic capacitors." *Journal of materials science* 42.14 (2007): 5613-5619.
6. Kovtun I. Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Baurienė, K. Pilkauskas // *Mechanika*. – Kaunas : KTU, 2016. – Vol. 22 № 6 (2016). – P. 494–489.
7. Pisarenko G. S., Kvitka O. L., Umanski E. S. *Strength of materials* – 2nd edition. – Kiev: – 2004, 655 P.
8. Cozzolino, Michael; Ewell, Gary. A fracture mechanics approach to structural reliability of ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1980, 3.2: 250-257.
9. Kahn, S.; Checkaneck, R. Acoustic emission testing of multilayer ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1983, 6.4: 517-526.
10. V.P. Roizman, I.I. Kovtun Software and hardware complex of acoustic emission // Measurement and computation technique in technological processes. - Khmelnytsky: KhNU, 1997. - Vol. 1. - P. 25-29.
11. Kovtun I. Development of methods for acoustic emission non-destructive strength diagnostics of components and units / I.I. Kovtun, V.P. Royzman // Scientific collection of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Ser.: Military and technical sciences. – Khmelnytsky: NASBGSU, 2015. – Vol. 3 (65). - P. 311–327.
12. Kovtun, I. I., Boiko, J. M., Petrashchuk, S. A. (2019), Reliability Improvement of Printed Circuit Boards by Designing Methods for Solder Joint Technical Diagnostics with Application of Acoustic Emission Method, *Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, Vol. 79, pp. 60-70.
13. Shannon R., Zucaro G., Tallent J., Collins V., Carswell J. (2019), A system for detecting failed electronics using acoustics, *Instrumentation & Measurement Magazine IEEE*, Vol. 22, No. 4, pp. 32-37.
14. I. Kovtun, S. Petrashchuk and J. Boiko, "Thermal Stress in Encapsulated Electronic Packages," 2019 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, 2019, pp. 1-6.
15. J. Boiko, I. Kovtun and S. Petrashchuk, "Vibration transmission in electronic packages having structurally complex design," 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, 2017, pp. 514-517.

References

1. Silin R. I. Improving Reliability of Machine Units and Details by Acoustic Emission Diagnosing / R. I. Silin, V. P. Royzman, I. I. Kovtun // Proceedings of 11th World Congress in Mechanism and Machine Science, Tianjin, China. – Tianji, 2004. – P. 2217–2221.
2. H. Ardebili, J. Zhang and M. G.Pecht. Encapsulation Technologies for Electronic Applications (Second Edition). United States, USA: William Andrew, Elsevier Inc., 2019, 508 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811978-5.00007-9>
3. E. J. R. Phua, M. Liu, B. Cho, Q. Liu, S. Amini, X. Hu, and C. LipGan. (2018, Mar.). Novel high temperature polymeric encapsulation material for extreme environment electronics packaging. *Materials & Design*, Vol. 141, pp.202-209. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.12.029>.
4. Koripella, Chowdary Ramesh. Mechanical behavior of ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology*, 1991, 14.4: 718-724.
5. Young, Amanda Lynn, et al. "Mechanical vs. electrical failure mechanisms in high voltage, high energy density multilayer ceramic capacitors." *Journal of materials science* 42.14 (2007): 5613-5619.
6. Kovtun I. Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Baurienė, K. Pilkauskas // *Mechanika*. – Kaunas : KTU, 2016. – Vol. 22 № 6 (2016). – P. 494–489.
7. Pisarenko G. S., Kvitka O. L., Umanski E. S. *Strength of materials* – 2nd edition. – Kiev: – 2004, 655 P.
8. Cozzolino, Michael; Ewell, Gary. A fracture mechanics approach to structural reliability of ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1980, 3.2: 250-257.
9. Kahn, S.; Checkaneck, R. Acoustic emission testing of multilayer ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1983, 6.4: 517-526.
10. V.P. Roizman, I.I. Kovtun Software and hardware complex of acoustic emission // Measurement and computation technique in technological processes. - Khmelnytsky: KhNU, 1997. - Vol. 1. - P. 25-29.
11. Kovtun I. Development of methods for acoustic emission non-destructive strength diagnostics of components and units / I.I. Kovtun, V.P. Royzman // Scientific collection of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Ser.: Military and technical sciences. – Khmelnytsky: NASBGSU, 2015. – Vol. 3 (65). - P. 311–327.
12. Kovtun, I. I., Boiko, J. M., Petrashchuk, S. A. (2019), Reliability Improvement of Printed Circuit Boards by Designing Methods for Solder Joint Technical Diagnostics with Application of Acoustic Emission Method, *Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, Vol. 79, pp. 60-70.
13. Shannon R., Zucaro G., Tallent J., Collins V., Carswell J. (2019), A system for detecting failed electronics using acoustics, *Instrumentation & Measurement Magazine IEEE*, Vol. 22, No. 4, pp. 32-37.
14. I. Kovtun, S. Petrashchuk and J. Boiko, "Thermal Stress in Encapsulated Electronic Packages," 2019 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, 2019, pp. 1-6.
15. J. Boiko, I. Kovtun and S. Petrashchuk, "Vibration transmission in electronic packages having structurally complex design," 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, 2017, pp. 514-517.

Надійшла / Paper received: 23.03.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020

Mon Nov 30 11:03:57 EET 2020, Бойко Юлія Миколайович, Хмельницький національний університет, ХНУ

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 2.0%

Словари проверки: en_US, ru_RU, ua_UA. Ошибок в документах: 13%

ID: 81639 Название: Діагностування міцності композитованих конструкцій електронної техніки при термоциклуванні Добавлено в БД: 2020-11-30 Авторы: Баговський В'ячеслав Валерійович Руководители: Бойко Юлія Миколайович Консультанты: Опоненты: Срьоменко Олександр Іванович	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	82607	1232	3038 (4%)	48 (4%)

Источники плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы

РІШЕННЯ КАФЕДРИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ТА РАДІОТЕХНІКИ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Діагностування міцності компаундованих конструкцій електронної техніки при термоциклюванні

Автор: Батовський В.В.

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: д.т.н., професор Бойко Ю.М.

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	-
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	-
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	-
5	Інше:	-

Підтвердження: Виявлені запозичення не є плагіатом так як відносяться до термінологічних та загальноживаних типових фраз і складають 4.8 %

10.11.2020

Дата

Підпис керівника

Підпис завідувача кафедри

Рецензія
опонента на дипломну роботу виконану за темою
«Діагностування міцності компаундованих конструкцій
електронної техніки при термоциклюванні»
студента гр. ТР_м-19-1 Батовського В.В.

Дипломна робота магістранта Батовського В.В. присвячена діагностиці міцності компаундованих конструкцій електронної техніки при термоциклюванні. Ця задача повинна вирішуватись при проектуванні, випробуванні та експлуатації таких виробів техніки, з метою оцінки та зменшення напружено-деформованого стану та виявлення причин руйнування і таким чином забезпечення міцності вказаних об'єктів дослідження.

Особливу актуальність вказана проблема набуває для електронної апаратури герметизованої заливкою компаундом в умовах різких перепадів температур.

В якості методів дослідження вдало використані експериментальні методи дослідження напружено-деформованого стану та дефектоскопії об'єктів, що знаходяться під дією як механічних навантажень на розтяг та згин, так і під дією температурних навантажень, зокрема перепадів температур. До використаних методів відносяться метод електротензометрії та метод акустичної емісії. Як досягнення слід відзначити, що вказані методи були адаптовані та використанні для малогабаритних виробів електронної техніки, на відміну від їх класичного використання.

В роботі вирішено ряд науково і практично важливих завдань, серед яких варто відмітити розробку програмного забезпечення зчитування та оброблення параметрів сигналів акустичної емісії, розробку методики тензометрування та визначення внутрішніх напружень в компаунді і компонентах герметизованих електронних модулів, які виникають після їх сполучення, встановлення температурних меж працездатності датчиків АЕ в діапазоні температур від + 50 °С до -50 °С, відбір хвилеводу для передачі сигналів АЕ від досліджуваного об'єкта в термокамері до датчика П113 поза термокамерою, створення вакуумної установки, розрядження якої перешкоджає утворенню льоду на тестованому зразку і хвилеводі, частотне розділення сигналів акустичної емісії, що випромінюються різними частинами герметизованої конструкції та розробку способу неруйнівного діагностування і контролю міцності нероз'ємних з'єднань різних композиційних матеріалів в умовах термоциклювання від + 60 °С до -50 °С.

Результати магістерської роботи апробовані статтею у науковому фаховому журналі «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», № 1, 2020 р.

В цілому робота відповідає критеріям до наукової роботи та містить ряд висновків, які представляють науковий та практичний інтерес і заслуговує оцінки «відмінно».

Опонент: к.т.н., доцент
кафедри фізики та електротехніки

О.І. Єрмоєнко