

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-5>
УДК 620.172.21:621.396.6.019.5

Ігор КОВТУН

<https://orcid.org/0000-0002-1430-6479>
Хмельницький національний університет

Андрій ГОРОШКО

<https://orcid.org/0000-0002-1386-2326>
Хмельницький національний університет

Світлана ПЕТРАЩУК

<https://orcid.org/0000-0003-2043-1409>
Хмельницький національний університет

НЕРУЙНІВНА ДІАГНОСТИКА МІЦНОСТІ НЕРОЗ'ЄМНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Стаття присвячена розробленню методик неруйнівної діагностики нероз'ємних елементів конструкцій електронної техніки, зокрема їх паяним та зварним з'єднанням. Методики неруйнівної діагностики міцності і герметичності побудовані на основі акустико-емісійного і електротензометричного методів вимірювання застосовані в умовах механічного, температурного та пневматичного навантаження. Випробування на міцність паяних з'єднань наскрізного та поверхневого монтажу двох-вивідних електронних компонентів в критичних умовах напружено-деформованого стану під дією простих видів механічного навантаження на відрив та розтяг та випробування паяних з'єднань друкованих плат навантаженням, яке створює напружено-деформований стан, що зустрічається в процесі експлуатації, за схемою навантаження на чистий згин в режимі циклічного пульсуючого навантаження показали зниження міцності та можливість використання параметрів акустичної емісії в якості діагностичних для виявлення дефектів та оцінки міцності паяних з'єднань. Проведено діагностику міцності на основі аналізу напружено-деформованого стану нероз'ємних з'єднань, які використовуються для герметизації модулів надвисоких частот виготовлених із сплаву АМГ-2 двох типів конструкції вузла герметизації виконаних відповідно зварним та паяним з'єднанням, під дією внутрішнього надлишкового тиску та температури. Набула подальшого розвитку акустико-емісійна методика неруйнівної діагностики міцності нероз'ємних елементів конструкцій електронної техніки, зокрема їх паяних та зварних з'єднань.

Ключові слова: неруйнівна діагностика, міцність, герметичність, паяне з'єднання, зварне з'єднання, акустична емісія, електротензометрія.

Igor KOVTUN, A. GOROSHKO, Svitlana PETRASHCHUK
Khmelnytskyi National University

NON-DESTRUCTIVE STRENGTH DIAGNOSTICS OF NON-DETACHABLE STRUCTURES IN ELECTRONIC PACKAGES

The represented paper is aimed at development of methods for non-destructive diagnostics of non-detachable structures in electronic packages, in particular, their soldered and welded joints, as much as such joints are considered to be the weakest link in the structure and providing their strength is an actual research task. Methods for non-destructive diagnostics of strength and air-tightness are based on acoustic-emission and electrotensometric measurement methods under the action of mechanical, thermal and pneumatic impacts. Strength testing solder joints of through-hole and surface mounted two-pin electronic components under critical stress and strain conditions produced by simple types of mechanical forces on pull out and tension tests and pure bending tests that produce stress and strain conditions identical to operational and conducted in cyclic pulsating mode with simultaneous recording mechanical characteristics and acoustic-emission parameters showed the decrease in solder joints strength caused by their defects and provided using acoustic emission parameters as diagnostic indicators to detect these defects and assess the strength of solder joints. The strength diagnostics for non-detachable sealing joints used to seal super-high frequency air-tight packages made from AMG-2 alloy of two types of sealing unit design representing both welded and soldered joints has been conducted by internal overpressure and temperature impacts. The stress and strain analysis of air-tight cases in conditions of pneumatic impacts has revealed that the stress in the cases is under the acceptable limit but in the joints reaches even the ultimate strength. The method for non-destructive acoustic-emission strength diagnostics as applied to non-detachable joints in electronic packages, in particular, their soldered and welded joints, has gained its progression.

Keywords: non-destructive diagnostics, strength, air-tightness, solder joint, weld joint, acoustic emission, electrotensometry.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Основною технологією отримання механічних та електричних нероз'ємних з'єднань у виробках електронної техніки залишається на сьогоднішній день пайка або зварювання [1–6]. Завдяки механічному зв'язку, який представляє собою жорстке і нерухоме защемлення, виникає взаємодія між елементами конструкцій, яка створює передумови для виникнення та передачі деформацій у всіх ланках механічного зв'язку. Такі деформації та, відповідно, напруження виникають в результаті дії як експлуатаційного навантаження так і під впливом конструктивно-технологічного виконання, і слід зазначити, що саме вони не рідко виявляються причиною руйнування електричних ланцюгів та втрати працездатності електронних вузлів і модулів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В електроніці та обчислювальній техніці у зв'язку з їх комплексною мікромініатюризацією вимоги до якості і надійності паяних та зварних з'єднань безперервно збільшуються і однією з важливих завдань забезпечення їх міцності та надійності є застосування та вдосконалення методів їх діагностики. Так державними стандартами [7, 8] обумовлено ряд методів, контролю якості паяних з'єднань. Поряд із значним збільшенням їх кількості зменшилися їх геометричні розміри. Так, площа контактної ділянки під мікросхеми в корпусах SOIC, PLCC становить 1,7 мм² і менше. У зв'язку з цим були продовжені пошуки більш інформативних вторинних критеріїв якості паяних з'єднань і розробка на їх основі методів діагностики. Загальна класифікація методів неруйнівної діагностики наведена в державному стандарті [9], проте застосування цих методів, як показує практика, не завжди забезпечує надійне відбраковування неякісних паяних з'єднань (ПЗ).

У ряді розглянутих робіт [10, 11] висловлені припущення про можливість застосування для контролю якості ПЗ електрофізичних методів, заснованих на реєстрації електрофізичних параметрів, що несуть інформацію про якість і надійність об'єкта. Відповідно до [12] до електрофізичних методів відносять: електропараметричний, шумовий, акустико-емісійний, екзоелектронної емісії, фотовідповідних та рекомбінантних випромінювань. Основним недоліком більшості зазначених методів є складність оцінювання небезпечності дефектного ПЗ, висока вартість і складність обладнання для контролю. В останні роки все більше застосування для неруйнівного контролю, діагностування і прогнозування міцності знаходить метод акустичної емісії, який характеризується широкими можливостями застосування, в тому числі і для контролю паяних з'єднань.

Формулювання цілей статті

Представлена робота присвячена розробленню методик неруйнівної діагностики нероз'ємних елементів конструкцій електронної техніки, зокрема їх паяним та зварним з'єднанням, оскільки, як показано в попередніх дослідженнях [13], саме вузли з'єднання виявляються найслабшою ланкою в конструкції і забезпечення їх міцності виступає актуальним завданням дослідження. Методики неруйнівної діагностики міцності і герметичності побудовані на основі акустико-емісійного та електротензометричного методів вимірювання під дією механічного, температурного та пневматичного навантаження.

Механічні випробування паяних з'єднань друкованих плат

Розповсюдженим випробуванням на міцність паяних з'єднань є випробування на зсув [14]. Проте, явище зсуву в чистому вигляді не зустрічається і супроводжується іншими деформаціями, які також викликають нормальні напруження і створюють складний напружено-деформований стан. Тому визначення характеристик міцності паяних з'єднань відбувалося за програмою випробувань, в якій відтворювали критичні умови напружено-деформованого стану за допомогою простих видів механічного навантаження на відрив, розтяг та згин.

Об'єктами дослідження були паяні з'єднання наскрізного та поверхневого монтажу двох-вивідних електронних компонентів. Для утворення паяного з'єднання використовувався олов'яно-свинцевий сплав ПОС-61. Поряд із ПЗ виконаними за технологією пайки, що відповідала нормам якості, випробуванням підлягали ПЗ виконані із заздалегідь заданими дефектами, такими як холодна пайка. Випробування проводили для встановлення впливу дефектів на міцність ПЗ та аналізу пов'язаних із ними сигналами акустичної емісії.

Випробування виконувались на розривній машині IP-5057-50 із використанням кріпильних пристосувань, які дозволяли виконувати задані види навантаження. Одночасно із записом діаграми навантаження, який здійснювався на самописці машини, системою акустико-емісійного контролю в одноканальному режимі вимірювання здійснювався запис таких параметрів сигналів акустичної емісії як амплітуда, активність та сумарний рахунок.

Випробування на відрив виконувались у спеціальному кріпильному пристосуванні, конструкція якого представлена на рис. 1, а. Пристрій складається із опорної колодки 1, до якої гвинтовими стяжками 7 через монтажні отвори кріпиться відрізок друкованої плати 2 із контактним вузлом 3 для наскрізного монтажу. Для забезпечення потрібної жорсткості кріплення основи друкованої плати здійснюється через притискні пластини 4, які розташовані в безпосередній близькості до контактної вузла по обидві сторони від нього. Навантаження паяного з'єднання здійснюється через відрізок мідного дроту 5, який імітує вивід електронного компонента. Дріт одним кінцем припаюється до контактної вузла, а іншим кріпиться гвинтовою стяжкою 8 до опорної колодки 6. Колодки 1 та 6 кріпляться в верхньому та нижньому затискачах розривної машини, завдяки чому здійснюється силове навантаження P за напрямом показаним на схемі. Навантаження здійснювалося із постійною швидкістю 1 мм/хв. Для реєстрації параметрів сигналів акустичної емісії датчик АЕ встановлюється на поверхні колодки 1.

Випробуванню підлягали дві партії зразків по 20 шт. в кожній, які поділялися за станом паяних з'єднань: 1) бездефектні; 2) із дефектом «холодна пайка».

Представлені в таблиці 1 усереднені значення отримані обробкою матеріалів випробувань, показали зниження значень руйнівних навантажень ПЗ з дефектом «холодна пайка» в середньому на 47 % та очевидну відмінність в прояві сигналів акустичної емісії, зокрема їх максимальної активності та сумарного рахунку, які мали суттєве перевищення для дефектних паяних з'єднань. Таким чином, зафіксоване зниження значень руйнівного навантаження продемонструвало зниження міцності ПЗ внаслідок наявності дефектів, та різниця в параметрах АЕ показала перспективи використання цих параметрів в якості діагностичних для виявлення дефектів та оцінки міцності паяних з'єднань. Отриманий результат підтверджує результати опубліковані в попередній роботі [15].

Випробування на міцність паяних з'єднань поверхневого монтажу здійснювались механічним навантаженням на розтяг у спеціальному кріпильному пристрої, конструкція якого представлена на рис. 1, б. Пристрій складається із двох ідентичних опорних колодок 1, до кожної з яких через монтажні отвори кріпляться два відрізки друкованої плати 2. Кріплення здійснюється через притискну платину 5 двома гвинтовими стяжками 6. Використання двох відрізків плат, між якими виконано паяне з'єднання 3 SMD компонента 4 (металокерамічного конденсатора К10-17В) дозволяє виключити вплив основи друкованої плати на міцність паяних з'єднань. Як і попередньому випробуванні колодки 1 кріпляться в верхньому та нижньому затискачах розривної машини, завдяки чому здійснюється силове навантаження P за напрямом показаним на схемі. Навантаження здійснювалося із постійною швидкістю 1 мм/хв. Датчик акустичної емісії встановлювався на поверхні однієї з колодок 1.

На відміну від попереднього випробування крім двох партій паяних з'єднань – бездефектних та із дефектом «холодна пайка» була використана третя партія паяних з'єднань виконаних із попереднім перегрівом SMD терміналів, що повинно було підвищити міцність з'єднання в порівнянні із стандартною технологією. Кожна партія налічувала по 20 зразків. Попередній прогрів здійснювався витримкою компонентів в термостаті протягом 30 хв. при температурі 200 °С після чого відбувалось їх розпаювання.

Представлені в таблиці 1 усереднені значення отримані обробкою матеріалів випробувань показали зниження значень руйнівних навантажень ПЗ з дефектом «холодна пайка» в середньому на 36,5 % та очікуване підвищення міцності на 48 % завдяки попередньому перегріву терміналів SMD. Також зафіксована очевидна відмінність в значеннях сумарного рахунку та максимальної активності сигналів акустичної емісії підтверджує можливість застосування цих параметрів для діагностики технічного стану та міцності паяних з'єднань. Отриманий результат підтверджує результати опубліковані в попередній роботі [15].

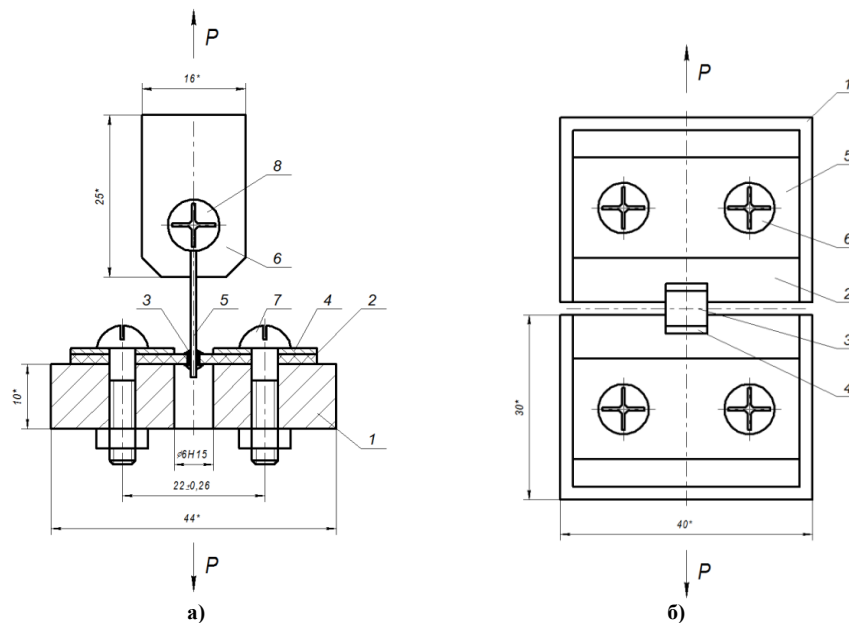


Рис. 1. Кріпильне пристосування для силового навантаження:

а) паяного з'єднання наскрізного монтажу на відрив; б) паяного з'єднання поверхневого монтажу на розтяг

Після дослідження міцності паяних з'єднань у критичних умовах навантаження наступне випробування проводилось навантаженням, яке створює напружено-деформований стан, що зустрічається в процесі експлуатації при деформації основи друкованих плат. В якості такого навантаження запропоновано використання схеми чистого згину, перевагами якого є можливість одночасного випробування багатьох ПЗ і забезпечення для них ідентичності напружено-деформованого стану.

Слід зазначити, що для здійснення неруйнівної діагностики міцності паяних з'єднань навантаження повинно не перевищувати допустимого напруження на розтяг ПЗ. Тобто тестове напруження повинно

знаходиться в межах ділянки пропорційності матеріалу припою, в якій відбувається тільки пружна деформація матеріалу, що може бути підтверджено відсутністю сигналів акустичної емісії. Таким чином, в умовах неруйнівного навантаження застосування методу акустичної емісії дозволить здійснювати діагностику міцності.

Таблиця 1

**Середні значення руйнівного навантаження
та параметрів акустичної емісії при випробуванні паяних з'єднань**

Стан паяного з'єднання	Руйнівне навантаження, Н	Відносна зміна міцності, %	Сумарний рахунок АЕ, імп.	Максимальна активність, імп/с
Випробування паяного з'єднання наскрізного монтажу на відрив				
Бездефектний	95,4	–	38	15
Холодна пайка	52,8	-44,65	85	40
Випробування паяного з'єднання поверхневого монтажу на розтяг				
Бездефектний	33,94	–	32	14
Холодна пайка	21,54	-36,53	55	32
З перегрівом	50,18	+47,85	28	11

Допустиме напруження на розтяг визначається за формулою:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_B}{s} = \frac{40}{2,5} = 16 \text{ МПа}, \quad (1)$$

де $\sigma_B = 40$ МПа – мінімальне значення границі міцності для припою ПОС-61 [16]; $s = 2,5$ – рекомендований коефіцієнт запасу міцності.

Відповідно до схеми навантаження максимальне напруження [17] виникає в небезпечному поперечному перерізі балки на довжині відрізка чистого згину l між опорами, де згинальний момент є максимальним $M_{\max} = P \times L$, де L – плече сили. Тоді максимально допустиме навантаження:

$$[P] \leq \frac{b \cdot h^2}{6L} [\sigma], \quad (2)$$

де b – ширина, h – товщина друкованої плати, L – плече сили, яке дорівнює відстані від місця прикладення сили на краю друкованої плати до ближчої опори. При $b = 50$ мм, $h = 1,5$ мм, $L = 20$ мм, $[P] = 15$ Н.

Випробування проводилися для 5-ти склотекстолітових фольгованих друкованих плат розмірами $160 \times 50 \times 1,5$, на кожній з яких було встановлено по 9 SMD компонентів розташованих на однаковій відстані один від одного в три ряди.

Випробування проводились в режимі циклічного пульсуючого навантаження в діапазоні від 0 Н до $P_{\text{тест}} = 15$ Н. Такому навантаженню відповідає максимальний прогин плати $f_{\max} = 1,9$ мм. Навантаження та розвантаження здійснювалося зі швидкістю 20 мм/хв. із витримкою 30 с між цими фазами. Випробування повторювалось в 10 циклах, або до появи ознак руйнування. Прояв ефекту Кайзера [18], який полягає в тому, що при повторному навантаженні сигнали АЕ практично відсутні, був використаний для підтвердження пружних деформацій та міцності паяних з'єднань, а також для підтвердження достовірності реєстрації п'єзодатчиком саме сигналів АЕ, а не різного роду шумів. Для реєстрації АЕ датчик кріпився до поверхні плати.

Характерно, що відсутність ефекту Кайзера при повторному навантаженні свідчила про наявність пластичних деформацій, або актів руйнування та розвитку тріщин, пор та інших дефектів. Витримка на піку навантаження дозволяла додатково виявити процеси релаксації та повзучості паяних з'єднань.

Під час випробувань 2 із 5-ти друкованих плат показали прояв сигналів АЕ та їх розвиток, зокрема сумарного рахунку подій, амплітуда яких перевищувала рівень дискримінації, впродовж випробування. Для прикладу на рис. 2 показано розвиток активності та сумарного рахунку АЕ друкованої плати, паяне з'єднання якої було зруйновано на 5-му циклі навантаження. Проведений огляд цих плат виявив наявність тріщини в паяному з'єднанні та відшарування контактної площадки. Слід зазначити, що випромінювання АЕ спостерігалось також в паузах на піку навантаження. Таким чином подібний метод навантаження із одночасним аналізом параметрів сигналів АЕ може бути використаний для діагностики міцності паяних з'єднань під дією неруйнівного навантаження.

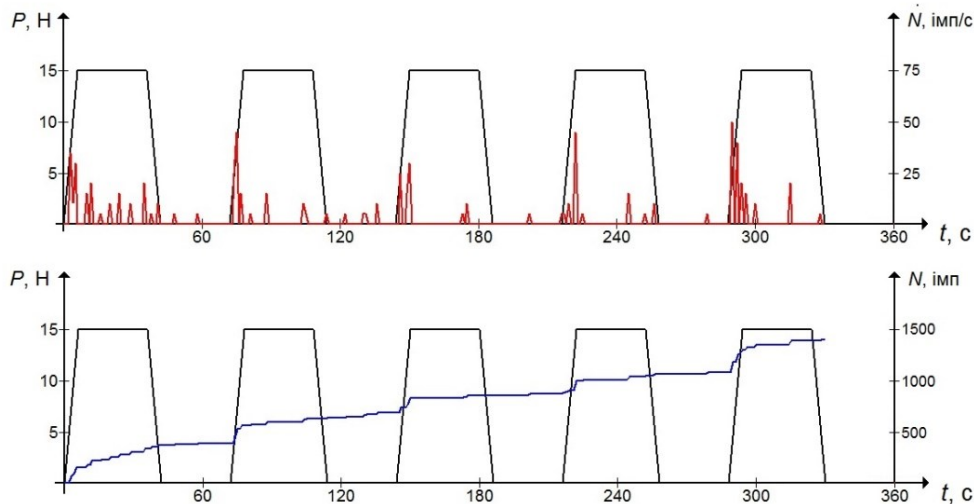


Рис. 2. Розвиток активності (N) та сумарного рахунку (N) при циклічному навантаженні друкованих плат

Діагностика паяних і зварних з'єднань захисних герметичних корпусів електронних модулів

Об'єктами дослідження були корпуси модулів надвисоких частот (НВЧ) спеціального призначення, які використовуються в авіаційних системах навігації і керування. На висоті корпус піддається дії внутрішнього тиску, який є надмірним порівняно із низьким зовнішнім тиском. При зльотах і приземленнях, корпуси піддаються дії знакозмінного навантаження і можуть бути розгерметизовані через надмірні втомні напруження, що діють на матеріали корпусу та їх зварні чи паяні шви. За технічними вимогами такі корпуси повинні витримувати не менше 100 зльотів і приземлень (циклів). При цьому герметичність за швидкістю витоку гелію повинна складати не більше $5 \cdot 10^{-2}$ Па·см³/с. Але не всі корпуси витримують таку кількість циклів, і на практиці розгерметизація може статися у будь-який момент.

Досліджені корпуси виготовлені із алюмінієвого сплаву АМГ-2 (рис. 3, а) представлені двома типами, які відрізняються технологією герметизації: 1) лазерним зварюванням (тип К); 2) паяним швом або герметиком (типи КМ, КБ).

Для проведення натурних досліджень було використано стенд тестування, який складається із двох комплексів: випробувального (термопневмосистема); та вимірювального, який реалізує такі методи як манометричний; бульбашковий; електротензометрії та акустичної емісії.

Діапазон вимірюваних величин надлишкового тиску для манометра 3 складає від 0 до 4 атм (ціна поділки – 0,04 атм), для манометра 5 – від 0 до 16 атм (ціна поділки – 0,16 атм). Кліматична камера «Фойтрон» 3626/51 слугує для імітації кліматичних умов навколишнього середовища (температури та вологості).

Місця установки тензодатчиків та індикатора годинникового типу показані на рис. 3, б.

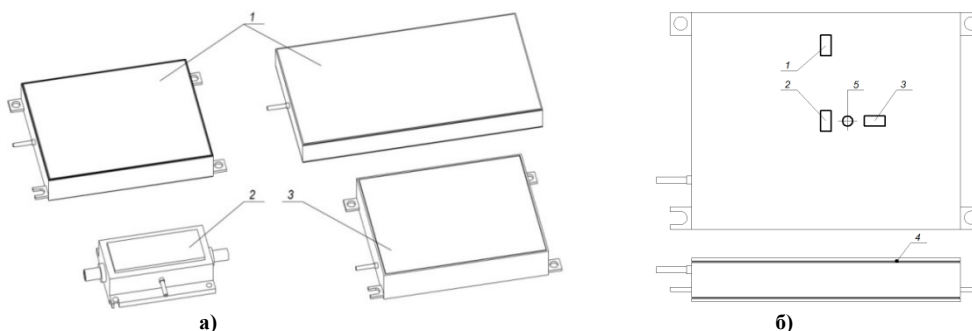


Рис. 3. Корпуси модулів НВЧ: а) К (1), КМ (2), КБ (3); б) препарування корпусів: 1 – тензодатчики з робочою базою 10 мм; 2 – тензодатчики з робочою базою 1 мм; 3 – індикатор годинникового типу

Для візуального контролю моменту втрати герметичності корпусу модуля на кожному ступені навантаження проводиться відсічення тиску повітря, після чого необхідно стежити за показаннями зразкового манометра на початку та в кінці етапу випробувань. Поряд з цим, у процесі випробувань можливий також візуальний контроль деформації корпусу модуля за індикатором годинникового типу.

У відповідності до програми випробувань корпусів НВЧ під дією внутрішнього надмірного тиску та температури були отримані наступні результати:

- 1) при $P_{\text{тест}} = 1,6$ атм і $\tau = +20^\circ\text{C}$ корпуси герметичні;
- 2) при $P_{\text{тест}} = 0,4$ атм і термоциклюванні в діапазоні $\tau = -60^\circ\text{C} - +85^\circ\text{C}$ в кількості трьох циклів (за винятком корпусів з явними дефектами шва) корпуси герметичні;
- 3) при циклічній зміні $P_{\text{тест}} = 0 - 1,6$ атм і $\tau = +85^\circ\text{C}$ корпуси не витримують заданих 100 циклів навантаження через недотримання технології виконання шва; структурні зміни в матеріалі шва при $\tau = +85^\circ\text{C}$ пов'язані, як із зміною температури, так і одночасно з деформаціями матеріалу шва.

Виявлений розкид отриманих значень тиску розгерметизації, який склав від 0,18 до 3,00 атм, та кількості циклів навантаження до розгерметизації корпусів свідчить про нестабільність та ненадійність технології герметизації. В такій ситуації підвищення надійності виготовлюваних корпусів можливо із розробкою методів контролю їх технічного стану, в процесі виробництва і експлуатації. Такий метод і засоби його реалізації були розроблені на базі методів електротензометрії та акустичної емісії, які дозволили визначити напружено-деформований стан та виявити процеси руйнування, які виявляються причинами розгерметизації об'єктів дослідження.

Оцінка напружено-деформованого стану корпусів НВЧ

Визначення напружено-деформованого стану корпусів виконувалось при статичному випробуванні пневматичним навантаженням, яке здійснювалось східчасто із записом показників тензодатчиків через кожні 0,2 атм. Для оцінки впливу температури випробування відбувались при $\tau = +20^\circ\text{C}$ та $\tau = +85^\circ\text{C}$. Отримані значення відносних деформацій перераховувались у нормальні напруження за законом Гука, при наступних значеннях модулю Юнга $E = 0,71 \cdot 10^5$ МПа – для АМГ-2; та $E = 39,7 \cdot 10^3$ МПа при $\tau = +20^\circ\text{C}$ і $E = 23,4 \cdot 10^3$ МПа при $\tau = +85^\circ\text{C}$ – для матеріалу припою [16]. Визначення прогину кришок корпусів здійснювались індикатором годинникового типу з ціною поділки 1 мкм. Контроль герметичності корпусів перевіряли методом занурення у спирт при надмірному тиску 0,4 атм.

Аналіз даних отриманих для корпусів із другої групи (КБ-3, КБ-4) показав, що напруження, які виникають в матеріалі кришок корпусів при температурах $+20^\circ\text{C}$ та $+85^\circ\text{C}$ є невеликими – в 5–6 разів менше границі міцності їх матеріалу – АМГ-2 ($\sigma_B = 200$ МПа $\pm 30\%$; $\sigma_T = 80$ МПа) і не представляють небезпеки та не залежить температури. Проте в матеріалі шва, під тиском, що наближається до робочого навантаження 1,6 атм, величини напружень досягають величин більших не тільки його границі пропорційності, а й границі міцності ($\sigma_B = 50$ МПа). Діаграма напружено-деформованого стану випробуваного корпусу КБ-3 залежно від надлишкового тиску при $\tau = +20^\circ\text{C}$ показані на рис. 4.

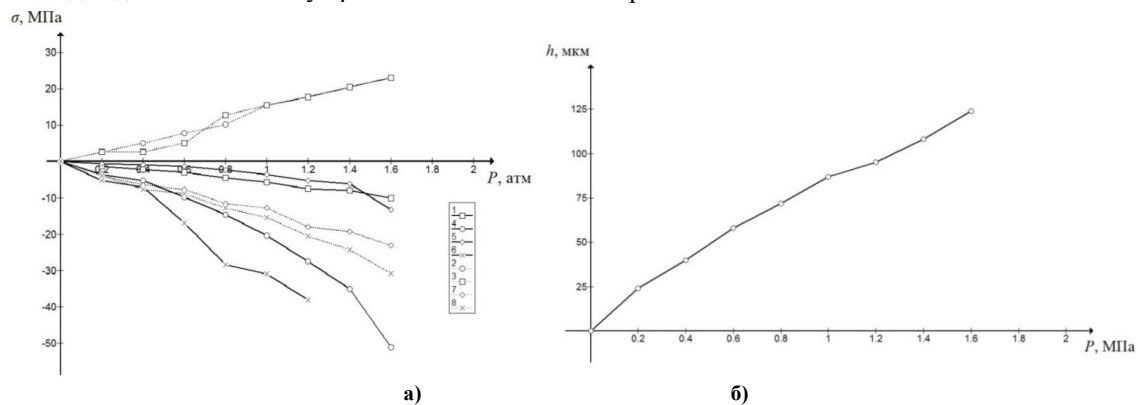


Рис. 4. Напруження у матеріалі шва (датчики 1, 4, 6) і кришки (датчики 7, 8) та прогин кришки корпусу КБ-3 (б) залежно від надлишкового тиску при $\tau = +20^\circ\text{C}$

При таких значеннях напружень матеріал шва відчуває пластичні деформації, і правильніше було б говорити, що датчики показують величини відносних деформацій, а не напружень. При такому характері деформацій припою (повзучість, великі деформації, великий час циклів теплових змін) відбувається перебудова його мікроструктури, що супроводжується зменшенням пластичності, і, при цьому, тріщини розвиваються в основному по межах зерен, тобто знижується втомна міцність шва. Подібні процеси відбуваються і в шві, який герметизує гвинт і кришку.

Наступні випробування для всіх типів корпусів проводились пневматичним навантаженням до руйнування при $\tau = +20^\circ\text{C}$. Одночасно із реєстрацією показників датчиків електротензометрії відбувалась реєстрація сигналів акустичної емісії.

Аналіз напружено-деформованого стану випробуваних корпусів типу К, виявив, що напруження на швах перевищують границю текучості ($\sigma_T = 80$ МПа) та досягають границі міцності ($\sigma_B = 200$ МПа $\pm 30\%$) зварного шва і спричиняють розгерметизацію гермо-вузлів. Характерним для корпусів було те, що напруження на швах і кришках мають протилежні знаки (рис. 5). Позитивні

напруження на кришках виробів свідчать про те, що вироби приймають діжку-подібну форму, в результаті чого на зовнішніх волокнах зварних швів повинні виникнути напруження стиску (які мають знак «мінус»), що і підтверджується результатами тензометрування.

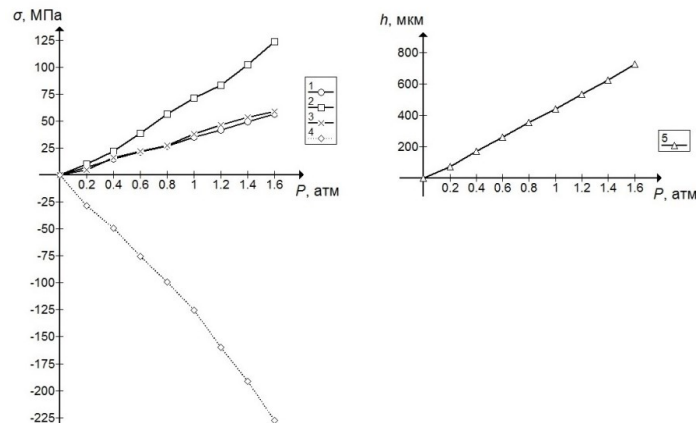


Рис. 5. Залежності напруження на кришці (1-3) і шві (4) та прогину кришки (5) корпусу К-21 від надлишкового тиску

Діагностика міцності та герметичності корпусів НВЧ методом акустичної емісії

Реєстрація сигналів АЕ здійснювалась резонансним п'єзоелектричним датчиком розташованим по центру кришки корпусів. Перешкодозахищеність від вібрацій, електричних наведень і т.п. досягалась пониженням повного підсилення приладу АФ-15 (80 дБ) на 9 дБ за допомогою вбудованого атенюатора та попереднім визначенням частотного діапазону корисних сигналів АЕ 200-500 кГц з використанням аперіодичного ПЕП із пологою АЧХ в діапазоні до 1,0 МГц.

Аналіз матеріалів АЕ дозволив виявити прояв значного рівня параметрів АЕ при тиску значно нижчому за тиск розгерметизації. В якості інформативних параметрів було запропоновано використовувати амплітуду та сумарний рахунок АЕ. Проте діагностування при статичному випробуванні не дає гарантії, що розгерметизація не відбудеться у наступному циклі навантаження, а саме в таких умовах працюють об'єкти дослідження. Тому подальші дослідження відбувались при циклічному випробуванні в пульсуючому режимі навантаження до $P_{\text{тест}} = 1,6$ атм із витримкою 1 хв. Випробування повторювалось в 100 циклах, або до появи розгерметизації корпусу. Прояв ефекту Кайзера, був використаний для перевірки герметичності та для підтвердження достовірності реєстрації п'єзодатчиками саме сигналів АЕ, а не різного роду шумів.

Характерно, що після початку повторного збурення АЕ, корпуси витримували в середньому біля 6–10 циклів до руйнування (рис. 6).

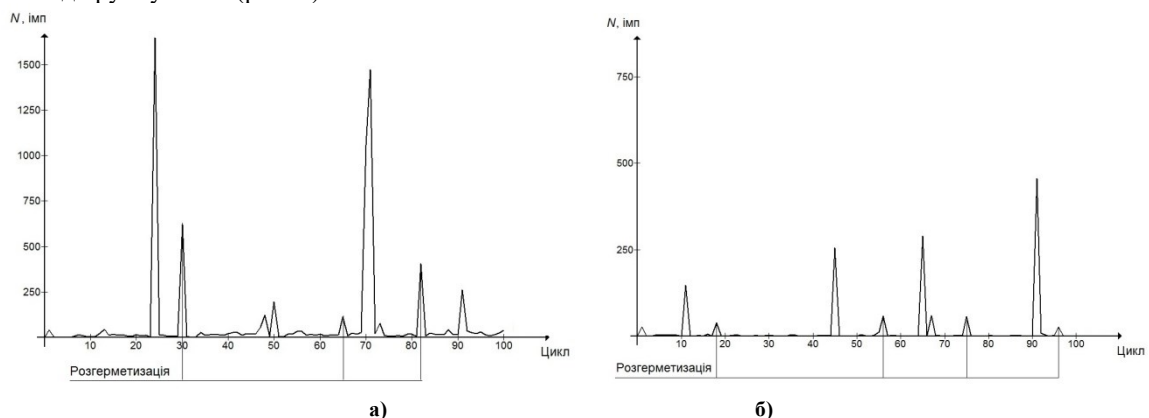


Рис. 6. Активність подій АЕ залежно від внутрішнього надлишкового тиску і циклічного навантаження корпусів К-17 (а) та К-18 (б)

Таким чином, повторний прояв сигналів АЕ свідчить про зародження і розвиток процесу руйнування зварного чи паяного шва корпусу, задовго до катастрофічного руйнування, тобто його розгерметизації, і свідчить про непридатність такого корпусу до експлуатації.

Методика неруйнівного діагностування міцності паяних та зварних з'єднань в конструкціях електронної техніки

Виходячи із отриманих результатів запропонована методика акустико-емісійної неруйнівної діагностики міцності нероз'ємних елементів конструкцій, зокрема їх паяних та зварних з'єднань:

1. Випробування здійснюють неруйнівним навантаженням, яке розраховується із коефіцієнтом запасу міцності s відносно граничного або руйнівного навантаження P_{\max} і відповідає допустимому напруженню паяного чи зварного з'єднання досліджуваної конструкції $P_{\text{тест}} = P_{\max}/s$.

2. Випробування проводиться в режимі пульсуючого циклу навантаження/розвантаження із витримкою паузи між цими фазами та одночасною реєстрацією параметрів сигналів акустичної емісії. При появі сигналів АЕ з амплітудою вище встановленого рівня дискримінації випробування продовжуються до десяти циклів. Повторний прояв АЕ із зростанням сумарного рахунку свідчить про розвиток небезпечних дефектів і початок процесу руйнування та непридатності об'єкту дослідження до експлуатації; при необхідності, проводиться локація небезпечних дефектів.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Випробування на міцність паяних з'єднань наскрізного та поверхневого монтажу двох-вивідних електронних компонентів в критичних умовах напружено-деформованого стану під дією простих видів механічного навантаження на відрив та розтяг показали зниження значень руйнівних навантажень ПЗ викликане дефектом «холодна пайка» в середньому на 47 % для наскрізного монтажу та на 36,5 % для поверхневого монтажу, та очікуване підвищення міцності на 48 % завдяки попередньому перегріву терміналів SMD.

Запропоновано використання схеми чистого згину для проведення випробування в режимі статичного та циклічного пульсуючого навантаження, яке створює напружено-деформований стан, що зустрічається в процесі експлуатації при деформації основи друкованих плат, перевагами якого є можливість одночасного випробування багатьох ПЗ і забезпечення ідентичності напружено-деформованого стану.

Запропоновано проведення неруйнівного випробування навантаженням, при якому напруження ПЗ знаходиться в межах ділянки пропорційності матеріалу припою, в якій відбувається тільки пружна деформація матеріалу, що може бути підтверджено відсутністю сигналів акустичної емісії. Також відсутність сигналів акустичної емісії слугує підтвердженням достовірності реєстрації п'єзодатчиком саме сигналів АЕ, а не різного роду шумів.

Циклічні випробування за пульсуючим циклом виявили, що відсутність ефекту Кайзера при повторному навантаженні свідчить про наявність пластичних деформацій, або актів руйнування та розвитку тріщин, пор та інших дефектів. Витримка на піку навантаження дозволяє додатково виявити процеси релаксації та повзучості паяних з'єднань.

Аналіз напружено-деформованого стану корпусів НВЧ під дією пневматичного навантаження здійснений методом електротензометрії виявив, що напруження в матеріалі кришок корпусів є невеликими – в 5–6 разів меншими границі міцності їх матеріалу – АМГ-2, проте в матеріалі шва герметизації величини напружень досягають величин більших не тільки його границі пропорційності, а й границі міцності.

Набула подальшого розвитку акустико-емісійна методика неруйнівної діагностики міцності нероз'ємних елементів конструкцій електронної техніки, зокрема їх паяних та зварних з'єднань, яка полягає у відборі інформативних параметрів: амплітуди та сумарного рахунку сигналів акустичної емісії, не перевищення порогового рівня яких в умовах циклічного навантаження, свідчить про придатність об'єкту дослідження до експлуатації.

Література

1. ДСТУ 2646–94. Плати друковані. Терміни та визначення. – Чинний від 1994-01-07. – Київ : Держстандарт України, 1994. – 44 с.
2. ДСТУ ІЕС 60917-1:2010. Конструкції механічні для електронного устаткування. Модульний принцип конструювання. Ч. 1. Родовий стандарт (ІЕС 60917-1:2009, IDT). – Київ : Держспоживстандарт України, 2013. – 21 с.
3. Robertson C. T. Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics / C. T. Robertson. – New Jersey : Prentice Hall Professional, 2003. – 277 p.
4. Tong J. P. C. A DMAIC approach to printed circuit board quality improvement / J. P. C. Tong, F. Tsung, B. P. C. Yen // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – London : Springer, 2004. – Vol. 23, Issue 7–8. – P. 523–531.
5. Electronic packaging: design, materials, process, and reliability / John H. Lau, C. P. Wong, John L. Prince, Wataru Nakayama. – New York: McGraw-Hill Professional, 1998 – 496 p.
6. Engelmaier W. Solder joints in electronics: design for reliability. Workshop Notes. Engelmaier Associates, Inc., Mendham, NJ, 1995. – 13 p.
7. ДСТУ 7655:2014. Вироби електронної техніки. Загальні вимоги щодо надійності та методи випробування. – На заміну ГОСТ 25359-82 ; чинний від 2015-07-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2009. – 9 с.
8. ДСТУ 8216:2015. Вироби електронної техніки. Класифікація за умовами застосування та вимоги стійкості до зовнішніх впливових чинників. – Київ : Держспоживстандарт України, 2017. – 11 с.

9. ДСТУ EN 1330-2:2008, Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 2. Загальні терміни стосовно методів неруйнівного контролю. – Київ : Держспоживстандарт України, 2009. – 22 с.
10. Optical Interconnects on and in Printed Circuit Boards. International Journal of Electronics and Communications / B. Wittmann, S. Lehmacher, S. Kopecz, A. Neyer // AEU International Journal of Electronics and Communications. – Elsevier GmbH, 2001. – Vol. 55, Issue 5. – P. 319–222.
11. Barto S. Nonlinear distortion of C/V characteristic – Useful tool for diagnostics of electrically conductive adhesives: Theoretical background, measuring equipment, selected applications / S. Barto and P. Mach // Proceedings of: Conf. on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostics), 6–8 Sept. 2016 Pilsen, Czech Republic. – Pilsen : IEEE, 2016. – P. 1–4.
12. ДСТУ EN 1330-1:2016. Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 1. Перелік загальних термінів. – Київ : Держспоживстандарт України, 2017. – 22 с.
13. 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. – P. 494–489.
14. Shear strength and fracture surface analysis of Sn58Bi/Cu solder joints under a wide range of strain rates / Yongqiang Wan, Shuang Li, Xiaowu Hu, Yu Qiu, Tao Xu, Yulong Li, Xiongxin Jiang // Microelectronics Reliability – Elsevier, 2018. – Vol. 86. – P. 27–37.
15. Kovtun I. Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // Proceedings of the Second IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo 2017), (Odessa, Ukraine, 1115 September, 2017). – P. 1–4.
16. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев ; отв. ред. Г. С. Писаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Наук. думка, 1988. – 736 с.
17. Писаренко Г. С. Опір матеріалів / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський ; за ред. Г. С. Писаренка. – 2-ге вид. допов. і перероб. – Київ : Вища школа, 2004. – 655 с.
18. Tonolini F. General review of developments in Acoustic Emission methods / F. Tonolini, A. Sala, G. Villa // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – Elsevier Ltd, 1987. – Vol. 28, Issues 1–5. – P. 179–201.

References

1. DSTU 2646–94. Printed circuit boards. Terms and definitions. – Valid from 1994-01-07. – Kyiv : Derzhstandard of Ukraine, 1994. – 44 p.
2. DSTU IEC 60917-1:2010. Mechanical constructions for electronic equipment. Module principle of construction. Pt. 1. Standard (IEC 60917-1:2009, IDT). – Kyiv : Dersspozhivstandard of Ukraine, 2013. – 21 p.
3. Robertson C. T. Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics / C. T. Robertson. – New Jersey : Prentice Hall Professional, 2003. – 277 p.
4. Tong J. P. C. A DMAIC approach to printed circuit board quality improvement / J. P. C. Tong, F. Tsung, B. P. C. Yen // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – London : Springer, 2004. – Vol. 23, Issue 7–8. – P. 523–531.
5. Electronic packaging: design, materials, process, and reliability / John H. Lau, C. P. Wong, John L. Prince, Wataru Nakayama. – New York: McGraw-Hill Professional, 1998 – 496 p.
6. Engelmaier W. Solder joints in electronics: design for reliability. Workshop Notes. Engelmaier Associates, Inc., Mendham, NJ, 1995. – 13 p.
7. DSTU 7655:2014. Electronic components. General standards for reliability and testing methods. – Valid from 2015-07-01. – Kyiv : Dersspozhivstandard of Ukraine, 2009. – 9 p.
8. DSTU 8216:2015. Electronic components. Classification by conditions of exploitation and standards of resistance to external impacts. – Kyiv : Dersspozhivstandard of Ukraine, 2017. – 11 p.
9. DSTU EN 1330-2:2008, Non-destructive control. Terminology. Pt 2. General terms on non-destructive control methods. – Kyiv : Dersspozhivstandard of Ukraine, 2009. – 22 p.
10. Optical Interconnects on and in Printed Circuit Boards. International Journal of Electronics and Communications / B. Wittmann, S. Lehmacher, S. Kopecz, A. Neyer // AEU International Journal of Electronics and Communications. – Elsevier GmbH, 2001. – Vol. 55, Issue 5. – P. 319–222.
11. Barto S. Nonlinear distortion of C/V characteristic – Useful tool for diagnostics of electrically conductive adhesives: Theoretical background, measuring equipment, selected applications / S. Barto and P. Mach // Proceedings of: Conf. on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostics), 6–8 Sept. 2016 Pilsen, Czech Republic. – Pilsen : IEEE, 2016. – P. 1–4.
12. DSTU EN 1330-1:2016. Non-destructive control. Terminology. Pt 1. List of general terms. – Kyiv : Dersspozhivstandard of Ukraine, 2017. – 22 c.
13. 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. – P. 494–489.
14. Shear strength and fracture surface analysis of Sn58Bi/Cu solder joints under a wide range of strain rates / Yongqiang Wan, Shuang Li, Xiaowu Hu, Yu Qiu, Tao Xu, Yulong Li, Xiongxin Jiang // Microelectronics Reliability – Elsevier, 2018. – Vol. 86. – P. 27–37.
15. Kovtun I. Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // Proceedings of the Second IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo 2017), (Odessa, Ukraine, 1115 September, 2017). – P. 1–4.
16. Reference book on strength of materials / G. S. Pisarenko, A. P. Yakovlev, V. V. Matveev ; ed. by G. S. Pisarenko. – 2-nd Edition. – Kyiv : Naukova dumka, 1988. – 736 p.
17. Pisarenko G. S. Strength of materials / G. S. Pisarenko, A. L. Kvitka, Y. S. Umanskiy; ed. by G. S. Pisarenko. – 2-nd Edition. – Kyiv : Higher school, 2004. – 655 p.
18. Tonolini F. General review of developments in Acoustic Emission methods / F. Tonolini, A. Sala, G. Villa // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – Elsevier Ltd, 1987. – Vol. 28, Issues 1–5. – P. 179–201.