

МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОЇ ДІАГНОСТИКИ НАДІЙНОСТІ ГЕРМЕТИЗАЦІЇ МОДУЛІВ НАДВИСОКИХ ЧАСТОТ

Об'єктами представленого дослідження є корпуси модулів надвисоких частот спеціального призначення, зокрема тих, які використовуються в авіаційних, морських і наземних системах навігації, керування і захисту сучасних надзвукових літаків, військового, цивільного та подвійного призначення. В процесі експлуатації корпуси піддаються численним перепадам зовнішнього тиску та температури, що може призвести до їх розгерметизації. Випробування проводились на створеному стенді, який складається із термо-пневматичної, тензометричної та акустико-емісійної систем. Проведені випробування корпусів внутрішнім надлишковим тиском виявили розкид значень тиску розгерметизації, що свідчить про нестабільність та ненадійність технології герметизації, зокрема лазерного зварювання та пайки. Застосування тензометричного та акустико-емісійних методів дозволили виявити характер напружено-деформованого стану корпусів і отримати інформативні параметри сигналів акустичної емісії, які були використані для розробки методу неруйнівного діагностування та прогнозування міцності і герметичності корпусів модулів надвисоких частот.

Ключові слова: герметичність, корпус, тензометрія, акустична емісія, деформація, напруження, тиск.

J. BOIKO, I. KOVTUN, S. PETRASHCHUK, O. KOVALCHUK

Khmelnytsky National University

NONDESTRUCTIVE METHODS FOR HERMETIC SEAL RELIABILITY DIAGNOSTICS IN SUPER-HIGH-FREQUENCY MODULES

The research given in the paper is focused on the strength and hermetic seal of the super-high-frequency sealed electronic modules which are installed onboard of airplanes, rockets or other type of transport and hence exposed to harsh environment of atmospheric air pressure and temperature drops which are likely to cause their depressurization. The cases of modules are made from aluminum alloy AMG-2 and sealed either by welding or by soldering. The cases differ in sizes and design of the sealed joint. For conducting thermal and overpressure tests the test installation has been developed which represents the train made of the following parts: tensometry and acoustic emission instruments, which are connected to personal computer through the analog-to-digital converter and system, interface; thermal and pressure testing systems. The research methods performed by the test installation are: manometrical method for evaluating excessive pressure that causes depressurization; acoustic emission method for defect detection and monitoring when the object is under pressure or temperature impacts; tensometry method for measuring strain and estimating stress in objects with respect to excessive pressure; and bubble method for location of places of the hermetic seal damages. Analysis of stress and deflection of the tested cases, in particular their caps and seams, revealed the inherent character of deformation that may cause depressurization of the sealed joints when those sustain inner overpressure. Analysis of acoustic emission data received during tests revealed informative parameters applicable for nondestructive tests of strength and hermetic seal for modules subjected to overpressure and thermal impacts. The nondestructive hermetic seal diagnostics and prediction method has been developed for cases of super-high-frequency modules by acceptable inner overpressure and thermal test's in accordance to which the tested case complies with technological standard in specified pressure range if specified acoustic emission parameter does not exceed the acceptable limit, otherwise the case is rejected or its depressurization is predicted by predefined prediction factor.

Keywords: hermetic seal; case; tensometry; acoustic emission; strain; stress; overpressure.

Вступ

Якість і надійність електронної апаратури забезпечується її конструкцією, технологією виготовлення і контролем її вихідних параметрів. Особливо це стосується техніки, яка використовується в авіації і космонавтиці, відмова якої може призвести до тяжких наслідків. Жорсткі умови експлуатації, зокрема широкий діапазон температур, знижений атмосферний тиск, вібрації і т.п., пред'являють до техніки підвищені вимоги.

Об'єктами представленого дослідження є корпуси модулів надвисоких частот (НВЧ) спеціального призначення, зокрема ті, які використовуються в авіаційних, морських і наземних системах навігації, керування і захисту сучасних надзвукових літаків, військового, цивільного та подвійного призначення. Електрична схема модуля монтується на об'єднувальній платі, яка розміщується в герметичному титановому, магнієвому, алюмінієвому або скляному корпусі [1, 2], кришки якого приварюють лазерним зварюванням або припаюють до основи, причому герметичність за швидкістю витіку гелію повинна складати не більше $5 \cdot 10^{-2}$ Па·см³/с.

Під час лету та впродовж польоту на великій висоті зовнішній атмосферний тиск повітря, що оточує корпус, стає значно нижче атмосферного тиску на землі, який також знаходиться всередині корпусу. Таким чином корпус піддається дії внутрішнього

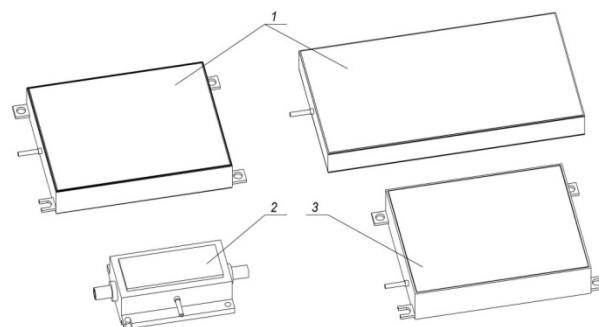


Рис. 1. Об'єкти дослідження: корпуси модулів НВЧ типу К (1), КМ (2), КБ (3)

тиску, який є надмірним в порівнянні із низьким зовнішнім. З урахування можливих перепадів температури цей внутрішній тиск може бути в 1,8 разу більше зовнішнього, і, розпираючи кришку і основу корпусу, може привести до деформацій останніх, зруйнувавши їх зварювальний шов або припій і привести до розгерметизації, а далі і до виходу модуля з ладу. Після посадки літака на землю значення зовнішнього тиску повертається до земного, тобто воно стає рівним внутрішньому, і навантаження що розпирало корпус зникає. При численних зльотах і посадках літака корпуси піддаються знакозмінним навантаженням і можуть бути розгерметизовані через надмірні втомні напруження, що діють на матеріали корпусу та зварювальні або паяні шви. За технічними вимогами такі корпуси повинні витримувати не менше 100 зльотів і посадок (циклів), але далеко не всі корпуси витримують таку кількість циклів, і на практиці розгерметизація може статися на будь-якому з циклів.

Всі досліджені корпуси виготовлені із алюмінієвого сплаву АМГ-2 і відрізняються один від одного розмірами та конструкцією вузла герметизації (рис. 2).

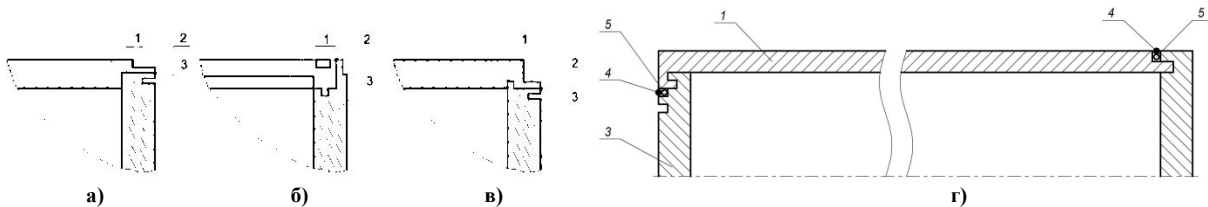


Рис. 2. Схеми вузлів герметизації корпусів модулів НВЧ першої групи:

1 – кришка; 2 – зварний шов; 3 – стінки корпусу; 4 – герметик Віксіт або паяний шов; 5 – дріт для розкриття

Досліджені типові схеми гермовузлів корпусів НВЧ представлені на рис. 2 а, б. У першій групі корпусів (типу К) герметизація досягається за допомогою лазерного зварювання місць стику кришки і основи, при цьому все навантаження від внутрішнього надлишкового тиску сприймається або повністю зварним швом (рис. 2, а), або зварним швом і конструкцією корпусу (рис. 2, б, в). У другій групі корпусів (типу КБ та КМ) (рис 2, г) герметизація місць стиків кришки і основи досягається за рахунок застосування герметика Віксіт (КБ-1) або припаюванням припоем (КБ-2, 3, 4, 5, КМ-1, 2, 6), для цієї групи корпусів навантаження від внутрішнього надлишкового тиску сприймається в основному конструкцією корпусу.

Методи та способи контролю герметичності та міцності корпусів НВЧ

При відборі методів контролю герметичності та міцності досліджуваних конструкцій необхідно враховувати їх придатність для поставлених умов випробувань: зміни температури від -60 ° С до +85 ° С, зміни надлишкового тиску від 0 до 10 атм, а також методів зварювання і пайки. Більшість методів неруйнівного контролю [3] не задовольняють умовам проведення досліджень через недостатню чутливість і малу точність вимірювань, громіздкість, високу вартість апаратури, економічну недоцільність, не відповідність до техніки безпеки і т.п.

Найбільш придатними для даної роботи є наступні методи: манометричний – дозволяє визначити величину надлишкового тиску, при якому відбувається розгерметизація виробу; бульбашковий – дозволяє виявити місця негерметичності; тензометрії – дає можливість контролювати рівень надлишкового тиску у виробі та вимірювати деформації для оцінки нормальних напружень в елементах конструкції виробу, які виникають в залежності та під дією надлишкового тиску; акустичної емісії (АЕ) – дає можливість виявляти дефекти у всьому об'ємі об'єкту дослідження при зміні внутрішнього тиску та слідкувати за динамікою їх розвитку. Комплексне використання перерахованих вище методів дозволяє, виконати необхідний обсяг досліджень з контролю герметичності корпусів НВЧ.

На рис. 3 представлено блок схему створеного стенду призначеного для випробування корпусів модулів НВЧ на міцність і герметичність в термокамері при надмірному тиску повітря.

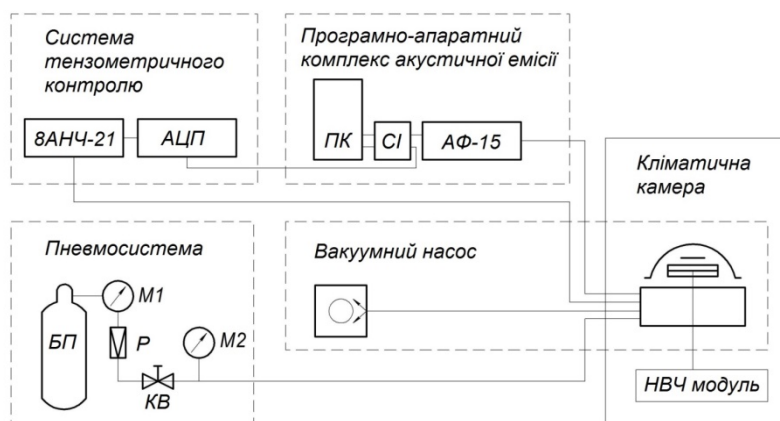


Рис. 3. Блок схема стенду експериментального для випробування герметичності корпусів модулів НВЧ

Блок схема стенду складається із двох функціональних комплексів апаратури: комплекс випробувальний; комплекс вимірювальний. Комплекс випробувальний призначений для здійснення тестового навантаження об'єктів дослідження під дією надмірного тиску та температури і складається із пневмосистеми, вакуумного насосу та кліматичної камери. Комплекс вимірювальний призначений для реєстрації та обробки матеріалів вимірювання деформацій та параметрів акустичної емісії складається із системи тензометричного контролю та програмно-апаратного комплексу акустичної емісії.

Випробування герметичності корпусів надвисоких частот із сумісним використанням методів електротензометрії та акустичної емісії

Корпуси були препаровані двома резонансними п'єзоелектричними датчиками розташованими на кришці біля коротких сторін з відстанню між ними в 100 мм для корпусів К-10 та К-12 і 80 мм – для корпусу К-11. Таке розташування п'єзодатчиків дозволяло утворювати лінійну антену і реєструвати лінійну координату джерел сигналів АЕ. Також корпуси були препаровані тензодатчиками, для реєстрації деформації та визначення напружень. Було встановлено 4 тензодатчики – 2 з вимірювальною базою 10 мм на кришках корпусів по середині перпендикулярно до довшої сторони, та 2 з вимірювальною базою 1 мм на швах вузлів герметизації модулів.

Препаровані корпуси приєднувались через трубку-штангель гнучким шлангом до установки для нагнітання повітря з метою створення надлишкового тиску. Виріб поміщався в термокамеру, де встановлювалась необхідна температура повітря (+20°C – для першої групи корпусів; +85°C – для другої) і підтримувалась незмінною протягом усіх циклів випробувань. На виріб встановлювався індикатор годинникового типу. Потім в досліджуваній корпус через трубку-штангель нагніталось повітря, створюючи надлишковий тиск усередині корпусу, послідовно доводячи його до $P_{\text{тест}} = 1,6$ атм. Протягом навантаження проводився запис показань тензодатчиків і датчиків АЕ. На певних ступенях навантаження (через кожні 0,2 атм) записували показання індикатора годинного типу. Тривалість кожної ступені навантаження і витримка на ній становила не менше 1 хв. до зникнення сигналів АЕ. Для візуального контролю моменту втрати герметичності корпусом на кожній ступені навантаження здійснювали відсічення тиску краном відсічки і стежили за показаннями зразкового манометру на початку і в кінці витримки.

У разі зменшення показань манометра (втрати герметичності корпусу), а також після затримки при $P_{\text{тест}} = 1,6$ атм здійснювали плавне зривання тиску в корпусі до $P = 0$ атм із записом сигналів АЕ і тензодатчиків безперервно, і показань індикатора годинного типу дискретно при тисках 1,6; 1,4; 1,2; 1,0; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0 атм. Записували нульові показання апаратури, відключали її, і виймали зразок із термокамери для контролю герметичності. Після охолодження досліджуваного корпусу до кімнатної температури (+20°C) проводили контроль герметичності корпусу методом занурення у спирт при надмірному тиску 0,4 атм згідно з [4].

Аналіз напружено-деформованого стану корпусів надвисоких частот за результатами електротензометрування

Для обробки даних тензометрії і отримання достовірної інформації про вимірюванні деформації було проведено тарування використовуваних тензорезисторів за допомогою балки рівного опору до згину. Отримані амплітуди сигналів електротензометрії з урахуванням знаку були перераховані в значення одиниць відносних деформацій (ОВД). Далі у відповідності до закону Гука для лінійних деформацій [5, 6] значення відносних деформацій були використані для розрахунку нормальних напружень в корпусах та швах герметизації модулів. Значення модуля Юнга прийняті для розрахунку становили: $E = 0,71 \cdot 10^5$ МПа – для матеріалу корпусів АМГ-2; $E = 39,7 \cdot 10^5$ МПа – для паяного шву корпусу.

Згідно з технологічними вимогами до герметичності досліджуваних корпусів тиск розгерметизації має бути не нижче 1,6 атм. Випробування корпусів показали розкид значень тиску розгерметизації для корпусів одного і того ж типорозміру і конструкції, що свідчить про нестабільність технології процесу самої герметизації. Виявлені значення тиску розгерметизації лежали в межах: 1,0...3,5 атм (рис. 2, а); 4,8...5,76 атм (рис. 2, б); 1,0...2,2 атм (рис. 2, в). Приклади розгерметизації корпусів представлені на рис. 4.

Напруження визначені для матеріалів кришок та швів та прогин кришок корпусів мали схожий характер прояву для тестованих корпусів. Для прикладу на рис. 5 показані графічні залежності вказаних параметрів від внутрішнього надлишкового тиску корпусів.

Напруження на швах і кришках, отримані в результаті тензометрування досліджуваних корпусів, мають протилежні знаки (рис. 5). Позитивні напруження на кришках виробів свідчать про те, що вироби приймають джгоподібну форму, в результаті чого на зовнішніх волокнах зварних швів повинні виникнути напруження стиску (які мають знак «мінус»), що і підтверджується результатами тензометрування швів. Отримані графічні залежності демонструють, що при досягненні тиску розгерметизації напруження на швах досягають границі міцності матеріалу зварного шву (для АМГ-2 $\sigma_B = 200$ МПа $\pm 30\%$), в той же час напруження на кришках – значно нижче. Враховуючи отримані знаки напружень, можна стверджувати, що розкриття швів починається із внутрішньої сторони шву. Частково

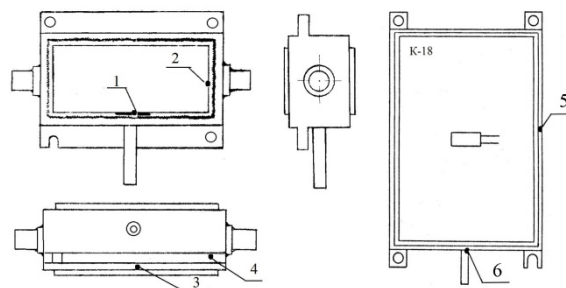


Рис. 4. Місця розгерметизації (1-6) корпусів модулів НВЧ

розкриттю шву перешкоджає шип-гребінь, виконаний в корпусах першої групи (рис. 2, а), що підтверджується деяким підвищенням тиску розгерметизації.

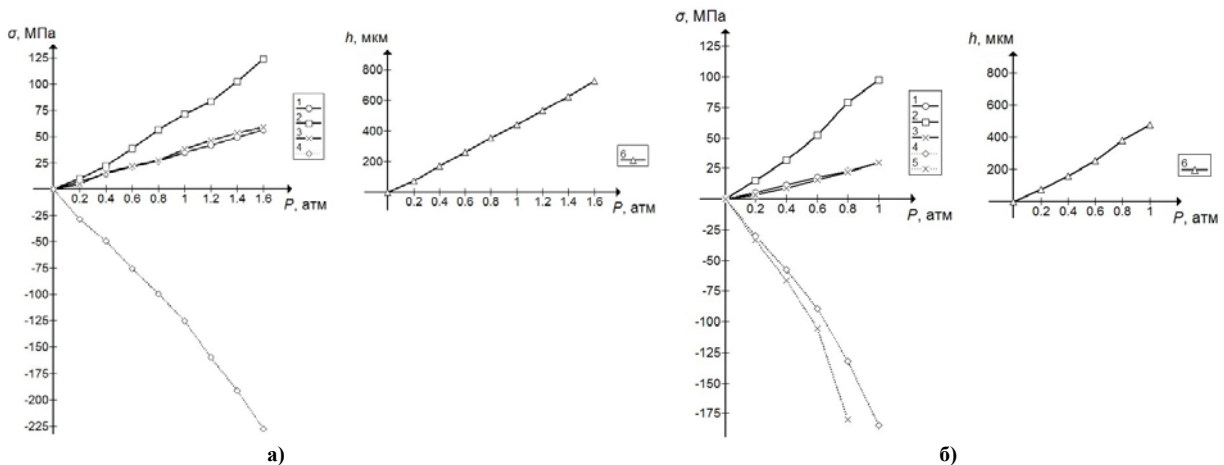


Рис. 5. Залежності напруження на кришках (1-3) і швах (4, 5) та прогину кришок (6) від надлишкового тиску корпусів К-7 (а) та К-9 (б)

Аналіз акустико-емісійного вимірювання корпусів НВЧ

При підвищенні вимог до надійності і довговічності зварних конструкцій має передбачатися вдосконалення засобів діагностики якості зварних з'єднань, що піддаються впливу внутрішнього тиску. Одним з можливих перспективних методів діагностики та прогнозування працездатності корпусів модулів НВЧ виявився метод акустичної-емісії [7–11].

Дослідження надійності герметизації і міцності корпусів модулів НВЧ з використанням методу АЕ були виконані за допомогою системи збору та обробки даних в програмно-апаратному комплексі акустичної емісії (рис. 3). Обробка сигналів АЕ проводилася після завершення експерименту за спеціальними програмами, що дозволяють побудувати часові залежності параметрів процесу АЕ та лінійний розподіл джерел АЕ [12, 13].

Для кожного корпусу модулів побудовано наступні графіки: активності процесу АЕ; амплітуди подій АЕ; потужності процесу АЕ в одиницю часу; амплітудний розподіл сигналів АЕ; розподіл сигналів по координаті для лінійної антени; тривимірні діаграми активності, амплітуди і потужності. Для прикладу на рис. 5 представлені графіки зазначених параметрів акустичної емісії, отримані при випробуванні корпусу К-10.

Як видно із представлених матеріалів, найбільш значний рівень сигналів АЕ мав місце при тиску 0,8 атм: амплітуда перевищила 400 мкВ, активність – 125 імп/с, енергія $E = 3 \cdot 10^{-10}$ мкВ²·с та потужність $W = 0,7 \cdot 10^{-9}$ мкВ². Це значення тиску, при якому напруження в корпусі і звареному шві ще далекі від граничних, тобто є безпечними для міцності конструкції, і може бути прийнято в якості діагностичного $P_{пр}$. Якщо після цього взяти відношення тиску розгерметизації до контрольного діагностичного, то можна отримати деяке число, яке назвемо коефіцієнтом прогнозування:

$$K = \frac{P_{zp}}{P_{пр}} \quad (1)$$

З огляду на те, що руйнування шва відбулося при $P_{гр} = 2$ атм, коефіцієнт прогнозування граничного (руйнівного) тиску для корпусу типу К-10: $K_{10} = 2 / 0,8 = 2,5$.

Аналіз отриманих матеріалів АЕ та коефіцієнтів прогнозування дозволяють зробити висновок про потенційну можливість використання методу АЕ для неруйнівного контролю якості зварювання модулів і для діагностування їх граничного (руйнівного) тиску. За діагностичний або контрольний тиск можна вибирати такий, щоб був безпечним для міцності конструкції, зокрема щоб напруження в зварному шві не перевищували $0,5\sigma_B$, і при якому має місце значний прояв всіх або деяких параметрів сигналів АЕ. При цьому можна знайти і в подальшому використати коефіцієнт прогнозування тиску розгерметизації тестованих корпусів.

Звичайно, коефіцієнт прогнозування тим більше, ніж при менших навантаженнях в порівнянні з руйнівними робиться прогноз або проводиться неруйнівний контроль. Але, очевидно, прогнозування буде надійніше, якщо воно ведеться за аналізом сигналів АЕ, отриманих за весь період навантаження до навантажень, найближчих до граничних. На практиці, доцільно вибирати порогове навантаження за результатами обробки статичних матеріалів випробувань партії однотипних виробів. Як видно з наведених графіків (рис. 6), число подій (АЕ) при збільшенні внутрішнього надлишкового тиску безперервно зростає аж до руйнування, проте реєстрація сигналів починається не з нуля, а з деякого тиску (0,4 атм – К-10; 0,6 атм – К-12; 0,8 атм – К-11), що з однієї сторони є однією з ознак відсутності перешкод при записі АЕ, а з іншої – характеризує якість зварного шва.

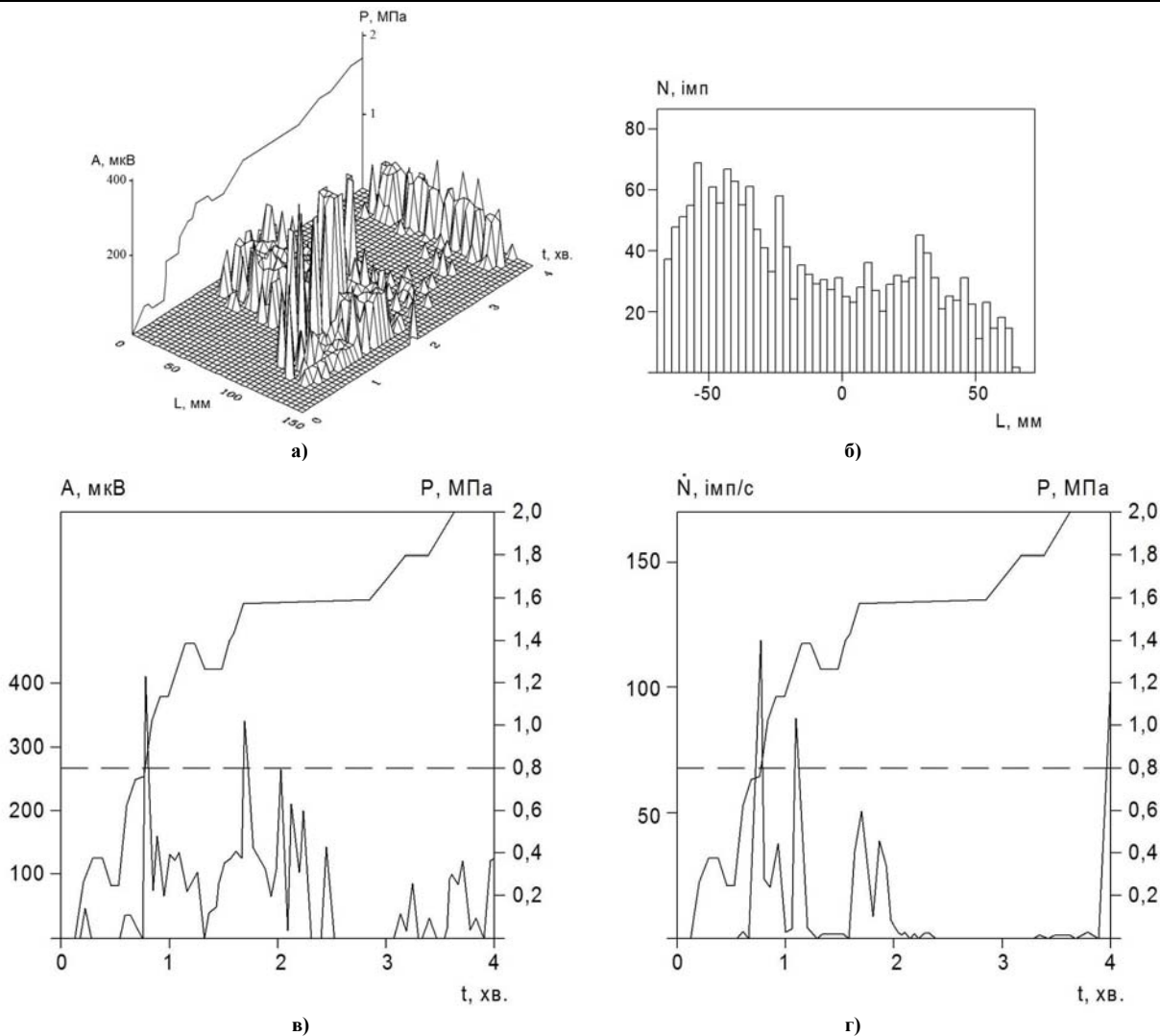


Рис. 6. Параметри акустичної емісії зареєстровані під час випробування корпусу К-10: а) тривимірна діаграма амплітуди подій АЕ; б) розподіл сигналів по координаті для лінійної антени; в) часова залежність амплітуди подій АЕ; г) часова залежність активності подій АЕ

Розробка методики неруйнівного діагностування та прогнозування міцності і герметичності корпусів надвисоких частот

При аналізі матеріалів експериментів для призначення надійного тиску прогнозування працездатності корпусів розглядалися значення середньої амплітуди на певній ступені навантаження та загальна сума подій і осциляцій накопичених за весь час до розглянутого тиску. На рис. 7 представлені залежності такого параметру як сумарний рахунок подій АЕ від внутрішнього надлишкового тиску.

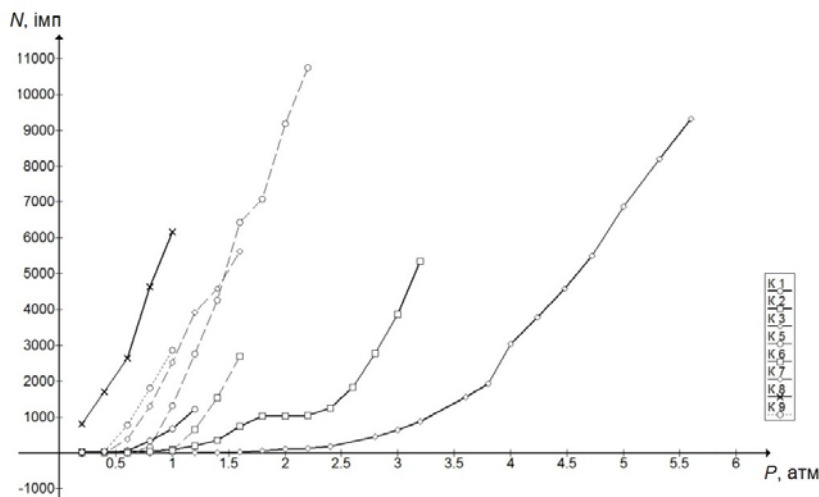


Рис. 7. Залежність сумарного рахунку подій від внутрішнього надлишкового тиску в корпусах типу К

Отримані значення сумарного рахунку сигналів АЕ в залежності від внутрішнього надлишкового тиску тестованих корпусів та коефіцієнти прогнозування тиску розгерметизації, можуть бути використані для визначення, тобто прогнозування тиску розгерметизації при безпечному навантаженні корпусів.

Прогнозований тиск розгерметизації визначається за формулою:

$$P_{\max}^{np} = P_{npz} \cdot K, \quad (2)$$

де P_{npz} – тиск, при якому сумарний рахунок сигналів АЕ досягає порогового значення, K – коефіцієнт прогнозування.

Значення коефіцієнтів прогнозування випробуваних корпусів лежать в межах 2-2,53. Цей розкид отриманих значень, відображає нестабільність фізико-механічних характеристик зварних швів, і є наслідком недосконалості технології лазерного зварювання. У цій ситуації, враховуючи особливу відповідальність тестованих корпусів (експлуатація на борту літака), для прогнозування тиску розгерметизації необхідно приймати мінімальне значення коефіцієнта прогнозування $K_{\min}=2$, тоді можлива помилка в прогнозуванні увійде в запас міцності.

Тепер для організації неруйнівного діагностування і прогнозування міцності та герметичності корпусів модулів НВЧ необхідно визначити безпечний рівень тиску тестування корпусів. Використовуючи мінімальне значення коефіцієнта прогнозування, тиск тестування буде розраховуватись по формулі:

$$P_{\text{тест}} = \frac{P_{\max(TY)}}{K_{\min}}, \quad (3)$$

де $P_{\max(TY)}$ – значення внутрішнього надлишкового тиску, який повинен витримати корпус за ТУ.

Неруйнующе навантаження корпусу до $P_{\text{тест}}$ дає можливість за параметрами сигналів АЕ оцінювати міцність і герметичність тестованих корпусів.

Запропонована методика неруйнівного діагностування і прогнозування міцності та герметичності корпусів модулів НВЧ складається з наступних етапів:

1. Діагностування і прогнозування міцності та герметичності корпусів модулів НВЧ проводиться при неруйнівному тестуванні корпусів внутрішнім надлишковим тиском. Стисле повітря подається всередину корпусу до досягнення тиску тестування $P_{\text{тест}} = P_{\max(TY)} / K_{\min}$, де $P_{\max(TY)}$ – граничний внутрішній надлишковий тиск корпусів за ТУ, K_{\min} – коефіцієнт прогнозування тиску розгерметизації ($K_{\min} = 2$). Під час випробування здійснюється одночасна реєстрація тиску і параметрів сигналів АЕ.

2. Якщо при навантаженні до $P_{\text{тест}}$ виникла акустична емісія, сумарний рахунок якої перевищив пороговий рівень (15 імп), корпус визнається непридатним для експлуатації в заданому по ТУ діапазоні тиску; при необхідності його тиск розгерметизації визначається за формулою $P_{\max}^{np} = P_{npz} \cdot K_{\min}$, де P_{npz} – тиск, при якому активність сигналів АЕ досягла порогового рівня.

3. Якщо сумарний рахунок АЕ не перевищив пороговий рівень, корпус вважається придатним для експлуатації в заданому по ТУ діапазоні тиску.

Висновки

Створено стенд тестування герметичності корпусів модулів надвисоких частот, який складається із двох комплексів – випробувального, призначеного для здійснення навантаження об'єктів дослідження під дією надмірного тиску та температури, та вимірювального, який складається із системи тензометричного контролю та програмно-апаратного комплексу акустичної емісії, призначеного для реєстрації та обробки деформацій та параметрів акустичної емісії.

Проведені випробування корпусів модулів надвисоких частот під дією внутрішнього надлишкового тиску виявили розкид значень тиску розгерметизації, що свідчить про нестабільність та ненадійність технології герметизації, зокрема лазерного зварювання та пайки.

Аналіз напружено-деформованого стану випробуваних корпусів модулів надвисоких частот, зокрема кришок та швів, виявив характер деформації останніх, в якому саме напруження на швах досягають границі міцності матеріалу зварного шву і спричиняють розгерметизацію гермо-вузлів під впливом внутрішнього надмірного тиску.

Розроблено неруйнівний акустико-емісійний метод діагностики та прогнозування герметичності корпусів модулів надвисоких частот, в якому придатність корпусів до експлуатації в заданому робочому діапазоні тиску визначається за умови не перевищення порогового рівня інформативного параметру сигналів акустичної емісії, в противному випадку корпус відбракується, або за необхідністю визначається прогнозований тиск розгерметизації за попередньо визначеним коефіцієнтом прогнозування.

Література

1. John H. Lau, C. P. Wong, John L. Prince and Wataru Nakayama. Electronic packaging: design, materials, process, and reliability. New York: McGraw-Hill Professional, 1998, 496 p.
2. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Bauriene and K. Pilkauskas “Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components”, МЕCHANIKA, vol. 22(6): 2016, pp. 489–494. DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.mech.22.6.16891>.

3. M. Balasko, E. Svab and G. Endrczy “Comparison of neutron radiography with other nondestructive methods”, in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 52, issue: 1, Feb. 2005, pp. 330–333.
4. State Industrial Standard GOST 20.57.406–81. Complex quality control. Production of electronics. Testing methods. M.: Standard inform, 1982. 133 p.
5. Писаренко Г. С. Опір матеріалів / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський. – 2 вид. – К., 2004, 655 с.
6. Ройзман В. П. Опір матеріалів / В. П. Ройзман. – Львів : Афіша, 2004. – 108 с.
7. V. Emamian, Zhiqiang Shi, M. Kaveh and A.H. Tewfik “Acoustic emission classification using signal subspace projections”, in *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2001. Proceedings. (ICASSP '01). 2001 IEEE International Conference, Salt Lake City, UT, USA, 7–11 May 2001.
8. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk “Nondestructive hermetic seal diagnostics and prediction method for super-high-frequency modules”. 2018 IEEE 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) : Proceedings of a meeting held, 20–24 Feb. 2018, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 776–780. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336314.
9. J. Boiko, I. Kovtun, S. Petrashchuk Vibration transmission in electronic packages having structurally complex design. First Ukraine IEEE international Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON - 2017): Proceedings of a meeting held, 29 May-2 June 2017. Kiev, Ukraine, 2017. P. 514–517. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100294.
10. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, T. Kałaczyński Theory and practice of vibration analysis in electronic packages. MATEC Web Conf. 17th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles. 2018. Vol. 182. P. 10. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818202015>.
11. Kovtun. Acoustic emission application for nondestructive strength diagnostics of printed circuit boards / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // *Вісник Хмельницького національного університету = Herald of Khmelnytskyi National University*. Технічні науки : наук. журн. – Хмельницький, 2018. – № 1. – С. 12–17.
12. F. Tonolini, A. Sala, G. Villa. (1987). General review of developments in Acoustic Emission methods. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 28(1-5), pp. 179–201. [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(87\)90075-5](https://doi.org/10.1016/0308-0161(87)90075-5).
13. W. Carter Ralph, Gregory L. Daspit, Andrew W. Cain and others, “Acoustic emission detection of BGA components in spherical bend”, in *2013 Proc. IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conf.*, Las Vegas, NV, USA, 2013, pp. 208–213. DOI: 10.1109/ECTC.2013.6575573.

References

1. John H. Lau, C. P. Wong, John L. Prince and Wataru Nakayama. *Electronic packaging: design, materials, process, and reliability*. New York: McGraw-Hill Professional, 1998, 496 p.
2. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Bauriene and K. Pilkauskas “Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components”, *MECHANIKA*, vol. 22(6): 2016, pp. 489–494. DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.mech.22.6.16891>.
3. M. Balasko, E. Svab and G. Endrczy “Comparison of neutron radiography with other nondestructive methods”, in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 52, issue: 1, Feb. 2005, pp. 330–333.
4. State Industrial Standard GOST 20.57.406–81. Complex quality control. Production of electronics. Testing methods. M.: Standard inform, 1982. 133 p.
5. Писаренко Г. С. Опір матеріалів / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський. – 2 вид. – К., 2004, 655 с.
6. Ройзман В. П. Опір матеріалів / В. П. Ройзман. – Львів : Афіша, 2004. – 108 с. V. Emamian, Zhiqiang Shi, M. Kaveh and A.H. Tewfik “Acoustic emission classification using signal subspace projections”, in *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2001. Proceedings. (ICASSP '01). 2001 IEEE International Conference, Salt Lake City, UT, USA, 7–11 May 2001.
7. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk “Nondestructive hermetic seal diagnostics and prediction method for super-high-frequency modules”. 2018 IEEE 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) : Proceedings of a meeting held, 20–24 Feb. 2018, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 776–780. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336314.
8. J. Boiko, I. Kovtun, S. Petrashchuk Vibration transmission in electronic packages having structurally complex design. First Ukraine IEEE international Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON - 2017): Proceedings of a meeting held, 29 May-2 June 2017. Kiev, Ukraine, 2017. P. 514–517. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100294.
9. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, T. Kałaczyński Theory and practice of vibration analysis in electronic packages. MATEC Web Conf. 17th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles. 2018. Vol. 182. P. 10. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818202015>.
10. Kovtun. Acoustic emission application for nondestructive strength diagnostics of printed circuit boards / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // *Вісник Хмельницького національного університету = Herald of Khmelnytskyi National University*. Технічні науки : наук. журн. – Хмельницький, 2018. – № 1. – С. 12–17.
11. F. Tonolini, A. Sala, G. Villa. (1987). General review of developments in Acoustic Emission methods. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 28(1-5), pp. 179–201. [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(87\)90075-5](https://doi.org/10.1016/0308-0161(87)90075-5).
12. W. Carter Ralph, Gregory L. Daspit, Andrew W. Cain and others, “Acoustic emission detection of BGA components in spherical bend”, in *2013 Proc. IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conf.*, Las Vegas, NV, USA, 2013, pp. 208–213. DOI: 10.1109/ECTC.2013.6575573.

Рецензія/Peer review : 8.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 22.11.2018 р.
Прорецензовано редакційною колегією