

## НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ І ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ ГЕРМЕТИЗОВАНИХ МІКРОСКЛАДАНЬ НВЧ-МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

В роботі запропоновано акустико-емісійний метод і засіб неруйнівного контролю і прогнозування міцності і герметичності зварних алюмінієвих корпусів мікроскладань НВЧ-діапазону, які піддаються перепадам атмосферного тиску внаслідок підняття на висоту під час експлуатації на літальних апаратах. Представлені результати досліджень, на основі яких вироблено практичну методику неруйнівного контролю міцності та попередження небезпечних станів корпусів мікроскладань НВЧ, встановлених на борту літака, в якому датчик АЕ служить датчиком безпеки на борту і за 6–10 циклів (тобто зльотів і приземлень) до катастрофічної руйнації корпусу «попереджає» про початок процесу руйнування. Спроектований і створений портативний АЕ-прилад, індикаторний пристрій якого сигналізує про наявність АЕ, яка перевищує заздалегідь установлений амплітудний рівень.

Ключові слова: неруйнівний контроль, міцність, прогнозування, акустична емісія, мікроскладання НВЧ, зліт/посадка літака.

YU.I. YATSYNYCH, V.P. ROYZMAN, A.V. GOROSHKO

Khmelnytskyi National University

### NON-DESTRUCTIVE CONTROL AND FORECASTING OF STRENGTHENED STRENGTHS MICROCOMPOSITION OF UHF ACOUSTICAL EMISSION METHOD

The reasons for depressurization of the microwave housing of microwave assemblies are analysed in the paper. It was found that the depressurization occurred as a result of cyclic loading in excess of  $\mu\text{m}$ . Experimental facilities have been created for experiments with the loading of micro assemblies by internal pressure and recording the parameters of acoustic emission signals. An acoustic emission method and a means of non-destructive control and prediction of the strength and tightness of microwave-welded aluminium enclosures that are exposed to atmospheric pressure changes due to elevation during operation on aircraft are proposed. The results of researches on the basis of which the practical method of non-destructive strength control and prevention of the dangerous states of microwave housing cases installed on board an aircraft in which the AE sensor serves as a safety sensor on board and for 6-10 cycles (take-offs and landings) before catastrophic failure are presented. A portable AE device has been designed and created, the indicator device of which indicates the presence of AE that exceeds the pre-set amplitude level.

Keywords: non-destructive testing, durability, forecasting, acoustic emission, microwave assembly, airplane take-off.

**Постановка проблеми.** У мікроелектроніці, силовій електроніці та електротехніці широко використовуються герметизовані елементи та функціональні вузли. Герметизація виключає вплив навколишнього середовища на внутрішній простір елементів і досягається різноманітними конструкторськими і технологічними засобами. Поряд з компаундуванням для герметизації функціональних вузлів електроніки, зокрема мікроскладань НВЧ-діапазону, які піддаються впливу коливань атмосферного тиску, застосовують зварні металеві корпуси. Така конструкція дає змогу не лише захистити виріб від дії перепаду тиску при зльотах/посадках літака, на якому вони функціонують, а й забезпечити ефективне екранування електронного вузла (рис. 1) [1]. При експлуатації мікроскладань НВЧ на літаках нерідко виникає їх розгерметизація через вплив циклічної зміни тиску, що відповідають зльоту/посадці. Внаслідок підняття на висоту всередині корпусу викликає надлишковий тиск, що може зруйнувати з'єднання корпусу з кришкою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні проблема механічної міцності мікроскладань і друкованих плат є актуальною і частково вирішується конструкторськими і технологічними методами на етапі виготовлення. Так, у роботі [2] автори застосовують лазерні методи підвищення надійності деяких електричних і електронних компонентів, що включають технологію з'єднання, модифікації поверхні, точного формування і лазерного зварювання.

У роботі [3] представлені результати досліджень міцності гнучких елементів електроніки і методи забезпечення їх стійкості до деформації. Різні автори [4] пропонують методи розрахунку і оцінювання пошкоджень в електронних паяних з'єднаннях за умов дії випадкової вібрації на друкованій платі.

Проблема підвищення надійності з'єднань корпусів мікроскладань НВЧ піднімалась у роботах вітчизняних і закордонних вчених [1, 5, 6]. Так, у [5] досліджено вплив технології зварювання на міцність з'єднань мікроскладань і мікросхем. У роботах [6, 7]



Рис. 1. Типи гермовузлів мікроскладань

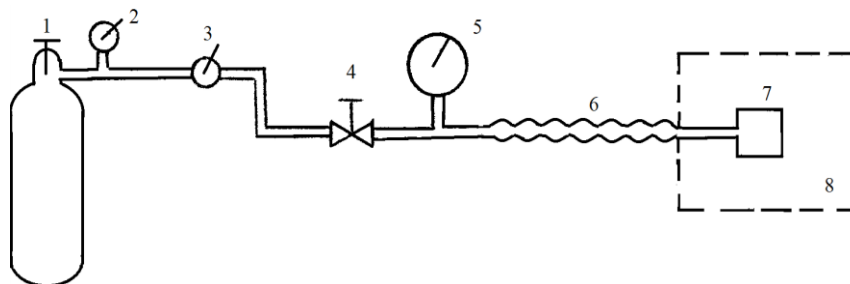
автори дослідили напружено-деформований стан плат міроскладань при динамічних навантаженнях, у [8] представлені результати ґрунтовних досліджень напружено-деформованого стану міроскладань під дією циклічно зміцнювальної температури та механічного зусилля, досліджені деформації паяних з'єднань. Результати огляду закордонних літературних джерел виявили повну відсутність методів неруйнівного контролю і прогнозування технічного стану корпусів міроскладань в процесі експлуатації. В Україні ж цю проблему досліджували Ройзман В.П., Цасюк В.В., Ковтун І.І. Деякі їх результати опубліковані у [9–11].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Корпуси досліджуваних міроскладань виготовляються з алюмінієвого сплаву АМГ-2 і відрізняються один від одного розмірами і конструкцією вузла герметизації кріплення кришок корпусів до основи. У першій групі корпусів (К-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12) герметизація досягається зварюванням місць стику кришок і підкладки лазерним променем, при цьому все навантаження від внутрішнього надлишкового тиску сприймається або повністю зварним швом, або звареним швом і конструкцією виробу. У другій групі корпусів (КБ-1 і КБ-2 корпусу вузла ВЧ-0100) герметизація місць стику кришки і підкладки досягається за рахунок застосування герметика Віксинт (КБ-1) або пайки припоєм (КБ-2). Для цієї групи корпусів навантаження від внутрішнього надлишкового тиску сприймається в основному конструкцією корпусу. Корпус міросхеми НВЧ повинен забезпечувати жорстке закріплення плати і з'єднання її виводів з переходами, що забезпечують введення-виведення енергії; захист схеми від зовнішніх впливів; функцію екрану; тепловідведення від ділянок плати, в яких розсіюється електромагнітна енергія [12].

Для усунення проблеми руйнування корпусів в експлуатації була поставлена задача експериментально знайти граничні значення надлишкового внутрішнього тиску розгерметизації корпусів міроскладань НВЧ, виміряти механічні напруження на кришках і зварних швах виробів, визначити найбільш ненадійні конструкції, виявити можливість оцінювання надійності герметизації і міцності досліджуваних об'єктів, а також її прогнозування.

Для оцінювання міцності матеріалу і герметичності корпусів міроскладань НВЧ вирішено було використати метод неруйнівного контролю під час випробувань. Такими методами можна також виявляти потенційно ненадійні з точки зору механічної точності ВЕТ, що у перспективі знизить рівень браку і зменшить витрати на ліквідацію наслідків відмов ВЕТ. Перспективним методом є метод акустичної емісії (АЕ), який дає змогу не лише знаходити місця виникнення потенційно небезпечних дефектів матеріалу на стадії формування тріщин, а й прогнозувати їх розвиток.

**Результати досліджень.** Для проведення досліджень було створено спеціальну установку, що складається з балона стисненого повітря, манометра для вимірювання величини тиску повітря в балоні,



1 – балон; 2 – манометр; 3 – понижувальний редуктор; 4 – кран відсічки;  
5 – манометр зразковий; 6 – гнучкий шланг; 7 – термокамера; 8 – корпус НВЧ  
Рис. 2. Схема установки для нагнітання повітря

понижувального редуктора для зниження тиску до необхідного рівня, манометра для вимірювання величини надлишкового тиску, що подається в корпус НВЧ, системи шлангів і вентилів (рис. 2).

Для проведення експериментальних досліджень міцності з використанням методу АЕ було створено програмно-

апаратний комплекс АЕ на базі серійно випущеного АЕ-приладу АФ-15 і персонального комп'ютера. При розробці комплексу було проведено модернізацію трьох субблоків АЕ-приладу, створено модуль комп'ютерного паралельного інтерфейсу і розроблено пакет прикладних програм, що дало можливість комп'ютеризувати процес збору й опрацювання параметрів сигналів АЕ, тим самим підвищивши кількість опрацьовуваних сигналів у 40 разів. Перераховані установки, пристосування і апаратура об'єднані в єдине робоче місце, що дозволяє проводити дослідження герметичності і міцності міроскладань НВЧ при зміні температури, тиску в широкому діапазоні, відпрацьовувати методику контролю силових елементів конструкцій за інформативними параметрами АЕ.

У результаті проведених досліджень обґрунтовано і розроблено методику неруйнівного діагностування, прогнозування міцності та герметичності корпусів міроскладань НВЧ. Згідно з нею, діагностування і прогнозування міцності та герметичності корпусів здійснюється при неруйнівному тестуванні корпусів надлишковим внутрішнім тиском. Стиснуте повітря подається всередину корпусу до досягнення тестового тиску  $P_{тест} = P_{max(TV)} / K_{min}$ , де  $P_{max(TV)}$  – граничний внутрішній надлишковий тиск корпусів за ТУ,  $K_{min}$  – коефіцієнт прогнозування тиску розгерметизації ( $K_{min} = 2$ ). Під час випробування проводиться одночасна реєстрація тиску і параметрів сигналів АЕ. Якщо при навантаженні до  $P_{тест}$  виникла АЕ, активність якої перевищила контрольний рівень (15 імп./с), корпус визнається непридатним для експлуатації в заданому по ТУ діапазоні тисків; за необхідності його тиск розгерметизації визначається за формулою  $P_{max}^{нрз} = P_{нрз} K_{min} P_{max}^3 = P_{нрз}^3 K_{min}$ , де  $P_{нрз}$  – тиск, при якому активність сигналів АЕ досягла

контрольного рівня. Якщо ж активність АЕ не перевищила контрольний рівень, корпус вважається придатним для експлуатації в заданому по ТУ діапазоні тисків. Подальші дослідження корпусів проводилися в динамічному пульсуючому режимі навантаження (рис. 3, 4). Необхідність таких досліджень була викликана тим, що при експлуатації на літаках під час злетів і посадок корпусу піддаються змінному надлишковому тискові за пульсуючим циклом напружень і розгерметизовуються, витримавши обмежену кількість циклів. У цьому випадку важливо мати інформацію про зародження і розвиток процесу руйнування їх зварного шва з тим, щоб завчасно вжити необхідних заходів.

Для партії з 20 корпусів 100 циклів випробувань показали наступне: для герметичних корпусів має місце ефект Кайзера, відповідно до якого при повторному навантаженні до попереднього рівня АЕ не відновлюється. Проте для 2-х корпусів, що розгерметизувались під час випробувань, АЕ почала випромінюватись за 6–10 циклів до розгерметизації і вже не зменшувалася, а прогресувала аж до розгерметизації [10].

У результаті було розроблено метод неруйнівного контролю міцності та герметичності корпусів, експлуатованих на борту літака. Контроль корпусів проводиться автоматично під час польотів за допомогою вимірювального АЕ-приладу, встановленого на борту літака. Датчик АЕ, що передає сигнали АЕ у вимірювальний прилад, встановлюється на контрольованому корпусі, а індикацію приладу, що сигналізує про випромінювання сигналів АЕ, виведено в кабіну пілота. Якщо з будь-яких причин прилад АЕ не може бути встановлений на борту літака, то контроль корпусів проводиться обслуговуючим обладнанням літака техніком на землі, який тестує корпус подачею надлишкового тиску через кожні п'ять злетів і посадок. При цьому:

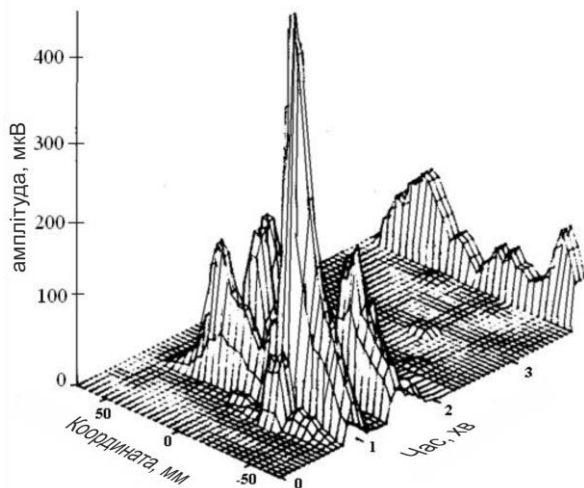


Рис. 3. Тривимірна діаграма зміни амплітуди сигналів АЕ залежно від часу

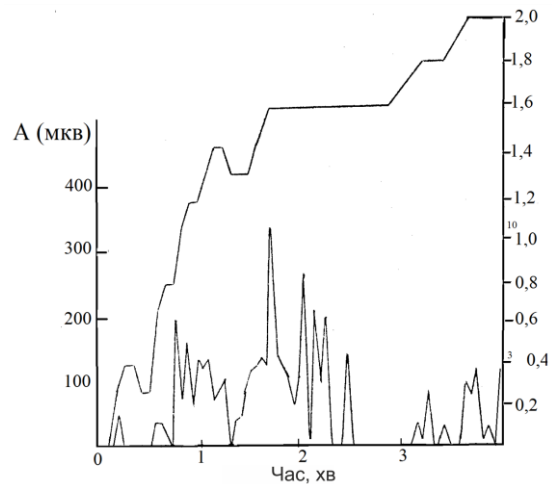


Рис. 4. Зміна амплітуди сигналів АЕ залежно від часу

– прояв ефекту Кайзера, тобто відсутність сигналів АЕ після першого циклу, тобто зльоту і посадки, свідчить про міцний і герметичний стан корпусу;

– якщо на  $n$ -м циклі з'являються сигнали АЕ, співмірні з виявленими на першому циклі, то це є попередженням про початок процесу катастрофічного руйнування і такий корпус розгерметизується через шість-десять злетів і посадок.

### Висновки

На основі отриманих результатів був запропонований засіб неруйнівного контролю міцності та попередження небезпечних станів корпусів мікроскладань НВЧ, встановлених на борту літака, в якому датчик АЕ служить датчиком безпеки на борту і за 6–10 циклів (тобто зльотів і приземлень) до катастрофічної руйнації корпусу «попереджає» про початок процесу руйнування. Також був спроектований і створений портативний АЕ-прилад, індикаторний пристрій якого сигналізує про наявність АЕ, яка перевищує заздалегідь установлений амплітудний рівень. Прилад містить один вимірювальний канал і реєструє сигнали АЕ у діапазоні 20–2000 кГц [10].

### Література

1. Овечкин Р. М. Новые технологичные СВЧ устройства для перестраиваемых мощных плотноупакованных СВЧ схем и настроечные корпуса для них : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.07 / Овечкин Роман Михайлович – Казань, 2004. – 150 с.
2. Pawlak R. Durability and reliability enhancement of selected electronic components achieved by laser technologies / R. Pawlak, M. Tomczyk, M. Walczak // 2017 MIXDES-24th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. IEEE. – 2017. – P. 459–462.
3. Harris K. D. Flexible electronics under strain: a review of mechanical characterization and durability enhancement strategies / K. D. Harris, A. L. Elias, H-J. Chung // Journal of materials science. – 2016. – P. 2771–2805.

4. Grieu M. Durability modelling of a BGA component under random vibration / M. Grieu // EuroSimE 2008-International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Micro-Systems. IEEE. – 2008. – P. 1–8.
5. Шмаков М. Микросварка при производстве микросборок и гибридных интегральных микросхем / Максим Шмаков // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 6. – С. 64–68.
6. Хади О. Ш. Конструкторско-технологические аспекты проектирования микросборок, работающих при динамическом нагружении / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 3. – С. 41–48.
7. Хади О. Ш. Моделирование напряженно-деформированного состояния корпусов микросборок в процессе их изготовления и эксплуатации / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов // Динамика и прочность (глава 1). Избранные труды всеросс. научн. конф. по проблемам науки и технологий. – 2013.
8. Ham S. J. Thermal deformations of CSP assembly during temperature cycling and power cyclin / S. J. Ham, M. S. Cho S. B. Lee // International Symposium on Electronic Materials and Packaging (EMAP2000). IEEE. – 2000.
9. Ройзман В. П. Механика в электронике : Том 3 / В. П. Ройзман. – Хмельницкий : ХНУ, 2015.
10. Ройзман В. П. Розробка методик акусто-емісійної неруйнівної діагностики міцності деталей і вузлів техніки / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун // Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Сер.: Військові та технічні науки. – 2015. – № 3. – С. 311–326.
11. Royzman V. Diagnosing of Technical State of the Products of Electronics by Acoustic Emission method / Vilen Royzman, Andrii Goroshko, Oleg Shinkaruk // TCSET'2012, February 21–24, 2012, Lviv–Slavske.
12. Емельянов В. Микроэлектронные СВЧ-компоненты на основе высокотемпературных сверхпроводников // Компоненты и технологии. – 2001. – № 6, № 7. – С. 34–41.

#### References

1. Ovechkin R. M. Novye tehnologichnye SVCh ustrojstva dlya perestraivaemyh moshnyh plotnoupakovannyh SVCh shem i nastroechnye korpusa dlya nih : dis. ... kand. tehn. nauk : 05.12.07 / Ovechkin Roman Mihajlovich – Kazan, 2004. – 150 s.
2. Pawlak R. Durability and reliability enhancement of selected electronic components achieved by laser technologies / R. Pawlak, M. Tomczyk, M. Walczak // 2017 MIXDES-24th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. IEEE. 2017. – R. 459–462.
3. Harris K. D. Flexible electronics under strain: a review of mechanical characterization and durability enhancement strategies / K. D. Harris, A. L. Elias, H.-J. Chung // Journal of materials science. 2016. – R. 2771–2805.
4. Grieu M. Durability modelling of a BGA component under random vibration / M. Grieu // EuroSimE 2008-International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Micro-Systems. IEEE. 2008. – R. 1–8.
5. Shmakov M. Mikrosvarka pri proizvodstve mikrosborok i gibridnyh integralnyh mikroshem / Maksim Shmakov // Tehnologii v elektronnoy promyshlennosti. – 2006. – № 6. – S. 64–68.
6. Hadi O. Sh. Konstruktorsko-tehnologicheskie aspekty proektirovaniya mikrosborok, robotayushih pri dinamicheskom nagruzenii / O. Sh. Hadi, A. N. Litvinov, N. K. Yurkov // Nadezhnost i kachestvo slozhnyh sistem. – 2015. – № 3. – S. 41–48.
7. Hadi O. Sh. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya korpusov mikrosborok v processe ih izgotovleniya i ekspluatatsii / O. Sh. Hadi, A. N. Litvinov // Dinamika i prochnost (glava 1). Izbrannye trudy vseross. nauchn. konf. po problemam nauki i tehnologij. 2013.
8. Ham S. J. Thermal deformations of CSP assembly during temperature cycling and power cyclin / S. J. Ham, M. S. Cho S. B. Lee // International Symposium on Electronic Materials and Packaging (EMAP2000). IEEE. 2000.
9. Royzman V. P. Mehanika v elektronike : Tom 3 / V. P. Rojzman. – Hmelnickij : HNU, 2015.
10. Royzman V. P. Rozrobka metodyk akusto-emisiinoy neruivnoy diahnostryky mitsnosti detalei i vuzliv tekhniki / V. P. Royzman, I. I. Kovtun // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Ser.: Viiskovi ta tekhnichni nauky. 2015. № 3. S. 311–326.
11. Royzman V. Diagnosing of Technical State of the Products of Electronics by Acoustic Emission method / Vilen Royzman, Andrii Goroshko, Oleg Shinkaruk // TCSET'2012, February 21–24, 2012, Lviv–Slavske.
12. Emelyanov V. Mikroelektronnye SVCh-komponenty na osnove vysokotemperaturnykh sverhprovodnikov // Komponenty i tehnologii. – 2001. № 6, № 7. S. 34–41.

Рецензія/Peer review : 28.10.2019 р.

Надрукована/Printed : 02.01.2020

Стаття прорецензована редакційною колегією