

УДК 51-74

DOI 10.30837/bi.2019.2(93).12



А.О. Функендорф¹, В.О. Бортнікова², І.В. Груздо³, Ю.Ю. Черепанова⁴

¹ ХНУРЕ, м. Харків, Україна, anastasiia.funkendorf@nure.ua;

² Укснаб ЧАО, м. Харків, Україна, viktoriiia.bortnikova@nure.ua

³ ХНУРЕ, м. Харків, Україна, irina.guzdo@nure.ua

⁴ ХНУРЕ, м. Харків, Україна, yulia.cherepanova@nure.ua

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ НЕРОЗ'ЄМНИХ З'ЄДНАНЬ У КОНСТРУКЦІЯХ МЕМС МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Запропоновано підхід до адаптації процесу отримання нероз'ємних з'єднань методом ультразвукового зварювання в рамках технології пакування МЕМС на рівні пластин. Представлено конструкційне рішення запропонованого підходу, а також математична модель процесу його.

МЕМС, УЛЬТРАЗВУКОВЕ ЗВАРЮВАННЯ, WLP ТЕХНОЛОГІЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Предложен подход к адаптации процесса получения неразъемных соединений методом ультразвуковой сварки в рамках технологии упаковки МЭМС на уровне пластин. Представлено конструктивное решение предложенного подхода, а также математическая модель процесса его реализации.

МЭМС, УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА, WLP ТЕХНОЛОГИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

An approach to the adaptation of the fixed connections by ultrasonic welding in the framework of MEMS packaging technology at the plate level obtaining process is proposed. The structural solution of the proposed approach is presented, as well as the mathematical model of the implementation process.

MEMS, ULTRASONIC WELDING, WLP TECHNOLOGY, MATHEMATICAL MODEL

Вступ

Процес корпусування мікроелектромеханічних систем (МЕМС) є одним з найбільш важливих етапів їх виробництва. У більшості випадків однією з обов'язкових умов для його реалізації є досягнення вакуумізації внутрішніх порожнин (наприклад, у МЕМС ємнісних датчиках тиску). Це може бути досягнуто при упаковці МЕМС в дискретні корпуси, що є досить складним і дорогим підходом. Аналогічним рішенням є корпусування МЕМС на рівні пластини (WLP – Wafer-Level Packaging), що дозволяє значно спростити і здешевити технологічний процес їх виробництва [1].

В рамках вимог до герметизації корпусів реалізація цього процесу досягається за рахунок використання технології термічного скріплення, яка вимагає температури значно вищої, ніж допустима для окремих МЕМС робоча температура. Можливість виникнення додаткових механічних напружень на межі між матеріалами окремих пластин внаслідок термічної деформації, може спричинити виникнення критичних помилок у роботі МЕМС пристроїв [2].

Ультразвукове (УЗ) зварювання в МЕМС на даний момент знаходить широке застосування переважно в рамках технології фліп-чіп, проте воно також може бути застосована і до WLP. Цей метод отримання нероз'ємних з'єднань має ряд переваг, а саме відсутність тривалого теплового нагріву поверхонь та сусідніх елементів, можливість використання для різних типів матеріалів зварювальних елементів і проміжних шарів, низькі вимоги до попереднього очищення поверхонь, що зварюються, а також достатню простоту автоматизації. Застосування даного методу

отримання нероз'ємних з'єднань в рамках технологій WLP є складним наукомістким завданням, що вимагає розробки нових підходів та математичних моделей для його реалізації з урахуванням високих вимог до герметизації корпусів МЕМС.

1. Адаптація методу ультразвукового зварювання для його застосування в рамках технології пакування МЕМС на рівні пластин

WLP метод заснований на з'єднанні пластин зі сформованими функціональними структурами з пластиною-кришкою. Даний процес дозволяє істотно спростити і здешевити технологію, оскільки робить можливою корпусування одночасно декількох пристроїв, розташованих на одній пластині (рис. 1) [1, 3].



Рис. 1. WLP метод пакування МЕМС датчиків

На даний момент існує безліч підходів для корпусування МЕМС на рівні пластин. Більшість з них засновані на отриманні нероз'ємних з'єднань між пластинами з проміжним шаром, або ж без нього. В якості проміжних шарів можуть виступати різні легкоплавкі метали і сплави, полімери, скло керамічні припої, геттери.

Застосування УЗ зварювання на етапі корпусування в рамках технології WLP, а також базовий похід без додаткового нагріву елементів був запропонований і обґрунтований в роботі [2]. Відповідно, адаптація даного методу отримання нероз'ємного з'єднання зі збереженням вимог до герметизації може бути досягнута за рахунок зварювання пластин в закритому боксі з відкачуванням повітря. Сам процес відведення повітря пропонується реалізувати через трубку, приєднану до боксу, з додатковим підключенням до неї відповідного обладнання, що дозволяє регулювати необхідний рівень тиску. Ущільнювальний елемент в рамках запропонованого підходу повинен бути виконаним з щільного, еластичного і герметичного матеріалу. Це дозволить забезпечувати необхідний рівень герметизації ємності, в якій проходить зварювання пластин. Візуально конструкційне рішення адаптації УЗ зварювання в рамках WLP технології, засноване на використанні поздовжньої коливальні системи [4, 5], представлено на рис. 2.

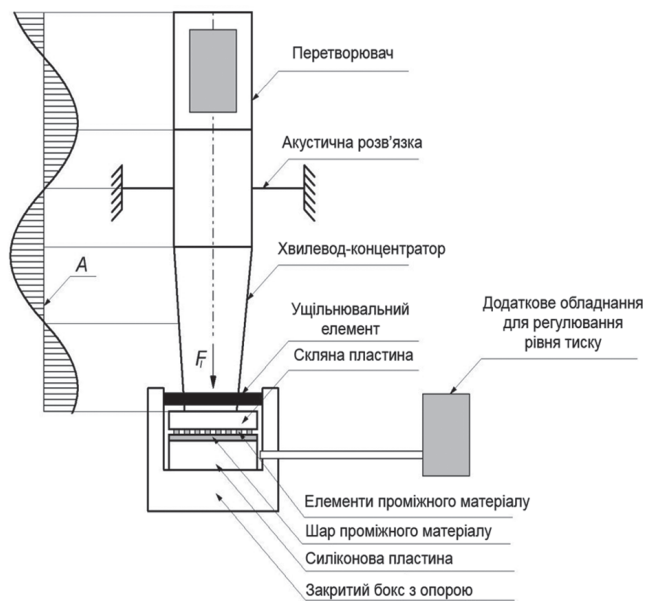


Рис. 2. Конструкційне рішення запропонованого підходу

У конструкціях такого типу важливим є розташування поверхонь, що зварюються, і площини опори до виводу хвильовода-концентратора, що забезпечує ортогональність спрямованості поширення УЗ хвиль щодо зварювальних поверхонь і відповідне напрямку вектора сили зварювального зусилля F_l [6].

Також, для ефективності запропонованої адаптації, додатковою умовою є наявність проміжного шару між пластинами, виконаного з твердого матеріалу (алюміній). Цей шар конструктивно забезпечує доступ до внутрішньої порожнини МЕМС пристрою, що є необхідним для виконання умови забезпечення її герметизації. У процесі зварювання елементи проміжного шару поступово рівномірно розподіляються

між пластинами, тим самим зменшуючи зазор між ними і закриваючи внутрішню порожнину пристрою.

Дослідження запропонованого підходу вимагає проведення ряду підготовчих етапів, які включають в себе розробку відповідної моделі технологічного процесу в рамках його автоматизації. Так, структурно-параметричну модель зазначеного процесу в узагальненому вигляді можна представити таким чином:

$$M = \begin{cases} X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}; \\ U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_k\}; \\ Y, \end{cases} \quad (1)$$

де M – модель процесу УЗ зварювання, n – кількість вхідних параметрів X , що впливають на процес (основних технологічних параметрів), k – кількість випадкових параметрів U , що впливають на процес (додаткових параметрів), Y – параметр, за яким оцінюється якість отриманого з'єднання, (згідно до роботи [5] з зусиллям на розрив).

Виходячи з цього, в рамках запропонованого підходу до адаптації, можна виділити п'ять основних технологічних параметрів процесу корпусування МЕМС на рівні пластин УЗ зварюванням: зусилля навантаження зварювального інструменту F_l , амплітуда його коливань A , вихідна потужність УЗ генератора P_g , час зварювання t і тиск P , необхідний для досягнення герметизації корпусу. Тоді, вплив зазначених параметрів на якість отриманого зварювального з'єднання може бути описано моделлю:

$$Y = f(F_l, A, P_g, t_{US}, P). \quad (2)$$

В результаті апроксимації представленої моделі лінійною функцією модель адаптованого для WLP процесу УЗ зварювання набуде вигляду:

$$Y = a_0 + a_1 F_l + a_2 A + a_3 P_g + a_4 t_{US} + a_5 P. \quad (3)$$

де $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ – питомі параметри моделі, що дозволяють прогнозувати значення і поведінку системи в цілому, з урахуванням впливу випадкових параметрів $U(a_0)$.

Для адекватності моделі також необхідно враховувати ефекти взаємодії між її основними технологічними параметрами. Використання методу активного планування в рамках даного дослідження надає змогу варіювати ряд факторів і отримувати одночасно кількісні оцінки для всіх ефектів. При цьому, на відміну від класичного регресійного аналізу, надає змогу уникнути кореляції між коефіцієнтами рівняння регресії. Таким чином, при статичному підході математична модель процесу отримання нероз'ємних з'єднань методом УЗ зварювання може бути представлена в загальному вигляді відрізком ряду Тейлора, в який розкладається невідома функція:

$$\begin{aligned}
Y = f(F_l, A, P_g, t, P) = & b_0 + \\
& + b_1 F_l + b_2 A + b_3 P_g + b_4 t + b_5 P + \\
& + b_{12} F_l A + b_{13} F_l P_g + b_{14} F_l t + b_{15} F_l P + \\
& + b_{23} A P_g + b_{24} A t + b_{25} A P + b_{34} P_g t + \\
& + b_{35} P_g P + b_{45} t P + b_{123} F_l A P_g + \\
& + b_{124} F_l A t + b_{125} F_l A P + b_{234} A P_g t + \\
& + b_{235} A P_g P + b_{345} P_g t P + b_{341} A P_g F_l + \\
& + b_{351} P_g P F_l + b_{451} t P F_l + b_{452} t P A + \\
& + b_{1234} F_l A P_g t + b_{1235} F_l A P_g P + \\
& + b_{2345} A P_g t P + b_{3451} P_g t P F_l + \\
& + b_{4512} t P F_l A + b_{12345} F_l A P_g t P
\end{aligned} \quad (4)$$

де b_0 – вільний член, що дозволяє враховувати вплив випадкових параметрів U , $b_1 - b_5$ – лінійні ефекти, $b_{12} - b_{45}$ – ефекти парної взаємодії, $b_{123} - b_{452}$ – ефекти потрійної взаємодії, $b_{1234} - b_{4512}$ – ефекти четверної взаємодії, b_{12345} – ефект п'ятірної взаємодії.

Базуючись на раніше проведених дослідженнях в даній області [2, 7, 8] можна визначити граничні значення оптимальних технологічних параметрів, для побудови моделі (табл. 1). При цьому, граничні значення тиску в боксі планується отримати в ході подальшого натурного експерименту, а значення амплітуди коливальної системи в реальних пристроях, як правило, характеризується їх конструкцією. Тому, в рамках зменшення розмірності задачі, для визначення значення було прийнято рішення про побудову математичної моделі процесу з урахуванням трьох основних регульованих технологічних параметрів, граничні значення яких наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення регульованих параметрів

Параметр	Діапазон значень
P_g	30~50 Вт
t	2.5~5 м
F_l	20,8~40,1 МПа

2. Розробка математичної моделі адаптації УЗ зварювання в рамках WLP технології корпусування МЕМС

На основі отриманих в ході моделювання [9] і зазначених в табл. 1 даних, згідно планування повного факторного експерименту (ПФЕ) [10-12], була складена матриця ПФЕ, на основі якої отримано наступні математичні моделі.

Розроблена математична модель адаптації УЗ зварювання в рамках WLP технології корпусування МЕМС без урахування ефектів взаємодії, що ґрунтується на матриці планування (табл. 2), має вигляд:

$$Y = 206,49 - 1,11P_g - 4,8t - 0,61F_l. \quad (5)$$

Коефіцієнт детермінації для цієї моделі становив 0,58, що є досить низьким показником, який свідчить про недостатню адекватність моделі і потребує додаткової побудови моделі з урахуванням ефектів взаємодії.

Співвідношення реальних и отриманих в ході моделювання даних для цієї моделі показано на рис. 3.

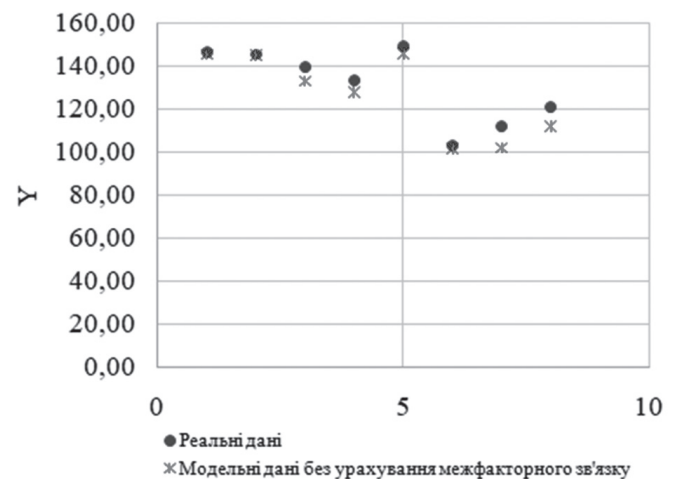


Рис. 3. Порівняння експериментальних та модельних даних

Отримана математична модель, заснована на розширеній матриці планування (табл. 2) з урахуванням важливості коефіцієнтів має вигляд:

Таблиця 2

Матриця планування

P_g	t	P	Y	a_1	a_2	a_3	b
30,00	2,90	20,80	146,54	-1,11	-4,8	-0,61	206,49
30,00	2,90	40,10	145,45	-1,11	-4,8	-0,61	206,49
30,00	5,00	20,80	139,42	-1,11	-4,8	-0,61	206,49
30,00	5,00	40,10	133,16	-1,11	-4,8	-0,61	206,49
50,00	2,90	20,80	149,27	-1,11	-4,8	-0,61	206,49
50,00	2,90	40,10	103,13	-1,11	-4,8	-0,61	206,49
50,00	5,00	20,80	112,26	-1,11	-4,8	-0,61	206,49
50,00	5,00	40,10	121,02	-1,11	-4,8	-0,61	206,49

$$Y = 9,1P_g + 65,86t + 10,27F_l - 2,3P_g t - 0,33P_g F_l - 2,35tF_l + 0,074P_g tF_l - 118,1. \quad (6)$$

Порівняння експериментальних і отриманих в ході моделювання [9] даних з урахуванням ефектів взаємодії між основними технологічними параметрами представлено на рис. 4.

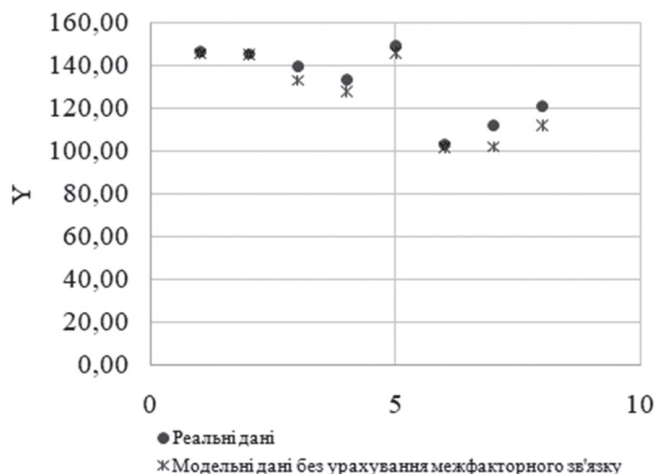


Рис. 4. Порівняння експериментальних та модельних даних з урахуванням ефектів взаємодії між основними параметрами

Коефіцієнт детермінації для розширеної моделі склав 0,98. Це є досить високим показником і говорить про мінімізацію помилки між експериментальними і розрахунковими даними.

Висновки

Запропонована адаптація методу ультразвукового зварювання для його застосування в рамках технології пакування МЕМС на рівні пластин. Представлено його конструктивне рішення, розроблене на основі поздовжньої коливальної системи.

Розроблена структурно-параметрична модель відповідного технологічного процесу, із застосуванням якої було виділено п'ять основних технологічних параметрів: зусилля навантаження зварювального інструменту, амплітуда його коливань, вихідна потужність УЗ генератора, час зварювання і тиск, необхідний для досягнення герметизації корпусу.

На основі отриманих в ході попередніх досліджень результатів та імітаційного моделювання була розроблена математична модель, що відображає функціональні взаємозв'язки між основними технологічними параметрами процесу і результируючим показником якості УЗ зварних з'єднань — зусилля на розрив.

Таблиця 3

Розширена матриця планування

P_g	t	P	$P_g \cdot t$	$P_g \cdot x_3$	$t \cdot P$	$P_g \cdot t \cdot P$	Y
30,00	2,90	20,80	87,00	624,00	60,32	1809,60	146,54
30,00	2,90	40,10	87,00	1203,00	116,29	3488,70	145,45
30,00	5,00	20,80	150,00	624,00	104,00	3120,00	139,42
30,00	5,00	40,10	150,00	1203,00	200,50	6015,00	133,16
50,00	2,90	20,80	145,00	1040,00	60,32	3016,00	149,27
50,00	2,90	40,10	145,00	2005,00	116,29	5814,50	103,13
50,00	5,00	20,80	250,00	1040,00	104,00	5200,00	112,26
50,00	5,00	40,10	250,00	2005,00	200,50	10025,00	121,02
a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	b
9,1	65,86	10,27	-2,3	-0,33	-2,35	0,074	-118,1
9,1	65,86	10,27	-2,3	-0,33	-2,35	0,074	-118,1
9,1	65,86	10,27	-2,3	-0,33	-2,35	0,074	-118,1
9,1	65,86	10,27	-2,3	-0,33	-2,35	0,074	-118,1
9,1	65,86	10,27	-2,3	-0,33	-2,35	0,074	-118,1
9,1	65,86	10,27	-2,3	-0,33	-2,35	0,074	-118,1
9,1	65,86	10,27	-2,3	-0,33	-2,35	0,074	-118,1
9,1	65,86	10,27	-2,3	-0,33	-2,35	0,074	-118,1
9,1	65,86	10,27	-2,3	-0,33	-2,35	0,074	-118,1

Представлена модель дозволяє визначати необхідні значення основних технологічних параметрів процесу, а також стає основою для подальшої реалізації запропонованого рішення адаптації метода УЗ зварювання в рамках WLP технології корпусування МЕМС.

Список літератури:

- [1] E. Esashi, "Wafer level packaging of MEMS", 2009 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS 2009), Denver, Colorado, 21-25 June, 2009, pp. 9-16.
- [2] P.I. Eswaran, S. Malarvizhi "MEMS Capacitive Pressure Sensors: A Review on Recent Development and Prospective", International Journal of Engineering and Technology (IJET), Vol 5 No 3 Jun-Jul 2013, pp. 2734-2746.
- [3] Ephraim Suhir, C. P. Wong, Y. C. Lee, "Micro- and Opto-Electronic Materials and Structures: Physics, Mechanics, Design, Reliability, Packaging",
- [4] З.Ю. Гомпа, "Технологія електронної техніки: навч. посібник у 2 т." — Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2010. — 884 с.
- [5] G. Harman, "Wire Bonding in Microelectronics: Materials, Processes, Reliability, and Yield", 3rd ed., McGraw Hill, New York, 2009.
- [6] И.Ш. Невлюдов, А.В. Пономарева, А. О. Функендорф, К.Л. Хрусталева, "Математическая модель технологического процесса получения неразъемных соединений в конструкциях роботов модульного типа". Доклады БГУИР. 2018, №4. — с. 51-57.
- [7] V. M. Borshchov, O. M. Listratenko, M. A. Protsenko, "Innovative microelectronic technologies for high-energy physics experiments", VFunctional materials, vol. 24, pp. 143-153, 2017.
- [8] S. Y. Kang, P. M. Williams, T. S. McLaren, and Y. C. Lee, "Studies of thermosonic bonding for flip-chip assembly," Materials Chemistry Phys., vol. 42, pp. 31-37, 1995
- [9] A. Funkendorf, V. Bortnikova, S. Maksymova, M. Melnyk, "Mathematical Model of Adapted Ultrasonic Bonding Process for MEMS Packaging," IEEE XV-th International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Lviv-Polyana, Svalyava, (Zakarpattia), Ukraine, May 22-26, 2019. — P. 79-82.
- [10] J.O. Rawlings, "Applied Regression Analysis". Pacic Grove, CA: Wadsworth & Brooks/Cole, 1988.
- [11] E. Harrell Jr., "Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic and Ordinal Regression, and Survival Analysis" (Springer Series in Statistics), Springer, 2015.
- [12] G. Ciaburro "Regression Analysis with R: Design and develop statistical nodes to identify unique relationships within data at scale", Packt Publishing, 2018.

Надійшла до редколегії 19.12.2019