

УДК 621.3.049

Аналіз термічної втоми в'язкопластичного припою для мікроелектронних компонентів і систем

Яма О.С., ORCID [0000-0002-9234-1990](https://orcid.org/0000-0002-9234-1990)e-mail: alexei.yama@gmail.comЧипегін Д. В., ORCID [0000-0002-9276-4774](https://orcid.org/0000-0002-9276-4774)e-mail: chipegin.dima@gmail.com

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» www.kpi.uaКафедра промислової електроніки www.kaf-pe.kpi.ua

Київ, Україна

Реферат — У роботі описано результати проведеного модулювання та аналізу термічної втоми для в'язкопластичного припою для термовивідних електронних компонентів. Результати свідчать про доцільність проведення подальших експериментів з використанням додаткових математичних моделей для попереднього виділення характерних ознак, та з використанням більшої кількості вхідних даних. Дана методика розрахунку надалі зможе дозволити визначати граничні режими експлуатації і проводити вибір компонентів з урахуванням температурної залежності їх параметрів, зменшить можливість виникнення аварійних режимів роботи різних пристроїв.

Ключові слова — термічна втома; цикли до відмови; сітчастий масив кульок; термовивідні електронні компоненти.

I. Вступ

Термічну втому особливо важливо враховувати при проектуванні пристроїв і апаратів, що працюють в умовах змінних теплових режимів, причому це можуть бути як потужні турбіни електростанцій, так і компоненти електронних приладів і систем. Оскільки, зменшення габаритів напівпровідникових приладів обумовлює підвищення теплового опору між кристалом і навколишнім середовищем, що ускладнює передачу тепла під час швидких процесів. Згідно з дослідженнями [1-4], майже 60% виходів з ладу пристроїв перетворювальної техніки пов'язані з перегрівом. При цьому на кожні 10°C підвищення температури, інтенсивність виходів з ладу подвоюється.

II. Постановка задачі

На друкованій платі, покритою тонким шаром міді, встановлені термовивідні електронні компоненти з розводкою кристала типу «Wire-bonded» (Розпайка виводів (англ. Wire bonding) - метод здійснення електричного між'єднання), типовий приклад – ШИМ контролер сімейства VT35, припаяні олов'яним в'язкопластичним припоєм з сітчастим масивом кульок (eng. - ball grid array (BGA)) 60Sn-40Pb [8]. На сьогоднішній день типи корпусів BGA, їх геометричні розміри, розташування і розмір кульок, відхилення розмірів досить добре систематизовані і стандартизовані об'єднаною інженерною радою по

електронним пристроям JEDEC (Joint Electronic Device Engineering Council) [6]. Стандарт IPC-7351A «Generic Requirements for Surface Mount Land Pattern and Design Standard» (Загальні вимоги до моделі поверхневого монтажу та дизайну), створена Японською асоціацією IPC (Association Connecting Electronics Industries) [7] з урахуванням вимог стандартів JEDEC, встановлює розміри. Випробування термоцикуванням здебільшого необхідні для перевірки надійності при зміні температури (в автомобільній, аерокосмічній, промисловій та інших сферах застосування), критерієм успішного проходження випробувань, очевидно, є відповідність КТР (коефіцієнт теплового розширення) матеріалу і компонента. Чим більше розміри компонента і чим вище число з'єднань між компонентом і платою, тим більший вплив робить КТР окремих складових частин.

Пристрій знаходиться в тепловому режимі роботи з циклом живлення: $5 \cdot 10^7$ Вт/м³ протягом 4 годин з підвищеною тепловіддачею і $1 \cdot 10^7$ Вт/м³ протягом 2 годин зі зниженою. Обидва мікропроцесора генерують енергію, коли вони включені і коли вони знаходяться в очікуванні. Це генерує тепло протягом усього терміну дослідження. Перемикання між високою і низькою потужністю відбувається не миттєво, а займає кілька хвилин.

З точки зору охолодження, мікроелектронні компоненти завжди розглядалися як критична ланка.



Оскільки живлення компонента багаторазово вмикається і вимикається, він піддається циклічним термічним навантаженням. Пошкодження при термічній втомі обумовлені циклічним характером зміни напруг і частковою релаксацією змінних залишкових напружень, що виникають при зміні температури [6].

III. Шляхи вирішення задачі

Процес моделювання проходить в два етапи:

1. Цикл навантаження.
2. Оцінка циклічної довговічності.

Для аналізу циклової втоми матеріалів часто використовують енергетичну модель, тобто ту, яка визначає втомну довговічність через енергію дисипації. Найчастіше всього описується моделлю Дарво для оцінки втоми довговічності припою на друкованій платі в результаті циклічних термічних навантажень.

Модель втоми Дарво об'єднує весь цикл від початку тріщини до поширення тріщини і описується виразом:

$$N = K_1 \left(\frac{\Delta W_{ave}}{W_{ref}} \right)^{k_2} + \frac{a}{K_3 \left(\frac{\Delta W_{ave}}{W_{ref}} \right)^{k_4}}$$

Де N – втомна довговічність, виражена в кількості циклів; ΔW_{ave} – середня щільність енергії дисипації в циклі; a – це відстань, яку тріщина повинна пройти до відмови роботи компонента; K_1 , k_2 , K_3 , k_4 и W_{ref} є матеріальними константами, значення яких наведені в табл.1.

Відстань в цьому аналізі приймається рівною $2,6457 \cdot 10^{-4}$ дюйма. Це засновано на припущенні, що проблема не симетрична і очікується, що тріщина почнеться з одного боку тільки в місці з'єднання, а не навколо його одночасно. Потрібно оцінити втомну довговічність і знайти елемент з найменшим числом циклом до руйнування. Для цього проведемо моделювання в середовищі COMSOL Multiphysics.

Табл.1. Числові значення матеріальних констант.

Параметр	Значення	Опис
K_1	13173	Коефіцієнт енергії зародження тріщини
k_2	-1,45	Показник енергії ініціювання тріщини
K_3	$3,92 \cdot 10^{-7}$ дюйма	Коефіцієнт поширення енергії тріщини
k_4	1.12	Показник енергії поширення тріщини
W_{ref}	1 фунт/кв. дюйм ³	Еталонна щільність енергії

При вирішенні нашої задачі, скористаємося концепцією субмоделювання, яка полягає в тому, що спочатку виконується аналіз повної моделі, з метою виявлення загальних тенденцій, а потім проводиться аналіз підмоделі. При цьому виконуються наступні кроки:

1. Сполучений структурний і термічний аналіз виконується протягом чотирьох циклів навантаження на повну модель. Оскільки вона містить кілька паяних з'єднань, використовується груба сітка. Всі з'єднання зведені таким чином, щоб мінімізувати чисельні розбіжності, які залежить від сітки.

2. Прогноз втоми зробимо на четвертому циклі. Обсяг середньої розсіюваної енергії і відповідний термін служби оцінюється для кожного паяного з'єднання окремо. Критичне з'єднання визначено.

3. Створюється підмодель критичного з'єднання з дрібною сіткою шляхом вирізання вузла в'язкопластичного матеріалу. Це робиться для всіх змодельованих циклів. Оскільки результати термічного аналізу пропонуються на кожному етапі, проводиться тільки дослідження структурної механіки.

4. Аналіз втоми виконується на критичному паяному з'єднанні в підмоделі. Передбачення терміну служби засноване на розсіянні енергії в шарі товщиною 50 мкм і обидва шари (Перший пов'язаний зі стороною міді другий – зі стороною мікрочіпа) оцінюються.

Прогноз втомної довговічності для обох мікрочіпів однаковий. Критичні з'єднання розташовані в кутах кожного масиву кулькових решіток. Це і очікувалося, оскільки ці сполуки відчують найвищі напруги через відмінності в теплових властивостях. Паяні з'єднання з більш крупними ґратами показують менший термін служби, ніж з'єднання іншого мікрочіпа. Прогноз ресурсу для всіх чотирьох кутових з'єднань приблизно однаковий, $10^{3,4}$ циклу.

Одне з чотирьох критичних кутових з'єднань повторно аналізується в підмоделі. Щоб переконатися, що температура правильно задана в підмоделі (рис.1 (а)), порівняємо температурні історії в точці на верхній стороні з'єднання показано на рис.1 (б). Результати обох моделей знаходяться в точній відповідності. Порівняння розсіяної енергії в точці на верхній стороні з'єднання показано на (рис.1 (б)). Результати відрізняються між двома моделями. Ця різниця викликана різницею в сітці. Більш точна сітка в підмоделі краще, ніж більш груба сітка повної моделі при захопленні градієнта деформації поблизу верхньої сторони паяного з'єднання.

Результати аналізу втоми критичного з'єднання в підмоделі показані на рис.2 (а) і рис.2 (б). На рис. 2(б) червоний графік описує втомну довговічність, що заснована на обсязі розсіюваної енергії, середнє значення оцінюється по всьому об'єму, в той час зелений графік описує середнє значення обсягу і виконується по окремим доменах.



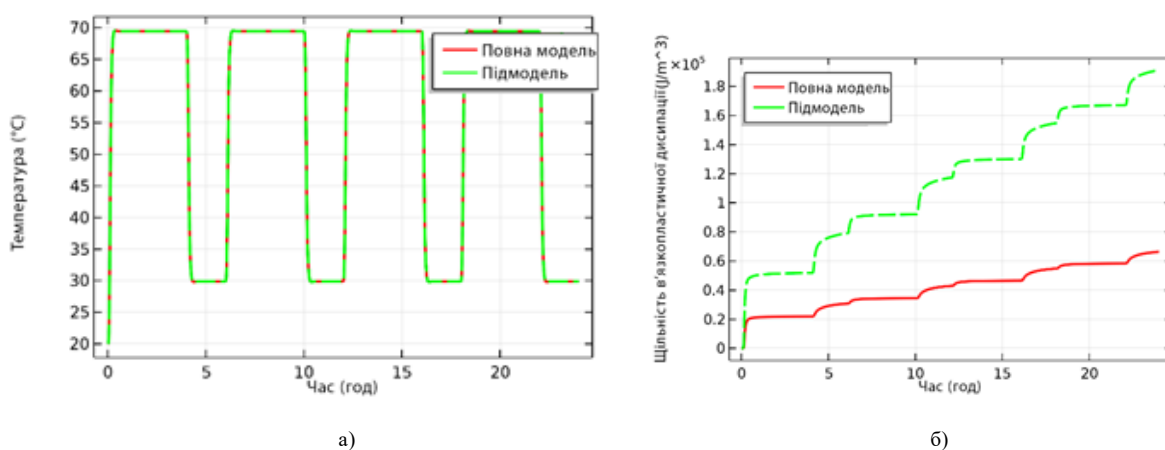


Рис.1. а - історія температур для повної моделі і підмоделі. б - історія порівняння з розсіяною енергією повзучості в обох моделях.

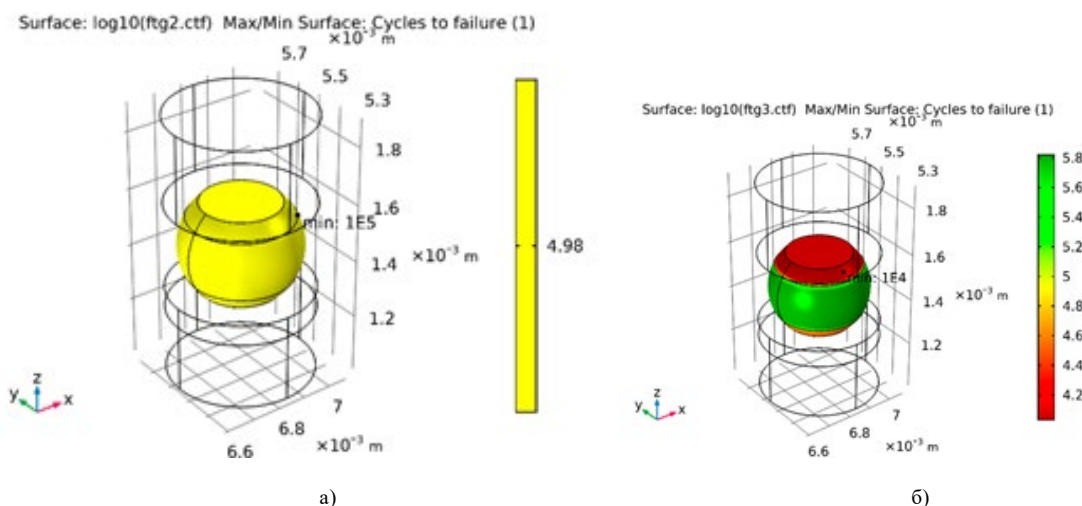


Рис.2. Прогноз втомних циклів, а - заснований на середньому обсязі; б - на основі середнього обсягу різних доменів.

ТАБЛ.2. ПОРІВНЯННЯ ВТОМНИХ ЦИКЛІВ, ПЕРЕДБАЧЕНИХ РІЗНИМИ МОДЕЛЯМИ.

Метод	Кількість циклів	Джерело
Повна модель	$8 \cdot 10^4$	
На середньому об'єму підмоделі	$1 \cdot 10^5$	Рис.2 (а)
На основі середнього обсягу різних доменів підмоделі	$1 \cdot 10^4$	Рис.2 (б)

Дані по втомним циклам з різних моделей зібрані в табл.2.

Різниця між прогнозуванням втомної довговічності повної моделі і підмоделі невелика. Однак в реальних умовах спостерігається, що тріщина проростає через паяні з'єднання поблизу кордону розділу, і саме тому потрібен тонкий шар. Якби тонкий шар був створений у всіх з'єднаннях повної моделі, моделювання зажадало б великих обчислювальних ресурсів. У поточному прикладі повна модель скла-

дається з близько 300 000 ступенів свободи, в той час як підмодель складається лише зі 180 000.

ВИСНОВКИ

Корпуси BGA дозволяють оптимальним чином розмістити велику кількість виводів на обмеженій площі, забезпечуючи всі необхідні технологічні норми при монтажі. Невеликі фізичні розміри, особливо в разі застосування мікросхем з малим кроком, знижують витрати на їх виробництво. Всі виводи розташовані на одній площині з нижньої сторони корпусу, тому довжина ланцюгів виходить коротше, ніж у мікросхем, що мають інші конструктивні виконання. Але при зменшенні площі поверхні мікросхеми, погіршується її охолодження. Тому подібна методика розрахунку надалі зможе дозволити визначити граничні режими експлуатації і проводити вибір компонентів з урахуванням температурної залежності їх параметрів, зменшить можливість виникнення аварійних режимів роботи різних пристроїв. А також обґрунтувати введення в процес технологічної підготовки виробництва широкого спектру виробів обов'язкового попереднього термопрофілювання для покращення засобів теплового



захисту для мікроелектронних компонентів. При цьому в основу покласти температурний профіль пайки як для безсвинцевої технології з урахуванням застосування компонентів в малих корпусах з обмеженими градієнтами наростання і спаду температур. Рекомендується проводити аналіз нових типів компонентів в технічних описах, на які задаються обмеження по КТР, градієнтами наростання і спаду температур.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] P. M. Fabis, D. Shum, and H. Windischmann, "Thermal modeling of diamond-based power electronics packaging," in *Fifteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, 2003, pp. 98–104, DOI: [10.1109/stherm.1999.762434](https://doi.org/10.1109/stherm.1999.762434)
- [2] B. Du, J. L. Hudgins, E. Santi, A. T. Bryant, P. R. Palmer, and H. A. Mantooth, "Transient electrothermal simulation of power semiconductor devices," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 1, pp. 237–248, 2010, DOI: [10.1109/TPEL.2009.2029105](https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2029105)
- [3] T. Leuca, M. Novac, B. Stanciu, A. Burcă, and M. Codrean, "Using Some Coupled Numerical Models in Problems of Designing an Inductive Electrothermal Equipment," *J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 77–80, 2014.
- [4] A. A. Merrikh, "Compact thermal modeling methodology for predicting skin temperature of passively cooled devices," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 85, pp. 287–296, 2015, DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2015.04.007](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.007)
- [5] A. Medvedev, "Modeli ustalostnyih razrusheniy payanyih soedeneniy," *Proizv. Elektron.*, no. 1, 2007.
- [6] "Low profile, fine pitch, ball grid array family (sq)," LF-XBGA. Item 11.11-751E, 2011. URL: <http://www.jedec.org/download/search/MO-275A.pdf>
- [7] "No Title." [Online]. Available: <http://www.pcbmatrix.com>.
- [8] V. Palliem, "Proektiruem platy s BGA, perevod Ju. Potapova [Designing boards with BGA]," *EDA Expert*, no. 5, 2002.

УДК 621.3.049

Анализ термической усталости вязкопластического припоя для микроэлектронных компонентов и систем

Яма А. С., ORCID [0000-0002-9234-1990](https://orcid.org/0000-0002-9234-1990)

e-mail: alexei.yama@gmail.com

Чипегін Д. В., ORCID [0000-0002-9276-4774](https://orcid.org/0000-0002-9276-4774)

e-mail: chipegin.dima@gmail.com

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» www.kpi.ua

Кафедра промышленной электроники www.kaf-pe.kpi.ua

Киев, Украина

Реферат — В работе описаны результаты проведенного моделирования и анализа термической усталости для вязкопластического припоя для термовыводящих электронных компонентов. Результаты свидетельствуют о целесообразности проведения дальнейших экспериментов с использованием дополнительных математических моделей для предварительного выделения характерных признаков, и с использованием большего количества входных данных. Данная методика расчета в дальнейшем сможет позволить определять предельные режимы эксплуатации и проводить выбор компонентов с учетом температурной зависимости их параметров, уменьшит возможность возникновения аварийных режимов работы различных устройств.

Ключевые слова — термическая усталость; цикл до отказа; сетчатый массив шариков; термовыводящие электронные компоненты.



UDC 621.3.049

Thermal fatigue prediction of viscoplastic solder for microelectronic components and systems

O. S. Yama, ORCID [0000-0002-9234-1990](https://orcid.org/0000-0002-9234-1990)

e-mail: alexei.yama@gmail.com

D. V. Chipehin, ORCID [0000-0002-9276-4774](https://orcid.org/0000-0002-9276-4774)

e-mail: chipegin.dima@gmail.com

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» www.kpi.ua

Department of Industrial Electronics www.kaf-pe.kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract — The paper describes the results of the simulation and analysis of thermal fatigue for a viscoplastic solder for thermally-draining electronic components. The results indicate the feasibility of further experiments using additional mathematical models to pre-allocate the characteristic features, and using more input data. This method of calculation will then be able to determine the limiting modes of operation and carry out the selection of components, taking into account the temperature dependence of their parameters, will reduce the possibility of emergency modes of operation of various devices. On a circuit board covered with a thin layer of copper, thermo-terminated electronic components with a wiring of a crystal of the type "Wire-bonded" are installed; a typical example is a PWM controller of the family VT35, soldered tin A ball-grid array (BGA), 60Sn-40Pb [8]. To date, the types of BGA enclosures, their geometric sizes, location and size of balls, and the size variations are well structured and standardized by the Joint Electronic Device Engineering Council (JEDEC). The IPC-7351A standard, "Generic Requirements for Surface Mount Land Pattern and Design Standard", established by the Association Associationing Electronics Industries, with the requirements of JEDEC standards, sets the size. Testing by thermocycling is mostly required to check reliability at temperature changes (in automotive, aerospace, industrial and other applications), the criterion for successful testing is obviously the compliance of the TEC (thermal expansion coefficient) of the material and component. The larger the component size and the higher the number of connections between the component and the board, the greater the impact of the TEC individual components.

The device is in the thermal mode of operation with a cycle of power: $5 \cdot 10^7$ W/m³ for 4 hours with increased heat output and $1 \cdot 10^7$ W/m³ for 2 hours with reduced. Both microprocessors generate energy when they are turned on and when they are in wait. This generates heat throughout the research period. Switching between high and low power is not instantaneous, but takes a few minutes.

In terms of cooling, the microelectronic components have always been seen as a critical link. Since the power of the component is repeatedly turned on and off, it is exposed to cyclic thermal load. Damage due to thermal fatigue is due to the cyclic nature of the change in voltage and the partial relaxation of the residual stress variables that arise when temperature changes.

Keywords — *thermal fatigue; cycles to failure; ball grid array; heat removal electronic components.*

