

КОВТУН І. І.

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

ПЕТРАЩУК С. А.

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

БОЙКО Ю. М.

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>

Хмельницький національний університет

ВПЛИВ ГЕРМЕТИЗАЦІЇ НА ВИНИКНЕННЯ ТА ПЕРЕДАЧУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЕЛЕКТРОННИХ МОДУЛІВ

Представленим в даній роботі науковим результатом є подальший розвиток застосування теорії Ламе-Гадоліна про взаємодію складених товстостінних циліндрів для оцінки міцності електронних компонентів, що мають форму тіл обертання та оточуючого шару компаунду при довільній формі заливки останнього в умовах термоудару. В межах осесиметричної задачі проведена оцінка напружено-деформованого стану системи електронний компонент – компаунд при перепаді температур, завдяки чому виявлено закономірність виникнення максимальних загальних радіальних, окружних та осевих напружень в залежності від їх радіального розподілу та режиму температурного навантаження. Здійснено розрахунок напружень в резисторі С2-29В герметизованому компаундом марки ЕЗК-25 в складі гермомодуля при сталому перепаді температур. Запропоновано експериментальний спосіб визначення граничних напружень в електронних компонентах герметизованих компаундом. Представлені ефективні технологічні методи захисту електронних компонентів герметизованих компаундом.

Ключові слова: герметизований електронний модуль, електронний компонент, компаунд, міцність, напружено-деформований стан

Igor KOVTUN, Svitlana PETRASHCHUK, Juliy BOIKO

Khmelnitskyi National University

INFLUENCE OF THE SEALING ON APPEARANCE AND TRANSMISSION OF TEMPERATURE DEFORMATIONS IN ELECTRONIC MODULES

The scientific result presented in this paper consists in development of the Lamé-Gadolin theory about interaction of joint thick-walled cylinders application to estimate strength of electronic components represented by bodies of revolution and surrounding layer of compound sealed by an arbitrary shape subjected to thermal impacts in the temperature range from +70 to -60 deg C. The difference in the coefficients of linear thermal expansion and other physical and mechanical characteristics of compound and electronic components under the temperature changes produces a contact pressure on their contact area causing thermal strain and stress in materials of both bodies in the sealed structure. Within the framework of the axisymmetric problem, the stress-strain condition of the electronic component-compound system has been assessed in condition of thermal impact, due to which the pattern of the maximum total radial, circumferential and axial stresses has been revealed depending on their radial distribution and the temperature load mode. The stress estimation in the S2-29V resistor sealed with the EZK-25 compound inside the sealed electronic package has been performed at the constant temperature drop. The experimental method is proposed for determining the ultimate stresses in electronic components sealed with compound under stress and strain condition identical to the operational one. Experimental measurement of circumferential and axial strains was carried out by using method of electrotenometry. Thermal impacts were reproduced in the thermostat and the climatic chamber. Technological methods for protection of electronic components in the structures of electronic packages sealed with compound has been proposed by embedding elastic and dissipative joints between electronic components and a sealant, and the effectiveness of their application is experimentally evaluated based on determination of the damping coefficient.

Keywords: sealed electronic package, electronic component, compound, strength, stress and strain condition

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Електронні модулі із загальною герметизацією експлуатуються на різноманітних об'єктах техніки: літаках, ракетах, судах, радіолокаційних станціях, локомотивах, де їм доводиться працювати в несприятливих умовах вібрацій, ударів, різких перепадів температури, вологості та тиску. Загальна герметизація (компаундом) забезпечує надійний захист від кліматичних впливів, підвищення стійкості виробів до дії вібрацій, проте на стадії виробництва при технологічному тренуванні термоударами (коли вироб з температури +70°C переносяться в температуру -60°C з годинною витримкою при кожній температурі), а також на етапах зберігання і експлуатації при коливаннях температури, внаслідок різниці в значеннях фізико-механічних характеристик, виникає взаємодія герметика із його включеннями, тобто з електронними компонентами та іншими елементами конструкції, що призводить до виникнення руйнівних механічних напружень. При розтріскуванні компаунду порушується герметизація виробу з наступним виходом його з ладу, при руйнуванні або деформації електронних компонентів настає обрив електричного кола, або відхилення електричних параметрів. Складність таких дефектів полягає у низькій ремонтпридатності герметизованих модулів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні застосування розрахунково-експериментальних методів оцінки напружено-деформованого стану [1–3] та забезпечення міцності деталей, вузлів та блоків електронної техніки [4, 5]

суттєво ускладнюється через такі причини як відсутність загальноприйнятої термінології, методик оцінки міцності та норм міцності, за якими повинно вестись проектування, розрахунки, випробування і впровадження в серійне виробництво та експлуатацію виробів електронної техніки, на противагу багатьом іншим галузям техніки, та складність натурних конструкцій, які представляють собою багатозв'язкові механічні системи і спроби розрахунку їх напружено-деформованого стану часто приводять до неточності рішень і компрометують найсучасніші методи розрахунку особливо в умовах нестабільності фізико-механічних характеристик використовуваних матеріалів і технології виробництва та сучасної тенденції до зниження ваги і отримання більшої щільності монтажу в малих габаритах виробів електронної техніки [7–9].

Постановка завдання

Завданням представлено дослідження є оцінка напружено-деформованого стану конструкції електронних модулів герметизованих компаундом при термоударах та розробка технологічних методів захисту електронних компонентів у герметизованих конструкціях. Об'єктами дослідження є електронні компоненти, які герметизовані компаундом і мають форму тіл обертання, такі як резистори, конденсатори, діоди, гермо-виводи і т.д.

Оцінка напружено-деформованого стану системи електронний компонент – компаунд при перепаді температур

Типовий процес герметизації електронних компонентів відбувається шляхом заливки полімерним матеріалом. До заливки модуль і компаунд розігріваються до температури полімеризації, розширюючись при цьому незалежно один від одного. Після заливки компаундом виріб поміщають в термостат і витримують до закінчення процесу полімеризації, в ході якого через хімічну усадку компаунда вже виникають незначні за величиною контактний тиск і напруження. По завершенні процесу полімеризації готові вироби охолоджують до нормальної температури. Тепер конструкція являє собою заполімеризований об'єм компаунда, який може розглядатися як єдине тіло із численними різнорідними включеннями.

Внаслідок відмінності коефіцієнтів лінійного температурного розширення і інших фізико-механічних характеристик компаунда і електронних компонентів при зміні температури на їх межі виникає контактний тиск, який зумовлює наявність напруження в матеріалах конструкцій.

Представленим в даній роботі науковим результатом є подальший розвиток застосування теорії Ламе-Гадоліна про взаємодію складених товстостінних циліндрів для оцінки міцності електронних компонентів, що мають форму тіл обертання та оточуючого шару компаунду при довільній формі заливки останнього.

Розрахункова схема представлена на рис. 1, а зведена до осесиметричної задачі взаємодії двох циліндричних тіл, на межі яких виникає контактний тиск P в наслідок різниці коефіцієнтів температурного лінійного розширення та інших фізико-механічних характеристик [10].

Якщо товщина стінки циліндричного тіла електронного компонента більше однієї десятої середнього радіуса, то з прийнятною для практики точністю його можна розглядати як товстостінний циліндр [11], навантажений по зовнішній поверхні контактним тиском P , а по внутрішній – тиском навколишнього середовища P_1 . А виділений шар компаунда як товстостінний циліндр, навантажений по внутрішній поверхні контактним тиском P , а по зовнішній тиском P_2 , рівним тиску навколишнього середовища.

Напружено-деформований стан представлено на рис. 1, б для нескінченно малого елемента $abcd$ вирізаного і циліндричного тіла, яким є електронний компонент або оточуючий його шар компаунду. На схемі σ_r – нормальне напруження на внутрішній циліндричній поверхні об'єму радіусом r (радіальні напруження); $\sigma_r + d\sigma_r$ – нормальне напруження на зовнішній поверхні радіусом $r + dr$; σ_t – нормальні напруження на плоских бічних гранях (окружні напруження); σ_z – нормальні напруження на торцевих поверхнях (осьові напруження). Показаний напрям напружень будемо вважати додатнім і відповідним розтягуванню елемента.

Внаслідок осьової симетрії циліндра і навантаження елемент перекошуватись не буде, і дотичні напруження по його гранях будуть відсутні. Тому нормальні напруження σ_r , σ_t та σ_z будуть головними напруженнями.

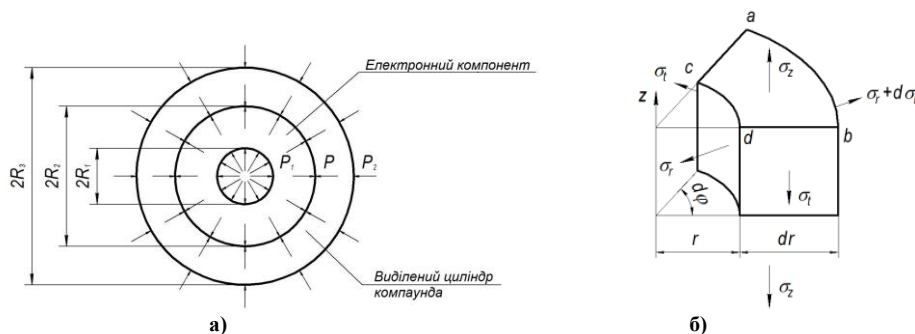


Рис. 1. Розрахункова схема: а) осесиметричної задачі взаємодії двох циліндричних тіл; б) напружено-деформованого стану елементарного об'єму

Відповідно до узагальненого закону Гука деформації елементарного об'єму представляють собою суму деформацій викликаних тиском і температурними розширеннями:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_z - \mu\sigma_t) + \alpha \Delta\tau; \varepsilon_t = \frac{1}{E}(\sigma_t - \mu\sigma_z - \mu\sigma_r) + \alpha \Delta\tau; \varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \mu\sigma_r - \mu\sigma_t) + \alpha \Delta\tau, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт лінійного температурного розширення, $\Delta\tau$ – зміна температури залежна від радіуса r та від часу t :

$$\Delta\tau(r, t) = \tau(r, t) - \tau_0, \quad (2)$$

де $\tau(r, t)$ – розподіл температури по радіусу циліндра, τ_0 – початкова температура тіла, t – час.

Рішенням рівнянь (1) вирази для напружень набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} [(1-\mu)\varepsilon_r + \mu\varepsilon_t + \mu\varepsilon_z - (1+\mu)\alpha \Delta\tau] \\ \sigma_t &= \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} [(1-\mu)\varepsilon_t + \mu\varepsilon_r + \mu\varepsilon_z - (1+\mu)\alpha \Delta\tau] \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} [(1-\mu)\varepsilon_z + \mu\varepsilon_r + \mu\varepsilon_t - (1+\mu)\alpha \Delta\tau] \end{aligned} \quad (3)$$

Отримані в [12] вирази температурних напружень представляють собою суму напружень, які виникають від нерівномірності радіального розподілу температури та напружень, які виникають від дії контактного тиску:

$$\sigma(P, \tau, r) = \sigma(\tau, r) + \sigma(P, r). \quad (4)$$

Наступні вирази (5–13) представлені з врахуванням граничних умов при $i = 1$: $(\sigma_{R_i}) = -P_i$, $(\sigma_{R_{i+1}}) = -P$ та при $i = 2$: $(\sigma_{R_i}) = -P$, $(\sigma_{R_{i+1}}) = -P_{i+1}$.

Напруження від нерівномірності радіального розподілу температури:

$$\sigma_r(\tau, r) = \frac{E_i}{1-\mu_i} \left[-\frac{1}{r^2} \int_{R_i}^r \alpha_i \Delta\tau_i r dr + \frac{r^2 - R_i^2}{r^2 (R_{i+1}^2 - R_i^2)} \int_{R_i}^{R_{i+1}} \alpha_i \Delta\tau_i r dr \right], \quad (5)$$

$$\sigma_t(\tau, r) = \frac{E_i}{1-\mu_i} \left[\frac{1}{r^2} \int_{R_i}^r \alpha_i \Delta\tau_i r dr + \frac{r^2 - R_i^2}{r^2 (R_{i+1}^2 - R_i^2)} \int_{R_i}^{R_{i+1}} \alpha_i \Delta\tau_i r dr - \alpha_i \Delta\tau_i \right], \quad (6)$$

$$\sigma_z(\tau, r) = \frac{E_i}{1-\mu_i} \left[\frac{2}{R_{i+1}^2 - R_i^2} \int_{R_i}^{R_{i+1}} \alpha_i \Delta\tau_i r dr - \alpha_i \Delta\tau_i \right]. \quad (7)$$

Напруження від дії контактного тиску (8–13) представлені при $P_i = 0$ внаслідок малості цих значень в порівнянні із контактним тиском P (табл. 1).

Аналіз математичних моделей (5–13) показав [13], що при сталому перепаді температур $\Delta\tau$ (це явище має місце при повному охолодженні або нагріванні системи електронний компонент – компаунд) і в електронному компоненті, і в оточуючому шарі компаунду значення загальних напружень (8–13) досягають максимальних значень, що також підтверджено в результаті експериментального дослідження.

Всі раніше наведені формули для визначення напружень складових нероз'єднаного з'єднання кераміка – компаунд є функціями контактного тиску P . Для визначення контактного тиску P розглянуто умову сумісності деформацій внутрішньої поверхні компаундного циліндра і зовнішньої циліндричної поверхні кераміки резистора: $U_{eл/r=R_2} = U_{комп/r=R_2}$.

Враховуючи значення переміщень матеріалів компаунда і електронного компонента на межі із контакту при $P_i = 0$ та $\Delta\tau = \text{const}$ контактний тиск отримує вираз (14) [10]:

Таблиця 1

Формули для визначення напружень і контактного тиску при сталому перепаді температур

Напруження	В електронному компоненті	У компаундному циліндрі
Радіальні	$\sigma_{r_1}(P, r) = -\frac{PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 - \frac{R_1^2}{r^2} \right), \quad (8)$	$\sigma_{r_2}(P, r) = -\frac{PR_2^2}{R_3^2 - R_2^2} \left(\frac{R_3^2}{r^2} - 1 \right), \quad (11)$
Окружні	$\sigma_{t_1}(P, r) = -\frac{PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{R_1^2}{r^2} + 1 \right), \quad (9)$	$\sigma_{t_2}(P, r) = \frac{PR_2^2}{R_3^2 - R_2^2} \left(\frac{R_3^2}{r^2} + 1 \right), \quad (12)$
Осьові	$\sigma_{z_1}(P) = -\frac{PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2}, \quad (10)$	$\sigma_{z_2}(P) = \frac{PR_2^2}{R_3^2 - R_2^2}, \quad (13)$
Контактний тиск	$P = \frac{[(1+\mu_2)\alpha_2 - (1+\mu_1)\alpha_1] \Delta\tau}{\frac{[(1+\mu_1)R_1^2 + (1-\mu_1)R_2^2]}{E_1(R_2^2 - R_1^2)} + \frac{[(1+\mu_2)R_3^2 + (1-\mu_2)R_2^2]}{E_2(R_3^2 - R_2^2)}} \quad (14)$	

Розрахунок напружень в резисторі С2-29В герметизованому компаундом марки ЕЗК-25 в складі гермомодуля при сталому перепаді температур

Аналітичний розрахунок головних напружень в резисторі та компаунді у складі гермомодуля виконувався за формулами (8–13).

Розрахунок був проведений при рівномірному шарі компаунда. Радіуси сполучених циліндричних тіл склали: $R_1 = 0,2$ мм; $R_2 = 0,75$ мм; $R_3 = 10$ мм.

Перепад температур, який відповідає зміні температури всього гермомодуля від $+70^\circ\text{C}$ (температура полімеризації) до -60°C (мінімально допустима температура випробувань в заводських умовах і в експлуатації) склав $\Delta\tau = 130^\circ\text{C}$.

Для розрахунку використовувалися фізико-механічні характеристики отримані в [14]. Розрахунок загальних радіальних, окружних та осьових напружень в резисторі та компаунді при сталому перепаді температур представлено у вигляді епюр їх радіального розподілу (рис. 2).

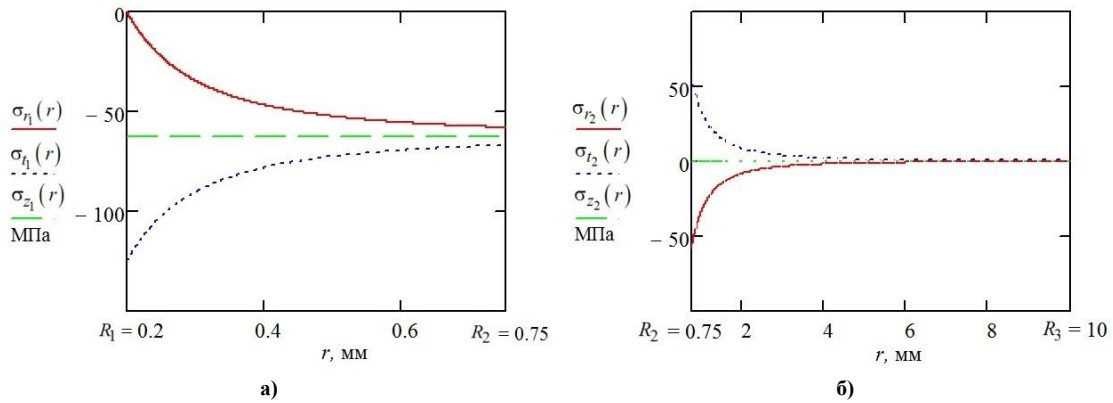


Рис. 2. Епюри радіального розподілу загальних напружень резистора (а) та компаунда (б) при сталому перепаді температур

Аналіз функцій епюр радіального розподілу загальних радіальних та окружних напружень показав, що в обох тілах радіальні напруження досягають максимальних значень на межі їх контакту, а окружні – на внутрішній поверхні кожного циліндру та при сталому перепаді температур.

В електронному компоненті виникають напруження стиску, при $R_1 \leq r \leq R_2$: $\sigma_{r1}(R_1) = 0, \sigma_{r1}(R_2) = \max, \sigma_{t1}(R_1) = \max, \sigma_{t1}(R_2) = \min$.

В компаунді радіальні напруження знаходяться в зоні стиску, а окружні – в зоні розтягу, при $R_2 \leq r \leq R_3$: $\sigma_{r2}(R_2) = \max, \sigma_{r2}(R_3) = \min, \sigma_{t2}(R_2) = \max, \sigma_{t2}(R_3) = \min$.

Осьові напруження σ_z за своїм значенням знаходяться між радіальними та тангенціальними і від радіусу r не залежать.

Оцінка міцності системи електронний компонент – компаунд із використанням осесиметричної розрахункової схеми (рис. 1) потребує вибору зовнішнього радіусу шару компаунду виділеного навколо заданого електронного компоненту, від якого, очевидно, залежить значення контактного тиску (14) на границі контакту та загальних напружень (8–10) в електронному компоненті. Такі залежності були отримані для найбільших за абсолютним значенням радіальних $\sigma_{r1}(R_3, r = R_2)$ (на зовнішній поверхні), окружних $\sigma_{t1}(R_3, r = R_1)$ (на внутрішній поверхні) та осьових напружень σ_{z1} (рис. 3).

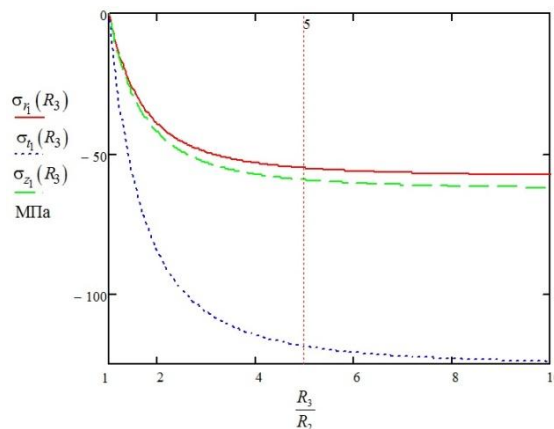


Рис. 3. Залежність найбільших за абсолютним значенням радіальних, окружних та осьових напружень в електронному компоненті від зовнішнього радіусу шару компаунду

З представлених графіків видно, що відповідно до отриманих функцій загальні напруження змінюються за гіперболічним законом і з ростом аргументу, в якості якого взята відносна величина R_3/R_2 , значення функцій наближатися до певних максимальних значень. В такому випадку можна визначити таке максимально допустиме значення аргументу – співвідношення зовнішніх радіусів компаундного циліндра і електронного компоненту, при подальшому збільшенні якого відносний приріст функцій $\Delta\sigma$ буде несуттєвим. Наприклад, при $[R_3/R_2] = 5$:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{r,t,z}[R_3/R_2] - \lim_{R_3/R_2 \rightarrow \infty} \sigma_{r,t,z}(R_3/R_2)}{\lim_{R_3/R_2 \rightarrow \infty} \sigma_{r,t,z}(R_3/R_2)} = -5,7\%$$

В таких випадках, задовольняючись 5-6% точністю розрахунків, компаундний циліндр можна розглядати як такий, що має нескінченно велику товщину стінки не залежно від форми його зовнішнього контуру. Таким чином, при зазначених співвідношеннях товщини шару компаунда і радіусу електронного компоненту можна обмежитися розглядом осесиметричної задачі, і збільшення тиску від компаунда, розташованого за зоною виділеного циліндра, буде несуттєвим у порівнянні з максимальним, знайденим при вирішенні осесиметричної задачі, і може не враховуватися в інженерних розрахунках.

Експериментальне визначення напружень в електронних компонентах герметизованих компаундом

Експериментальне визначення напружень проводилося для резисторів С2-29В у складі модулів герметизованих компаундом ЕЗК-25 при термоударах від +70°C до -60°C.

Поверхню резисторів препарували малобазними дротяними одно-нитковими тензорезисторами МПТ-1-100 для вимірювання окружних та осьових деформацій, які виникають в їх керамічних трубках.

Препаровані компоненти герметизували в складі гермомодуля експлуатаційним компаундом ЕЗК-25 на основі епоксидної смоли ЕД-20. В процесі термоудару здійснювалася безперервна реєстрація деформацій. В експерименті брало участь 5 гермомодулів, кожен із яких містив 5 резисторів. Випробування кожного гермомодуля проводили при термоциклюванні від температури +70°C до -60°C в п'яти циклах для цього гермомодуль поміщався в термостат СС-200 з температурою +70°C, а потім в кліматичну камеру Файтрон 3526/51 з температурою -60°C. Час витримки $t = 30$ хв при кожній температурі було отримано з розрахунку температурного розподілу в об'ємі виробу [12].

Для визначення деформацій резисторів тільки від дії компаунда від отриманих показань тензорезисторів в герметизованих модулях віднімали показання тензорезисторів в гермомодулях до герметизації при однакових значеннях температур.

В ході експериментів було встановлено, що максимальні значення загальних напружень відповідають моменту повного остигання гермомодуля, тобто при усталеному перепаді температур.

В табл. 2 представлено значення загальних окружних та осьових напружень отримані в результаті експериментального та аналітичного дослідження. Порівняння розрахункових та експериментальних значень показало їх незначну розбіжність до 13 %.

Таблиця 2

Експериментальні та розрахункові значення загальних окружних та осьових напружень на поверхні резисторів С2-29В герметизованих компаундом ЕЗК-25 при термоударі від +70 до -60°C

Загальні напруження		
Радіальні σ_{r1} , МПа	Окружні σ_{t1} , МПа	Осьові σ_{z1} , МПа
Експериментальні значення		
-	-60,36	-55,25
Математичне моделювання		
-57,95	-66,83	-62,39
Відносне відхилення, %		
-	10,72	12,92

Таким чином було експериментально підтверджено висновок зроблений на основі аналітичного аналізу, про те, що максимальні значення загальних напружень в системі електронний компонент – компаунд при термоударах виникають при усталеному перепаді температур, що дозволяє використовувати в інженерних розрахунках для оцінювання міцності системи електронний компонент – компаунд формули для розрахунку загальних напружень при усталеному перепаді температур із достатньою точністю.

Оцінка міцності системи електронний компонент – компаунд

Електронні компоненти, заполімерізовані компаундом, і сам компаунд знаходяться в складному об'ємному напружено-деформованому стані, в якому всі три головні напруження не дорівнюють нулю. В таких випадках як вказано в [11] небезпечний стан одного і того ж матеріала може мати місце при різних граничних значеннях головних напружень залежно від співвідношень між ними, зокрема для електронного компонента $\sigma_{r1} > \sigma_{z1} > \sigma_{t1}$, а для компаунда $\sigma_{t2} > \sigma_{z2} > \sigma_{r2}$. Але вважається, що експериментальне встановлення граничних значеннях головних напружень виявляється дуже складною задачею як через труднощі постановки дослідів, так і через великий об'єм випробувань.

Використання теорій міцності теж не завжди правильно відображає реальний напружений стан об'єктів. Величина допустимого напруження носить умовний характер, так як не відображає характеру передбачуваного руйнування, режиму навантаження та інших факторів, що впливають на надійність.

В представлений роботі була здійснена спроба експериментального визначення граничних (руйнівних) напружень в умовах напружено-деформованого стану ідентичного до експлуатаційного. В якості таких напружень було обрано окружні напруження електронного компонента на межі контакту двох тіл, оскільки, як було показано в результаті математичного моделювання (9) та експериментального дослідження, серед інших напружень, саме вони є найбільшими за абсолютними значеннями і їх вимірювання не викликає труднощів.

Експериментальне визначення граничних окружних напружень здійснювалося способом аналогічним до описаного раніше, за винятком заливки «жорстким» (без пластифікатора і наповнювача) компаундом на основі ЕЗК-25, в якому зберігався подібний експлуатаційному об'ємний напружено-деформований стан, але із більшими значеннями. 5 герметизованих модулів послідовно з'єднували в електричне коло, яке піддавали термоударам із одночасною реєстрацією тензорезисторів і електричних параметрів кола. При обриві кола або відхиленні електричного параметра (опору) за допустимі межі ($\pm 10\%$) в жорсткому компаунді фіксували руйнівне напруження σ_b . Потім модуль із компонентом, який вийшов ладу виключали з електричного кола і продовжували експеримент.

При появі мерехтливих дефектів виміряні в жорсткому компаунді напруження брали за руйнівні, оскільки цей дефект є рівнозначним за своїми наслідками руйнуванню компонента і нерідко зустрічається в умовах експлуатації.

Отримані значення граничних окружних напружень виявилися в діапазоні від -58,74 до -107,66 МПа. Як показали результати попереднього дослідження максимальні експлуатаційні окружні напруження (табл. 2) можуть перевищувати ці граничні значення і приводити до руйнування і виходу з ладу електронних модулів, що вимагає розробки способів зниження експлуатаційних напружень та забезпечення міцності системи електронний компонент – компаунд.

Отримані результати розробки ефективних технологічних методів захисту електронних компонентів

Одним із найбільш ефективних методів зниження напружень в герметизованих системах, які виникають в результаті взаємодії електронного компонента та герметика, є створення або модифікація пружно-дисипативних зв'язків між ними.

Введення таких додаткових зв'язків в механічну систему електронний компонент – герметик було запропоновано застосуванням ряду технологічних засобів.

Ефективність застосування додаткових пружно-дисипативних зв'язків оцінювалася коефіцієнтом демпфірування рівного відношенню деформацій (напружень) електронного компонента виміряних в герметизованому модулі без та із застосуванням пружно-дисипативного зв'язку відповідно.

Для експериментального оцінювання коефіцієнту демпфірування кожного з видів захисних засобів використовувався окремий герметизований модуль, який містив по п'ять резисторів С2-29В. Резистори гермомодулів препарували малобазними тензодатчиками типу МПТ як описано раніше. Для визначення деформацій резисторів тільки від дії компаунда та захисного засобу від отриманих показань тензорезисторів в герметизованих модулях віднімали показання тензорезисторів в гермомодулях до герметизації при крайніх значеннях температур термоудару. Герметизація модулів відбувалася компаундом типу ЕЗК-25. При термоударах герметизовані модулі спочатку перебували в термостаті з температурою $+70^\circ\text{C}$ і далі в кліматичній камері з температурою -60°C з витримкою при кожній температурі не менше 30 хв.

Спочатку дослідженню підлягали демпфірувальні захисні покриття: кислотний однокомпонентний силіконовий герметик КЛТ-30 і нейтральний однокомпонентний силіконовий герметик ВГО-1, які використовуються для герметизації обладнання, пристроїв, резисторів, що працюють в умовах постійної вібрації, і не викликають корозії алюмінієвих сплавів, анодованих і срібних покриттів, вуглецевої сталі в діапазоні температур від -60°C до $+250^\circ\text{C}$, та силіконовий герметик Виксинт У-2-28, який застосовується в пристроях, що використовуються в авіації, в космічних умовах, а також в електротехнічній і радіопромисловості.

Отримана ефективність використання вказаних видів покриття (табл. 3) досягала не тільки демпфірувальними властивостями, але й усуненням безпосереднього зв'язку між електронними компонентами та герметиком завдяки їх антиадгезійним властивостям.

Проте більшу ефективність показали засоби запропоновані в наступному етапі розробки, в якому в якості пружно-дисипативних зв'язків використовувалися кембрики виготовлені з поліетилену та поліхлорвінілових термоусадних трубок. Поліетиленові кембрики та термоусадні трубки відповідного діаметру попередньо розрізані по твірній та використані для захисту електронних компонентів у складі модуля перед герметизацією.

Як видно із табл. 3 кембрики та трубки мають найбільший коефіцієнт демпфірування, крім того у ряді випадків такі засоби є більш технологічними в порівнянні із покриттям і більш дешевими, хоча вони і не завжди застосовувані у виробництві, як, наприклад, при захисті компонентів прямокутної форми.

Слід зазначити, що оцінка напружено-деформованого стану системи електронний компонент – компаунд, запропонована в цьому підрозділі, розроблена для електронних компонентів, які мають форму тіл

обертання. Вибір таких об'єктів дослідження викликано тим, що саме така форма піддається найбільшому навантаженню зі сторони герметика, який оточує їх зо всіх сторін та створює складний об'ємний напружено-деформований стан для ЕК та герметика.

Таблиця 3

Значення коефіцієнта демпфірування пружно-дисипативних зв'язків

Вид пружно-дисипативного зв'язку	Коефіцієнти демпфірування
KLT-30	1,91
ВГО-1	1,96
У-2-28	2,05
Кембрики із поліетилену	3,66
Поліхлорвінілові термоусадні трубки	3,42

На відміну від тіл обертання багаточисельні ЕК прямокутної форми, зокрема ЕК поверхневого монтажу, мають обмежену площу контакту із герметиком і за рахунок цього піддаються меншому навантаженню, яке в основному приходиться на одну найбільшу поверхню компонентів. Разом із тим прямокутна форма не позбавлена своїх недоліків, до яких можна віднести гострі ребра та кути, які виступають концентраторами напружень і суттєво знижують міцність герметизованих конструкцій. Одним із способів зниження таких концентраторів може бути зглаження або округлення ребер компонентів, що буде також наближувати їх форму до форми тіл обертання і зробить можливим використання запропонованої математичної моделі для розрахунку напружень та оцінки їх міцності, але таке завдання не входило в рамки представлених досліджень.

Ще одним із можливих методів зниження напружено-деформованого стану системи електронний компонент – герметик може бути зменшення перепаду температур Δt , який виникає в наслідок різниці між температурою полімеризації в процесі герметизації та експлуатаційною температурою. Як показано в (14) величина контактної тиску, а значить і величина загальних напружень (8–13) є прямо пропорційною до Δt . Таким чином зменшення температури полімеризації дозволить зменшити стан попередньої напруженості герметизованих модулів в процесі виробництва та в подальшому експлуатаційний напружено-деформований стан.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Застосуванням теорії Ламе-Гадоліна про взаємодію складених товстостінних циліндрів для оцінки міцності електронних компонентів, що мають форму тіл обертання та оточуючого шару компаунду при довільній формі заливки останнього отримані функції радіального розподілу загальних радіальних та тангенціальних напружень, які виявили, що в обох тілах радіальні напруження досягають максимальних значень на межі їх контакту, а окружні – на внутрішній поверхні кожного циліндру та при сталому перепаді температур.

Встановлено, що при співвідношенні товщини виділеного шару компаунда до радіусу електронного компонента, яке складає 5:1, можна обмежитися розглядом осесиметричної задачі, і збільшення тиску від компаунда, розташованого за зоною виділеного циліндра, буде несуттєвим і може не враховуватися в інженерних розрахунках.

Запропоновано експериментальний спосіб визначення граничних напружень, відповідно до якого граничні (руйнівні) окружні напруження електронних компонентів визначаються в такому ж об'ємному напружено-деформованому стані, що і при експлуатації, але із більшими значеннями завдяки використанню «жорсткого» (без пластифікатора і наповнювача) компаунду.

Запропоновані технологічні методи захисту електронних компонентів у герметизованих компаундом конструкціях електронної техніки за рахунок створення пружно-дисипативних зв'язків між електронними компонентами та герметиком і експериментально оцінена ефективність їх застосування на основі визначення коефіцієнту демпфірування рівного відношенню деформацій (напружень) електронного компонента виміряних в герметизованому модулі без та із застосуванням пружно-дисипативного зв'язку відповідно. Встановлено, що найбільші коефіцієнти демпфірування мають поліетиленові кембрики та поліхлорвінілові термоусадні трубки відповідного діаметру попередньо розрізані по твірній та використані для захисту електронних компонентів у складі модуля перед герметизацією.

Література

1. Robertson C. T. Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics / C. T. Robertson. – New Jersey : Prentice Hall Professional, 2003. – 277 p.
2. 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.
3. 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.
4. ДСТУ 2634–94. Вироби електронної техніки. Методи оцінювання відповідності вимогам до надійності. – [Чинний від 1995-07-01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 1995. – 4 с.

5. 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.
6. ДСТУ 8216:2015. Вироби електронної техніки. Класифікація за умовами застосування та вимоги стійкості до зовнішніх впливових чинників. – Київ : Держспоживстандарт України, 2017. – 11 с.
7. Прогнозирование надёжности узлов и блоков радиотехнических устройств космического назначения на основе моделирования напряжённо-деформируемых состояний : монография / С. Б. Сунцов, В. П. Алексеев, В. М. Карабан, С. В. Пономарёв. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 114 с.
8. Талицкий Е. Н. Защита электронных средств от механических воздействий. Теоретические основы / Е. Н. Талицкий. – Владимир : Владим. гос. ун-т., 2001. – 256 с.
9. Singh T. Failure Modes and Mechanisms in Electronic Packages / T. Singh., P. Viswanadham. – Boston : Chapman & Hall, MA: Springer, 1998. – P. 363.
10. Calculation of mechanical stresses in adjoint system of electronic component and compound and strength assessment / V. Royzman, S. Petrashchuk, I. Kovtun, A. Lokoshchenko // Journal of Vibroengineering. – Vilnius, 2013. – Vol. 15, Issue 1. – P. 65–71.
11. Писаренко Г. С. Опір матеріалів / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський ; за ред. Г. С. Писаренка. – 2-е вид. допов. і перероб. – Київ : Вища школа, 2004. – 655 с.
12. Petrashchuk S. Solving Problem of Thermal Conduction for Providing Strength of Electronic Units on Thermal Impacts / S. Petrashchuk, I. Kovtun, A. Voznyak // Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy. Technical and Technological Equipment (HMTTSC-2016): MATEC Web of Conferences (Tomsk, April 19-21, 2016). – Vol. 72. – P. 5.
13. Kovtun I. Thermal stress in encapsulated electronic packages / I. Kovtun, S. Petrashchuk, J. Boiko // Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), (Odessa, Ukraine, 9–13 September, 2019). – P. 6.
14. Ройзман В. П. Идентификация физико-механических характеристик полимерных материалов / В. П. Ройзман, И. И. Ковтун, С. А. Петрашук // Вісник Технологічного університету Поділля. – Хмельницький : ТУП, 2002. – № 4, ч. 1. – С. 18–25.

References

1. Robertson C. T. Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics / C. T. Robertson. – New Jersey : Prentice Hall Professional, 2003. – 277 p.
2. 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.
3. 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.
4. DSTU 2634–94. Electronic components. Methods of estimation of conformity with demands on dependability. – Valid from 1995-07-01. – Kyiv : Derszspozhivstandard of Ukraine, 1995. – 4 p.
5. DSTU 7655:2014. Electronic components. General standards for reliability and testing methods. – Valid from 2015-07-01. – Kyiv : Derszspozhivstandard of Ukraine, 2009. – 9 p.
6. DSTU 8216:2015. Electronic components. Classification by conditions of exploitation and standards of resistance to external impacts. – Kyiv : Derszspozhivstandard of Ukraine, 2017. – 11 p.
7. Reliability prediction for space radio engineering devices based on the simulation of stress-strain conditions : Monograph / S. B. Suntsov, V.P. Alekseev, V.M. Karaban, S.V. Ponomarev. – Tomsk : Publishing of Tomsk. st. un. of control systems and radio engineering, 2012. – 114 p.
8. Talitskii E. N. Protection of electronic devices from mechanical impacts. Theoretical fundamentals / E. N. Talitskii. – Vladimir : Vladimir st. un., 2001. – 256 p.
9. Singh T. Failure Modes and Mechanisms in Electronic Packages / T. Singh., P. Viswanadham. – Boston : Chapman & Hall, MA: Springer, 1998. – P. 363.
10. Calculation of mechanical stresses in adjoint system of electronic component and compound and strength assessment / V. Royzman, S. Petrashchuk, I. Kovtun, A. Lokoshchenko // Journal of Vibroengineering. – Vilnius, 2013. – Vol. 15, Issue 1. – P. 65–71.
11. Strength of materials / G. S. Pisarenko, V. A. Agaev, A. L. Kvitka, V. G. Popkov, Y. S. Umanskiy. – 2-nd Edition. – Kiev : Technika, 1967. – 792 P.
12. Petrashchuk S. Solving Problem of Thermal Conduction for Providing Strength of Electronic Units on Thermal Impacts / S. Petrashchuk, I. Kovtun, A. Voznyak // Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy. Technical and Technological Equipment (HMTTSC-2016): MATEC Web of Conferences (Tomsk, April 19-21, 2016). – Vol. 72, P. 5.
13. Kovtun I. Thermal stress in encapsulated electronic packages / I. Kovtun , S. Petrashchuk, J. Boiko // Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), (Odessa, Ukraine, 9–13 September, 2019). – P. 6.
14. Royzman V. P. Identification of physical and mechanical characteristics of polymeric materials / V. P. Royzman, I. I. Kovtun, S. A. Petrashchuk // Herald of Technological university of Podillia. – Khmelnitsly : TUP, 2002. – 4, Iss. 1. – P. 18-25.