

змогу подолати суперечливість запропонованої Г.Альтшуллером системи стандартів [3]. В межах цієї системи мінімально життєздатним функціональним перетворювачем визнається виключно веполь з двох речовинних і одного польового елементів, що позбавляє сенсу існування запропоновані там же вимірювальні веполі, які моделюють вимірювальні задачі і складаються з двох польових і одного речовинного елементів. Причиною цього протиріччя є саме неврахування різного типу цих веполів: більшість стандартів і всі позначення [3] стосуються речовинних веполів, а вимірювальні веполі є польовими.

Якщо прийняти цю термінологію, то в межах польового веполя необхідно знайти місце для інструменту і виробу. Спираючись на розширене визначення виробу як об'єкта перетворення, а інструменту – як елемента, під дією якого це перетворення здійснюється, видається доцільним вважати виробом польового веполя енергетичний потік на вході  $\Pi_{\text{вх}}$ , інструментом – речовинний елемент  $\mathbf{B}$ , під дією якого здійснюється це перетворення, а характер цього перетворення описати передавальною функцією елемента  $\mathbf{B}$  у вигляді співвідношення  $\Pi_{\text{вих}}/\Pi_{\text{вх}}$ . Отже, речовинний веполь буде однозначно задаватися ланкою  $\mathbf{B}_2 \rightarrow \Pi \rightarrow \mathbf{B}_1$ , а польовий – ланкою  $\Pi_{\text{вх}} \rightarrow \mathbf{B} \rightarrow \Pi_{\text{вих}}$ , з передавальною функцією  $\Pi_{\text{вих}}/\Pi_{\text{вх}}$ .

1. Гліненко Л.К., Смердов А.А., Вибойцик О.М. *Моделювання евристичних задач проектування*. Львів, 1997. 2. Альтшуллер Г.С., Злотин Б.Л., Зусман А.В., Филатов В.И. *Поиск новых идей: от озарения к технологии*. Кишинев, 1989. 3. Альтшуллер Г.С. *Стандарты на решение задач // Нить в лабиринте*. Петрозаводск, 1988. 4. Горяинов Л.Г. *Анализ энергетических цепочек как метод совершенствования технических систем // ТРИЗ*. 1990. 1, 2. С. 16–22. 5. Заритов М.Ф. и др. *Энерго-информационный метод научно-технического творчества*. М., 1988.

УДК 539.293.011.44

Закалик Любов, Красівський Ігор

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра конструювання  
і технології виробництва радіоапаратури

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВНУТРІШНІХ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ В БАГАТОШАРОВИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СТРУКТУРАХ

© Закалик Любов, Красівський Ігор, 2000

Багатошарові інтегральні структури широко використовуються в радіоелектронній апаратурі та іншій сучасній техніці. При виготовленні цих структур в процесі охолодження від температури нанесення шарів до нормальної (робочої) температури, а також при експлуатації в них виникають значні механічні напруження. В цій статті запропонований метод розрахунку напружено-деформованого стану інтегральних структур.

The multilayered integral structures find a wide use in radioelectronic apparatus and other contemporary engineering. Attached to making of these structures in chilling

**process from temperature of bringing layers to normal (work) temperature, and also attached to exploitation arise considerable mechanical stress. The computation method of tensely deformed state of integral structures is offered in this paper.**

У зв'язку з вимогами до якості та надійності виробів мікроелектроніки, безперервним підвищенням щільності упаковки та зменшенням розмірів елементів, збільшенням кількості топологічних шарів, розширенням переліку використаних матеріалів, необхідно більшу увагу приділяти питанням, які пов'язані з механічними явищами в інтегральних структурах, а самі інтегральні структури розглядати як механічні системи, в яких діють зовнішні та внутрішні механічні збурення, що викликають в її елементах напружено-деформований стан.

Близько 50 % відмов у мікроелектронних пристроях виникає через недопустимо великі деформації в інтегральних структурах, системах багаторівневих міжз'єднань, корпусних деталях, елементах електромонтажу, паяних і зварних з'єднаннях при механічних і термічних впливах у процесі їх виробництва, випробування та експлуатації. Крім цього, підвищені механічні напруження в елементах структури стимулюють фізико-хімічні процеси, а особливо дифузію, що приписують ефекту механо-хімічної активності. Для усунення та запобігання цих явищ на етапі проектування необхідний аналіз напружено-деформованого стану в елементах мікроелектронних пристроїв.

Для визначення рівня механічних температурних напружень в інтегральних структурах використовується спрощений підхід, який базується на такому допущенні: оскільки товщина підкладки (кристала) значно (в десятки-сотні разів) більша за товщину створених на її поверхні шарів, то загальна деформація інтегральної структури та деформація окремих шарів буде задаватись деформацією підкладки. Такий підхід дає досить високу похибку і тому його необхідно використовувати при першому наближенні. Для одержання результатів з вищою точністю при розрахунку механічних напружень та деформацій необхідно врахувати рівноважний напружено-деформований стан інтегральної структури, який створюється під дією деформацій і пружних властивостей підкладки та створених на ній шарів.

Запропонований метод можна використати для розв'язання задачі про напружено-деформований стан вільної багатопарової структури, що складається з пружних ізотропних шарів. Вважаємо, що граничні умови в основах структури задовольняються точно, а на бічній поверхні наближено (за принципом Сен-Венана).

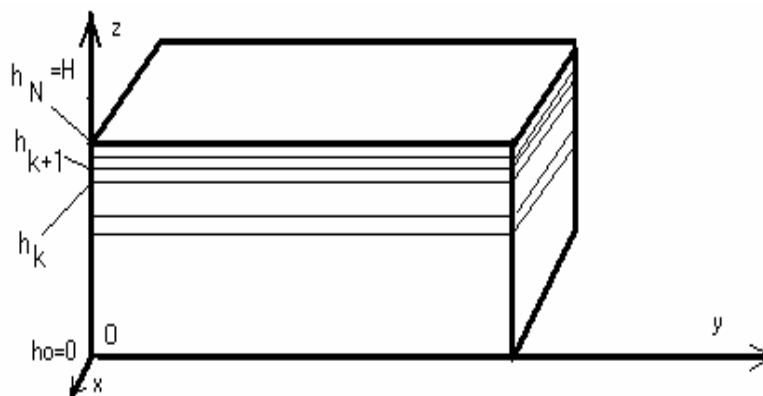


Рис.1. Система координат у багатопаровій структурі.

Розглянемо багатошарову структуру у вигляді пластини товщиною  $H$ , що складається з  $N$  пружних ізотропних однорідних шарів з паралельними основами. Введемо систему прямокутних декартових координат  $Oxyz$ , так, щоб площина  $Oxy$  збігалася з нижньою основою пластини, а вісь  $Oz$  була спрямована від нижньої до верхньої основи пластини. Пронумеруємо послідовно шари пластини, починаючи з нижнього (підкладки), числами  $k=1,2,\dots, N$ . Координату  $z$  площини розділу  $k$ -го і  $k+1$ -го шарів позначимо через  $h_k$  ( $k=1,2,\dots, N-1$ ). Тоді:  $h_0=0, h_N=H$  (рис. 1).

Припустимо, що температурне поле в пластині при нормальній (робочій) температурі  $T_H$  однорідне як по товщині, так і в площині структури. І вважаємо, що температура нанесення кожного шару  $T_{ок}$  є різною. Нехай основи пластин вільні від зовнішніх навантажень, тоді задаємо компоненти напружень так:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_0(z), \sigma_z = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = \sigma_{xy} = 0, z = 0, H \quad (1)$$

Оскільки рівняння зв'язку між напруженнями і деформаціями для

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_0(z), \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = 0, z=0, H \quad (2)$$

пружних матеріалів відоме [1], то для компонент деформацій рівняння сумісності деформацій зведуться до одного рівняння, з якого випливає, що

$$\varepsilon_0(z) = C_1 + C_2 \cdot z \quad (3)$$

Співвідношення (3) відображає загальну деформацію пластини, яка лінійно змінюється за товщиною. Рівняння Гука, що зв'яже механічне напруження і деформацію, згідно з (1) і (2) набуде вигляду:

$$\sigma_0(z) = \frac{E_k}{1-\nu_k} \left[ \varepsilon_0(z) - \int_{T_{ок}}^{T_H} \alpha_k(z) dT \right], \quad (4)$$

де  $E_k$ ,  $\nu_k$  і  $\alpha_k$  – відповідно модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона і коефіцієнт теплового лінійного розширення  $k$ -го шару.

Вираз (4) дає змогу обчислити напруження в певному  $k$ -му шарі. В правій частині виразу (4) у дужках записана відносна деформація  $k$ -го шару:

$$\varepsilon_k(z) = \left[ \varepsilon_0(z) - \int_{T_{ок}}^{T_H} \alpha_k(z) dT \right], \quad (5)$$

що враховує складові: загальну деформацію, викликану тепловим розширенням при зміні температури в  $k$ -му шарі.

Виходячи з виразу (4), з врахуванням співвідношення (3), задача визначення напружено-деформованого стану пластини зводиться до знаходження двох постійних  $C_1$  і  $C_2$ , які будемо шукати з граничних умов на вільній боковій поверхні, що задаються згідно з принципом Сен-Венана: рівнодійне зусилля і рівнодійний момент на боковій поверхні пластини відповідно дорівнюють нулеві [2,3]:

$$\int_0^H \sigma_0(z) dz = 0 \quad (6)$$

$$\int_0^H \sigma_0(z) z dz = 0 \quad (7)$$

Підставивши (4) в (6) і (7) з врахуванням (3) отримуємо систему інтегральних рівнянь для визначення постійних  $C_1$  і  $C_2$ :

$$C_1 \sum_{k=1}^N \frac{E_k}{1-\nu_k} (h_k - h_{k-1}) + C_2 \sum_{k=1}^N \frac{E_k}{1-\nu_k} \left( \frac{h_k^2}{2} - \frac{h_{k-1}^2}{2} \right) = \sum_{k=1}^N \frac{E_k}{1-\nu_k} \int_{h_{k-1}}^{h_k} \left[ \int_{T_0(z)}^{T(z)} \alpha_k(T) dT \right] dz, \quad (8)$$

$$C_1 \sum_{k=1}^N \frac{E_k}{1-\nu_k} \left( \frac{h_k^2}{2} - \frac{h_{k-1}^2}{2} \right) + C_2 \sum_{k=1}^N \frac{E_k}{1-\nu_k} \left( \frac{h_k^3}{3} - \frac{h_{k-1}^3}{3} \right) = \sum_{k=1}^N \frac{E_k}{1-\nu_k} \int_{h_{k-1}}^{h_k} \left[ \int_{T_0(z)}^{T(z)} \alpha_k(T) dT \right] z dz, \quad (9)$$

Постійні коефіцієнти  $C_1$  і  $C_2$  мають певний фізичний зміст:  $C_1$  являє собою лінійну відносну деформацію (розтяг-стиск) пластини при  $Z=0$ ; а  $C_2$  – кривину згину пластини, що визначає її рівноважний напружено-деформований стан. Розв'язавши систему рівнянь (8) і (9), отримаємо постійні  $C_1$  і  $C_2$ , які підставляємо в (3) і (4). В результаті одержуємо співвідношення для визначення деформації та напруження в кожному шарі для даної інтегральної структури.

Розглянутий метод реалізований у вигляді програми на MATHCAD для розрахунку НДС багатошарової системи між'єднань для багатокристалльного модуля. Запропонований метод дає змогу визначити напружено-деформований стан в будь-якій багатошаровій структурі.

1. Боли Б. и Уейнер Дж. Теория температурных напряжений. М., 1964. 2. Хуторянская Д.Г. Определение напряженного состояния многослойных вязкоупругих плит при нестационарном и неоднородном по толщине температурном поле // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Горький, 1977. 3. Kitazawa I, Hibino Y. A Steady on Thermal-Stress-Reliability of Si Based PLC Substrate // IEEE Trans. Comp., Packag., Manufakt. Technol. 1997. Vol. 20. №7. P. 327 – 333.

УДК 621.319.837

Кобасяр Михайло, Русин Богдан

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗНІМАННЯ ПРОЕКЦІЙНИХ ДАНИХ НА ЯКІСТЬ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

© Кобасяр Михайло, Русин Богдан, 2000

У роботі проведена оцінка необхідної кількості проєкційних даних для реконструкції зображень. Досліджено вплив параметрів схеми знімання проєкційних даних при їх зашумленні і обмеженні динамічного діапазону на якість реконструкції.

In the work is carried out the estimation of the necessary amount of the projection data for reconstruction of the images. It has been investigated the influence