

МОДЕЛЮВАННЯ ВИГИНУ ДВОШАРОВОЇ СТРУКТУРИ ПРИ ТЕРМОВПЛИВАХ

Невлюдов І.Ш., Палагін В.А., Демська Н.П., Разумов-Фризюк Є.А.

Харківський національний університет радіоелектроніки

The article proposes a mathematical model for the calculation of the bending of two-layer aluminum-polyamide film materials, which is based on the general provisions of the theory of bending: the presence of a neutral layer, the length of which does not change during bending, the material is on the side of concavity, prone to compression, and Finally, the structure obeys the Hooke law, which makes it possible to calculate stresses in layers of material by removing them from the neutral layer.

У міру ускладнення конструкцій нових видів виробів електронної техніки, на основі гнучких багатошарових структур, може знижуватися ефективність їх проектування, виробництва й експлуатації, зокрема при їх широкому впровадженні у конструкціях компонентів мікроелектромеханічних систем (МЕМС) [1]. Для багатошарових структур слід враховувати: взаємодію між матеріалами шарів; вплив конструктивних і технологічних факторів на напружено-деформований стан (НДС), щоб уникнути потенційно можливих проблем із різним ступенем розширення та гнучкості шаруватого матеріалу, зі зміщенням матеріалу та ін. [2]. Одним з факторів, що значною мірою впливає на такі важливі механічні характеристики як міцність, релаксація напружень, довговічність та інші показники, є працездатність в певних температурних діапазонах. Для проведення розрахунків, пов'язаних з аналізом НДС необхідно мати величини термомеханічних параметрів, зокрема, коефіцієнти лінійного теплового розширення (КЛТР) та величину усадки при різних температурах [3]. Адже саме при підвищенні температури полімерний матеріал переходить у високоеластичний стан, який характеризується низьким модулем пружності і у такому стані матеріал не може застосовуватися як конструкційний [3]. У багатьох випадках аналітичні методи аналізу [4], зважаючи на складність геометрії пристроїв, відмінності властивостей окремих мікрочастин розглянутих структур не представляється можливим. Методи опису та аналізу повинні в необхідній мірі враховувати і специфіку використовуваних технологічних процесів виготовлення конкретних МЕМС пристроїв [1]. Тому стає очевидною необхідність розробки моделі напружено-напруженого стану багатошарової поліімідної металізованої структури [5].

Запропонована математична модель [6] розрахунку вигину двошарових

алюміній-поліімідних матеріалів під впливом зміни температури, в основі якої лежать загальні положення теорії вигину: існування нейтрального шару, лінійні розміри якого не змінюється при згинанні, матеріали зі сторони вигину піддається стисканню, а зі сторони округлості – розтягненню; ненадавлюванні сусідніх шарів один на одного і, наприкінці, структура підпорядковується закону Гука, що дає можливість обчислення напружень в елементарних шарах матеріалів за їх подовженням від нейтрального шару.

Остання умова рівносильна вимогам невикривлення нормалей до нейтральної (серединної) поверхні вигнутої структури та одночасно нормальності до зовнішніх поверхонь структури. Ці умови відповідають так званому циліндричному вигину, зручність використання якого міститься в придатності до малих вигинів і довільно великих. При напрямках осей структури: X – подовжня вісь, Y – поперечна в тілі структури матеріалу, Z – напрямки перпендикулярні елементарним площадкам Δx_i та Δy_i . При циліндричному згині центр кривизни розташовується на перетині напрямків Z , що є перпендикулярними до різних елементів довжини Δx_i .

Багатошарова структура складається з шарів матеріалів (поліімід з різною товщиною матеріалу в різних місцях топології і металеві провідникові елементи), з постійною для матеріалу механічними параметрами але різною товщиною шарів. Закон Гука для кожного шару має вигляд:

$$\sigma_x^k = \frac{E_k}{1 - \mu_k^2} (\varepsilon_x^k + \mu_k \varepsilon_y^k); \quad \sigma_y^k = \frac{E_k}{1 - \mu_k^2} (\varepsilon_y^k + \mu_k \varepsilon_x^k);$$

$$\tau_{xy}^k = \frac{E_k}{2(1 + \mu)} \varepsilon_{xy}^k; \quad \tau_{xz}^k = G_k \gamma_{xz}^k; \quad \tau_{yz}^k = G_k \gamma_{yz}^k,$$

де $\frac{E}{1 - \mu^2} = D$ – жорсткості пластин, $E_k = E_k(z)$; $\mu_k = \mu_k(z)$ – модулі поздовжньої пружності і коефіцієнт Пуассона в площині ізотропії, паралельні зовнішнім поверхням; $G_k = G_{(z)}$ – модуль поперечного зсуву.

При зміні температури вихідними даними для розрахунку σ_{lyz} та σ_{2yz} обираємо $\sigma_{lyz} = -\mu \sigma_{lz}$; $\sigma_{2yz} = -\mu \sigma_{2z}$ у зоні під провідником, у відповідності з об'ємним напруженим станом. У цьому виразі σ_{lyz} означають нормальні напруження в перетині Y , що змінюються по висоті Z у відповідності до закону Гука (рис. 1).

В двошаровому матеріалі після виготовлення (нанесення лаку на алюмінієву фольгу, імідізації клею та охолодження до кімнатної температури). У якості одиничного типового елемента взяти провідник шириною b_1 , висотою h_1 , який симетрично розташований на полііміді товщиною h_2 , шириною $b_2 = l_2/2 + b_1 + l_2/2$ (рис. 2).

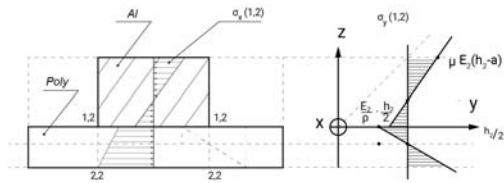


Рис. 1. Нормальні напруження у відповідності до закону Гука

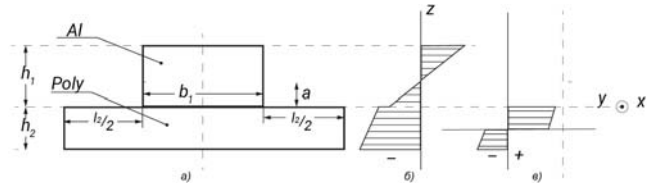


Рис. 2. Поперечний переріз елемента гнучкого шлейфа: а – поперечний переріз; б – розподіл деформацій; в – еюра напружень вздовж осі X (довжини)

Наступною операцією є отримання провідників методом витравлювання амонієм проміжків між провідниками. Травлення виконується після випрямлення вигину структури, отриманого із-за різних ТКЛР при охолодженні амонію та полііміду. Випрямлення забезпечується прикладення розтягуючого зусилля по осі X, рівномірно розподіленого по осі Y, яке створюється згинальним моментом M_x шляхом вигину в напрямку, протилежному вигину при охолодженні структури (намотування з протилежному вигині матеріалу двошарової структури на циліндр радіуса ρ_x). При цьому всі шари структури, які були деформовані при охолодженні матеріалу, ці деформації усувають (розтягнуті стиснуться до вихідного стану, стислі – подовжуються). Напруження в шарах полііміду будуть однаковими по всій його товщині, в шарах алюмінію однаковими по всій товщині). Точніше вони будуть нульовими. І в такому стані шарів проводиться травлення металу з пробільних місць.

Після травлення шлейф (структура поліімід+провідники) знімається з оправлення (циліндра радіусом ρ_x). У зоні під провідниками механічні напруження σ_{ixz} та $\sigma_{iyz} = \sigma_{ixz}$ відновлюються до значень термічних напружень, викликаних охолодженням при виготовленні матеріалу.

При травленні провідників пропадають сили, що виникають в шарі алюмінію і полііміду через різницю ТКЛР матеріалів структури. Напруження в полііміді залишаються завдяки зміні температури від температури імідізації до кімнатної температури, ці напруги підкоряються закону Гука і внаслідок адаптації сил по всій товщині полііміду в зоні відсутності провідників, тобто відповідають рис. 1.

По осі X (уздовж осі X) σ_{1z} та σ_{2z} визначаються за формулами моделі вигину [7] під площею провідника:

$$\sigma_{1z}^{(t)} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta t}{h_1 \left(\frac{1}{E_1 h_1} + \frac{1}{E_2 h_2} \right)} \left[\frac{1}{h_1} - \frac{(h_1 + h_2)(E_1 Z)}{2(E_1 J_1 + E_2 J_2)} \right]; \quad \sigma_{2z}^{(t)} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta t}{h_2 \left(\frac{1}{E_1 h_1} + \frac{1}{E_2 h_2} \right)} \left[\frac{1}{h_2} - \frac{(h_1 + h_2)(E_2 Z)}{2(E_1 J_1 + E_2 J_2)} \right]$$

Модель, розроблена для прогнозування вигину метал-полімерної двошарової структури, може знайти більш широке застосування, зокрема, для розрахунку деформації консольних мікробалок істотно менших об'єктів ніж розглянуті в роботі [1], які використовуються в якості сенсорів ІК випромінювання, в теплобаченні.

Література

1. Невлюдов І.Ш. Мікросистемна техніка та нанотехнології: Монографія / І.Ш. Невлюдов, В.А. Палагін. – К. : НАУ, 2017. – 528 с.
2. Жуков, А.А. Энергетические характеристики поверхностей и адгезионная прочность полиимидных покрытий на гидрофильных подложках в технологии микроэлектроники [Текст] / А.А. Жуков // Электронная техника. – 2001. – Сер. 3, №155. – С. 59-62.
3. Шидловський М.С. Нові матеріали: частина 2 - Експериментальні методи досліджень механічних властивостей конструкційних полімерів та пластмас: Навчальний посібник / М.С. Шидловський, А.Є. Бабенко, О.О. Боронко, О.П. Заховайко, С.І. Трубочев. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 265 с.
4. Плоский з'єднувач електронних пристроїв з нульовою силою вставки: патент № 103402 України на корисну модель / Ю. І. Богдан, Н.П. Демська, В.В. Невлюдова, В.А. Палагін, Є.А. Разумов-Фризюк, В.І. Роменський; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 23.
5. Жарикова І.В. Курапов С.В., Невлюдов І.Ш., Палагін В.А., Разумов-Фризюк Е.А., & Чеченя В.С. Трассировка подключающей пластины многозондового устройства контроля VGA-компонентов // Вісник Запорізького національного університету. Фізико-математичні науки. – 2013. – №. 2. – С. 28.
6. Мікроелектромеханічний багатозондовий контактний пристрій : пат. на винахід № 97538 / Борщов В.М., Коцій Л.Д., Лістратенко О.М., Невлюдов І.Ш., Палагін В.А., Проценко М.А., Разумов-Фризюк Є.А., Тертишний С.М., Тимчук І.Т. ; ХНУРЕ. – 2012
7. Nevliudov, I.S., Borshchov, V.M., Palagin, V.A., Razumov-Fryziuk, I.A., Tymchuk, I.T., Nevliudova, V.V., & Petrova, A.Y. (2019). Mathematical model of bending two-layer film aluminium-polyimide structure due to temperature changes. *Functional Materials*, 26(2), 342-346. doi:10.15407/fm26.02.342