

УДК 621.3.049.75

DOI: 10.18372/0370-2197.2(83).

*І. Ш. НЕВЛЮДОВ, В. А. ПАЛАГІН, Н. П. ДЕМСЬКА, В. В. НЕВЛЮДОВА,
М. Г. СТАРОДУБЦЕВ*

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОЛІМІДНИХ КОМУНІКАЦІЙНИХ СТРУКТУР НА ПРИКЛАДІ ГНУЧКОГО ШЛЕЙФУ

Найнебезпечнішим типом впливів на гнучкі шлейфи та друковані плати є пружно-пластичні деформації від багаторазових згинань або так звана малоциклова втома матеріалу. Ці деформації виникають між частками структури, які обертаються або коливаються відносно одна однієї. Предметом даного дослідження є гнучкий двошаровий шлейф. Метою даної роботи є дослідження залежності параметрів довговічності полімідних шлейфів з мідними провідниками від конструктивно-технологічних рішень двошарових структур та розробка рекомендацій по збільшенню довговічності та стійкості гнучких структур виробів мікроелектроніки та мікроелектромеханічних систем. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішення наступних завдань: проведення аналізу даних про вплив конструктивних і технологічних факторів на напружено-деформований стан; проведення моделювання та інженерний аналіз гнучких шлейфів при силовому температурному впливі; розгляд нових конструктивно-технологічних варіантів підвищення довговічності та міцності гнучких структур; встановлення найбільш важливих факторів міцності. При вирішенні поставлених завдань була використана методологія моделювання з використанням САД системи SolidWorks та методу скінчених елементів. Проведена оцінка із застосуванням критерію Коффіна-Менсона, який встановлює квадратичну залежність стабільності від радіусу перегину друкованої плати. В результаті проведеного дослідження розраховані та порівняні розподіл нормальних напружень, сил та згинальних моментів у шарах міді та полімиду для різних розмірів елементів. Результати представлені у вигляді діаграми нормальних напруг вздовж подовжньої осі. Встановлено, що застосування захисних полімідних шарів підвищує довговічність мідного провідника в 1,8...2,55 рази. Діаграми розподілу напружень представлені у вигляді кольорових термограм, а розрахункові запаси міцності склали 2...5 разів. Отримані результати показують сприятливі умови для досягнення високої якості виготовлення гнучких мідно-полімідних шлейфів та друкованих плат інтегрованих мікроелектронних пристроїв.

Ключові слова: *гнучка друкована плата, полімідні комунікаційні структури, пружно-пластичні деформації, довговічність.*

Вступ. З кожним роком зростають вимоги до вузлів електронної техніки (ЕТ) у зв'язку з жорсткістю умов їх експлуатації [1]. Разом з тим в залежності від свого призначення, дані модулі можуть підпадати під вплив численних дестабілізуючих факторів. Тому в даний час актуальним напрямом є розробка ЕТ на основі гнучких комутаційних структур (ГКС), зокрема, гнучких друкованих плат і кабелів, які набули широкого поширення завдяки забезпеченню можливості зниження габаритно-масових характеристик, вартості, підвищення надійності пристроїв, що містять такі структури. ГКС в умовах мікромініатюризації виробів сучасної електронної техніки забезпечують ряд переваг при створенні електро-з'єднань в пристроях як стаціонарних, так і рухомих конструкцій [2]. При їх ви-

користанні мінімізуються масогабаритні параметри вузлів, поліпшуються умови охолодження [3], спрощується монтаж [4].

Таким чином, підвищення техніко-економічних показників вузлів ЕТ, що досягається застосуванням ГКС, супроводжується необхідністю обґрунтування рівня конструкторсько-технологічних рішень забезпечення і до ускладнення технологічних процесів при їх виробництві. Сучасний рівень розвитку теорії забезпечення якісних параметрів радіоелектронних пристроїв не надає прийнятних засобів оцінки і контролю параметрів надійності вузлів ЕТ на базі ГКС. Тому стає очевидною необхідність створення і удосконалення методів оцінки якісних характеристик таких модулів [5] на етапах їх проектування, виробництва і експлуатації.

Постановка задачі. У міру ускладнення конструкцій нових видів виробів ЕТ, на основі гнучких структур (ГС), може знижуватися ефективність їх проектування, виробництва й експлуатації, зокрема при їх широкому впровадженні у конструкціях компонентів мікроелектромеханічних систем (МЕМС) [6]. Також для багатшарових ГС слід враховувати взаємодію між матеріалами шарів, використовувати конструкцію, яка забезпечує безкладальне виготовлення, щоб уникнути потенційно можливих проблем із різним ступенем розширення та гнучкості шаруватого матеріалу, зі зміщенням матеріалу, впливом вологості та ін. [7-8].

Найбільш небезпечними поширеними видами впливів [9], за яких відбувається руйнування ГС, є пружно-пластичні деформації від багаторазових згинань або так звана малоциклова втома матеріалу (рис. 1).

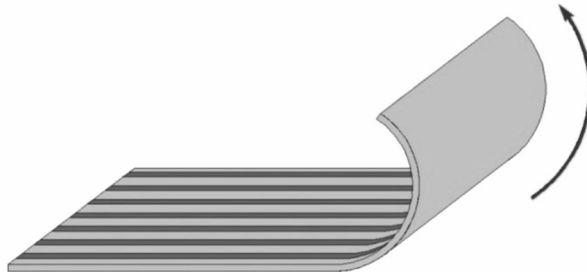


Рис. 1. Вигин гнучкої друкованої плати

Деформації згинання виникають в пересувній мобільній апаратурі, в якій гнучкі друковані плати (ГДП) використовуються для з'єднання двох або більш жорстких модулів, які обертаються або коливаються один відносно іншого, наприклад ноутбуки, датчики, маніпулятори, антени та ін. Така деформація може призвести до відшарування фольгованого провідника від діелектричної основи, виникненню тріщин в провідниках. Визначаючим параметром виникнення дефектів є радіус перегину ГДП [10].

В роботі необхідно провести дослідження залежності параметрів довговічності полімідних шлейфів з мідними провідниками від конструктивно-технологічних рішень двошарових структур та розробити рекомендації по збільшенню довговічності та стійкості гнучких структур виробів мікроелектроніки та МЕМС. Навести дані про вплив конструктивних і технологічних факторів на напружено-деформований стан (НДС). Привести результати моделювання та інженерного аналізу гнучких шлейфів при силовому температурному впливі, встановити найбільш важливі фактори міцності.

Дослідження гнучких структур. Проведемо дослідження напружено-деформованого стану матеріалів гнучкого шлейфа на прикладі вигину плати, що складається з двох різнорідних матеріалів: мідного провідника і поліімідної плівки (рис. 2).

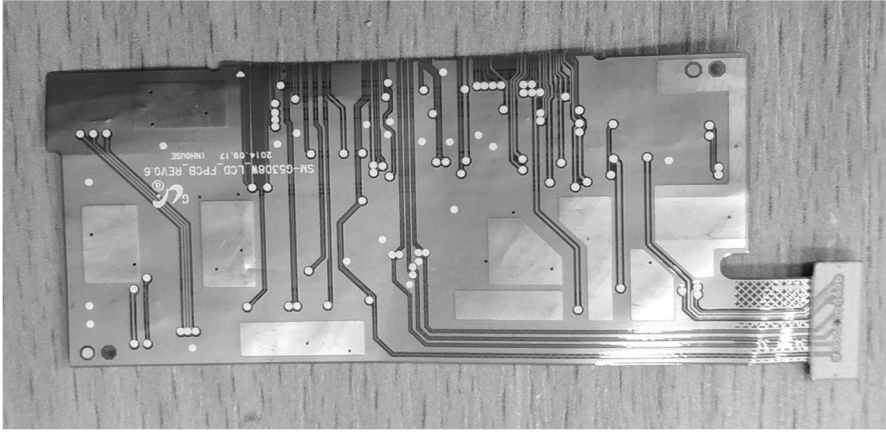


Рис. 2. Досліджуваний зразок

Дослідження матеріалів гнучкого шлейфу при багаторазових перегибах знають циклічних пружно-пластичних деформацій і працюють в області малоциклової втоми.

Виділимо з шлейфу типовий елемент у вигляді балки. Поперечний переріз і його основні розміри представлені на рис. 3. При розрахунку використовуємо теорію вигину композитних балок [6].

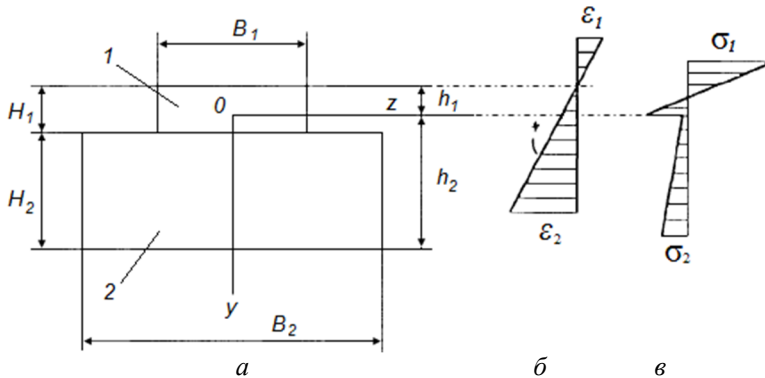


Рис. 3. Поперечний переріз елемента гнучкого шлейфа і основні розміри: a – поперечний переріз; b – розподіл деформацій; v – епюра напружень вздовж осі X (довжини); 1 – мідний провідник; 2 – поліімідна плівка

Припустимо, що балка знаходиться в стані чистого вигину, стислі волокна вгорі, розтягнуті вниз. Знайдемо положення нейтральної лінії поперечного перерізу, де нормальні напруження дорівнюють нулю $\sigma = 0$.

Нормальні напруги, (діючі по осі X) в мідному провіднику σ_1 , і поліімідній плівці σ_2 під ним визначимо з рівнянь:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \varepsilon_1 E_1 = \frac{y}{\rho} E_1 = \lambda_1 y E_1, \\ \sigma_2 &= \varepsilon_2 E_2 = \frac{y}{\rho} E_2 = \lambda_2 y E_2,\end{aligned}\quad (1)$$

де ρ – радіус кривизни балки; λ – кривизна, $\lambda=1/\rho$; y – відстань від нейтральної лінії, що збігається з віссю Z ; E_1 , E_2 – модулі пружності міді і полііміду.

Положення нейтральної лінії визначимо з умови рівності нулю сумарної осової сили в поперечному перерізі:

$$\int_1 \sigma_1 dF + \int_2 \sigma_2 dF = 0$$

де $dF=dy \cdot B_i$

З використанням (1) отримаємо:

$$E_1 \int_1 y dF + \int_2 y dF = 0, \quad (2)$$

де інтеграли є статичними моментами площі поперечного перерізу міді і полііміду щодо нейтральної лінії.

Згинальний момент балки може бути визначений за формулою:

$$M = \int \sigma y dF = \int_1 \sigma_1 dF + \int_2 \sigma_2 dF = \frac{E_1 J_1 + E_2 J_2}{\rho}, \quad (3)$$

де J_1 , J_2 – моменти інерції площі 1 і 2 щодо нейтральної лінії.

Спільне рішення рівнянь (1) і (3) дозволяє знайти закон розподілу напружень в балці в залежності від моменту вигину:

$$\sigma_1 = \frac{MyE_1}{E_1 J_1 + E_2 J_2}, \quad \sigma_2 = \frac{MyE_2}{E_1 J_1 + E_2 J_2}.$$

Розглянемо приклад визначення нейтральної лінії для базового варіанту гнучкого шлейфа, що має наступні розміри: товщина міді $H_1 = 15$ мкм і полііміду $H_2 = 50$ мкм; ширина міді $B_1 = 70$ мкм і полііміду $B_2 = 140$ мкм.

Фізико-механічні властивості матеріалів представлені в табл. 1, де α – коефіцієнт температурного лінійного розширення (КТЛР), E – модуль пружності, μ – коефіцієнт Пуассона, $[\sigma]$ – допустимі напруження.

Таблиця

Фізико-механічні властивості матеріалів гнучкого поліімідного шлейфа

Матеріал	$\alpha \cdot 10^6, ^\circ C^{-1}$	$E \cdot 10^{-5}, МПа$	μ	$[\sigma], МПа$
Мідь	17,	1,0	0,33	
Поліімід	20	0,03	0,3	170

Оскільки $E_1 \gg E_2$ ($E_1 = 10$ МПа, $E_2 = 3 \cdot 10^3$ МПа), припустимо, що нейтральна лінія розташована в частині 1. Позначимо відстань від нейтральної лінії (oz) до верхньої і нижньої поверхні балки h_1 і h_2 відповідно.

При записі компоненту рівняння (2) в якості одиниць виміру використовуємо Ньютони і мікрометри, тоді:

$$E_1 \int_1 y dF = 10^{-1} \left[\left(\frac{h_1}{2} \right) h_1 B_1 + \left(\frac{H_1 - h_1}{2} \right) (H_1 - h_1) B_1 \right] = 3,5(225 - 30h_1),$$

$$E_2 \int_2 y dF = 13 \cdot 10^{-3} \left[\left(H_1 - h_1 \frac{H_2}{2} \right) H_2 B_2 \right] = 21(40 - h_1).$$

Підставимо ці величини в рівняння (2) і знайдемо координату нейтральної лінії – $h_1 = 13$ мкм. Вище нейтральної лінії волокна шлейфу стиснуті, нижче – розтягнуті. Аналогічно знайдемо положення нейтральної лінії для шлейфа з товщиною мідного провідника $H_1 = 35$ мкм – $h_1 = 21$ мкм.

З формул (1) видно, що напруги в матеріалах шлейфу прямо пропорційні кривизні балки і модулю пружності. Епюра деформацій по висоті перерізу лінійна (рис. 3, б), а епюра напружень пилоподібна (рис. 3, в), оскільки модулі пружності міді і полііміду різні. Причому, градієнт зміни напружень σ_1 істотно вище, тому що $E_1 > E_2$.

Руйнування гнучких шлейфів обумовлено низьким показником циклової втоми міді, яка супроводжується пружно-пластичною деформацією, появою і поширенням ушкоджень. Число циклів навантаження не перевищує $10^4 \dots 10^5$.

З літературних джерел відомо, що довговічність гнучких шлейфів при радіусі перегину 1...10 мм становить $200 \dots 10^4$ циклів.

Тому для оцінки довговічності матеріалів використовують критерії Коффіна-Менсона у вигляді:

$$N = 0,25 \left(\varepsilon_B / \varepsilon_{II} \right)^2, \quad (4)$$

де ε_B – залишкова відносна деформація матеріалу при розриві; ε_{II} – розмах відносної циклічної пластичної деформації

$$\varepsilon_{II} = \Delta\varepsilon - \varepsilon_y = \frac{2\sigma}{E^*} - \frac{2\sigma_T}{E},$$

де $\Delta\varepsilon$ – повна відносна деформація; ε_y – пружна відносна деформація; σ – максимальне напруження; σ_T – межа текучості матеріалу; E^* – модуль пружності матеріалу за межами пружності, для міді $E^* = (0,05 \dots 1)E$.

З формули (4) видно, що при підвищенні ε_{II} в 10 разів, довговічність матеріалу знижується в 100 разів.

Для підвищення довговічності необхідно зниження напружень і деформацій, що досягається обмеженням радіусу перегину шлейфа (1). Величину відносної деформації при вигині обчислюють за формулою $\varepsilon = y/\rho$. Для міді допустима відносна деформація (коли деформації залишаються пружними) становить $\varepsilon_y = 0,002$. Тоді допустимий радіус перегину для мідних провідників знайдемо з формули:

$$[\rho] = \frac{Y_{\max}}{\varepsilon_y} = \frac{h_1}{\varepsilon_y}. \quad (5)$$

На рис. 4 представлена залежність допустимого радіусу перегину від товщини мідних провідників, отримана за допомогою формули (5)

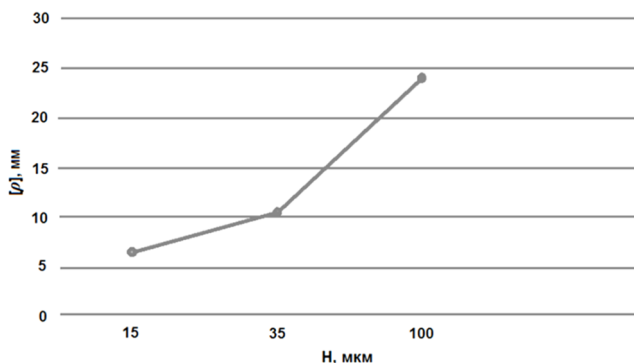


Рис. 4. Залежність допустимого радіусу перегину від товщини мідного провідника шлейфу

При дослідженні впливу конструктивно-технологічних факторів на міцність шлейфів використовували програмний комплекс SolidWorks.

Моделювання та аналіз характеристик міцності проводили за допомогою програмного комплексу Simulation, інтегрованого в CAD-систему SolidWorks (рис. 5). Програмний комплекс заснований на методі кінцевого елемента.

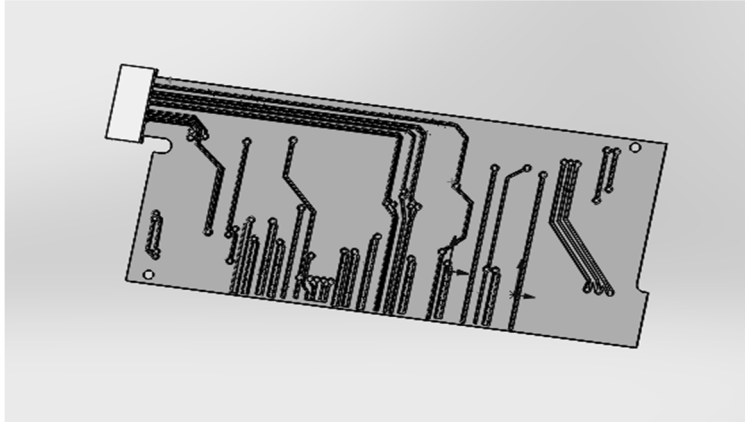


Рис. 5. 3D-модель досліджуваного шлейфу в в CAD-системі SolidWorks

Метод кінцевого елемента дозволяє апроксимувати суцільну середу з нескінченним числом ступенів свободи сукупністю простих елементів, що мають кінцеве число ступенів свободи і пов'язаних між собою в вузлових точках. Розбиття конструкції на кінцеві елементи малих розмірів дозволяє врахувати неоднорідність матеріалу і конструкції, її конструктивні і технологічні особливості.

Базова кінцева елементна модель шлейфу мала радіус перегину 5 мм (геометричні параметри поперечного перерізу – $H_1=15$ мкм, $H_2=50$ мкм, $B_1=70$ мкм, $B_2=140$ мкм). Перегин шлейфу здійснювали навколо жорсткого ролика ($\rho=5$ мм). Розглядали НДС матеріалів шлейфу при переміщенні кінця шлейфа на 5 мм.

На рис. 6 представлені різні форми шлейфів: а – базовий варіант, провідник на плівці; б – провідник в плівці розташований несиметрично; в – провідник в плівці розташований симетрично. На рис. 6 представлені також розрахункові коефіцієнти запасу міцності для міді, визначені за формулою:

$$m = [\sigma] / \sigma_{екв}$$

де $[\sigma]$ – допустиме напруження (табл. 1); $\sigma_{екв}$ – еквівалентна максимальна напруження, визначена з використанням кінцево-елементних моделей.

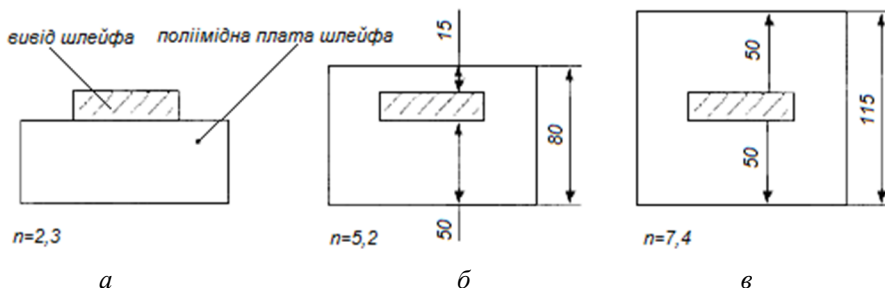


Рис. 6. Залежність запасу міцності «n» виводів шлейфа від конструкції шлейфа: без захисного покриття (а), з товщиною покриття рівній товщині виводу (б) і з товщиною покриття рівній товщині поліімідної плати (в)

НДС матеріалів базової моделі «а» показано на рис. 6. Максимальні напруги в мідному провіднику на його поверхні складають 53 МПа, що відповідає запасу міцності $n=2,8$. Розподіл напружень по висоті перерізу лінійне. У моделі «б» максимальні напруги в міді склали 29 МПа, запас міцності $n=5,2$. У моделі «в» $\sigma_{\max}=20,2$ Мпа, $n=7,4$.

Видно, що використання поліімідних захисних покриттів (варіант б і в) дозволяє істотно підвищити міцність мідних провідників – запас міцності зростає в 1,8 ... 2,55 рази.

Еквівалентні напруги (Von Mises, Па) розраховані за гіпотезою енергії зміни форми:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження.

Діаграми розподілу еквівалентних напруг представлені на рисунках 7–9 у вигляді ізоліній на тлі деформованої моделі шлейфу.

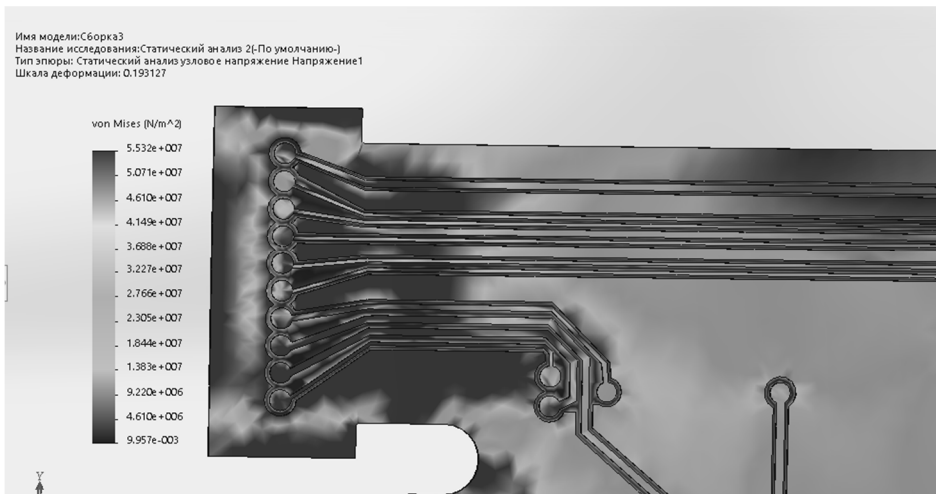


Рис. 7. Напружено-деформований стан в матеріалах шлейфу базової моделі

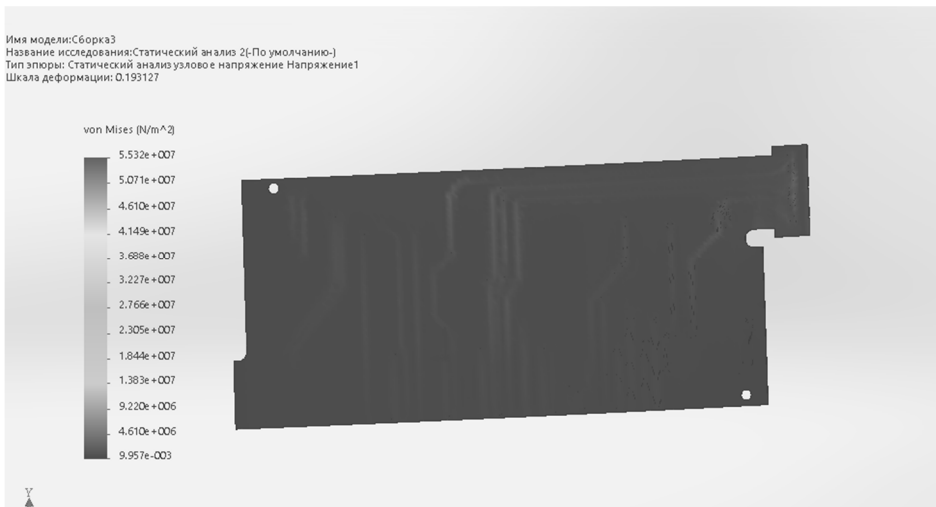


Рис. 8. Напружено-деформований стан в шарі поліімідної плівки

Аналіз НДС матеріалів шлейфа з товщиною мідних провідників 35 мкм вказує, що несуча здатність шлейфу істотно підвищується в порівнянні з базовою товщиною провідників. Для оцінки впливу товщини провідників на міцність шлейфу розроблена модель, де перегин здійснювали при постійному навантаженні (рис.9) – згинальний момент дорівнює 21 Н·мкм. При збільшенні товщини провідника з 15 до 35 мкм (в 2,33 рази) напруги в міді знизилися з 391 МПа до 194 МПа, міцність підвищилася в 2,04 рази.

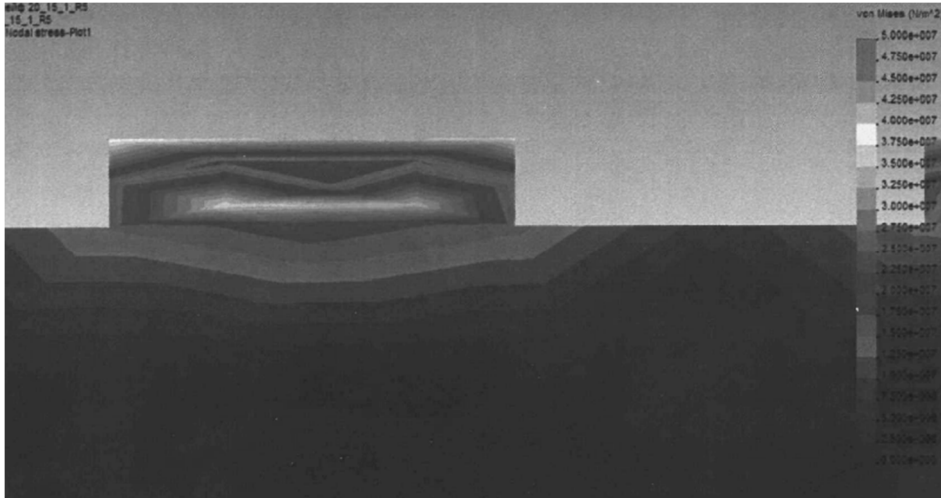


Рис. 9. Термо-пружні напруги в перетині шлейфу при нагріванні до 373 К

Великий інтерес представляє завдання термопружності шлейфу. Була розроблена модель із зовнішнім навантаженням у вигляді нагріву шлейфу на 100 °С (рис. 10). При нагріванні шлейф згинається в бік елемента з меншим КТЛР – мідь знаходиться в стислому стані. Нейтральний шар має складну просторову форму. Характер розподілу напружень відповідає фізичній природі взаємодії різномірних матеріалів. Конструкція напруг локалізується на поверхні мідних провідників, в місцях зміни форми з'єднуються.

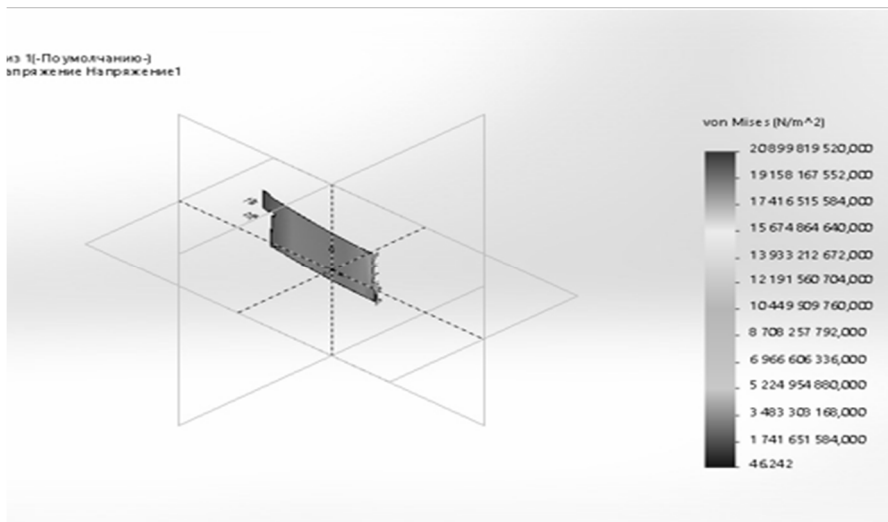


Рис. 10. Напружено-деформований стан шлейфу при постійному силовому навантаженню з провідниками товщиною 35 мкм

У місцях концентрації напружень кольорові ізолінії розподілу еквівалентних напруг викривляються з підвищенням їх щільності.

Максимальні напруги в міді склали 50 МПа, що відповідає запасу міцності $n=3$.

Висновки. В ході дослідження було зроблено наступні висновки:

– величина механічної напруги і розмах пружно-пластичної деформації прямо-пропорційні кривизні перегину шлейфу. Встановлено залежність допустимого радіуса перегину шлейфа від товщини мідних провідників;

– оцінювати довговічність гнучких шлейфів доцільно за допомогою критерію Коффіна-Менсона з використанням величини циклічної пластичної деформації міді;

– при збільшенні товщини мідного провідника з 15 мкм до 35 мкм запас міцності гнучких шлейфів зростає в 2,04 рази;

– використання захисних покриттів дозволяє істотно підвищити міцність мідних провідників – запас міцності зростає в 1,8... 2,55 рази;

– концентрація термомеханічних напруг при нагріванні локалізується на поверхні мідних провідників, в місцях зміни форми з'єднуються. Встановлено що при нагріванні шлейфу на 100 °С запас міцності становить $n=3$.

Отримані результати створюють сприятливі технологічні передумови для реалізації високоякісного монтажу гнучких поліімідних шлейфів в складі високо-інтегрованих виробів мікроелектроніки. Як виявлено на основі аналізу технічної літератури висока роздільна здатність (мінімальний крок) монтажних виводів (балок) шлейфу може бути досягнута за рахунок нових конструктивно-технологічних рішень по монтажній зоні шлейфу.

Список літератури

1. Н. И. Плис, В. Г. Вербицкий, В. Д. Жора и др. Технология сборки микросхем на гибком полиимидном носителе. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2010. № 5 - 6. с. 43–45.

2. 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; заявл. 10.07.2015; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 23. 3 с.

3. Исследование зависимости максимального перегрева радиоэлектронного аппарата от его параметров / [В. В. Семенец, А. М. Синотин, Т. А. Колесникова та ін.]. // Системи обробки інформації. – 2018. – №4. – С. 29–34.

4. Гуськов, Г. Я. Монтаж микроселектронной аппаратуры [Текст] : учеб. пособие / Г.Я. Гуськов, Г.А. Блинов, А.А. Газаров. – М.: Радио и связь, 1986. – 175 с.

5. І.Ш. Невлюдов, В.М. Борщов, І.Т. Тимчук, М.А. Проценко, Н.П. Демська / Новітні конструктивно-технологічні рішення надлегких детекторних модулів для фізичних експериментів // Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2018. No. 5 (3). – С. 67-78

6. Невлюдов І.Ш. Мікросистемна техніка та нанотехнології: Монографія / І.Ш. Невлюдов, В.А. Палагін. – Киев, НАУ 2017. – 528 с.

7. Жуков, А. А. Энергетические характеристики поверхностей и адгезионная прочность полиимидных покрытий на гидрофильных подложках в технологии микроселектроніки [Текст] / А. А. Жуков // Электронная техника. – 2001. – Сер. 3, №155. – С. 59-62.

8. Исследование влагопоглощения полиимидных покрытий и свободных пленок методом ИК-спектроскопии. Новые материалы и технологии НМТ-98 [Текст] : тез. докл. науч. практ. конф. (окт. 1998) / отв. ред. Б. Н. Дунаев. – Москва : САА, 1998. – 282 с.

9. Разумов-Фризюк Е. А., Невлюдова В. В., Демская Н. П. и др. Оценка влияния ме-

ханических воздействий на гибкие печатные платы // Problems of Friction & Wear. – 2016. – Т. 1. – №. 70. – С. 143-149

10. Приччин С. Е., Гуріна Д. В., Демська Н. П. Методи контролю якості гнучких структур // Radioelectronics & Informatics journal. 2016. №3. С. 3-6.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2019.

Невлюдов Ігор Шакирович – д-р тех. наук, професор, завідувач кафедри комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, igor.nevliudov@nure.ua

Палагін Віктор Андрійович – д-р. тех. наук, доцент, професор кафедри комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, viktor.palahin@nure.ua

Демська Наталія Павлівна – старший викладач кафедри комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, nataliia.demska@nure.ua

Невлюдова Вікторія Валеріївна – канд. тех. наук, доцент кафедри комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, viktorii.nevliudova@nure.ua

Стародубцев Микола Григорович – канд. тех. наук, доцент, доцент кафедри комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, nikolaj.starodubcev@nure.ua

I. NEVLIUDOV, V. PALAHIN, N. DEMSKA, V. NEVLIUDOVA, M. STARODUBCEV

RESEARCH OF A STRESS-STRAIN STATE OF POLYIMIDIC INTERCONNECTION STRUCTURES ON FLEXIBLE PRINTED CIRCUIT BOARD

The most dangerous type of influences on flexible cables and printed circuit boards are elastic-plastic bending deformations or multicycle wear. These deformations occur between particles of the structure that rotate or oscillate relative to one another. The subject of this study is a flexible two-layer printed circuit board. The purpose of this work is to study the dependence of the parameters of durability of polyamide plugs with copper conductors on structural and technological solutions of two-layer structures and to develop recommendations for increasing the durability and stability of flexible structures of products of microelectronics and microelectromechanical systems. To achieve the goal, the following tasks need to be addressed: analysis of data on the influence of constructive and technological factors on the stress-strain state; conducting of modeling and engineering analysis of flexible printed circuit board power temperature influence; consideration of new structural and technological options for increasing the durability and durability of flexible structures; the establishment of the most important factors of strength. In solving the tasks, the methodology of modeling using CAD system Solid Works and finite elements method was used. Estimations is carried out using the Coffin-Manson criterion, which establishes the quadratic dependence of stability on the radius of the printed circuit board. As a result of the study, the distribution of normal stresses, forces and bending moments in copper and polyimide layers for different dimensions of the elements is calculated and compared. The results are presented in the form of a diagram of normal stress along the longitudinal axis. It was established that the use of protective polyamide layers increases durability of copper conductor in 1,8 ... 2,55 times. Diagrams of voltage distribution are presented in the form of color thermograms, and the estimated strength reserves were 2 ... 5 times. The obtained results show favorable conditions for achieving high quality of manufacturing of flexible copper-polyimide cables and printed circuit boards of integrated microelectronic devices.

Key words: flexible printed circuit board, polypropylene communication structures, elastic-plastic bending deformations, durability.

References

1. Plis N. I., Verbitskiy V. G., Zhora V. D. i dr. Tehnologiya sborki mikroshem na gibkom poliim- idnom nositele. *Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. - 2010. - # 5 - 6. s. 43-45.
2. Ploskyi ziednuvach elektronnykh prystroiv z nulovoiu syloiui vstavky: patent № 103402 Ukrainy na korynsnu model / Yu. I. Bohdan, N. P. Demska, V. V. Nevliudova, V. A. Palahin, Ye. A. Razumov-Fryziuk, V. I. Romenskiy; zaiavl. 10.07.2015; opubl. 10.12.2015, Biul. № 23. 3 s.
3. Yssledovanye zavysymosti maksimalnogo perehrevu radyoelektronnoho apparata ot eho parametrov / [V. V. Semenets, A. M. Synoty, T. A. Kolesnykova ta in.]. // *Systemy obrobky informatsii*. - 2018. - №4. - S. 29-34.
4. Huskov, H. Ya. Montazh mykroelektronnoi apparatury [Tekst] : ucheb. posobyu / H.Ia. Huskov, H.A. Blynov, A.A. Hazarov. - M.: Radyo y sviaz, 1986. - 175 s.
5. I.Sh. Nevliudov, V.M. Borshchov, I.T. Tymchuk, M.A. Protsenko, N.P. Demska / Novitni konstruktivno-tehnolohichni rishennia nadlezhkykh detektornykh moduliv dlia fizychnykh eksperymentiv // *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2018. No. 5 (3). - S. 67-78
6. Nevliudov I.Sh. Mikrosystemna tekhnika ta nanotekhnolohii: Monohrafiia / I.Sh. Nevliudov, V.A. Palahin. - Kyev, NAU 2017. - 528 c
7. Zhukov, A. A. Enerheticheskiye kharakterystyky poverkhnosti y adhezyonnaia prochnost polyymydykh pokrytyi na hydrofilynykh podlozhkakh v tekhnolohyy mykroelektronnyky [Tekst] / A. A. Zhukov // *Elektronnaia tekhnika*. - 2001. - Ser. 3, №155. - S. 59-62.
8. Yssledovanye vlahopohlashcheniya polyymydykh pokrytyi y svobodnykh plenok metodom YK-spektroskopyy. *Novye materyaly y tekhnolohyy NMT-98* [Tekst] : tez. dokl. nauch. prakt. konf. (okt. 1998) / otv. red. B. N. Dunaev. - Moskva : SAA, 1998. - 282 s.
9. Razumov-Fryziuk E. A., Nevliudova V. V., Demskaia N. P. y dr. Otsenka vliyaniya me-khanycheskykh vozdeistviy na hybkyye pechatnye platy // *Problems of Friction & Wear*. - 2016. - T. 1. - №. 70. - S. 143-149
10. Prytchyn S. E., Hurina D. V., Demska N. P. Metody kontroliu yakosti hnuchkykh struktur // *Radioelectronics & Informatics journal*. 2016. №3. S. 3-6.