

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Розроблення методу випробовування механічних властивостей гнучких
комутаційних структур для мобільних роботів

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи КТРСм -21-1

Бездітко А. Ю.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Комп'ютеризовані та
робототехнічні системи

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. КІТАМ Жарікова І. В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
зав. кафедри

Невлюдов І. Ш.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

2022 р.

Я, як студент(ка) ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

27.10.2022

Бездітко А. Ю.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютеризовані та робототехнічні системи (код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Бездітку Антону Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ . Розроблення методу випробовування механічних властивостей гнучких комутаційних структур для мобільних роботів затверджена наказом по університету від _____ 07.11.2022 р. № 1462 Ст.
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 28.12. 2022 р.
3. Вихідні дані до роботи _____ 3.1 Математична модель випробування;
3.2 Досліджувані вироби – гнучкий шлейф, роз'єм; 3.3 Обладнання для проведення випробування – лабораторний блок живлення, мультиметр, термopара; 3.4 Типи мобільних роботів, для яких буде досліджено гнучкі вироби – наземні, повітряні, морські.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
 - 4.1. Вступ
 - 4.2 Аналіз існуючих комутаційних структур
 - 4.3 Технологія виробництва гнучких комутаційних структур та аналіз засобів контролю і випробовування гнучких друкованих плат
 - 4.4 Методи випробування гнучких комутаційних структур
 - 4.5 Розробка методу випробовування гнучких комутаційних структур
 - 4.6 Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 8 с., формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Керівник (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання та існуючих рішень	2.11.2022	Виконано
2	Опрацювання літератури за темою роботи	12.11.2022	Виконано
3	Виконання розділу 1	14.11.2022	Виконано
4	Виконання розділу 2	16.11.2022	Виконано
5	Виконання розділу 3	25.11.2022	Виконано
	Виконання розділу 4	02.12.2022	Виконано
	Виконання розділу 5	05.12.2022	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	15.12.2022	Виконано
7	Оформлення презентації	26.12.2022	Виконано
8	Подання роботи на рецензію	27.12.2022	Виконано
9	Подання роботи на підпис зав. Кафедри	28.12.2022	Виконано
10	Подання атестаційної роботи в ЕК	28.12.2022	Виконано

Дата видачі завдання 1 листопада 2022 р.

Студент

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Бездітко А. Ю.

(прізвище, ініціали)

доц. каф. КІТАМ

Жарікова І. В

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 116 с., 40 рис., 3 табл., 2 дод., 21 джерело.

КОМУНІКАЦІЙНА СТРУКТУРА, ГНУЧКА ДРУКОВАНА ПЛАТА, ГНУЧКИЙ ШЛЕЙФ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА, МЕТОДИ ВИПРОБОВУВАННЯ.

Об'єкт дослідження – процес випробовування гнучких комутаційних структур для мобільних роботів.

Предмет дослідження – гнучкі комутаційні структури для мобільних роботів.

Метою даної роботи є розробка методу випробування електричних впливів на гнучкі комутаційні структури та виявлення найбільш оптимальних параметрів для виготовлення гнучких шлейфів.

Методи досліджень – теоретичний аналіз існуючих видів комутаційних структур, вимог і літератури, пов'язаної з розробкою методів механічного випробування гнучких друкованих плат, а також систематизація й узагальнення методів і виробів в області методів випробування комутаційних структур для мобільних роботів.

У роботі було проведено аналіз існуючих друкованих плат, а також методів їх випробування, також досліджена їхня міцність. Показано вплив фізичних та електричних умов на гнучкий шлейф. Наведено результати випробування й інженерного аналізу гнучкого шлейфа при електричному впливі, встановлені найбільш суттєві дефекти при нагріванні.

ABSTRACT

The explanatory note: 116 p., 40 fig., 3 tabl, 1 app., 21 sources.

COMMUNICATION STRUCTURE, FLEXIBLE PRINTED BOARD,
FLEXIBLE PIPE, MECHANICAL PROPERTIES, PRODUCTION
TECHNOLOGIES, TESTING METHODS.

The object of research is the process of testing flexible switching structures for mobile robots.

The subject of research is flexible switching structures for mobile robots.

The purpose of this work is to develop a method of testing electrical effects on flexible switching structures and to identify the most optimal parameters for the manufacture of flexible loops.

Research methods – theoretical analysis of existing types of switching structures, requirements and literature related to the development of methods of mechanical testing of flexible printed circuit boards, as well as systematization and generalization of methods and products in the field of testing methods of switching structures for mobile robots.

The paper analyzed the existing printed circuit boards, as well as their testing methods, and also investigated their strength. The influence of physical and electrical conditions on the flexible loop is shown. The results of testing and engineering analysis of a flexible loop under electrical influence are presented, the most significant defects during heating are established.

ЗМІСТ

Перелік скорочень і умовних позначень.....	10
Вступ.....	11
1 Аналіз існуючих комутаційних структур.....	12
1.1 Види комутаційних структур.....	12
1.2 Гнучкі комутаційних структури	14
1.3 Основні види гнучких друкованих плат	16
1.4 Переваги гнучких друкованих плат.....	19
1.5 Висновки до розділу 1.....	27
2 Технологія виробництва гнучких комутаційних структур та аналіз засобів контролю і випробування гнучких друкованих плат.....	29
2.1 Основні матеріали для виготовлення гнучких друкованих плат	29
2.2 Процеси виготовлення гнучких друкованих плат	36
2.3 Засоби контролю та випробування друкованих плат	46
2.4 Висновки до розділу 2.....	54
3 Методи випробування гнучких комутаційних структур	55
3.1 Електричний метод	55
3.2 Металографічний аналіз друкованих плат	57
3.3 Рентгеноспектральний флуоресцентний аналіз друкованих плат	62
3.4 Метод прискорених вібраційних випробувань	71
3.5 Висновки до розділу 3.....	81
4 Розробка методу випробування гнучких комутаційних структур	82
4.1 Розробка математичної моделі випробування випробування гнучких комутаційних структур	82
4.2 Розробка практичного випробування гнучких комутаційних структур.....	89
4.3 Охорона праці.....	93

	8
4.4 Висновки до розділу 4.....	97
Висновки	99
Перелік джерел посилання.....	104
Додаток А Демонстраційний матеріал	106
Додаток Б Відомість кваліфікаційної роботи.....	116

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ,

- АОІ – автоматична оптична інспекція;
БДП – багатошарова друкована плата;
ГДП – гнучкі друковані плати;
ГКС – гнучкі комутаційні структури
ДДП – двостороння друкована плата;
ДП – друкована плата;
ЕОС – електронно-обчислювальна система;
ІМС – інтегральна мікросхема;
КМО – компонент, що монтується в отвори;
КМП – компонент, що монтується на поверхні;
КС – комутаційні структури;
РЕА – радіоелектронна апаратура;
РЕЗ – радіоелектронні засоби;
ЧПУ – числове програмне керування;
СПФ – сухий плівковий фоторезист;
СНЗ – середнє неквадратичне значення;
ШВВ – широкосмугові випадкові вібрації;

ВСТУП

У сучасному світі зростає кількість галузей та місць застосування електроніки. Запчастини для електроніки дуже часто не ремонтпридатні та вимоги до них та їх надійності вищі з кожним днем. Для відповідності деяким сучасним вимогам до засобів електронної техніки користуються гнучкими платами або гнучкими шлейфами. Вони використовуються у багатьох галузях – від приводу дисководу у портативному комп'ютері до сонячних панелей на космічній станції. Проте, надійність та якість цих друкованих плат потребує вдосконалення. Проте, крок вперед для гнучких друкованих плат також повинен бути економічним і технологічно простим.

Гнучкі комутаційні структури (ГКС) останнім часом отримали найширше застосування при створенні мобільних роботів та виробів, забезпечуючи високу якість електричних з'єднань як у стаціонарних, так і рухомих конструкціях.

ГКС – це різного роду системи гнучких шлейфів, або гнучких друкованих плат які можуть містити одно, дво та багат шарові структури між з'єднаннями. Їхні конструкції можуть бути повністю гнучкими або комбінацію жорстких і гнучких частин.

Стійкість до перегинів забезпечує використання ГКС В конструкціях електронних приладів (ЕП), що неодноразово складаються в книжку або згортаються в рулон. Конструктивно виконувані за принципом організованих виводів вони забезпечують зменшення габаритів та ваги ЕП, можливість застосування автоматизованих процесів їх виготовлення та монтажу, знижуючи цим трудомісткість технологічного процесу та підвищуючи надійність з'єднань.

За масово-габаритними показниками ГКС мають значні переваги порівняно з плоскими стрічковими кабелями, що виготовляються на основі плющеного мідного дроту (лудженого або без лудіння). Протягом останніх років все більшою популярністю користуються гнучкі друковані шлейфи та гнучко-жорсткі друковані плати. Їх застосування найбільш актуально в галузі

портативної електроніки як з'єднувач між різними частинами електронних пристроїв, виконаних на базі жорстких друкованих плат, а також як заміна кабельних з'єднань. З іншого боку, з урахуванням гнучких друкованих плат можуть виконуватися котушки індуктивності, антени тощо.

Область застосування гнучких комутаційних є великою. Насамперед у мобільних роботах, що вимагає мініатюризації, що у свою чергу може погано позначитися на механічних властивостях компонентів усередині роботів, і може викликати відмови.

Тому розробка методу випробовування механічних властивостей гнучких комутаційних структур є актуальним завданням

Об'єктом дослідження є процес випробовування гнучких комутаційних структур для мобільних роботів.

Предмет дослідження – гнучкі комутаційні структури для мобільних роботів.

Метою роботи є роботи є розробка методу випробування електричних впливів на гнучкі комутаційні структури для мобільних роботів та виявлення найбільш оптимальних параметрів для виготовлення гнучких шлейфів Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз гнучких друкованих плат і гнучких шлейфів, розглянути існуючі варіанти застосування , їх конструкції та розміщення;
- обґрунтувати необхідність випробування гнучких комутаційних структур та визначити вимоги до них;
- розробити метод випробовування гнучких шлейфів, вибрати основні критерії випробування, розробити структуру випробування, провести випробування;
- оформити пояснювальну записку згідно [1] та [2].

Результати кваліфікаційної роботи апробовано на міжнародній науково-практичній конференції «MODERN RESEARCH IN WORLD SCIENCE» [3].

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОМУТАЦІЙНИХ СТРУКТУР

1.1 Види комутаційних структур

Комутаційні структури – спеціальним чином сформовані провідні середовища, призначені для комутації та передачі сигналів між різними модулями та субмодулями ЕОС.

Комутаційні структури використовуються на всіх рівнях електронних модулів: з'єднання всередині інтегральних мікросхем, з'єднання між різними виробами електронної техніки, з'єднання між блоками електронної апаратури та ін. Вони бувають міжмодульними, міжосередковими, міжблочними тощо, що обумовлює їхнє конструктивне виконання.

Комутаційні структури для електронних обчислювальних систем повинні мати:

- мінімально активний та індуктивний опір;
- однорідний за довжиною структури хвильовий опір;
- мінімальне поле навколо лінії при протіканні нею струму;
- здатність передавати сигнали у широкому діапазоні частот, струму та напруги.

Задовольнити всім вище переліченим вимогам, неможливо. Тому застосовуються різноманітні типи КС залежно від функціональних особливостей, як самих КС так і апаратури, а також пристроїв на які вони встановлюються.

Вибір конструктивно-технологічного варіанта виконання з'єднань – важливе та складне завдання, що значною мірою впливає на якість проектованої апаратури.

На (рис. 1.1) представлені геометричні параметри деяких видів комутаційних структур.

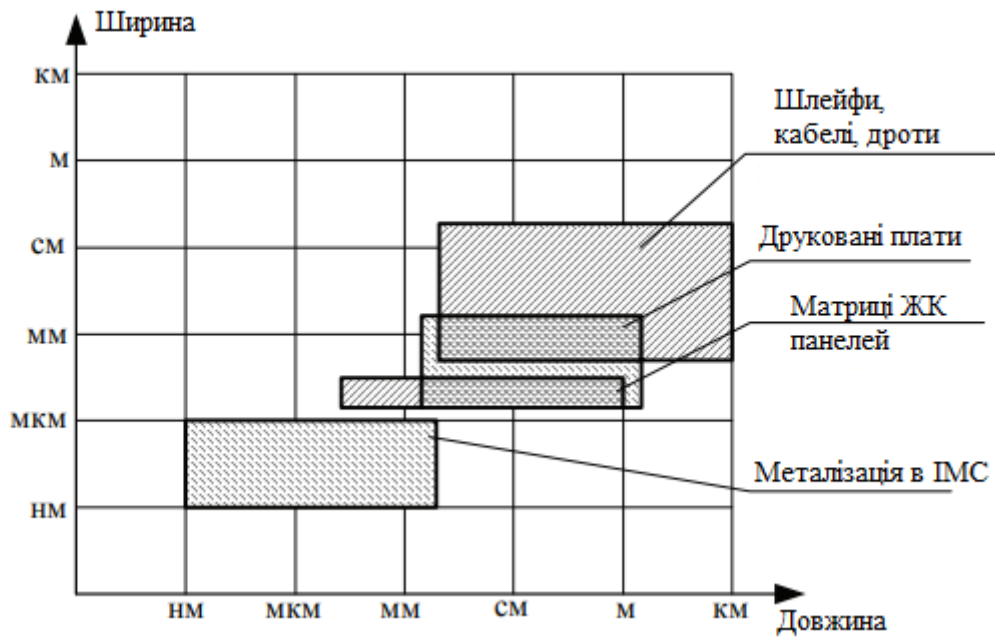


Рисунок 1.1 – Геометричні параметри деяких видів комутаційних структур

В даний час збільшується складність електронної апаратури та її мініатюризація, що веде до зміщення геометричних розмірів комутаційних структур у мікро та нанообласті. Це вимагає постійного збільшення роздільної здатності технологічного обладнання, а також розробки нових видів технологій та модернізації вже існуючих.

Незважаючи на складність переходу до нанорозмірів, їх реалізація відкриває широкі перспективи у технології комутаційних структур. Зменшення розмірів електричних зв'язків наводить до зниження згасання та спотворення сигналу. Зменшення ширини друкованих провідників дозволяє збільшити щільність монтажу та точність виготовлення друкованих плат.

Так, наприклад, розміри мінімального елемента в інтегральних мікросхемах наближаються до 32 нм, активно розробляється технологія виробництва друкованих плат з шириною провідників 75 мкм і 50 мкм. Існує декілька видів друкованих плат за класифікацією, наприклад, за кількістю друкованих провідних шарів.

1.2 Гнучкі комутаційних структури

Використання гнучких діелектричних матеріалів для виготовлення друкованих плат дає як розробнику, так і користувачеві електронних пристроїв низку унікальних можливостей. Це насамперед – зменшення розмірів та ваги конструкції, підвищення ефективності складання, підвищення електричних характеристик, тепловіддачі та загалом надійності.

Якщо врахувати основну властивість таких плат – динамічну гнучкість, то стає зрозумілим все більший обсяг застосування таких плат в автомобілях, побутовій техніці, медицині, в оборонній та аерокосмічній техніці, комп'ютерах, системах промислового контролю та бортових системах [4].

Гнучкі друковані плати – це системи гнучких шлейфів, які можуть містити одно, два або багатошарові структури між з'єднань. Їх конструкції можуть бути повністю гнучкими або бути комбінацією жорстких і гнучких частин. Постійно зростаючий попит на гнучкі схеми і особливо на гібридні гнучкожорсткі багатошарові друковані плати обумовлений низкою факторів.

Гнучкі схеми дають можливість створювати унікальні конструкції, які дозволяють вирішувати питання між схемних з'єднань та монтажу, забезпечуючи при цьому гнучкість системи. За допомогою таких схем виробники друкованих плат можуть випускати складні гнучкі шлейфи та інші конструкції із стійко високим відсотком виходу придатних. У гнучких платах застосовуються найпрогресивніші адгезійні системи, такі як акрилові, що використовуються в гнучких композиційних матеріалах. Гнучкі плати забезпечують підвищену ефективність та надійність кінцевих систем.

У порівнянні з жорстким монтажем друковані плати, виготовлені з матеріалів на основі поліамідів, акрилатів, поліефірів та епоксидних смол, більш ефективні економічно, тому що вони забезпечують більше свободи та можливостей для конструктора, більш високу продуктивність під час виробництва плат через монтаж готових виробів, дають вигоду за вагою та обсягом, займаними виробами, забезпечують простоту безпомилкового монтажу

та встановлення кінцевого виробу.

Порівняно з іншими гнучкими композиційними матеріалами, гнучкі плівки на основі поліамідів можуть забезпечити:

- стабільно вищу міцність зчеплення;
- контрольовану та низьку плинність адгезиву;
- гарну хімічну стійкість та стійкість до розчинників;
- виняткову термічну стійкість, наприклад, при паянні;
- гарну стабільність розмірів;
- більшу технологічну ширину переробки;
- тривалий термін зберігання без холодильників;
- сталість якості від партії до партії.

З урахуванням цих якостей виробники друкованих плат з усіх гнучких матеріалів віддають перевагу поліамідним матеріалам, щоб підняти продуктивність та ефективність своїх підприємств.

При роботі з поліамідними матеріалами фахівці відзначають такі його переваги, як:

- можливість багаторазового пресування та багаторазового паяння без розшарування та здуття плат;
- простота та легкість видалення, заміни компонентів, надійність при їх перепаяванні;
- виняткові електричні властивості;
- гарна гнучкість і адгезійна здатність, що необхідної під час роботи в критичних режимах вигину;
- можливість проектувати багат шарові плати із дуже високою щільністю монтажу;
- підвищена надійність встановлених робочих місць систем.

Саме з цих причин для найбільш складних схем із найвищими вимогами до надійності у специфікації вказують поліамідні матеріали.

Фізичні властивості полімерних плівок, що використовуються в гнучких схемах, значно відрізняються від властивостей матеріалів, які застосовуються в

жорстких платах на основі склотканин з епоксидними або поліамідними системами. Це спонукає виробників жорстких плат освоїти нові технології, специфічні для гнучких і гнучко-жорстких систем.

Гнучкі друковані плати (ГДП) виготовляються на поліамідній або лавсановій плівці і тому можуть легко деформуватися навіть після формування провідного малюнка. Більшість конструкцій гнучких друкованих плат аналогічна конструкціям друкованих плат на жорсткій основі.

1.3 Основні види гнучких друкованих плат

Односторонні ГДП – найпоширеніші у цьому класі плат, оскільки виявляють найкращу динамічну гнучкість. Контактні майданчики таких плат розташовані з одного боку, як матеріал фольги, що проводить, найчастіше використовується мідь (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Односторонні ГДП

Односторонні ГДП із двостороннім доступом мають один провідний шар, контактні майданчики до якого виконані з обох боків плати (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Односторонні ГДП із двостороннім доступом

Двосторонні ГДП мають два провідні шари, які можуть бути з'єднані наскрізними металізованими переходами (на малюнку провідники нижнього шару йдуть перпендикулярно до провідників верхнього шару). Плати цього типу забезпечують високу щільність монтажу, часто використовуються в електронних пристроях з контрольованим повним опором (імпедансом) плат (рис. 1.4).

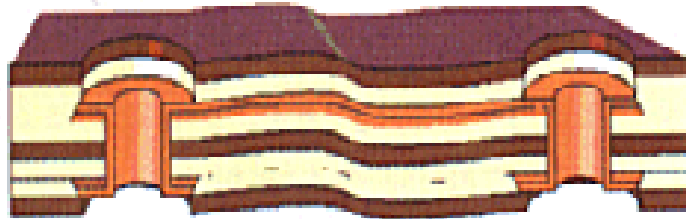


Рисунок 1.4 – Двосторонні ГДП

Багатошарові ГДП (рис. 1.5) містять не менше трьох провідних шарів, з'єднаних металізованими отворами, які забезпечують міжшарове з'єднання. У таких платах простіше реалізувати високу щільність монтажу, оскільки не потрібно забезпечувати більших значень співвідношень "висота/діаметр отвору". Прогнозується застосування таких ГДП для збирання на них багатокристалльних інтегральних схем.

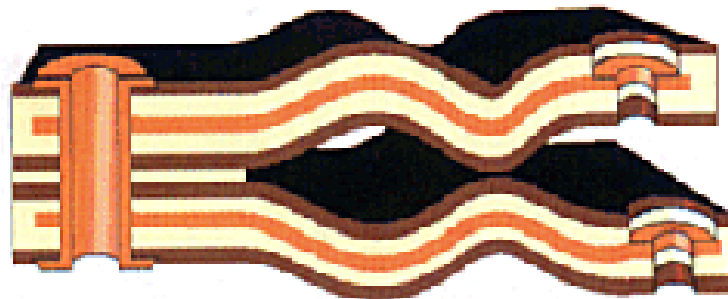


Рисунок 1.5 – Багатошарові ГДП

Гнучко-жорсткі ДП є гібридними конструкціями і містять як жорсткі, так і гнучкі основи, скріплені між собою в єдину збірку та електрично з'єднані

металізованими отворами. Найбільш поширені у виробках оборонної техніки, проте розширюється їх застосування й у промисловій електроніці (рис. 1.6).

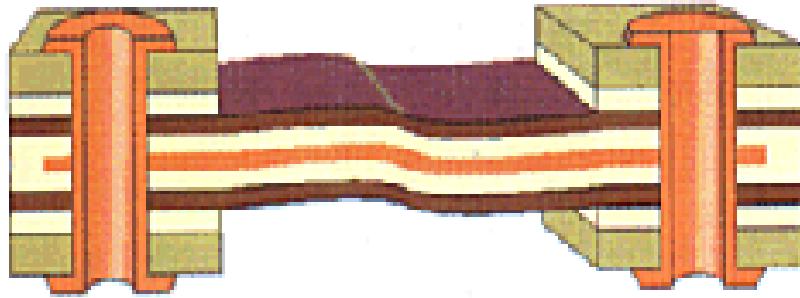


Рисунок 1.6 – Гнучко-жорсткі ДП

ГДП з місцевим посиленням (зміцненням). У таких платах можливе розміщення всередині гнучкої основи жорстких металевих деталей. Виходять багатоетапним процесом фотолітографії та травлення (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – ГДП з місцевим посиленням

Крім того, гнучкі плати, як і жорсткі, класифікуються за призначенням, що також необхідно враховувати та вказувати у конструкторській документації. Розрізняють декілька категорій гнучких плат:

– гнучкі плати, гнучкість яких проявляється лише у процесі збирання (статична стійкість), що показано (рис. 1.8) на прикладі блоку автомобільної

електроніки на основі багатошарової гнучко-жорсткої друкованої плати, де гнучкість гнучкої частини плати використовується лише у процесі складання;

– гнучкі плати, що постійно згинаються в процесі роботи (динамічно стійкі), вони поділяються на: «періодично» гнучкі (сотні та тисячі циклів перегинів) та «безперервно» гнучкі (мільйони та мільярди циклів перегинів), тому для них вказується стійкість до певної кількості перегинів та умови (радіуси) перегинів;

– плати для високотемпературних застосувань (понад 105 °С);

– плати, що підпадають під сертифікацію UL, тобто мають підвищену вогнестійкість, порівнянну з вогнестійкістю жорстких плат.



Рисунок 1.8 – Гнучко-жорстка друкована плата автомобільної електроніки

1.4 Переваги гнучких друкованих плат

Існує багато причин використання гнучких друкованих плат як засіб між'єднань в електронних пристроях. У деяких випадках, коли необхідна стійкість гнучких друкованих плат до динамічних навантажень, використання гнучких друкованих плат є очевидним. Принаймні у цьому вони не мають альтернативи. Набагато більше за інші області використання гнучких

друкованих плат, у яких вони допомагають вирішити проблеми ущільнення компонування апаратури.

Зменшення габаритів гнучких друкованих плат використовують найтоншу діелектричну основу з усіх доступних сьогодні матеріалів, призначених для створення між'єднань. У деяких випадках з цих матеріалів можна виготовити гнучкі друковані плати, що мають повну товщину менше 50 мкм, включаючи захисний шар. Жорсткі монтажні підкладки з тією ж функціональністю виявляються вдвічі товстішими. Мало того, що мала товщина гнучких друкованих плат приваблива сама по собі, можливість її складати за рахунок гнучкості дозволяє скорочувати обсяги і габарити електронних пристроїв.

Зменшення маси є додатковою перевагою малої товщини гнучких друкованих плат. Самі по собі вони легші за аналогічні жорсткі друковані плати на 75 %. Мала маса між'єднань, що реалізується гнучкими друкованими платами, виявилася настільки привабливою в аерокосмічній апаратурі, що ця сфера їх використання стала конкурувати за обсягами виробництва з портативною електронікою.

Зменшення часу та вартості складання. Гнучкі друковані плати уособлюють просту та швидку технологію створення між'єднань для вузлів та блоків електронної апаратури. Альтернатива гнучким друкованим платам – провідний монтаж та гнучкі кабелі, пов'язані з необхідністю прокладання проводів за наміченими трасами з'єднань та їх закріплення, зачистки та паяння кожного дроту окремо. Джгутовий провідний монтаж вимагає ще й додаткових витрат на позначення адрес зв'язків. ГДП дають можливість використання групових методів збирання та монтажу виробів. Крім того, саме їх виготовлення набагато дешевше завдяки використанню групових технологій виготовлення та маркування.

Зменшення помилок збирання. Хоча дротовий монтаж неминуче пов'язаний із людським фактором, гнучкі друковані плати не мають джерел помилок людської природи. Ручний монтаж – постійний ризик виникнення помилок. ГДП проектується у складі системи між'єднань і потім відтворюються

машинними методами, що запобігають впливу людського фактора. В результаті, за винятком неминучих помилок виробництва, гнучкі друковані плати не дозволяють створити з'єднання, що не відповідають спроектованій схемі.

Збільшена системна надійність. Фахівці з надійності завжди під час пошуку джерел відмов електронної апаратури шукають дефекти між з'єднань. Академік Берг свого часу заявив: «Наука про надійність – це наука про контакти. Що їх більше, то менш надійна система». Гнучкі друковані плати – ідеальний засіб для зменшення контактів. Коли вони сконструйовані належним чином і раціонально застосовуються в електронному компонуванні, вони сприяють збільшенню надійності, скорочуючи кількість з'єднань в межах електронного модуля або блоку.

Заміна провідного монтажу. Серед фахівців з гнучких схем існує правило, яким гнучкі плати рентабельно використовувати, коли потрібно мати більше 25 міжз'єднань від точки до точки. Це дещо довільно, але основна концепція вірна. Для вибору рішення потрібно зіставляти вартість дротового та друкованого гнучкого монтажу з урахуванням обсягу та інших факторів виробництва. Деякі проектувальники виробів знаходять гнучкі друковані плати більш рентабельними вже починаючи з двох чи трьох зв'язків. Тим не менш, у ряді випадків існує обґрунтованість використання джгутового монтажу на противагу гнучким друкованим платам. Наприклад, на (рис. 1.9) показаний джгутовий провідний монтаж силових ланцюгів, що не підлягає заміні на гнучкі друковані плати [5].

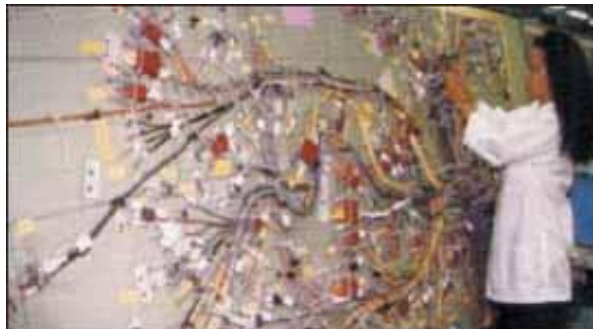


Рисунок 1.9 – Джгутовий провідний монтаж силових ланцюгів

Динамічна гнучкість. Стійкість до багаторазового динамічного вигину є однією з найважливіших властивостей гнучких друкованих плат. У таких випадках може бути достатньо інших гнучких з'єднань, таких як плоскі стрічкові кабелі, але гнучкі друковані плати є стандартним методом створення більш надійних з'єднань між рухомими частинами (рис. 1.10). Тонкий основний матеріал у поєднанні з дуже тонкою мідною фольгою надає гнучким платам велику перевагу у створенні динамічно стабільних з'єднань.



Рисунок 1.10 – Гнучка друкована плата у приводі дисководу

Майже всі основні матеріали для гнучких друкованих плат мають електричні властивості (однорідність матеріалу та електричні властивості на високих частотах), сприятливі для формування ліній передачі. Це робить відносно легким впровадження гнучких схем у високошвидкісних лініях електропередач.

Там, де існує однорідність матеріалу, єдиною виробничою вимогою є забезпечення того, щоб провідник був достатньо однорідним по всій довжині. Тобто точне відтворення геометрії провідника з метою досягнення необхідних значень властивостей лінії зв'язку. Зазвичай використовуються лінії з хвильовим опором 50 Ом – для гнучких друкованих плат це легко досягається. Вищі значення хвильового опору забезпечують більш товсті гнучкі друковані плати, що призводить до меншої гнучкості. Щоб вирішити цю проблему без збільшення

товщини, лінії передачі повинні бути зроблені з дуже тонкими провідниками, що може призвести до поганої точності ширини провідника та зниження якості.

У високошвидкісних лініях передачі скін-ефект домінує на високих частотах, тому зменшення перерізу провідника мало впливає на їхню роботу. Площа поперечного перерізу значно менша за фізичну площу поперечного перерізу.

Плоскі провідники мають більшу площу поверхні, ніж круглі, і ефективніше розсіюють тепло.

Це перша перевага. Крім того, порівнюючи гнучкі та жорсткі плати, стає зрозуміло, що шлях теплопередачі від жорсткої друкованої плати довший, ніж шлях теплопередачі від тонкої гнучкої основи.

Крім того, розсіювання тепла гнучкої друкованої плати йде в обидві сторони, що значно покращує ефективність розсіювання тепла. Однак, жорсткі друковані плати можуть використовувати більш товсті шари внутрішнього радіатора, на відміну від гнучких друкованих плат.

Об'ємна компоновка це – можливість вигідно розташувати в просторі кристали мікросхем, які в поєднанні з потужними електронними властивостями, забезпечують малі габарити електронних пристроїв.

Тобто в деяких електронних пристроях кілька одношарових або багатошарових плат поєднані між собою за допомогою гнучких друкованих плат і укладені одна на одну (рис. 1.11) або дві жорсткі плати, з'єднані між собою, можуть кріпитися до різних стінок корпусу електронного пристрою.

Надійність таких конструкцій підвищується за рахунок відсутності роз'ємних паяних з'єднань.

Знижений опір потоку охолоджуючого повітря – рівномірно плоска конструкція гнучких друкованих плат дозволяє розміщувати їх у корпусі обладнання, не створюючи особливого опору потоку охолоджуючого повітря. У той же час, велика кількість клубків дроту діє як бар'єр для повітряного потоку, перешкоджаючи ефективному охолодженню пристрою.

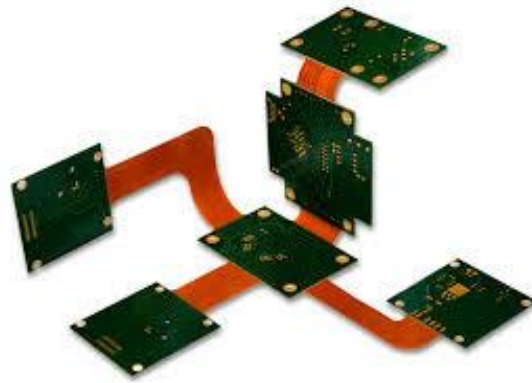


Рисунок 1.11 – Приклад використання гнучких основ для стапелювання кристалів мікросхем

Придатність гнучкої основи друкованих плат для поверхневого монтажу – технологія поверхневого монтажу на ранніх стадіях розвитку зіткнулася з багатьма труднощами, пов'язаними з невідповідністю коефіцієнта теплового розширення компонента та монтажної підкладки. Ця невідповідність викликала значні термомеханічні напруги в з'єднаннях між проводами компонентів і контактними майданчиками на монтажній основі, викликаючи численні несправності.

Розробка нових підкладок з кращою стабільністю розмірів і нові інженерні рішення в дизайні пакувальних продуктів вирішили більшість проблем. Проте одним із рішень, яке виявилось найефективнішим, є використання гнучких підкладок. Вони, як правило, мають нижчий коефіцієнт теплового розширення і є більш гнучкими до термомеханічних навантажень, які виникають без руйнування з'єднання.

Різні конструкції ліній передач. Крім переваг використання гнучких друкованих плат у конструкціях ліній електропередачі, слід відзначити здатність зменшувати спотворення цифрових сигналів на довгих лініях зв'язку. Відносно низькі значення діелектричної проникності та діелектричних втрат є лише одним із факторів, які призводять до меншого ослаблення сигналу, ніж інші конструкції ліній із використанням жорстких діелектриків.

Також така конструкція дозволяє робити переходи з одного пристрою на інший без використання з'єднувачів, які створюють розриви зв'язку, а ще за допомогою гнучких властивостей дозволяє розробляти екзотичні конструкції без обмежень, які не можуть створити жорсткі матеріали. Приклад однієї з цих структур показаний на (рис. 1.12).

Комбінація поверхневого кріплення до жорсткої основи монтажної плати та вихідного з'єднання з гнучкою основою збільшує щільність монтажу. Монтаж SMT на гнучких підкладках характеризується гарним поєднанням теплового розширення матеріалу компонента та гнучкого шару, прикріпленого до жорсткої основи. Крім того, низький модуль пружності гнучкого матеріалу компенсує невеликі розбіжності в температурних коефіцієнтах. Сама багат шарова гнучка друкована плата служить основою для наскрізних отворів і виводів для поверхневого монтажу.

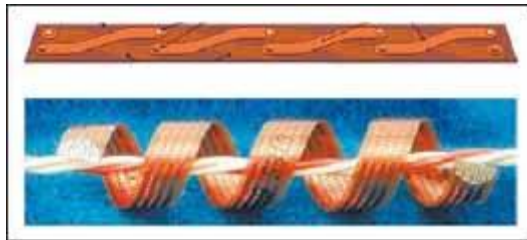


Рисунок 1.12 – Гнучкі друковані плати надають можливість створення незвичайних конструкцій ліній зв'язку

Комбінація поверхневого кріплення до жорсткої основи монтажної плати та вихідного з'єднання з гнучкою основою збільшує щільність монтажу. Монтаж SMT на гнучких підкладках характеризується гарним поєднанням теплового розширення матеріалу компонента та гнучкого шару, прикріпленого до жорсткої основи. Крім того, низький модуль пружності гнучкого матеріалу компенсує невеликі розбіжності в температурних коефіцієнтах. Сама багат шарова гнучка друкована плата служить основою для наскрізних отворів і виводів для поверхневого монтажу.

Гнучко-жорсткі друковані плати, які повністю замінюють дротове з'єднання, ще більше покращують блочне компонування. Можна уявити, як виглядала б мініатюрна конструкція блоку з роз'ємними контактами, якби використовувалась у гнучко-жорсткій друкованій платі, показані на малюнку (рис 1.13). Перевагою такої конструкції є відсутність роз'ємних і паяних з'єднань, що підвищує надійність [6].

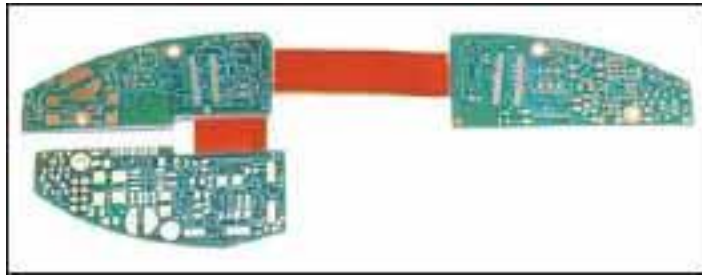


Рисунок 1.13 – Гнучко-жорстка багат шарова друкована плата, що монтується на трьох стінках електронного пристрою (3 жорсткі шари, 2 гнучкі)

Технологія «кристал на гнучкій друкованій платі» (Chip-on-Flex – COF). На противагу технології «кристал-на-платі» (Chip-on-Board – COB) технологія COF дозволяє забезпечити більшу щільність компонування, а отже, меншу масу та габарити.

До того ж, COF-технологія позбавлена багатьох недоліків COB технологій, пов'язаних з різними коефіцієнтами термічного розширення кристала і підкладки. У зв'язку з цим COF-технологія успішно використовується в аерокосмічній апаратурі.

У поєднанні з можливістю складати монтаж на гнучкій друкованій платі в стопки COF технологія має значні переваги, особливо там, де кристал мікросхеми не потрібно герметизувати.

Ще один приклад практичного використання COF технології – монтаж кристалів на стрічці (TAB технологія), на її основі створюються всілякі конструкції із щільною упаковкою компонентів (рис. 1.14).

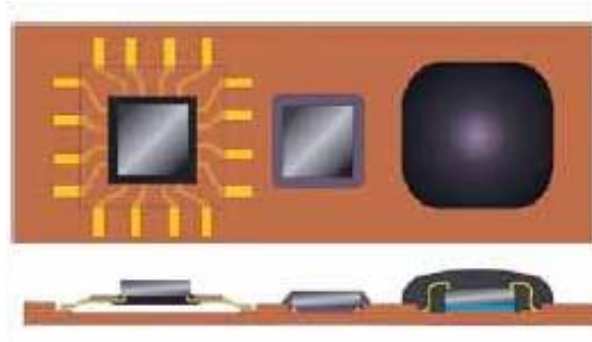


Рисунок 1.14 – Приклади монтажу кристалів мікросхем на гнучку підкладку

Гнучкі друковані плати у тонких конструкціях. Можливість перфорації у тонких основах гнучких друкованих плат дозволяє здійснювати між'єднання безпосередньо з кристала мікросхеми на периферію електронних пристроїв, як це показано для прикладу на (рис. 1.15).



Рисунок 1.15 – Приєднання гнучкої друкованої плати безпосередньо до мікросхеми на кристалі

Ця технологія, використовується для пакування мікросхем у SIM-картах, всіляких картах пам'яті (SD, MMC, MS, MS Pro, CF, Flash Memory Card) тощо, які вимагають зовнішні виводів. Масовість виробництва цих пристроїв по суті забезпечена застосуванням мініатюрних гнучких друкованих плат. Цей пакувальний формат тепер широко відомий як монтаж BGA за CSP технологією

(Chip-Scale Package – CSP). Також ця технологія монтажу сьогодні домінує у мікромініатюрних, кишенькових та портативних пристроях.

1.5 Висновки до розділу 1

У цьому розділі були розглянуті численні типи гнучких комутаційних структур, які використовуються в електронних пристроях. Деякі вже нагадують архаїчні пристрої, а деякі друковані плати ще не повністю вдосконалені для надійного виробництва та широкого використання.

Сучасні електронні пристрої використовуються у все більшій кількості галузей, і до їх компонентів висувається широкий спектр вимог. Надійність і фізична міцність електронних компонентів повинні підвищуватися з кожним днем. Розглянувши основні типи друкованих плат, можна прийти до висновку, що одношарові та багатшарові друковані плати неспроможні задовільнити сучасні вимоги використання, тому гнучкі друковані плати є більш універсальними. Однак гнучкі друковані плати мають і недоліки. Їх обмежена функціональність може перешкоджати їх використанню в громіздкій електротехніці. Гнучкі друковані плати все частіше використовуються в побуті і складних електронних пристроях. Однак, на відміну від інших друкованих плат, гнучкі друковані плати також потребують дослідження та покращення якості. Це пояснюється тим, що підвищення їх якості дає великий поштовх для розвитку електронних пристроїв.

Гнучкі друковані плати давно відомі як петлі, що використовуються окремо або як частина гнучко-жорстких друкованих плат. Однак ці друковані плати є найефективнішими, якщо використовувати їх ширше, ніж просто як гнучкі петлі. Також одним з напрямків розвитку та вдосконалення гнучких друкованих плат є покращення гнучких властивостей існуючих гнучких шлейфів. Саме тому для подальших експериментів і досліджень була обрана гнучка друкована плата.

2 ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ГНУЧКИХ КОМУТАЙНІХ СТРУКТУР ТА АНАЛІЗ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ І ВИПРОБУВАННЯ ГНУЧКИХ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

2.1 Основні матеріали для виготовлення гнучких друкованих плат

До складу гнучких плат входять:

- мідна фольга;
- діелектричні основи та діелектричні захисні покриття;
- адгезиви.

Конкретні типи цих матеріалів вибирають залежно від сфери застосування гнучких плат. При проектуванні гнучких плат основою вибору матеріалів стають вимоги до багаторазовим чи одноразовим вигинам гнучких елементів конструкцій.

Одноразово (дворазово і більше) гнучкі плати, що згинаються, можуть бути використані як тимчасові тристепенні системи з'єднання в електронних конструкціях замість провідних з'єднань.

Рухливі (динамічні) гнучкі плати дуже різноманітні та специфічні; при їх проектуванні та виготовленні необхідно забезпечувати багаторазові вигини без руйнування на весь час експлуатації електронних пристроїв (наприклад, принтерів або сканерів з головою, що рухається). Багато хто з них має бути розрахований на кілька сотень мільйонів згинів. Як приклад можна також навести дискові приводи комп'ютерів.

Як провідниковий матеріал найчастіше використовують мідь. Зазвичай застосовують два типи мідної фольги [7].

Електролітична (ED) мідь. Даний тип мідної фольги формують електрохімічним способом, аналогічним використовуваному для твердих ПП. Така фольга має шорсткість з одного боку, що покращує її адгезію з основою плати.

Відмінна характеристика ED-міді її структура. Оскільки фольга нарощується під час електрохімічного процесу, вона має вертикальну структуру. З цієї причини вона не має високої гнучкості і не підходить для використання в рухомих гнучких платах. На рис. 2.1 показано вертикальну будову ED-фольги. Стандартні значення її товщини для гнучких плат – 17,5 мкм; 35 мкм; 70 мкм; 105 мкм та 140 мкм.

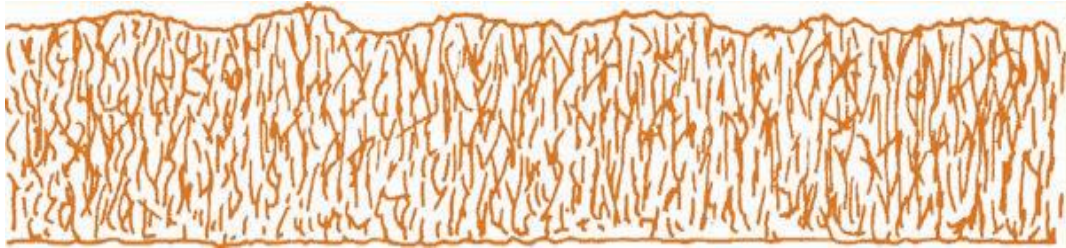


Рисунок 2.1 – Типова кристалічна структура електролітичної (ED) фольги

Катанна (RA) мідь. Даний тип фольги отримують розкочуванням на блюмінг-слябінгах при високій температурі до потрібних товщин. Отриману таким чином фольгу відпалюють у нейтральному середовищі для надання їй гнучкості.

На противагу електролітичній фользі (ED) мідь, що розкочується і термооброблена (RA), має горизонтальне розташування кристалітів (рис. 2.2). Така структура забезпечує значно кращу гнучкість та міцність фольги, тому для динамічних (рухливих) схем краще застосовувати RA-фольгу.

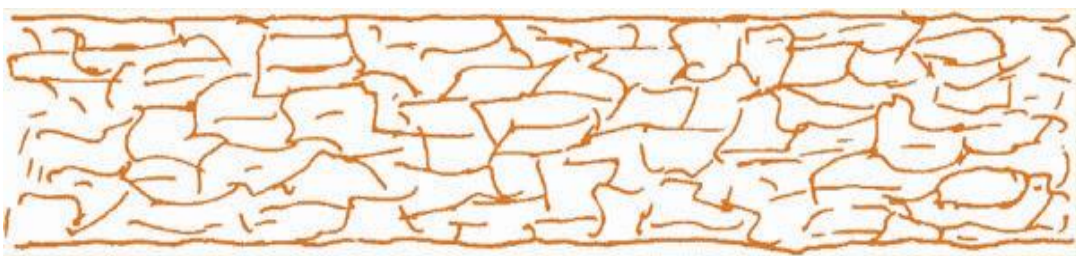


Рисунок 2.2 – Кристалічна структура катаної (RA) фольги

Недоліком RA-міді є її гладка поверхня. Через це знижується адгезія фольги з основою плати; додаткова хімічна обробка поверхні RA-міді здатна посилити адгезію без погіршення гнучкості фольги.

Стандартні значення товщини RA-фольги для гнучких плат – 17,5 мкм; 35 мкм; 70 мкм; 105 мкм та 140 мкм.

Діелектричні основи та електроізоляційні захисні покриття. Існує кілька видів основ гнучких плат. Зазвичай використовують поліімідні та поліефірні плівки. Вони також підходять для захисних покриттів.

Поліімід, також відомий під фірмовою назвою Kapton (торгова марка компанії DuPont de Nemours), найкраще підходить для використання у гнучких платах. Він має такі відмінні характеристики:

- висока термостійкість – дозволяє виробляти пайку без небезпеки пошкодження гнучкої плати;
- відмінні електричні властивості;
- хороший хімічний захист.

Основні недоліки:

- досить висока вартість матеріалу;
- відносно велике вологопоглинання.

Стандартні значення товщини поліімиду – 12,7 мкм; 25 мкм; 50 мкм; 75 мкм та 127 мкм.

Поліефір, відомий як лавсан або Mylar (торгова марка компанії DuPont de Nemours), найчастіше використовується в дешевих гнучких платах. Його основні характеристики:

- відмінні електричні властивості;
- висока стабільність розмірів;
- гарний хімічний захист;
- низьке вологопоглинання;
- низька вартість матеріалу.

Основний недолік поліефіру це погана термостійкість, що ускладнює або унеможливорює паяння.

Через погану термостійкість полієфіру його не застосовують у двосторонніх гнучких платах. Стандартні значення товщини полієфіру – 12,7 мкм; 25 мкм; 50 мкм; 75 мкм; 127 мкм; 178 мкм та 356 мкм.

До складу гнучких плат можуть входити й інші матеріали, проте у зв'язку з їх рідкісним застосуванням обмежимося лише коротким описом.

Тефлон – найдорожчий матеріал, який використовується лише якщо його застосування обумовлено чудовими термічними та високочастотними властивостями, що виправдовує високу вартість тефлону.

Склотканина з епоксидним просоченням застосовується в тих рідкісних випадках, коли плата не розрахована на багаторазовий вигин, так як інакше буде пошкоджена склотканина.

Random Fiber Aramid – цей матеріал також відомий як Nomex (торгова марка компанії DuPont de Nemours), що характеризується гарною термостійкістю та низькою вартістю. Недоліками його є слабка механічна міцність та високе вологопоглинання.

Якщо підстави жорстких ПП утворюються скріпленням базових матеріалів і мідних фольг за допомогою адгезиву (смоли), що виділяється з препрега, то в гнучких платах подібне скріплення фольги і плівкової основи досягається за допомогою систем адгезивів. Вони поділяються на дві основні групи: термопластики та термореактивні полімери. Вибір зазвичай обумовлюється технологією і областю застосування гнучких плат.

Полієфірні адгезиви належать до термопластиків; вони здатні витримувати лише малі робочі температури із збереженням адгезії. Неприпустимим є застосування полієфірних адгезивів за наявності в техпроцесі наступних стадій за участю високих температур і тиску, оскільки при їх розм'якшенні може бути зміщений мідний малюнок плати.

Свердління отворів у двосторонніх платах, що супроводжується нагріванням свердла, здатне призвести до небажаного покриття отворів адгезивом, що знизить якість їхньої металізації. Якщо ж потім має бути лудіння плати, то в результаті буде порушено шар самого полієфірного адгезиву.

Таким чином, поліефірні адгезиви можуть бути використані у виробі масового споживання з механічно обтисканими контактами (непаяними сполуками).

Епоксидні адгезиви відносяться до термореактивних адгезивів і тому здатні витримувати температуру паяння та високу температуру навколишнього середовища.

Однак вони мають обмежену гнучкість, тому епоксидні адгезиви не використовують для гнучких плат з багаторазовими перегинами.

Акрилові адгезиви належать до адгезивів на основі термореактивної смоли, але стійкі до дії високих температур (паяння та ламінування). Мають гарну гнучкість і тому використовуються в гнучких платах з багаторазовими динамічними перегинами.

Щоб уникнути замаслювання адгезивом монтажних поверхонь Acrylic Adhesive повинен бути слабоплинним або неплинним.

Існують також модифікації Acrylic Adhesives, що містять невелику кількість епоксидної смоли. Такі адгезиви грубіші, тому непридатні для динамічних гнучких плат із багаторазовими перегинами.

Вище було наведено опис основних матеріалів, що становлять гнучкі плати. Однак нині існують вже готові напівфабрикати, що дозволяють виробнику гнучких плат не обробляти вищеописані базові матеріали (мідні фольги, діелектричні основи та адгезиви). Щоб забезпечити можливість обробки напівфабрикатів, наприклад свердління та ламінування, вони забезпечуються напівзатверділим (у стадії) нетекучим адгезивом.

Оскільки поліімідні діелектричні основи використовуються найчастіше, наведено нижче опис процесів з їх застосуванням. Також існують напівфабрикати на основі Nomex Framid paper (особливий папір) та поліефірних плівок, але розглядатися вони не будуть, оскільки це не дасть нам додаткової інформації.

Існує безліч способів комбінування поліімідних плівок, мідних фольг та шарів адгезиву. Кожен виробник вибирає найбільш підходящу йому комбінацію,

орієнтуючись на рис. 2.3.

Мідь		Поліімід	
мкм	oz.	мкм	mil
17,5	0,5	25	1
35	1	25	1
70	2	25	1
17,5	0,5	50	2
35	1	50	2
70	2	50	2
35	1	75	3

Рисунок 2.3 – Поліімід з односторінним фольгуванням

Залежно від сфери застосування гнучкої плати мідні фольги можуть бути електролітичними (ED) або катаними (RA).

При використанні ED-міді слід застосовувати або слаботекучий епоксидний адгезив завтовшки 25 мкм, або модифікований акриловий адгезив завтовшки від 12 мкм до 15 мкм. При використанні RA-міді необхідно застосовувати акриловий адгезив товщиною 25 мкм.

Крім того, існують вже готові захисні покриття – поліімідні плівки з нанесеним шаром адгезиву (рис. 2.4).

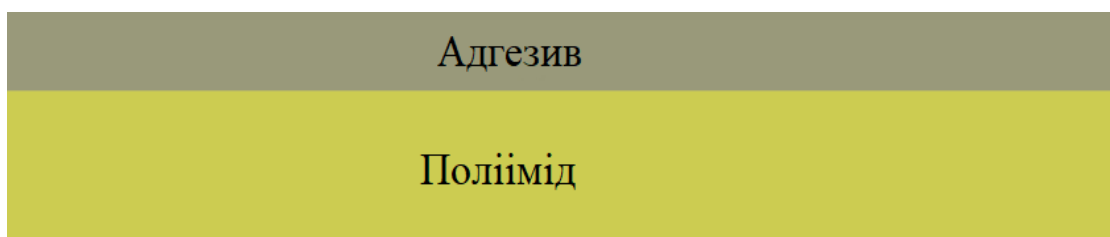


Рисунок 2.4 – Поліімідна плівка з нанесеним адгезивом

Можна використовувати або слабоплинний або модифікований акриловий адгезив. Необхідна його товщина залежить від висоти мідного малюнку плати, тому що в процесі ламінування адгезив має заповнити всі поглиблення малюнку.

Зазвичай при товщині мідної фольги, що використовується під малюнок 35 мкм і 70 мкм застосовують адгезив товщиною 25 мкм і 50 мкм відповідно.

Необхідна товщина захисної поліімідної плівки залежить від товщини основи плати. При товщині поліімідної плівки основи 25 мкм необхідно використовувати захисне покриття завтовшки 25 мкм (зокрема, для гнучких плат динамічного застосування). Це забезпечує симетричність будови плати, при якому мідна фольга виявляється на так званій нейтральній лінії. Таке центральне положення міді дозволяє уникнути пошкодження провідної мідної кулі при згинанні платі (рис. 2.5).

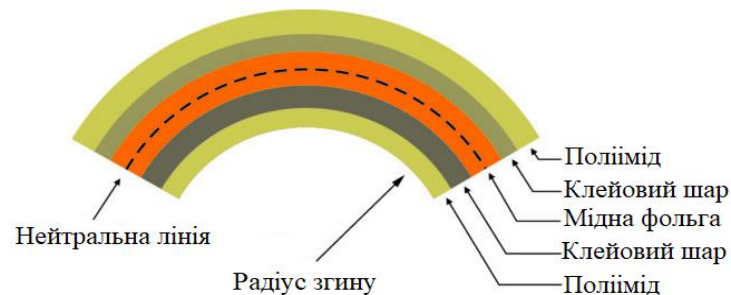


Рисунок 2.5 – Напряга згину фольги відсутня, якщо вона знаходиться на нейтральній лінії вигину

У деяких випадках виникає необхідність використання поліімідної плівки з адгезивом з обох сторін.

Як і для захисних покриттів, адгезивом скріплюючих шарів може бути або слабоплинний або модифікований акрилат. Його товщина залежить від висоти мідного малюнка, як і у випадку із захисними покриттями.

Найчастіше листові адгезиви є листом слабоплинного акрилу, нанесений на поліпропіленовий папір, від якого він легко відокремлюється (рис. 2.6). Листові адгезиви зазвичай використовують для скріплення гнучких плат у багатошарові або для скріплення їх з торцевими жорсткими платами.

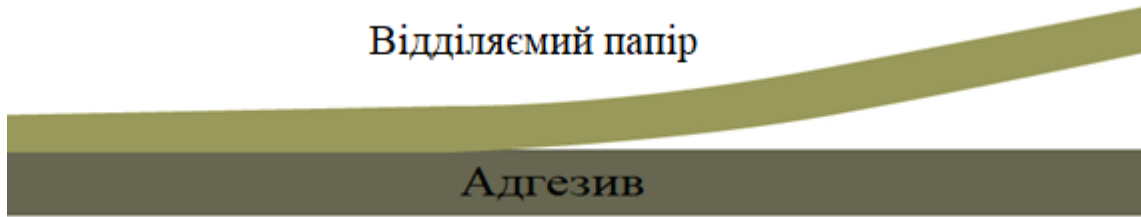


Рисунок 2.6 – Листовий адгезив на транспортному папері,
що відокремлюється

Просочене слабо текучим адгезивом склополотно виконує ті ж функції, що і препрег з епоксидним просоченням у жорстких багатошарових платах. Склополотно використовується для скріплення гнучких плат з жорсткими або для кріплення тепловідводів на жорсткі плати [8].

2.2 Процеси виготовлення гнучких друкованих плат

Оскільки матеріал основи гнучких плат тонкий і нестабільний порівняно з основами жорстких плат, для нього встановлюються допуски на всі елементи конструкцій ширше прийнятих за IPC-2223A [9]. Використовувані у масовому виробництві тонкі матеріали, що постачаються в рулонах, здатні стискатися або розтягуватися під час процесу, що використовуються в масовому виробництві, що веде за собою виникнення специфічних труднощів. Тому для чіткого уявлення про процеси виготовлення гнучких плат наш опис буде заснований на використанні листових матеріалів (не рулонних), більш простих в обробці. Вони зазвичай призначені для випуску невеликих партій або, якщо потрібна висока якість плат.

Нижче наведено опис виробництва наступних видів гнучких плат:

- односторонні;
- односторонні з наскрізними отворами;
- двосторонні;

- багатошарові;
- твердо-гнучкі.

Найпростіший вид гнучких плат односторонні без металізації. Однак і при їх виробництві необхідно стежити, щоб не було розриву або деформації тонких матеріалів. На рис. 2.7 наведена схема процесу виготовлення односторонніх гнучких плат.

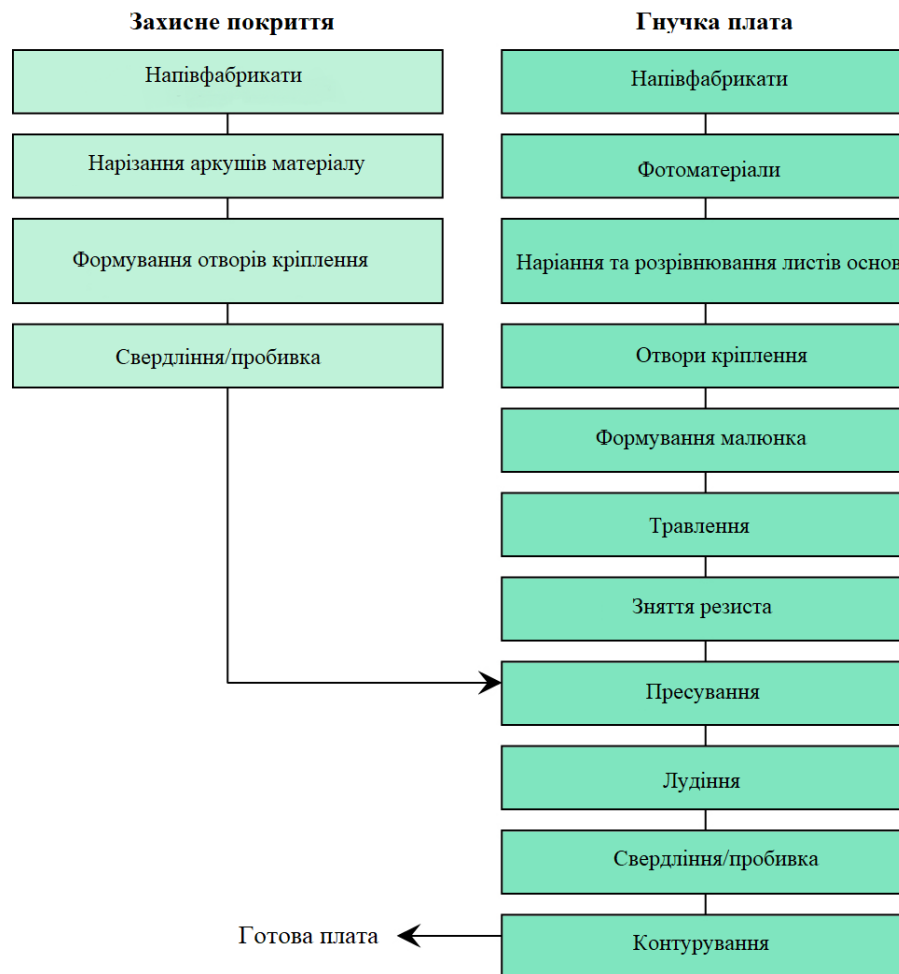


Рисунок 2.7 – Схема виготовлення односторонньої гнучкої плати

В одному з варіантів буде використано наступний матеріал (рис. 2.8): поліімідна плівка 50 мкм, покрита з одного боку мідною фольгою товщиною 35 мкм за допомогою 25 мкм акрилового клею; захисне покриття, що складається з поліімідної плівки 50 мкм та адгезиву товщиною 25 мкм у стадії В.

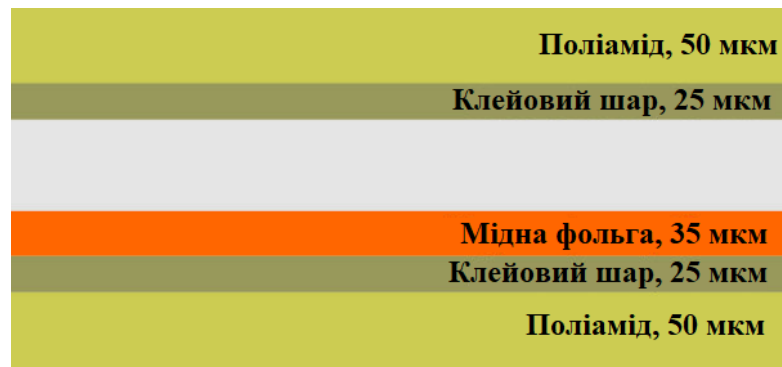


Рисунок 2.8 – Структура матеріалу односторонніх гнучких плат

У зв'язку з високою вартістю поліімідної плівки, малюнки гнучких плат слід розташовувати в заготовці так, щоб максимально використовувати поверхню листа.

Потрібно мати на увазі, що поліімідні плівки більше стискаються у напрямку їх поливу. З огляду на це на листі поліімиду необхідно розташовувати гнучкі плати таким чином, щоб у довжину вони лежали перпендикулярно напрямку поливу, як показано на рис. 2.9.

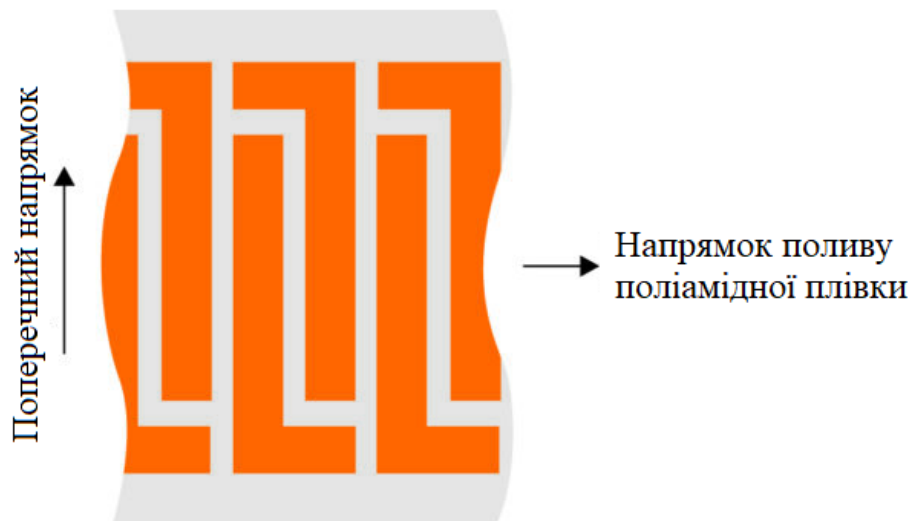


Рисунок 2.9 – Приклад виконання малюнка заготовки гнучких плат

Нарізання та розрівнювання листів основ – форма поліімідного листа має

бути виконана таким чином, щоб кожна гнучка плата забезпечувалася технологічними полями. Більше того, технологічні поля мають бути захищені від травлення, щоб зберегти їхнє мідне покриття. Отримані по контуру плат мідні «рамки» покращують міцність і розмірну стійкість плівки і знижують ризик її розриву в процесі виготовлення плат.

При роликовому нанесенні та припресуванні мідної фольги поліімідна плівка виявляється під тиском, внаслідок чого відбувається її вирівнювання. Заготівлі плат обробляються в пресі під температурою та тиском протягом однієї години, потім, не знімаючи тиску, їх охолоджують. Коли температура в пресі стає рівною кімнатній температурі, заготовки виймають із преса.

Базові (фіксуючі) отвори служать для встановлення плат та позиціонування захисного покриття. Для досягнення кращої точності їх слід розміщувати на технологічних полях плат.

При формуванні малюнка перед тим як наносити фоторезист слід ретельно очистити мідну поверхню плати. На відміну від жорстких плат, гнучкі плати не піддаються механічному зачищенню в конвеєрному обладнанні, оскільки може бути пошкоджений їх тонкий матеріал.

У невеликому виробництві зазвичай використовують ручне чищення пемзою; також можливе хімічне очищення, що слабо діє на гнучкий матеріал.

Вибір між сухим плівковим фоторезистом (СПФ) та трафаретним друком проводиться відповідно до рекомендацій, вказаних для односторонніх плат. Найчастіше використовують СПФ, оскільки його простіше обробляти. Прояв, однак, утруднений тим, що гнучкий матеріал може бути «намотаний» на барабани конвеєра, щоб уникнути чого по краях листової заготовки встановлюють довгі жорсткі підстави, що закріплюють матеріал. Так само роблять при травленні заготівлі та знятті з неї фоторезиста.

Після прояву фоторезиста виходить позитивний малюнок плати, тобто шар резиста травлення полімеризується у місцях майбутніх доріжок та контактів.

Травлення незахищеної міді досягається або зануренням у травильний розчин, або його розпорошенням через форсунки.

Найчастіше застосовують двостороннє вертикальне розпилення при конвеєрному завантаженні плат. Для досягнення кращого рівномірного травлення по всій поверхні плати пересуваються форсунки по різних напрямках.

Головне, щоб при видаленні непотрібної міді з усіх ділянок не допустити надмірного травлення, яке може збільшити підтравлення. Як тільки основа плати стає видимою, слід припинити травлення міді.

Після травлення плати промивають у воді, нейтралізують і промивають у воді знову, щоб видалити залишки травильного розчину.

Як травильні розчини для плат, покритих резистом (сплав олово-свинець або олово), частіше використовують склад з аміаку, хлористого амонію та хлорної міді.

З урахуванням явища травлення визначають мінімально можливу ширину доріжок залежно від товщини мідної фольги. Чим тонша фольга – тим менше підтравлення. Товщину мідної фольги завжди слід вибирати, виходячи з щільності малюнка.

Захисне покриття. Зазвичай для фінішного покриття використовують поліімідну плівку, на одну із сторін якої нанесений адгезив у стадії В. Для забезпечення герметичності покриття малюнка захисне покриття наносять під дією тиску та температури. Відкритими залишаються лише контактні майданчики – для них роблять спеціальні перфорації у захисному покритті.

Необхідно, щоб листи захисних покриттів за розміром були трохи менше заготовок плат, так як при передчасному покритті країв плат бульбашки повітря, що опинилися під захисним шаром, вже не зможуть бути видалені.

Листи захисних покриттів, що поставляються забезпечені фіксуєчими отворами, розташованими відповідно до базових отворів заготовок гнучких плат. Отвори під контактні майданчики потрібно перфорувати свердлінням. За великого обсягу виробництва їх вигідніше пробивати у штампах.

Свердління отворів у захисному покритті виконується так само, як і свердління жорстких плат, тобто одночасно свердлять стопку від 5 до 10 шарів. Однак для цього потрібні дещо інші параметри свердління, так як на відміну від

жорстких плат гнучкі плати є поліімідними підставами без мідних шарів, здатних відводити тепло.

Якщо виробляється свердління великих листів захисного покриття, необхідно враховувати похибку суміщення заготовок плат, що виникає. У деяких випадках похибка суміщення може сягати 0,2 %.

Нашарування захисного покриття. Попередньо потрібно провести очищення мідної поверхні протрусених заготовок гнучких плат. Для зменшення механічного впливу на заготовку зазвичай вибирають хімічне очищення. Так як під час неї поліімід вбирає в себе вологу, потім заготовку необхідно просушувати в печі за температури + 120 °C протягом 30 хв, інакше може відбутися розшарування плат.

Надалі листи захисного покриття поєднують із заготовками плат. Можливе візуальне поєднання або суміщення по фіксуючих отворах і штирях. Отримані заготовки сплавляють на кутах паяльником.

Нашарування гарячим прокатом. Найбільш вигідно проводити нашарування, пропускаючи плати із прикріпленим захисним покриттям між двома гарячими пресуючими барабанами. Для цього необхідно, щоб адгезив був термопластиком з низькою температурою плавлення, наприклад, поліефір. З урахуванням того, що шари, які шаруються, можуть трохи розійтися, часто порушується точність їх суміщення. Тому перфорації в захисному покритті необхідно робити значно більше необхідних розмірів, щоб компенсувати похибку, що виникає, і забезпечити доступ до контактних майданчиків.

Нашарування в пресовому устаткуванні. Більш дорогим способом є нашарування під впливом тиску і температури в пресі. При цьому досягається найкраще поєднання та герметичність шарів, а також стає можливим використання адгезивів на основі термореактивних полімерів – таких як епоксидний та акриловий адгезив.

Пресування шарів плати преса проводиться між двома сталевими плитами преса. Однак при пресуванні гнучких плат, для компенсації нерівностей сталевих плит і більш рівномірного розподілу тиску на поверхню плати, необхідно

використовувати прокладки, що вирівнюють. Ті ж прокладки слугують для щільнішого заповнення захисного покриття між доріжками та навколо контактних майданчиків.

До складу прокладок входить еквалайзер, що вирівнює тиск (наприклад, лист силіконової гуми на склополотні), засіб передачі тиску (аркуш тефлонового склополотна) та відповідний розділовий матеріал (зокрема плівка політетрафторетилену – фторопласту).

Для більш ефективного використання продуктивності преса одночасно пресують кілька гнучких плат. Для цього необхідно, щоб кожна з них мала свої прокладки зі сталеву розділювальною пластиною і щоб всі плати були вирівняні відносно одна одної.

Слід використовувати певну кількість адгезиву, щоб шляхом змочування і заповнення ним малюнка провідників забезпечити моноліт — без бульбашок повітря і без розтікання надлишкового адгезиву на відкриті контактні площі. При товщині акрилового адгезиву 25 мкм допускається розтікання величиною від 50 мкм до 100 мкм, що потрібно враховувати під час проектування та технологічної підготовки проекту гнучких плат.

На (рис. 2.10) показано ділянку гнучкої плати з контактним майданчиком (у центрі) та двома провідниками поруч. Тут використовуються поліімідні плівки товщиною 25 мкм (основа гнучкої плати та захисне покриття).

Затвердіння адгезиву в стадії В проводять при температурі від + 175 °С до + 200 °С та тиску від 15 кг/см² до 25 кг/см² протягом однієї години.

Потім, щоб уникнути виникнення в платах внутрішньої напруги, нагріту стопку слід протягом 20 хв охолоджувати, не знімаючи тиск. Після цього протягом двох годин проводять остаточне термозатвердіння плат у спеціальній печі за температури + 120 °С.

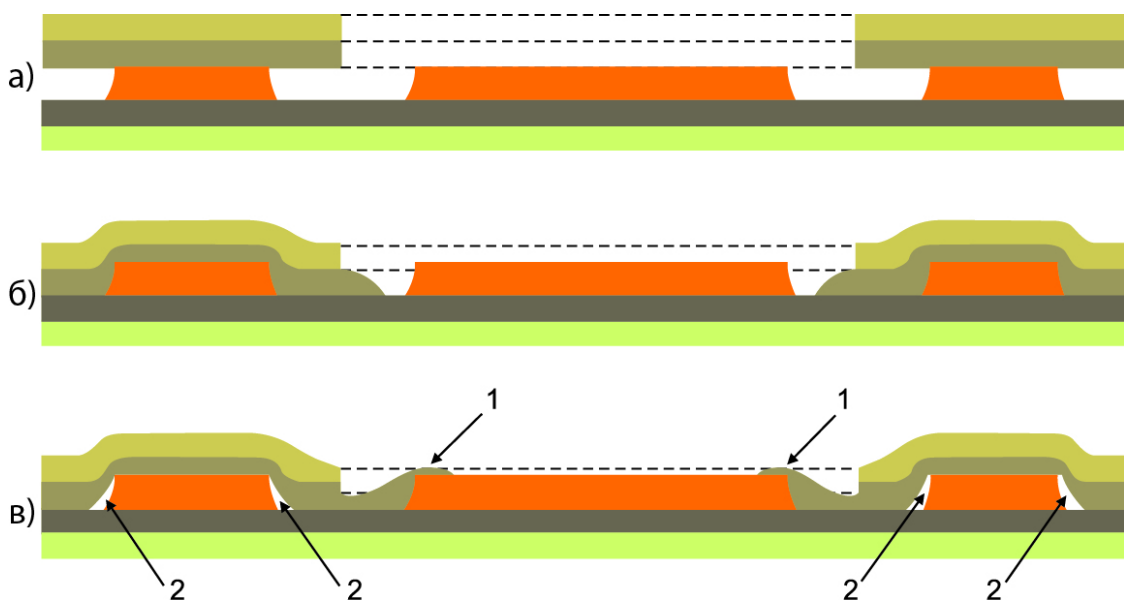
Найбільш просте і дешеве захисне покриття – епоксидна фарба, що наноситься трафаретним друком, затвердіння якої досягається впливом ультрафіолетових променів.

За своїми електричними властивостями таке покриття гірше за поліімідну

плівку; використовувати його для динамічних (рухливих) гнучких плат не рекомендується, оскільки воно значно погіршує їх гнучкі властивості.

Після нанесення захисного покриття та пресування гнучкої плати роблять лудіння контактних площ (монтажних поверхонь).

Вцілому нині лудіння відбувається як і лудіння жорстких плат, крім особливих вимог у зв'язку з тим, що матеріали підстав тонкі і гнучкі. Для закріплення гнучких плат, наприклад при пропусканні їх між повітряними ножами, потрібні спеціальні інструменти.



- а) перфорована захисна плівка на заготівлі у вихідному стані
Добре видно, що просвердлений отвір у захисному шарі більший за розмірами, ніж контактний майданчик;
- б) добре виконане нашарування захисної плівки;
- в) погано виконане нашарування захисної плівки:
- 1 – плівка напливла на контактний майданчик;
- 2 – нещільності (бульбашки) по периметру профілю провідника

Рисунок 2.10 – Приклади нашарування захисної плівки

Оскільки під час очищення плат поліімід вбирає в себе вологу, перед

лудінням необхідно проводити сушіння плат у печі при температурі + 200 °С протягом однієї години. Інакше плата може розшаруватись.

Свердління, пробивка отворів. у контактах проводиться на верстаті з ЧПУ. За великого обсягу виробництва отвори пробивають у набірних штампах.

Процес свердління аналогічний свердлінню жорстких плат, крім того, що для різних типів застосовуваного поліімиду і адгезиву необхідно встановлювати відповідні параметри свердління – швидкість обертання та подачі свердла.

На останньому етапі проводиться оконтурювання гнучких плат. Для невеликих обсягів виробництва (від 2500 до 5000 плат на місяць) використовують так звану м'яку технологію. Вона полягає у застосуванні системи сталевих ножів, закріплених у листі фанери та гострих з одного боку. Потрібні прорізи у фанері або випилюють або виконують за допомогою лазера. У сукупності всі леза утворюють контур плати; також можна формувати і внутрішні елементи контуру (рис. 2.11).

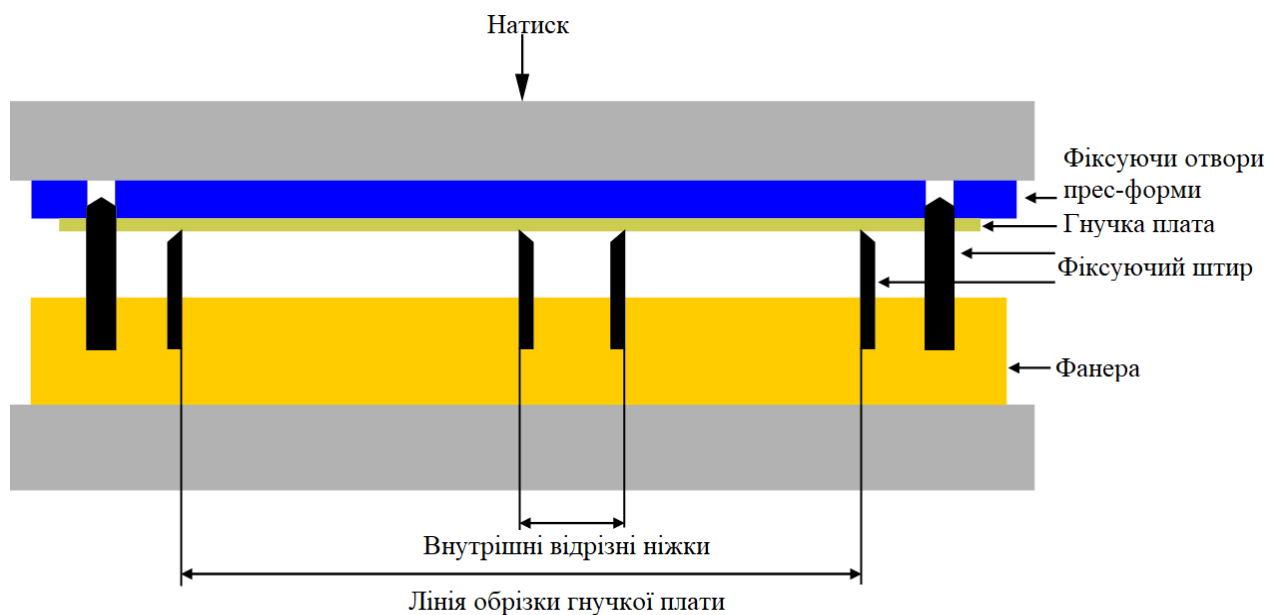


Рисунок 2.11 – Технологічний пристрій для обрізання гнучких плат за контуром

Для оконтурювання заготовку плати встановлюють поверх сталевих лез, та за допомогою системи фіксуючих штирів та власних базових отворів плати. Під впливом тиску на встановлену поверх плати пластикову пластину (наприклад,

вініпласт) виконується оконтурювання.

Через похибки сталених лез, що використовуються, похибка оконтурювання виходить більше $\pm 0,5$ мм. Особливо проблематично витримуються допуски радіусів заокруглень країв плат. Тому завжди слід встановлювати радіус заокруглень великим і збільшувати допуск їх значень.

При менших допусках конфігурацію контуру або великих обсягах виробництва застосовують так зване жорстке оконтурювання. У цій технології для пробивання зовнішнього та внутрішнього контурів використовують пуансон та матрицю з твердішої сталі (рис. 2.12).

Подібна установка часто конструюється таким чином, щоб за один такт, крім оконтурювання, пробиває і всі отвори контактних майданчиків.

При незмінності контуру плати термін служби такого штампу обмежується тривалістю виробництва виробу. Похибка всіх вимірювань ліній зовнішніх та внутрішніх контурів та положень отворів забезпечується в межах \pm від 0,1 мм до 0,2 мм.

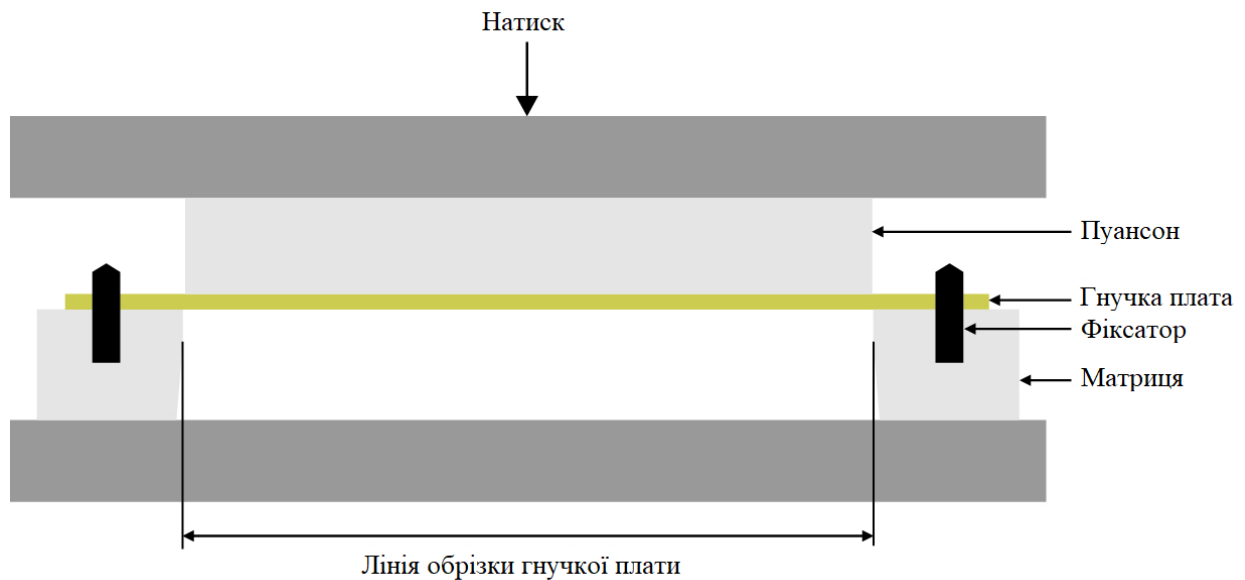


Рисунок 2.12 – Оконтурювання гнучких плат у жорсткому штампі

Якщо гнучка плата, що виготовляється, призначена для динамічного

використання, необхідно, щоб її краї були абсолютно рівними, оскільки найменший задирок або надрив здатний призвести до втомного розриву поліімідної плівки.

Щоб уникнути цього, потрібно при проектуванні установки жорсткого оконтурювання забезпечити щільний контакт пуансона і матриці.

Іншою перевагою жорсткого оконтурювання є запобігання формуванню частинок поліімиду по контуру гнучкої плати, як при м'якому оконтурюванні. Зокрема, в комп'ютерах такі частинки здатні порушити роботу жорстких дисків, забруднивши їхній робочий простір [10].

2.3 Засоби контролю та випробування друкованих плат

Контроль і випробування об'єктів виробництва мають на меті дві цілі:

- оцінка придатності виробів до використання – розбраковка;
- використання отриманої інформації для управління виробництвом, спрямованого на збільшення виходу річної продукції використаної якості.

Тому для управління процесом використовується технологічний контроль, а для оцінки якості – вихідний контроль. Ряд прикритих дефектів можна виявити тільки в процесі виготовлення. Тоді технічному контролю піддаються заготовки плат за відповідними операціями.

Прийом плат здійснюється за технічним вимогам (ТВ) та технічними умовами (ТУ), розробляються підприємством-виробником на підставі вітчизняних і міжнародних стандартів (IPC, ISO PERFAG та ін.). В умовах відсутності сучасних вітчизняних стандартів при розробці ТУ, як правило, із зарубіжних стандартів використовують вимоги та методи контролю, із вітчизняних – процедури контролю та випробувань [11].

Контроль за ознаками зовнішнього вигляду (візуальний контроль). Основну інформацію про стан об'єкта контролю людина отримує безпосередньо за допомогою зовнішнього огляду або візуалізації різних фізичних ефектів, що виявляють неоднорідності поверхні об'єкта спостереження. Більшість ознак

зовнішнього вигляду є основною в оцінці якості друкованих плат. Більш того, будь-який інший вид контролю у разі виявлення дефекту підтверджується зовнішнім оглядом поверхні або розкриттям друкованих плат, що дозволяє переконатися в наявності дефектів, що мають зовнішні прояви.

Вимоги до якості зображення на фотошаблонах полягають у тому, що на прозорих та не прозорих елементах зображення в зонах неприпустимості дефектів не повинно бути плям, розривів, проколів та інших дефектів.

Фотолітографія – фотографічний процес на фоторезистах, що відрізняється високою роздільною здатністю.

Якість фоторельєфу значною мірою залежить від можливості формування бездефектних плівок контрольованої та відтворюваної товщини. Дефекти рельєфу мають різноманітний характер та причини. Найчастіше вони з'являються, коли якість матеріалів (насамперед фоторезистів) відповідає нижньому рівню. Тоді фоторезист може мати нерівномірну товщину, низьку світлочутливість, численні проколи, недостатню пластичність, погану адгезію і т. д., що призводить до втрати точності відтворення малюнка, лущення та відшарування плівки фоторезиста і т. п. Нерідко погана якість фоторезиста пов'язана з умовами зберігання.

Дефекти другої групи пов'язані з неправильно підібраними режимами експозиції та прояви фоторезиста (швидкість конвеєра, тиск струменів і температура проявляючого розчину, температура і тиск води в магістралях відмивного модуля). Для підбору цих режимів і поточного контролю геометричної точності відтворення малюнка служить тест-елемент, що містить 12 зон різної густини переплетення. При контролі режимів прояву та експозиції отримане зображення тест-елемента порівнюють із затвердженим зразком, щоб прийняти рішення про спрямованість коригування параметрів процесу фотолітографії. Тест-елемент розміщується на технологічному полі кожного фотошаблону, щоб мати можливість контролювати кожну плату або шар БДП.

Дефекти третьої групи пов'язані з вадами фотошаблонів, запиленістю рами експонування та робочих приміщень. Фоторезисти з тією чи іншою точністю

відтворюють ці дефекти та тіні від порошин та забруднень. Розсіювання світла та переекспонування зменшують розмір дефектів у негативах фоторезиста, але розширюють їх у позитивних плівках. У цьому плані негативні фоторезисти кращі.

Травлення друкованого малюнка – це процес видалення незахищених фоторезистом ділянок металевої плівки (фольги, гальванопокриття) шляхом хімічного або електрохімічного розчинення.

Якщо хімічний склад і фізичні властивості плівок, що витравлюються, однорідні, що відноситься, наприклад, до випадку травлення фольги, то дія травителів повинна бути ізотропною.

Травлення малюнка по фользі з металізацією всієї поверхні близько до ізотропного, якщо знехтувати дещо більшою швидкістю травлення гальванічних шарів.

Якщо гальванічне нарощування йде по рельєфу, сформованому із сухого плівкового фоторезиста так, що гальванопокриття нарощується не вище за фоторельєф, то геометрія друкованих елементів відтворюється особливо точно. При використанні в цьому процесі діелектриків з ультратонкою від 5 мкм до 10 мкм фольгою вдається досягти точності відтворення струмопровідного малюнка \pm від 5 мкм до 10 мкм.

Ступінь спотворення друкованих елементів на операції травлення оцінюється через відношення товщини витравленого шару до глибини підтравлювання – коефіцієнт підтравлення. Однак профіль провідників можна побачити і виміряти коефіцієнт підтравлювання тільки мікрошліфами при металографічному аналізі якості плати. Тому цей параметр якості використовується в основному при відпрацюванні процесу травлення та аналізі відмов.

Для оперативного контролю за якістю травлення користуються тест-елементами травлення, які дозволяють без вимірювань геометрії провідників оцінити стан процесу травлення. При глибокому підтравлюванні на кромках провідників нависають краї метал-резиста, які можуть обламуватися, утворюючи

численні тонкі задирки, здатні викликати короткі замикання. Задирки мають товщину всього від 10 мкм до 15 мкм і їх важко виявити неозброєним оком. Можливість коротких замикань через задирки перевіряється наклеюванням і швидким здиранням липкої стрічки з витравленого малюнка. Задирки, що відірвалися, виявляють себе у вигляді приклеєних металевих частинок.

Вимоги до друкованого малюнка зазвичай формуються по мінімуму ширини друкованого провідника і мінімуму ширини ізоляційного проміжку між краями елементів. Обмеження максимальної ширини друкованого провідника у цьому випадку визначається мінімальним ізоляційним проміжком.

Вимірювання ширини провідників здійснюється, як правило, за допомогою звичайних мікроскопів, поле зору яких навряд чи перевищує 10 мм при вимірі розмірів провідників завширшки від 0,1 мм до 0,5 мм. У зв'язку з цим вимір їх ширини здійснюється між середніми лініями нерівності краю. Мінімальні та максимальні значення розмірів, що відповідають западинам та виступам краю нерівностей, у допуск на ширину провідників для забезпечення заданого хвильового опору не входять та обмежуються лише заданими кресленням мінімальними значеннями ширини провідників та ізоляційних зазорів.

Контроль друкованих плат за ознаками зовнішнього вигляду є головним видом тестування, оскільки він є найінформативнішим. Мало того, незалежно від виду методів контролю якості друкованих плат, що використовуються, остаточне рішення про характер і допустимість виявлених дефектів приймається за результатами візуального аналізу. Для цього застосовуються монокулярні, бінокулярні, безокулярні мікроскопи. Якщо обсяги виробництва настільки великі, що трудовитрати та візуальний контроль стають значними до розрахунку ціни друкованої плати, доводиться розглядати необхідність використання автоматичних оптичних тестерів. Разом з тим, при візуальному контролі зорова та психологічна втома оператора призводить до пропуску дефектів. І чим дрібніші елементи друкованих плат, тобто чим вони прецизійні, тим більша ймовірність пропуску дефектів. І незалежно від того, що більша частина дефектів

виявляється на наступних стадіях виробництва, аж до перевірки функціонування апаратури, ціна помилок зростає в міру запізнення в їх виявленні. Тому особливо актуально уникати помилок у фотошаблоні, оскільки вони тиражуватимуться у всій партії плат, що виготовляються з цього фотошаблону.

Оптичний мікроскоп – найпоширеніший прилад аналізу якості друкованих плат.

Зображення об'єкта в оптичному мікроскопі формується за допомогою системи скляних лінз, що мають вищий показник заломлення, ніж повітря. Мікроскоп містить освітлювальну систему, штатив із предметним столиком та систему формування зображення.

Щоб поліпшити контроль за допомогою програмних продуктів, які можна додати до цифрового мікроскопа. Існують програмні рішення для цифрового мікроскопа, які допомагають співробітникам контролю якості виконувати свою роботу простіше та точніше, усуваючи суб'єктивність людського зору. Програма порівняння зображень є одним із програмних продуктів, для електроніки, де оператор може порівняти досліджуваний зразок з еталоном (рис. 2.13).



Рисунок 2.13 – Програма порівняння досліджуваного зразка з еталоном

Оператор, що аналізує якість поверхні друкованої плати, легко виділяє і

розпізнає на зображенні її окремі елементи (провідники, зазори, сторонні предмети, неякісні елементи поверхні діелектрика і т. д.). На об'єкти, які його не цікавлять зараз, він просто не звертає уваги і легко виключає їх з аналізу. Якщо його запитати, яким чином він відрізняє різні елементи друкованої плати, він спробує назвати деякі формальні ознаки (розмір і форма провідника, колір і текстура діелектричної основи), але навряд чи у процесі реальної роботи він вимірює чи упереджено оцінює кожен елемент. Він просто, виходячи зі свого досвіду, візуально впізнає дефект.

При комп'ютерній обробці, після введення зображення всі пікселі є рівноцінними по можливості віднесення їх до якогось типу об'єктів. Для розпізнавання аналогічно тому, як їх дізнається людина, потрібно визначити формальні ознаки, якими їх можна виділити із зображення в конкретні елементи і потім класифікувати, тобто визначити тип об'єкта.

Системи АОІ використовують сучасну оптику, апаратне та програмне забезпечення, а також бібліотеки різних алгоритмів знаходження дефектів. Ці алгоритми працюють на підставі логічних правил, що впливають на прийняття остаточних рішень. Система отримує зображення друкованої плати, що перевіряється, і порівнює його з «еталонною» панеллю, що зберігається в пам'яті АОІ. Як зразок можуть бути використані дані САD, фотошаблони та еталонна друкована плата. Різні алгоритми знаходження дефектів аналізують невідповідності між перевіреною та еталонною панелями та приймають рішення, чи є дані відмінності дефектом чи ні. Весь процес прийняття рішень базується на перевагах та установках користувача.

Далі подано схематичний принцип роботи систем АОІ (рис. 2.14).

Отримання зображення – оптичний блок, що включає об'єктив, системи освітлення і скануючу камеру, передає зображення друкованої плати для подальшої обробки.

Попередня обробка зображення – обробка та підготовка отриманого зображення порівняно з еталоном.

Аналіз – проводиться перевірка зображень з використанням алгоритмів

знаходження дефектів, що здійснюють порівняння підготовленого зображення з еталонним та працюють у межах дозволених допусків.

Рішення – прийняття рішення про відповідність або невідповідність плати еталону, що базується на правилах і перевагах користувача.

Аналізатор дефектів маркує місце розташування дефекту, класифікує його з урахуванням правил, визначених користувачем, і передає дані подальшої верифікації, управління та стабілізації виробничого процесу.

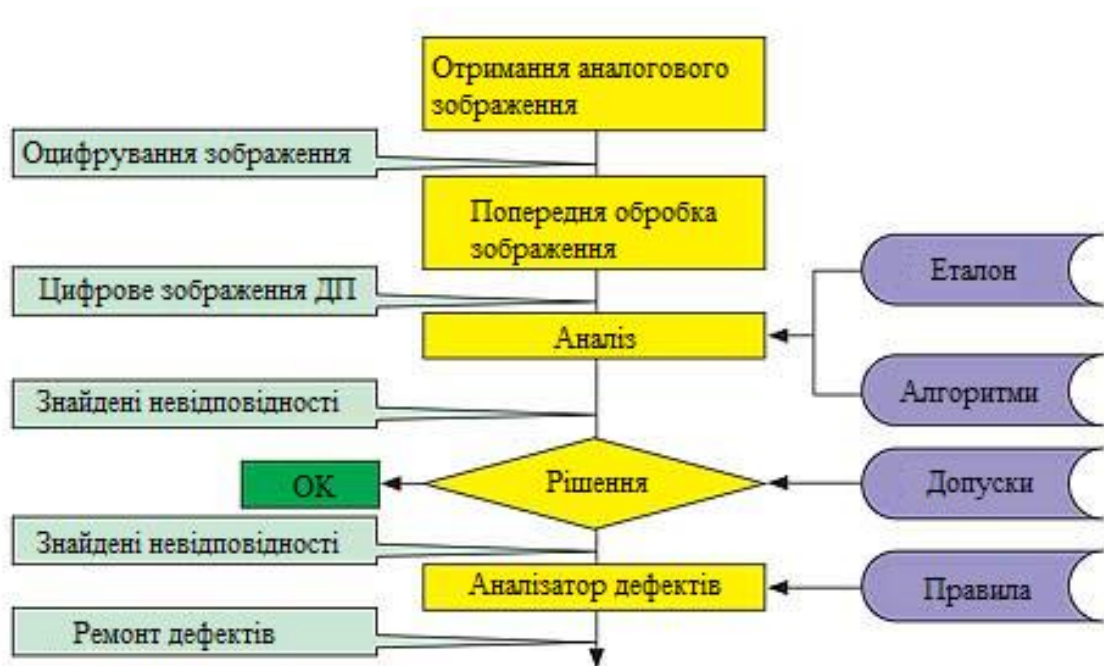


Рисунок 2.14 – Структурна схема розпізнавання дефектів

Сучасні системи АОІ використовують дублюючі методи знаходження дефектів та елементи штучного інтелекту для забезпечення високого рівня детектування за нульової кількості помилкових спрацьовувань.

Кожен піксель зображення має унікальні координати X та Y , значення яскравості та (або) кольору відповідно до колірної моделі. Пікселі, що утворюють об'єкти зображення, часто відрізняються від фону за цими властивостями, що дозволяє виділити пікселі зображення, що мають однакові значення яскравості або кольору, тобто відповідні об'єктам.

Виділення за яскравістю здійснюється за гистограмою яскравості, на якій

вручну або автоматично за допомогою спеціального алгоритму виділяються інтервали яскравості, що відповідають об'єктам. Піки на гістограмі, як правило, відповідають близьким за яскравістю, однорідним ділянкам зображення, тобто об'єктам та фону. Для виділення аналізованої області необхідно встановити межу інтервалу посередині між піками. Наприклад, для темних об'єктів фотошаблону, які знаходяться на світлому фоні, потрібно виділяти темний пік, а для світлих на темному тлі – білий пік.

Виділення об'єктів за кольором, як правило, є складнішим завданням, оскільки використовуються різні колірні моделі, всередині яких треба виділити область колірного простору, що відповідає об'єктам. Для кожної колірної складової виділяється свій інтервал яскравості, а поєднання інтервалів визначає задану область колірного простору.

Виділення за кольором або яскравістю чудово працює для багатьох конструкцій друкованих плат, як показано на (рис. 2.15). Однак існує багато зображень, на яких елементи малюнка друкованих плат мають схожі яскравості та кольори та відрізняються лише внутрішньою текстурою. Під текстурою розуміється упорядкований візерунок (малюнок), який утворюють пікселі, що формують зображення об'єкта. Варіації цього візерунка може бути пов'язані з розкидом яскравості, характером розподілу точок різної інтенсивності, спрямованістю.

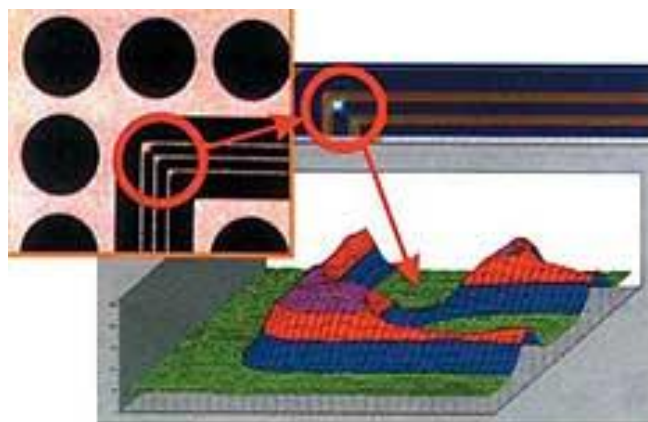


Рисунок 2.15 – Гістограми зображень провідників із звуженням зазорів

Контроль друкованих плат може бути визнаний доцільним на всіх операціях виготовлення друкованих плат, за результатами яких робляться висновки про дефектність плати та приймається рішення про її відбракування або ремонт. Використовується спеціалізована система сканування перевірки друкованих плат, обладнана моторизованим предметним столом, цифровою камерою і комп'ютером з програмним забезпеченням. Робота системи полягає у послідовному введенні зображень окремих фрагментів плати, їх «зшивання» в єдине зображення та порівняння останнього з еталонним зображенням плати. Еталонні зображення знаходяться у вбудованій базі даних (електронній бібліотеці) і перед встановленням оператора. В результаті порівняння тестованої плати з еталоном області розбіжності виділяються кольором. Класифікація дефектів здійснюється оператором шляхом вибору типу дефекту з меню. Координати дефекту фіксуються автоматично. Процес тестування закінчується формуванням протоколу, куди заноситься інформація, куди входять код оператора, код зразка, автоматично розпізнаний номер плати, перелік дефектів, висновок оператора, його коментарі та, за необхідності, зображення плати.

2.4 Висновки до розділу 2

З розглянутої технології виготовлення друкованих плат видно, що їх виготовлення вимагає великих матеріальних витрат. Однак життєвий цикл продукту не закінчується, коли він виготовлений, він триває, поки його не використають і не викинуть, тому виробник повинен експериментувати з готовим продуктом, щоб надалі використовувати продукт для його вдосконалення та забезпечення його ремонтпридатності. Експериментування та покращення якості продукції після такого енергоємного виробництва вимагає ресурсів компанії, як матеріалів, так і кваліфікації. Крім того, після прийняття рішення про вдосконалення продукту необхідно переглянути технологію його виробництва і навіть придбати та замінити обладнання чи програми, які вже діють. Тому сучасні тенденції розвитку технології виробництва вимагають від

виробників випробування своїх виробів. Пропонується детальніше розглянути методи випробовування гнучких комутаційних систем і розробити власний метод випробувань.

3 МЕТОДИ ВИПРОБУВАННЯ ГНУЧКИХ КОМУТАЦІЙНИХ СТРУКТУР

3.1 Електричний метод

В електричних методах (табл. 3.1) використовують дві системи тестування: Матричне тестування (ложе цвяхів) це – використання матричної системи тестування для кожного типу плат виготовляється спеціальний перехідний адаптер, на який згодом накладається плата, що тестується. Перевага методу – висока швидкість перевірки, недолік – велика вартість адаптера. У результаті матричне тестування є доцільним для перевірки великих партій друкованих плат обмеженої номенклатури. При безадаптерному тестуванні (літаючі щупи) виготовлення додаткових пристроїв не потрібне. Над поверхнею плати пересуваються головки із зондами, зазвичай по дві чи чотири на кожен бік плати, і опускаються на контактні майданчики друкованої плати, що тестується. Швидкість перевірки даним способом нижча, ніж адаптерним. Однак цей метод тестування вигідний під час перевірки невеликих партій плат.

Таблиця 3.1 – Співставлення методів тестування

Електричне матричне тестування	Електричний тестер із «літаючими щупами»	Автоматичне оптичне тестування
Основні переваги		
Надійні результати тестування плат як електричного виробу; можливість тестування будь-якого типу плат; висока продуктивність при великих партіях обмеженої номенклатури	Надійні результати тестування плат як електричного виробу; можливість тестування будь-якого типу плат; переваги при тестуванні обмежених обсягів плат широкої номенклатури	Можливість тестування фотошаблонів; висока продуктивність процесу; відсутність додаткових витрат; швидке визначення розташування дефектів

Продовження таблиці 3.1

Електричне матричне тестування	Електричний тестер із «літаючими щупами»	Автоматичне оптичне тестування
Основні недоліки		
Відсутність можливості тестування фотошаблонів; висока вартість адаптера; складність визначення точного розташування дефектів	Відсутність можливості тестування фотошаблонів; велика, порівняно з адаптерним та оптичними методами, тривалість тестування	Аналізуються не електричні з'єднання, а їх зображення; результати оптичного тестування можуть потребувати перевірки іншими методами; відсутня тестування металізації отворів

На рис. 3.1 показаний приклад виявлення та нормування дефектів суміщення отворів з контактними майданчиками. Стандарти МЕК та ІРС нормують ці зсуви для різних класів апаратури, що відрізняються мірою відповідальності та умовами експлуатації.

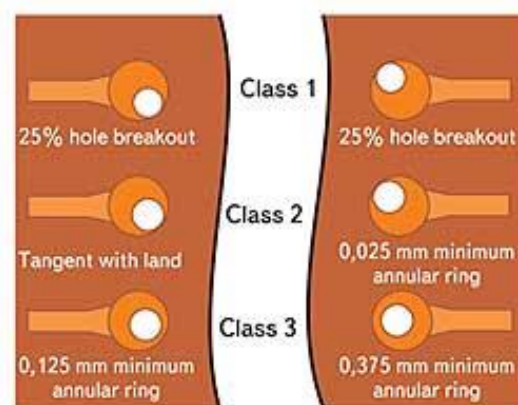


Рисунок 3.1 – Оцінка зміщення елементів міжз'єднань

На рис. 3.2 показані приклади усунення покривної плівки з контактними

майданчиками.



Рисунок 3.2 – Дефекти поєднання перфорації покривної плівки з контактними майданчиками

3.2 Металографічний аналіз друкованих плат

Найбільш достовірно контроль металізації отворів та внутрішніх з'єднань МПП виконується за допомогою мікросліфів. По мікросліфів можна виявити порушення форми елементів сполук, дефекти зрощування металізації з контактним майданчиком внутрішнього шару, глибину підтравлювання діелектрика в МПП, якість механічної обробки отворів, товщину міжшарової ізоляції та інші важливі елементи внутрішньої структури друкованих плат (рис. 3.3). У стандартах нормується якість металізації залежно від відповідальності апаратури (рис. 3.4).

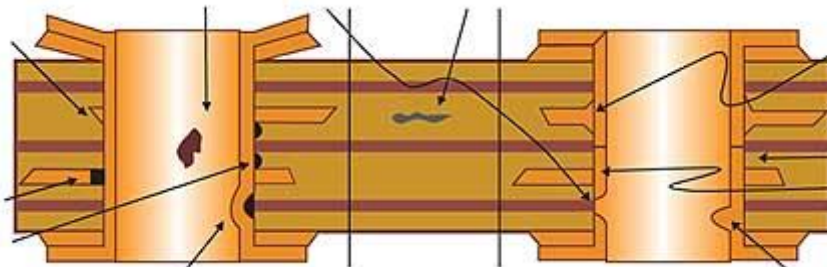


Рисунок 3.3 – Характерні дефекти міжз'єднань у багатошарових платах, що виявляються металографічним аналізом

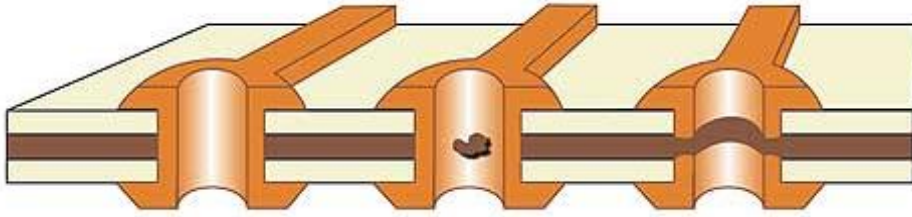


Рисунок 3.4 – Нормування якості металізації наскрізних отворів: ліворуч – відмінно; посередині – прийнятно; справа – неприпустимо

Виготовлення мікрошліфів пов'язане з руйнуванням зразків, що виключає застосування цього методу для контролю металізації отворів на робочому полі плати, а результати вимірювань товщини міді по мікрошліфам отворів, розташованих на технологічних шарах, можуть дати помилкові результати: при недостатній розсіюючій здатності електролітів внаслідок крайового ефекту товщина металізації на краях плати може бути невизначено більше, ніж на робочому полі плати. Однак при відпрацюванні методів контролю вибір критеріїв придатності за товщиною та якістю металізації отворів може бути здійснений тільки за перерізом мікрошліфів.

На перших етапах відпрацювання нових технологічних процесів металографічний контроль друкованих плат за мікрошліфами тест-елементів технологічного поля є обов'язковим для кожної плати. У міру відпрацювання процесу контроль по мікрошліфа стає вибіркоким і служить лише для перевірки стабільності технологічного процесу.

Для отримання плоскої поверхні зрізу зразок встановлюється у фторопластову форму і заливається компаундом, наприклад, епоксидним компаундом холодного затвердіння або акрилатними складами (такими, як бутакрил технічний, тощо). Може успішно застосовуватися опресування зразка пластмасами гарячого затвердіння. Заливальний склад повинен мати хорошу адгезію з поверхнею зразка. При механічній обробці шліфу необхідно передбачити заходи, що унеможливають нагрівання зразка. Зріз слід відшліфувати і відполірувати відомими способами, застосовуючи все більш

тонкі абразиви. Шліфування виробляють на тканині, закріпленій на колі, що обертається, від самої грубої до найтоншої зернистості абразиву. При переході на більш дрібнозернистий абразив необхідно дотримуватись особливої обережності та чистоти, щоб не перенести частки більшого абразиву на операцію більш тонкої обробки. Щоб уникнути змащування металів, слід обробку шліфу вести під кутом 45° до зразка, а не вздовж або впоперек зразка. Переходити до наступної стадії шліфування можна тільки тоді, коли сліди попередньої стерлися. Остаточне оздоблення мікрошліфа – полірування – проводиться на більярдному сукні або авіаційній повсті (кордному фетрі), натягнутому на диски. Частота обертання – диска від 50 об/хв до 500 об/хв.

При шліфуванні зрізу необхідно витримувати перпендикулярність площини зразка до площини шліфування, а зріз виконувати точно по осі отвору (рис. 3.5), інакше неминуче виникають помилки в оцінці товщини металізації.

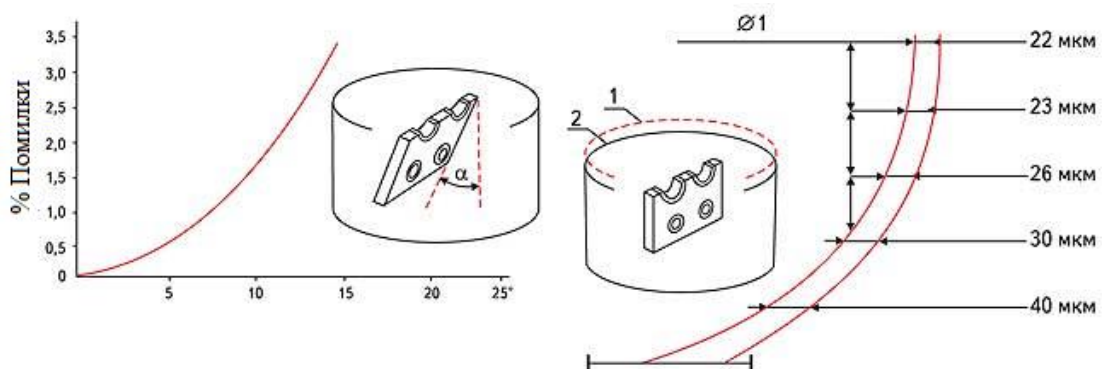


Рисунок 3.5 – Розмір помилок, викликаних відхиленням від перпендикулярності перерізу мікрошліфа та неспіввісністю різу

Тривалість обробки мікрошліфа на пастах ГОІ не повинна перевищувати: на грубій від 3 хв до 5 хв, на середній від 2 хв до 3 хв, на тонкій від 1 хв до 2 хв. Велика тривалість полірування призводить до завалювання країв покриттів різної твердості і внаслідок цього – втрати чіткості меж розділу при спостереженні під мікроскопом. Для виявлення кристалічної структури покриття та отримання контрасту між покриттями застосовується хімічне травлення

мікрошліфу. Далі наводяться два склади травлячих розчинів, що застосовуються у технології друкарського монтажу.

Розчин №1:

- біхромат калію – 2 г;
- вода – 100 мл;
- хлористий натрій, насичений водний розчин – 4 мл;
- сірна кислота – 8 мл;
- 3 % водний розчин перекису водню – 50 мл;
- 25 % водний розчин аміаку – 50 мл.

Полірування потрібно проводити алмазними пастами чи пастах ГОІ, склад яких наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Склад пасты ГОІ

Компоненти пасты	Вміст %		
	Груба паста	Середня паста	Тонка паста
Окис хрому	81	76	74
Силікагель	2	2	18
Розщеплений жир	5	10	10
Олеїнова кислота	–	–	2
Сода двовуглекисла	–	–	0,2
Гас	2	2	2

Тривалість обробки мікрошліфа на пастах ГОІ не повинна перевищувати: на грубій від 3 хв до 5 хв, на середній від 2 хв до 3 хв, на тонкій від 1 хв до 2 хв. Велика тривалість полірування призводить до завалювання країв покриттів різної твердості і внаслідок цього – втрати чіткості меж розділу при спостереженні під мікроскопом. Для виявлення кристалічної структури покриття та отримання контрасту між покриттями застосовується хімічне травлення мікрошліфу. Далі наводяться два склади травлячих розчинів, що застосовуються у технології друкарського монтажу.

Розчин №1:

- біхромат калію – 2 г;
- вода – 100 мл;
- хлористий натрій, насичений водний розчин – 4 мл;
- сірна кислота – 8 мл;
- 3 % водний розчин перекису водню – 50 мл;
- 25 % водний розчин аміаку – 50 мл.

Перед травленням мікрошліфи необхідно промивати у спирто-бензиновій суміші для видалення залишків жирів від операції полірування пастою ГОІ, потім обмивати водою та висушувати спиртом.

Товщину та якість покриттів контролюють за допомогою звичайних або металографічних мікроскопів зі збільшенням від 50 разів до 200 разів. При ретельному виготовленні мікрошліфа можна досягти точності виміру товщини покриття $\pm 0,7$ мкм.

Вимоги до якості металізації та обробки отворів друкованих плат полягають у наступному:

- товщина мідного гальванопокриття в отворі має бути не менше 25 мкм;
- глибина підтравлювання діелектрика повинна бути в межах від 10 мкм до 30 мкм;
- мідне гальванопокриття не повинно мати грубого кордону з торцями контактних майданчиків на внутрішніх шарах;
- поверхня міді у отворах повинна мати захисне покриття заданої товщини;
- не допускаються металеві вкраплення в об'ємі діелектрика та сторонні включення в металевих покриттях;
- металізація отворів має бути суцільною, щільною, дрібнозернистою з мінімальними міжкристалітними прошарками.

Для виготовлення мікрошліфів давно практикується використання комплекту лабораторного обладнання: штамп для вирубання зразків, ручний

прес для опресування зразків у прес-формі; пилка для точного розрізу зразка по осях отворів ; полірувальна машина для доведення поверхні мікрошліфа . На (рис. 3.6) показані приклади мікрошліфів, виконаних з використанням техніки.



Рисунок 3.6 – Приклади мікрошліфів, виконаних з використанням техніки

3.3 Рентгеноспектральний флуоресцентний аналіз друкованих плат

Основним завданням рентгеноспектрального аналізу є якісне та/або кількісне визначення хімічного складу досліджуваного зразка. Рентгеноспектральний аналіз дозволяє визначити практично всі хімічні елементи, за винятком низки найлегших. Він відрізняється високою точністю: у окремих випадках похибка аналізу вбирається від 0,1 % до 0,3 %. Для рентгеноспектрального аналізу характерні висока продуктивність, що досягає сотень елементів визначень на годину, і можливість практично повної автоматизації. Тому рентгеноспектральний аналіз широко застосовується в техніці та наукових дослідженнях [12].

Можливість визначення складу рентгенівськими методами полягає в тому, кожен елемент періодичної системи має індивідуальним, властивим лише йому характеристичним рентгенівським спектром. Щоб здійснити аналіз, необхідно передусім порушити характеристичне випромінювання атомів зразка та

дослідити його спектральний склад за допомогою спектрометра. Вимірявши довжини хвиль характеристичного спектру, можна, використовуючи таблиці довжин хвиль характеристичних ліній елементів, визначити елементний склад зразка (виконати рентгеноспектральний аналіз).

Порушення характеристичного випромінювання атомів досліджуваного зразка може бути досягнуто шляхом його бомбардування швидкими електронами (аналіз первинних спектрів) або шляхом опромінення рентгенівськими променями (аналіз за вторинними спектрами, або флуоресцентний аналіз).

При аналізі первинних спектрів досліджуваній зразок поміщають у вакуум. Системи фокусування та відхилення електронного пучка дають можливість проводити аналіз у мікрообсязі та в заздалегідь обраній ділянці поверхні зразка (локальний мікроаналіз). Слід зазначити складнощі, що виникають при дослідженні складу діелектриків (заряд поверхні первинними електронами) та легкоплавких металів та матеріалів (випар під дією електронного пучка).

Найбільшого поширення набув флуоресцентний метод аналізу. Аналіз флуоресцентного випромінювання має деякими перевагами порівняно з аналізом за первинними спектрами: зразок розташовується поза вакуумним об'ємом, в ході аналізу зразок не нагрівається, тому його хімічний склад не змінюється; у вторинному спектрі відсутня фон, характерний для гальмівного випромінювання, завдяки чому підвищується контрастність аналізованих ліній, а отже, і чутливість методу. Однак слід зазначити недолік флуоресцентного аналізу: вторинні спектри мають малу інтенсивність; для легкоатомних зразків обмежено можливість аналізу з атомними номерами менше 12.

Фізичною основою аналізу складу за рентгенівськими спектрами є однозначний зв'язок між атомним номером хімічного елемента і довжинами хвиль рентгенівського характеристичного випромінювання, що генерується ним. Флуоресцентне випромінювання збуджується внаслідок поглинання фотона атомом речовини (рис. 3.7). При досить великій енергії первинного фотона h

може статися іонізація оболонки атома, включаючи К-оболонку, внаслідок чого атом залишає електрон з енергією $W_{\text{кін}}$. На місце, що звільнилося в К-оболонці перейде електрон з L-оболонки. При цьому випускається фотон характеристичного випромінювання hK і т. д. У результаті в атомі спостерігатиметься цілий ряд переходів електронів між вищими та нижчими рівнями енергії, що супроводжуються емісією фотонів характеристичного випромінювання, яке називається флуоресцентним. Ця назва підкреслює, що характеристичні промені виникли при опроміненні речовини фотонами, а чи не електронами.

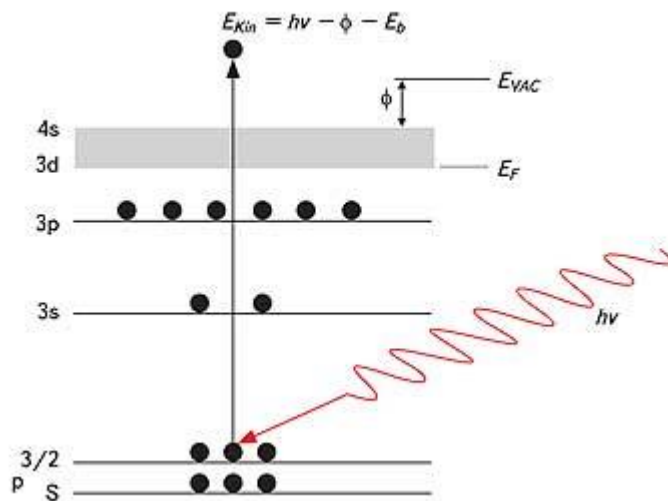


Рисунок 3.7 – Схема збудження вторинного випромінювання

Усі переходи, які закінчуються на К-рівні, призводять до випромінювання К-серії; переходи, що закінчуються на рівнях L, – до випромінювання L-серії і т. д. Імовірність переходів неоднакова, тому інтенсивність рентгенівських Характеристичних ліній різна (рис. 3.8). Характеристичні спектри хімічних елементів подібні до будови, що обумовлено однаковою структурою внутрішніх оболонок. Експериментально встановлено, що зі збільшенням порядкового Номери елемента спектри зміщуються у бік коротких довжин хвиль, тобто вищих частот (закон Мозлі).

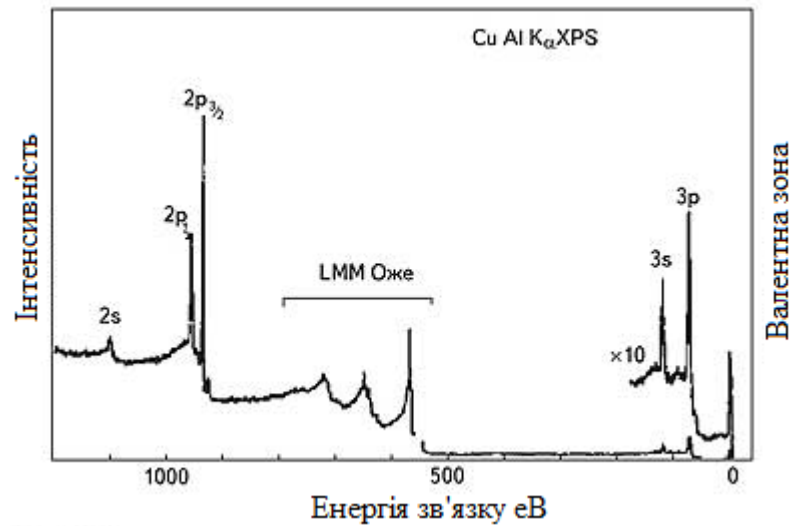


Рисунок 3.8 – Спектри випромінювання міді

Характеристичне рентгенівське випромінювання, що виникло в досліджуваному зразку, аналізується за допомогою спектрометрів. На відміну від видимої частини спектра, рентгенівське випромінювання прозоре для звичайної оптики. Тому для рентеноспектроскопії вимушено використовуються дифракційні методи, які поділяються на дві групи: кристал-дифракційні та енергодисперсійні (безкристальні).

У кристал-дифракційних спектрометрах для виділення заданої лінії спектру з флуоресцентного випромінювання зразка використовується дифракція випромінювання на кристалі.

Якщо змінювати кут між випромінюванням та дифракційними решітками, що утворюються кристалом, шляхом повороту кристала, то для всіх довжин хвиль, що входять у випромінювання зразка, буде послідовно виконуватися умова дифракції цьому кристал-аналізаторі. Відбувається розкладання рентгенівського спектру за довжинами хвиль. Випромінювання реєструється детектором.

Для розкладання рентгенівського випромінювання спектр використовують спектрометри з плоскими і вигнутими кристалами (рис. 3.9).

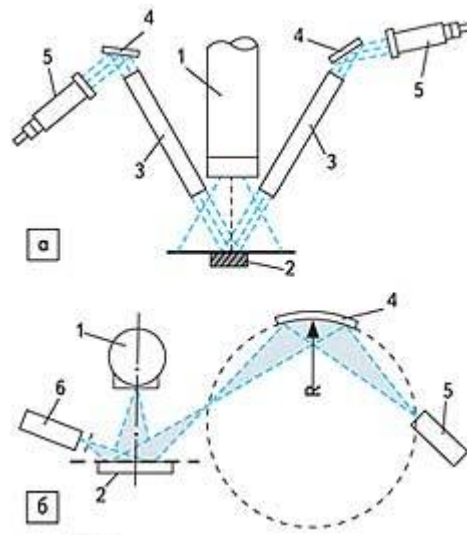


Рисунок 3.9 – Схеми розкладання рентгенівського випромінювання у спектр

Спектрометр з плоским кристалом має високу світлосилу, обумовлену тим, що одночасно використовується для відображення майже всю поверхню великого плоского кристала. Однак його роздільна здатність низька. Високу роздільну здатність можна забезпечити при використанні спектрометрів, в яких застосовуються різні рентгенооптичні фокуруючі схеми з вигнутим кристалом.

Одним з таких спектрометрів є спектрометр по схемою Кошуа Рентгенівський флуоресцентний спектрометр (рис. 3.10) складається з трьох основних вузлів: рентгенівської трубки, випромінювання якої збуджує спектр флуоресценції досліджуваного зразка, кристала-аналізатора для розкладання променів спектр та детектори для вимірювання інтенсивності спектральних ліній.

Різниця енергій електронного переходу з одного рівня на інший $E_{1,2}$ індивідуальна для кожного атома. Ця обставина використовується у рентгенофлуоресцентному аналізі. Положення ліній у РФА легко оцінити, використовуючи закон Мозлі:

$$\Delta E = hv \left((2\pi m_e e^4 (Z - \xi)^2) h^2 \right) \left(\frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n_1^2} \right), \quad (3.1)$$

де h – постійна Планка, Дж·с;

ν – частота рентгенівської лінії, Гц;

m_e – маса електрона, МеВ/с;

e – заряд електрона, Кл;

Z – атомний номер елемента;

ξ – постійна екранування;

n_0 та n_1 – основні квантові числа початкового та кінцевого станів.

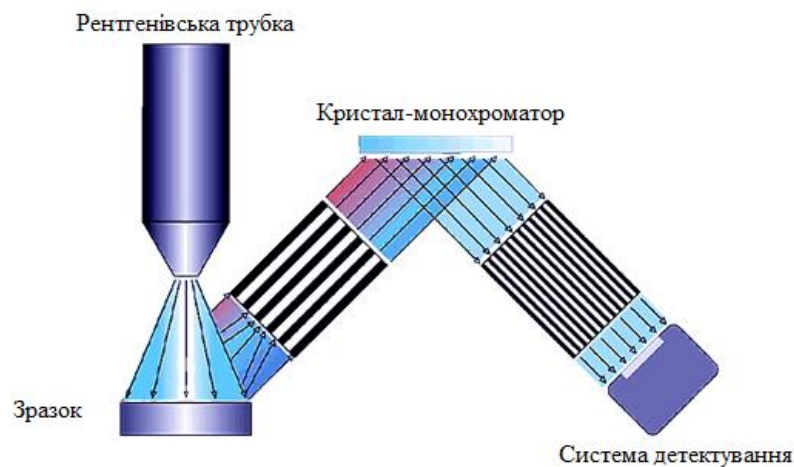


Рисунок 3.10 – Рентгенівський флуоресцентний спектрометр

Перехід від вимірної інтенсивності аналітичної лінії до змісту елемента, що визначається – етап, що завершує процес рентгенофлуоресцентного аналізу. Основне його завдання – забезпечити отримання правильного значення концентрації елемента в аналізованому зразку. Це завдання вирішують у різний спосіб залежно від ступеня складності складу проби. Розглянемо найбільш поширену класифікацію, виділяючи дві групи методів аналізу, що відрізняються визначенням відносної інтенсивності аналітичної лінії.

Якщо інтенсивність аналітичної лінії елемента порівнюють з інтенсивністю будь-якої іншої лінії, зареєстрованої у певній послідовності або одночасно від того ж випромінювача, то аналіз виконують способом внутрішнього стандарту. Як внутрішній стандарт може бути використаний будь-

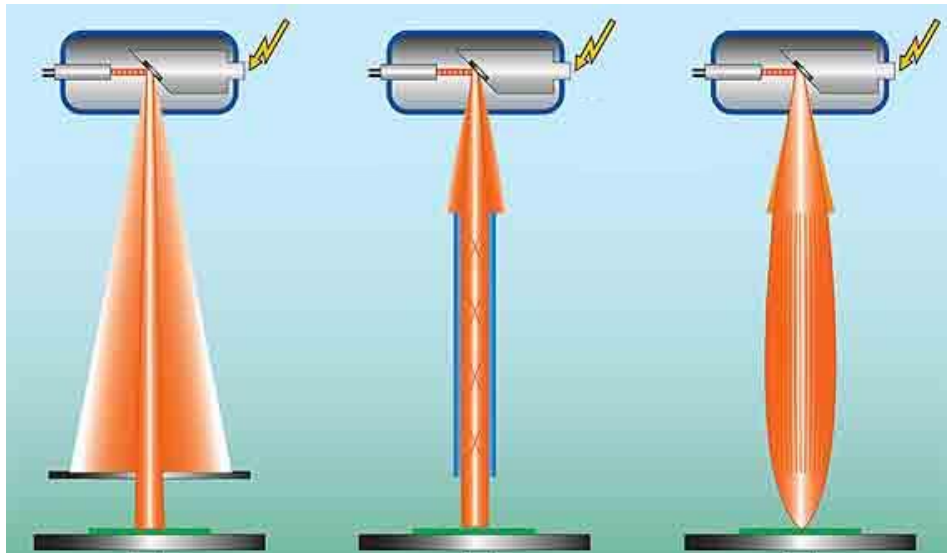
який сигнал, зареєстрований від проби та змінюється при зміні умов аналізу за тим самим законом, як і аналітична лінія. Якщо при знаходженні концентрації елемента інтенсивність його аналітичної лінії реєструється у певній послідовності або одночасно від незалежного випромінювача, прийнято вважати, що аналіз виконують способом зовнішнього стандарту. У способі зовнішнього стандарту порівнюють інтенсивності аналітичних ліній, зареєстрованих від різних зразків, тому такий спосіб має багато прийомів, що дозволяють враховувати відмінність хімічних складів проб та робочих еталонів.

Особливості виробництва електроніки полягають у мініатюрності елементів міжз'єднань, покриттів, компонентів, розміри яких обчислюються мікронами та частками міліметрів.

З їх розмірами має зіставлятися розмір плями зондування зразків рентгенівським променем. Для його зменшення застосовують різні способи використання апертур та засобів колімації (рис. 3.11). Використання апертур (рис. 3.11, а) – найпростіший спосіб зменшення плями, але він пов'язаний з великими втратами енергії випромінювання і, отже, із втратою чутливості приладу. Засоби колімації (рис. 3.11, б) дозволяють сконцентрувати променеву енергію в обмеженій зоні і, отже, збільшити енергію вторинного випромінювання чи зменшити потужність рентгенівського випромінювання. Полікапілярна лінза (рис. 3.11, в) фокусує вихідне з рентгенівського джерела випромінювання так, що за рахунок її використання формується промінь високої щільності потужності, що покриває дуже малу область зондованої поверхні, що обчислюється мікронами.

Відмінності у товщинах покриттів та вмісті компонентів у сплавах можна реєструвати, вимірюючи та зіставляючи інтенсивність спектральних ліній характеристичного випромінювання відповідних елементів покриттів та композицій.

Використовуючи координатний стіл, можна раструвати поверхню зразка та отримувати інформацію про розподіл того чи іншого елемента або розподіл товщини покриття зразкового зразка.



а) спосіб зменшення плями; б) засоби колімації; в) полікапілярна лінза.

Найбільше просто визначається товщина покриття основи (рис. 3.12) за рахунок вимірювання різниці інтенсивності їх вторинного випромінювання.

Рисунок 3.11 – Різні способи зосередження рентгенівського випромінювання у зоні зондування

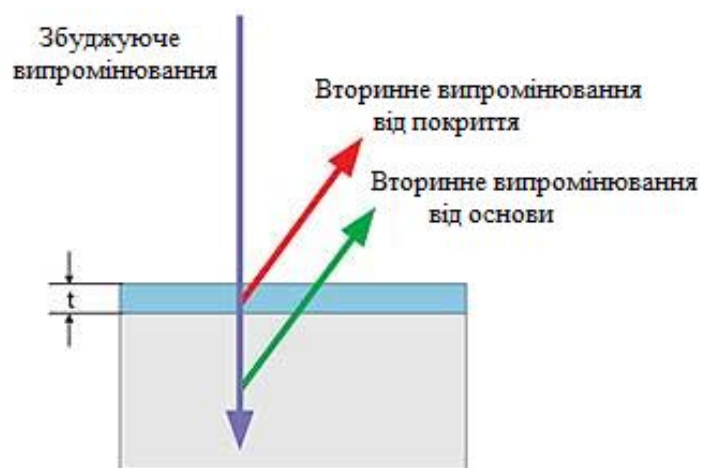


Рисунок 3.12 – Вторинне випромінювання від покриття та основи

Чим товщі плівка покриття, тим інтенсивніше її вторинне випромінювання

і тим більше вона екранує випромінювання основи (рис. 3.13).



Рисунок 3.13 – Залежність інтенсивності вторинного випромінювання основи та плівки покриття від товщини покриття

Прилади флуоресцентного аналізу, з комп'ютерною обробкою спектрів вторинного випромінювання, дозволяють вимірювати товщини багат шарових покриттів (рис. 3.11): двошарових (рис. 3.11, а), тришарових (рис. 3.11, б) та сплавів (рис. 3.11, в).

Прилади рентгенівського флуоресцентного аналізу, що поставляються, відрізняються:

- розміром формованої на зразку плями;
- форматом плат, що розміщуються для аналізу;
- набором стандартних зразків для калібрування аналізатора;
- способом колімації рентгенівського променя.

Наприклад, доречно навести характеристики одного з рентгенівських флуоресцентних мікроскопів SFT9350 японської фірми СІІ.

Удосконалений рентгенівський мікроскоп здійснює високоточний вимір

завдяки поліпшеним характеристикам рентгенівського флуоресцентного випромінювання 75 Вт рентгенівської трубки в поєднанні з дуже маленькими прицільними коліматорами.

В результаті мікроскопи серії SFT9300 можуть вимірювати мікроділянки і тонкі плівки, такі як висновки мікросхем, роз'єми ГДП та ДП, які важко вимірювати традиційними засобами внаслідок недостатньої інтенсивності рентгенівського флуоресцентного випромінювання самих вимірюваних зразків.

Основними перевагами рентгеноспектрального флуоресцентного методу, що використовуються у виробництві електроніки, є:

- можливість визначення багатьох хімічних елементів, крім найлегших, на одному приладі у широкому діапазоні концентрацій, починаючи від 10 % до 100 %;
- простота підготовки зразків плат до аналізу, зокрема, для деяких приладів можливо обійтися взагалі без підготовки проб;
- висока точність аналізу, що обмежується лише представництвом стандартних проб та надійністю даних про склад стандартних зразків, що використовуються для градування;
- висока продуктивність методу: час, необхідний виконання аналізу — залежно від типу приладу, кількості визначених елементів та вимог до точності аналізу, вимірюється хвилинами чи навіть секундами.

3.4 Метод прискорених вібраційних випробувань

Для визначення відповідності виробів подібним високим вимогам необхідне проведення тривалих випробувань великих обсягів вибірок. Для переважної більшості виробів тривалість таких випробувань становить кілька тисяч годин.

У сучасних умовах такий підхід може виявитися абсолютно неприйнятним, по-перше, з точки зору досягнення потрібного результату:

- за великої тривалості не забезпечується необхідна оперативність контролю надійності виробів;

- по при велику задану ймовірність безвідмовної роботи не забезпечується необхідна достовірність контролю та випробувань.

По-друге, з погляду витрат при організації виробництва:

- різке збільшення собівартості через витрати на споживання електроенергії та обслуговування випробувального устаткування;

- різке збільшення терміну випуску виробів (у кілька разів).

Крім того, будь-яке відключення камери, вібростенду або гідропульсатора з різних причин (аварійне відключення електроенергії, паспортна необхідність відключати обладнання, тощо) внесе неприпустимі зміни до процесу.

В результаті вартість та терміни розробки та виготовлення виробу стають не виправдано більшими за відсутності прогнозованого результату.

Сучасні дослідження вчених у сфері надійності спрямовані на скорочення подібних витрат.

Такі методи зветься прискорених випробувань.

Прискорені випробування – вид випробувань, що дозволяють оцінити надійність виробу, скоротивши час випробувань та збільшивши інтенсивність навантаження.

Існують спеціальні випробувальні стенди (рис. 3.14) для дослідження впливу механічних коливань на вихідні параметри радіоелектронних засобів на основі гнучких модулів, що дозволяє проводити лабораторні випробування адаптивної системи зміни натягу гнучких друкованих плат, для подальших коригувань технологічного процесу їхнього виготовлення.

Конструкція дає можливість дослідження саме гнучких модулів радіоелектронних засобів.

Пристрій може використовуватися при випробуваннях впливу механічних коливань бортових радіоелектронних засобів (РЕЗ) у різних галузях їх застосування.

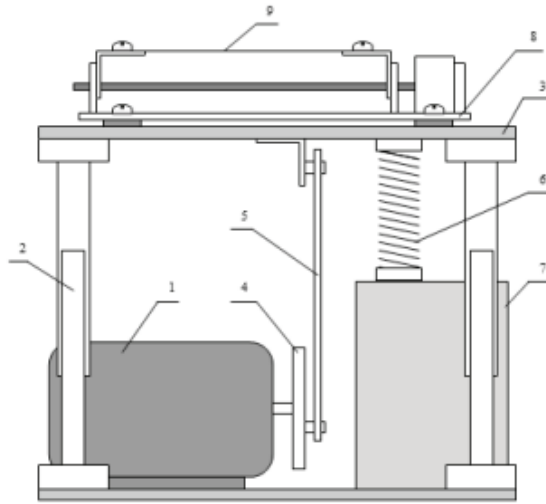


Рисунок 3.14 – Ескіз стенду для дослідження впливу механічних коливань на вихідні параметри РЕЗ

Відмови, до яких призводять різного роду обриви і поломки, остаточно виводять апаратуру з ладу, і її функціонування не відновлюється після припинення впливу вібрації. Прикладами такого роду відмов можуть бути, наприклад, розриви доріжок друкованого монтажу віброуючої плати, руйнування паяних, зварних та клейових з'єднань, обриви висновків резисторів, конденсаторів тощо [13].

Дослідження результатів роботи експериментальної установка дає змогу оцінити вплив механічних вібрацій на гнучкі модулі у складі радіоелектронних засобів. Таким чином, для зменшення впливу вібрацій на РЕЗ на основі гнучких модулів спочатку необхідно виміряти та проаналізувати вплив вібрацій різної амплітуди та частоти на тестовий зразок такого модуля. Аналіз результатів даних вимірів дозволить вносити зміни до подальшої концепції захисту РЕЗ від механічних дій.

В результаті проведених експериментальних досліджень одержано дані, відповідно до яких можна провести аналіз залежностей вихідних параметрів котушки індуктивності при впливі на гнучкий модуль вібрацій різного типу.

Такі методики вже були розроблені стосовно температурних впливів. Це

методики HASS (Highly Accelerated Stress Screens) та HALT (Highly Accelerated Life Test). Вони дозволяють довести виріб до «потрібного місця» кривою відмов.

Моделювання та опис температурних процесів ґрунтується на положеннях, висунутих свого часу Арреніусом.

Енергія активації – це мінімальна кількість енергії, яку потрібно повідомити системі, щоб відбулася реакція. Термін запроваджено Сванте Августом Арреніусом у 1889 році. Типове позначення енергії реакції – E_a .

Для початку процесу, до якого можна віднести і ініціацію прихованого дефекту, області зразка з дефектом необхідно передати енергію, що перевищує поріг енергій, який активує виявлення дефекту.

Режими випробувань, засновані на цьому методі, наведені в багатьох стандартах табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Режимы випробувань

Найменування режиму випробувань	Стандарт
Термоудар	IEC-60068-2-14, Na JIS C 0025, Na DIN EN 60068-2-14, Na MIL-202G, Method 107G, MIL-883F, Method 1010.8, EIAJ ED-7407, EIAJ ED-2531A, JASO D001
Температура – вологість – тиск (Highly Accelerated Stress Test – HAST)	EIAJED 4701, JEDEC, EIA/JESD22-A110-A, IEC60068-2-66

Існує альтернативний спосіб оцінки коефіцієнта прискорення при вібровипробуваннях.

Під тиском все більших вимог до виробів, які піддаються впливу механічних динамічних навантажень протягом життєвого циклу, з'являються все нові й удосконалені методики визначення та прогнозування вібростійкості та віброміцності.

Моделювання руйнування від динамічних факторів може бути описане за допомогою щодо молодій галузі науки про надійність – механіки руйнування. Це розділ механіки, в якому вивчаються конструкційні матеріали та їх здатність

чинити опір руйнуванню під дією зовнішніх сил за наявності втомних тріщин та різних технологічних та експлуатаційних дефектів. При вирішенні завдань у механіці руйнування використовується комплексний підхід до проблеми руйнування, заснований на поєднанні методів механіки суцільних середовищ із методами експериментальної та теоретичної фізики та хімічного металознавства, математичної теорії пружності та будівельної механіки. При цьому завданнями механіки руйнувань є оцінка швидкості зростання тріщини втоми і визначення залишкової міцності, тобто визначення руйнівного навантаження для конструкції, пошкодженої тріщиною.

Механіка руйнування, що базується на результатах суворого математичного аналізу пружних напруг і деформацій поблизу вершини тріщини у випадках крихкого і квазікрихкого руйнувань, називається лінійною механікою руйнування. Основний параметр, що використовується в лінійній механіці руйнування, – коефіцієнт інтенсивності напруг K , який є параметром аналітичних виразів, що описують напружено деформований стан поблизу вершини тріщини.

При стійкому зростанні тріщин у разі дії змінних навантажень швидкість зростання втомних тріщин виявляється досить добре корельованою з амплітудою K . Параметри залежності швидкості росту тріщин від K та кількості циклів навантаження є характеристикою матеріалу.

В даний час найбільш ймовірною динамічною моделлю руйнування вважається руйнування втоми. При дії певної кількості циклів навантаження у матеріалі навколо характерних утворень (кордон зерна, мікродефект та ін.) накопичуються дислокації, які надалі виявляються у вигляді макродефектів: так зароджується тріщина втоми. Вершина тріщини є концентратором напруги: в результаті поле напруг у зразку перерозподіляється в околиці вершини тріщини. Для багатьох матеріалів тріщини втоми ростуть рівноважно до характерного розміру визначеного для кожного матеріалу та вектора параметрів навантаження, після чого настає миттєве зростання тріщини і руйнується виріб. Такий розмір тріщини називається критичною довжиною тріщини. Швидкість

зростання тріщини залежить:

- від властивостей матеріалу (модуль пружності, межа пружності, межа пластичності, межа повзучості, межа міцності, структура матеріалу, склад);
- від характеру навантаження, що додається (значення постійної та динамічної складової, їх співвідношення, періодичність, особливості застосування навантаження);
- від зовнішніх умов (температура, вологість, тиск, наявність хімічно активних речовин).

Усі зазначені фактори практично неможливо оцінити аналітично, тому для кожного матеріалу та виду навантаження будуються емпіричні криві втоми. Вони апроксимуються формулою Періса – це емпірична формула зростання тріщини втоми:

$$\frac{dl}{dN} = C(\sigma\sqrt{\pi l})^m, \quad (3.2)$$

де σ – напруга в матеріалі, МПа;

l – довжина тріщини м;

N – кількість циклів;

C, m – емпіричні коефіцієнти.

При інтегруванні з граничними умовами досягнення довжини тріщини критичного значення $l = l_0$ отримуємо залежність числа циклів від напруги. За цими рівняннями будуються втомні діаграми матеріалу, які зветься кривих втоми (рис. 3.15).

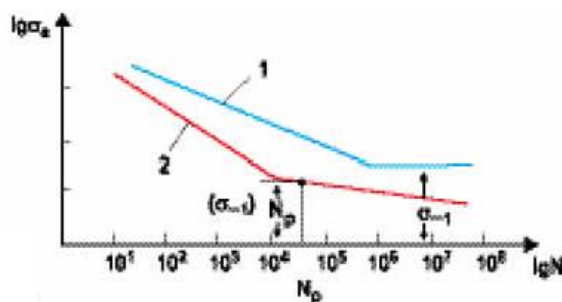
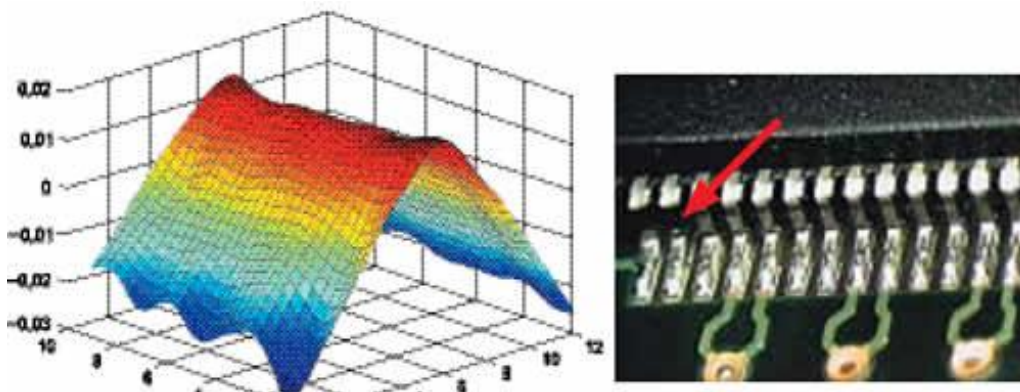


Рисунок 3.15 – Крива втоми

Ці криві описують залежність фактора, що навантажує, від тимчасового фактора. Криві втоми будуються на логарифмічній шкалі. На кривій втоми видно, скільки циклів навантаження потрібно для матеріалу до його руйнування при заданому значенні напруги в матеріалі.

Існує рівень впливу, що навантажує, при якому час програми навантаження необмежено. Цей рівень навантаження називається межею втомої міцності. Для різних матеріалів та для різних умов навантаження він різний. Межа втомої міцності позначається σ_1 (рис. 3.16).



- а) поле деформацій друкованої плати при дії синусоїдальної вібрації;
 б) при дії ШСВ 9,8-28g (СНЗ) у діапазоні частот від 20 Гц до 2000 Гц

Рисунок 3.16 – Втомне руйнування

У цій галузі було проведено багато досліджень, і практично для всіх матеріалів збудовано криві втоми.

Теза, що використовується при прискоренні виявлення дефекту, ґрунтується на принципі прискорення випробувань за допомогою збільшення навантаження на зразок. Але замість положень Арреніуса тут використовуються положення механіки руйнування: що більше напруги у матеріалі, то менше циклів до його руйнації.

При дії синусоїдальної вібрації з постійною амплітудою фактором, що навантажує, буде середньоквадратичне значення прискорення, тимчасовим

фактором – кількість циклів навантаження. При дії широкосмугової випадкової вібрації (ШВВ) навантажуючим фактором буде середнє неквадратичне значення (СНЗ) прискорення, тимчасовим фактором буде час дії випадкової вібрації. Цікаво відзначити, що форма кривих втоми практично не залежить від розподілу спектральної густини потужності. (При збільшенні інтенсивності навантаження рекомендується дотримуватися конгруентності базового та посиленого профілів.)

Форма кривих втоми суттєво відрізняється при дії широкосмугової випадкової вібрації та синусоїдальної вібрації.

Дані основні положення дозволяють оцінити залежність між навантаженням та часом навантаження. Далі показані припущення та викладки, які дозволяють чисельно визначити коефіцієнт прискорення.

Руйнування виробів проходить механізмом лінійного зростання тріщини втоми. Отже, формула, що описує зростання тріщини втоми, може із заданою точністю визначити час до руйнування.

Матеріал немає межі втоми. Тому крива втоми описується рівнянням:

$$N = C \times \sigma^{-m}, \quad (3.3)$$

де N – кількість циклів до руйнування при напрузі в матеріалі;

σ – напруга в матеріалі, МПа;

C, m – емпіричні коефіцієнти для матеріалу та способу навантаження.

Оскільки тріщина втоми зростає лінійно, запас міцності виробу можна оцінювати як:

$$n/N = \sigma^m / C, \quad (3.4)$$

де n – поточна кількість циклів;

N – кількість циклів до руйнування при напрузі у матеріалі;

σ – напруга в матеріалі, МПа;

C, m – емпіричні коефіцієнти для матеріалу та способу навантаження.

Напруга в матеріалі σ лінійно залежить від навантаження θ , що додається (наприклад, середньоквадратичного значення прискорення при дії синусоїдальної вібрації або ШСВ, м/с²):

$$\sigma \sim \theta. \quad (3.5)$$

З цього можна зробити висновок: навантаження, що додається, пропорційна запасу живучості міцності і кількості циклів навантаження:

$$n/N = \sigma^m n/C \sim \theta^m n/C. \quad (3.6)$$

Кількість циклів навантаження при імітації відповідає кількості циклів при впливі реального навантаження при експлуатації, транспортуванні та ін. Звідси можна зробити висновок, що кількість циклів n навантаження при впливі реального навантаження пропорційно часу навантаження:

$$n/N \sim \theta^m T/C. \quad (3.7)$$

При цьому слід враховувати таке:

- даний спосіб не придатний для оцінки прискорення випробувань, якщо характерні процеси руйнування виробу проходять не по механізму втоми;
- виріб може складатися з різних матеріалів, які мають різні характеристики втоми (m, C) (рис. 3.17);
- для того самого матеріалу втомні характеристики можуть змінюватися в залежності від зовнішніх умов або можуть бути некоректно визначені;
- час та характер впливу не завжди точно можуть бути відтворені на випробувальному стенді;
- напруги, які у матеріалі виробу, можуть мати нелінійну залежність від зовнішніх впливів;

– для сталі рівень напружень при тесті може виявитися вищим за межу втомної міцності, в той час як реальний вплив буде нижчим. Розподіл амплітуд у спектрі може відрізнятись під час експлуатації та випробування на стендах.

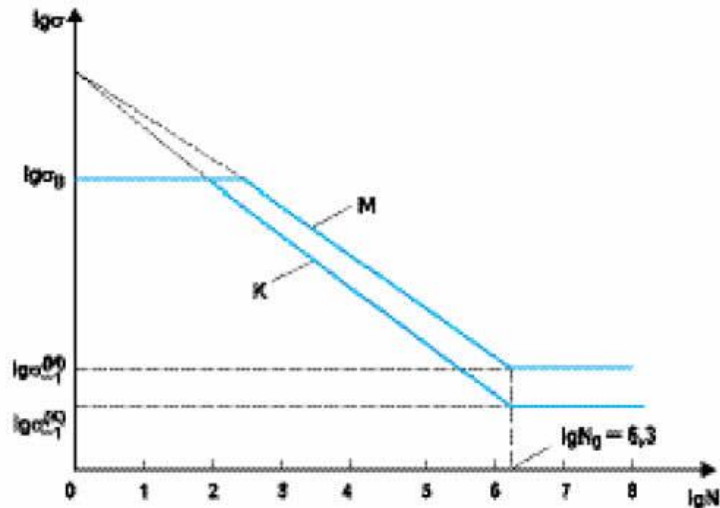


Рисунок 3.17 – Відмінності кривих втоми для матеріалу (M) та конструкції зразка (K)

Для різних конструкційних матеріалів втомна характеристика m варіюється від 5 до 25. Американський військовий стандарт MIL-STD-810E рекомендує значення $m = 6$ для випробувань на дію синусоїдальної вібрації та $m = 8$ для впливу ШСВ. Для конструкційних матеріалів, що застосовуються у виробках середньої складності, такі значення коефіцієнта призводять до задовільної кореляції результатів, але при застосуванні даного методу складніше структурованих виробів результат може бути неточним.

У таких випадках випробування можуть виявити дефекти, які б ніколи не виникли при реальному впливі навантаження (рис. 3.18). І навпаки, випробування не здатні виявити дефекти, які матимуть місце у реальних умовах.

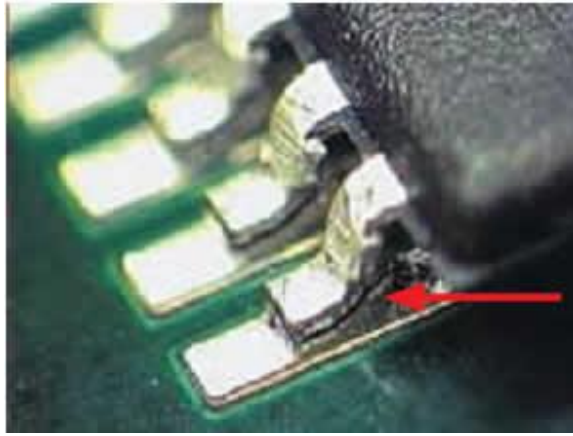


Рисунок 3.18 – Втомне руйнування паяння висновків компонентів TSOP по межі припій/вивід

Для носіїв та його компонентів і систем вплив динамічних чинників носить дуже нестаціонарний характер: дуже інтенсивні навантаження протягом коротких проміжків часу, решта часу – робота при відносно невеликих і середніх рівнях впливу.

В даному випадку можливі помилки полягають у тому, що при моделюванні короткочасне інтенсивне навантаження не збільшується (це дозволяє «заощадити» на типорозмірі вібростенда, гідропульсатора), а середні та малі навантаження збільшуються трохи більше, ніж потрібно, щоб компенсувати відсутність посилення пікових інтенсивних навантажень. Такий необґрунтований підхід може призвести до сильного спотворення результатів, особливо під час випробувань конструктивно складних виробів [14-15].

При складному профілі зовнішнього навантаження, коли його дуже важко точно апроксимувати звичайними засобами системи керування вібростенду, рекомендується відтворювати «записаний» за допомогою спеціальних віброметрів профіль на борту носія. Ступінь «посилення» профілю з метою отримання потрібного коефіцієнта прискорення вважається автоматично та чисельно, за спеціальним алгоритмом, передбаченим компанією-розробником у системі управління.

Ця методика заснована на механізмі втомного руйнування матеріалів при впливі зовнішнього навантаження. Як апарат, що описує це явище, використовуються залежності, взяті з нового напрямку оцінки тривалої міцності виробів – механіки руйнування. За виконання певних умов дана методика дозволяє істотно скоротити час випробувань зразків при механічних випробуваннях. При цьому існує обладнання, яке дозволяє максимально наблизити модель до реальних умов і за заданим алгоритмом чисельно збільшити навантаження, тим самим зменшити час випробувань.

3.5 Висновки до розділу 3

Проаналізувавши вищеописані методи випробувань, можна зробити висновок, що для випробування гнучких комутаційних структур, які використовуються в мобільних роботах, потрібно розробити дещо інший метод, який включатиме в себе дослідження на стійкість до струмового навантаження гнучких шлейфів, а також буде відрізнятися такими особливості як:

- простота застосування;
- дешевизна обладнання для його реалізації;
- наявність математичних моделей фізичної поведінки матеріалів;
- можливість застосування не лише для розробки мобільних роботів, а також для будь-яких інших електронних пристроїв.

4 РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИПРОБОВУВАННЯ ГНУЧКИХ КОМУТАЦІЙНИХ СТРУКТУР

4.1 Розробка математичної моделі випробування випробування гнучких комутаційних структур

Підчас використання мобільних роботів або електронних засобів, роз'ємних з'єднання і гнучких друкованих плат або гнучких шлейфів, отримують різні механічні навантаження.

Найбільш часто контакт в роз'ємі погіршується через механічні ушкодження пов'язані з підвищенням температури. Також мають місце і інші види деформації, але вони не настільки критичні, як оплавлення або деформація.

Даний вид дефектів часто виникає у електронних системах або мобільних роботах. Наприклад, у рухомих частинах в'язаних шлейфами, або у лініях з високим навантаженням, а також у інших електронних пристроях, які були розглянуті у другому розділі. Такий вид деформації може призвести до короткого замикання у провідниках та пошкодженні діелектричного шару.

При експерименті було взято за основу – випробування на стійкість до струмового навантаження і на основі цього виявити ряд механічних ушкоджень не тільки гнучкого шлейфа а також і роз'єму до якого він підключений. Одним з параметрів, який може вплинути на покращення якості гнучких комутаційних структур є якість виготовлення мідного провідника та діелектричної основи гнучких плат. За допомогою отриманих при експериментах температурних значень матеріалу необхідно виявити відхилення температури при пропусканні току через провідник і порівняти їх з теоретичними, на основі цих даних можна буде зробити висновок про якість виготовлення провідника та діелектрика з яких виготовлений гнучкий шлейф. Таким чином можна покращити якість гнучких структур та збільшити їх надійність.

У цьому розділі проведені дослідження термічних навантажень та міцності

провідників і діелектричного шару гнучкої комутаційної структури при різних значеннях сили струму та температури.

Розглянемо моделі оцінки граничного струму друкованої доріжки, який у деяких ситуаціях є визначальним параметром при виборі товщини провідних шарів друкованої плати.

Вибір товщини мідних шарів друкованої плати визначається, перш за все, необхідними мінімальним зазором та мінімальною шириною провідника, а також максимальним струмом, що протікає провідником. Ці параметри можуть суперечити один одному: чим тонший шар, тим менший топологічний малюнок може бути отриманий, але тим менший граничний струм витримає друкована доріжка (за інших рівних умов – ширина провідника, частота струму, тепловідведення та ін.). Теплова енергія Q , що виділяється на омичному опорі R друкованої доріжки, викликає підвищення її температури щодо навколишнього середовища, призводячи до перегріву самого провідника і пов'язаних з ним компонентів або, в крайньому у випадку, до його перегорання при граничному струмі.

Співвідношення між струмом через друковану доріжку і приростом температури залежить від багатьох параметрів і в загальному вигляді важко уявити, проте існують формули, що дозволяють зробити попередні оцінки. Одна з перших спроб належить У.Г. Прісу. Свою емпіричну залежність він отримав у лабораторному експерименті, в якому він поступово збільшував струм через провідник до моменту його напруження до червоного світіння. Формула Пріса пов'язує струм розжарення з діаметром провідника d для різних матеріалів:

$$I = K \times d, \quad (4.1)$$

де K – таблична константа, приблизно рівна 80 для міді;

d – діаметром провідника, м.

Використовуючи співвідношення площі кола, можна переписати цю формулу для мідного провідника з площею перерізу S :

$$I = 96 \times S, \quad (4.2)$$

де S – площею перерізу мідного провідника м^2 .

В експерименті Пріса провідник був підвішений у повітрі, на відміну від провідника на друкованій платі, умови тепловідведення для якого зовсім інші. Близькими є умови тепловідведення для випадків одиночного з'єднувального провідника, а також для деяких випадків мікродротяної розварки (коли для її захисту не використовується компаундування), де ця формула може давати хорошу оцінку граничного струму.

Допустимим приростом температури друкованої доріжки зазвичай вважається від $10\text{ }^\circ\text{C}$ до $30\text{ }^\circ\text{C}$. Це значення може бути і більше в залежності від параметрів проекту, однак у всьому діапазоні робочих температур виробу температура доріжки повинна бути меншою за температуру склування матеріалу друкованої плати (англ. glass transition temperature, T_g) і тим більше температури розжарювання міді. Тому корисна залежність приросту температури ΔT від струму I доріжки шириною w і товщиною фольги h , наведена Д. Бруксом [16]:

$$\Delta T = \frac{cIa}{w\beta h\gamma}, \quad (4.3)$$

де c , a , β , γ – константи, значення яких для внутрішніх шарів наведено на (рис. 4.1);

I – сила струму;

w – ширина доріжки, м;

h – товщина фольги, м.

Варто враховувати, що на зовнішніх шарах товщина фольги зазвичай більша від 20 мкм до 40 мкм відносно базового значення у зв'язку з додатковим напилюванням при створенні перехідних отворів. Також вплив фінішного покриття на платах без маски може бути значним. Це використовують у силових приладах, коли на розкриті від маски друковану доріжку паяють додатковий припій.

Умова	С	α	β	γ
Внутрішній шар	80	2	1,15	1
• 18 мкм	264-312	2	1,1	1,52
• 35 мкм	480	1,9	1,1	1,52
• 70 мкм	600	2	1,15	1,52
• 105 мкм	450-600	1,9	1,15	1,52

Рисунок 4.1 – Значення констант для різних параметрів провідного шару

Ще однією відомою формулою розрахунку граничної здатності провідника є формула Ондердонка, яка містить такий важливий параметр, як час. Вона зв'язує час t пропускання струму I через мідний провідник перерізом S і приріст температури ΔT щодо початкової температури T_0 :

$$8,6 \times 10^{-6} \times \left(\frac{I}{S}\right) \times t = \lg\left(1 + \frac{\Delta T}{234+T_0}\right), \quad (4.4)$$

де I – випробувальний струм, що подається на металізований отвір, А;

S – площа перерізу провідника, м²;

t – тривалість пропускання випробувального струму, с;

ΔT – приріст температури, °С;

T_0 – початкова температура, °С.

Оскільки при виведенні формули [17] виключається будь-який тепловідведення, то випадку друкованої доріжки ця формула застосовна для короткого імпульсу струму тривалістю від 1 с до 2 с. Зі збільшенням часу та впливу тепловідведення точність оцінки падає, у рази знижуючи граничний струм. Графіки залежностей за всіма трьома наведеними формулами для різних параметрів друкованої доріжки наведені на (рис. 4.2).

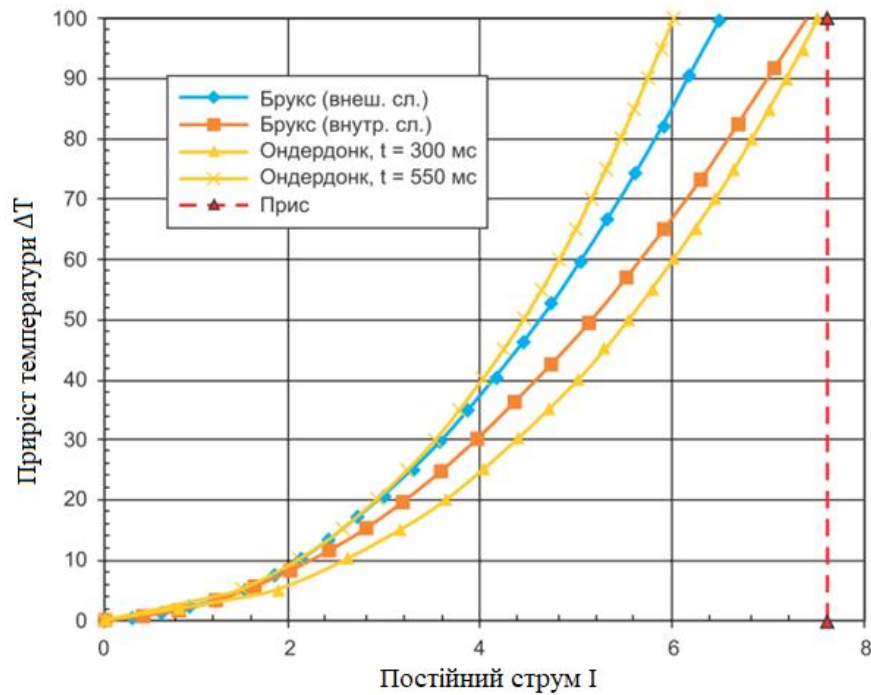


Рисунок 4.2 – Струмонесуча здатність доріжки провідника шириною 1 мм для шару мідної фольги товщиною 35 мкм

Для більш точного опису нагріву ми застосуємо формули, які зможуть зв'язати енергію, що передаються від мідного провідника в діелектрик [18]. При пропусканні струму по мідному провіднику гнучкого шлейфа виділяється теплова енергія, яка розподіляється різними каналами:

$$Q_b = Q_m + Q_d, \quad (4.5)$$

де Q_b – енергія, що виділяється на мідному провіднику при пропусканні випробувального струму протягом заданого часу, Дж;

Q_m – енергія, що підвищує температуру мідного провідника, Дж;

Q_d – енергія, що передається від мідного провідника в діелектрик, Дж.

Енергія у вигляді тепла, що виділяється на мідному провіднику при проходженні ним випробувального струму, обчислюється за відомою формулою:

$$Q_b = I^2 R t, \quad (4.6)$$

де I – випробувальний струм, що подається на металізований отвір, А;

R – опір шару металізації, Ом;

t – тривалість пропускання випробувального струму, с.

Опір мідного провідника обчислюється за відомою формулою:

$$R = \rho \frac{L}{S}, \quad (4.7)$$

де ρ – питомий опір мідного шару металізації, Ом/м; для гальванічної міді, $\rho = 1,9 \times 10^{-8}$ Ом/м;

L – довжина провідника, м;

S – площа перерізу провідника, м².

Енергія, що йде на нагрівання мідних частин провідника, обчислюється за формулою:

$$Q_m = C m \Delta T, \quad (4.8)$$

де C – питома теплоємність мідних частин, Дж/кг·К; для міді $C = 385$ Дж/кг·К;

m – маса мідних частин, кг;

ΔT – температура перегріву мідних частин, °С.

$$Q_d = a A t \Delta T, \quad (4.9)$$

де a – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м² К;

A – площа поверхні, через яку проходить тепловіддача, м²;

t – тривалість процесу активної тепловіддачі, що збігається з тривалістю подачі випробувального струму, с;

ΔT – різниця температур між мідним провідником і діелектриком, що збігається з температурою перегріву мідних частин, °C.

На підставі аналізу формул для обчислення теплового опору, можна записати тотожність:

$$\frac{a}{(\lambda \times A)} = \frac{1}{(\alpha \times A)}, \quad (4.10)$$

де a – довжина провідника теплової енергії, м;

λ – коефіцієнт теплопровідності діелектричного основи плати, Вт/м·К, для полііміду дорівнює 0,19 Вт/м·К.

З формули (4.10) можна виразити коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{\lambda}{a}. \quad (4.11)$$

Провівши відповідні перетворення, можна виразити величину перегріву мідних частин гнучкої плати у вигляді:

$$\Delta T = \frac{I^2 R t}{C m + a A t}. \quad (4.12)$$

Підставивши числові значення констант з урахуванням прийнятих параметричних постійних при струмі $I = 7,7$ А, тривалістю подачі випробувального струму $t = 20$ с, отримуємо $\Delta T = 73$ °C при температурі навколишнього середовища 20 °C, температура поверхні плати має дорівнювати 93 °C.

Але завжди важливо враховувати умови експерименту та аналітичні припущення щоб зробити висновок, і зрозуміти межі застосування тієї чи іншої формули. Жодна з наведених формул не дасть точне та оптимальне співвідношення між граничним струмом та необхідним перерізом провідника для реальних умов [19-20]. Вплив сусідніх провідників і компонентів як джерел

та приймачів тепла, випромінювання, активного або пасивного охолодження може бути врахований тільки при реальних дослідженнях. У цьому випадку результати експерименту найбільш точними. Справа в тому, що провідних гнучкого шлейфа має не прямокутний переріз, а близький до трапецієподібного (рис. 4.3), а його ширина і значення провідності мідної фольги можуть не тільки відрізняються від розрахункових за моделлю, але й мають деякий розкид від зразка до зразка, партії до партії, виробника до виробника і т. д.

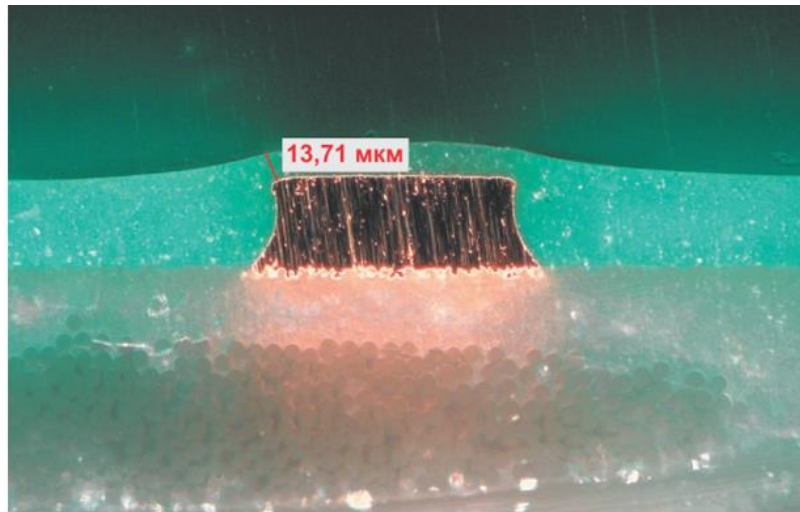


Рисунок 4.3 – Перетин друкованої плати, у якому видно не ідеальність геометрії доріжки

Вплив відхилень ширини посилюється із її зменшенням. Тим не менш, розрахункові результати за формулами та рекомендацією стандартів найчастіше будуть представляти найгірший випадок, забезпечуючи цим запас міцності системи. Якщо розробнику потрібно оптимізувати співвідношення між граничним струмом та необхідним перетином друкованої доріжки, то до цієї мети необхідно йти ітеративним шляхом моделювання або експерименту.

4.2 Розробка практичного випробовування гнучких комутаційних структур

Для дослідження ми взяли гнучкий прямий шлейф AWM 20798 тип – FFC

(рис. 4.4), матеріал основи – поліімід, матеріал провідника – мідь, товщина основи 100 мкм, товщина провідника 35 мкм, ширина провідника 0,9 мм, довжина шлейфа 150 мм.



Рисунок 4.4 – Гнучкий прямий шлейф

Гнучкий шлейф який з одного боку був зафіксований у FFC FPC роз'ємі, а з іншого боку через спеціальний адаптер до нього був підключений лабораторний блок живлення Longwei LW-K3010D (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Лабораторний блок живлення Longwei LW-K3010D

Напруга подавалась лише через одну з 24 мідних доріжок, для того щоб більш точно вирахувати відхилення температури, сила випробувального

струму яка проходила через доріжку дорівнює 7,7 А, тривалість пропускання випробувального струму 20 с, температура навколишнього середовища 20 °С (рис. 4.6).



Рисунок 4.6 – Температура навколишнього середовища

Підчас експерименту температура на поверхні ГШ вимірювалась за допомогою цифрового мультиметра UNI-T UTM139C та підключеної у відповідні гнізда термопари, на поверхню ГШ була нанесена термопровідна паста КПТ-19, для кращого перенесення тепла з ГШ на кінчик термопари, вимірювання проводилось у районі першої доріжки ГШ на яку і подавався струм. (рис. 4.7).



Рисунок 4.7 – Термопара на поверхні ГШ районі першої доріжки

Далі було зафіксований стрімкий зріст температури на поверхні ГШ яка дійшла до максимального значення у 128 °C за 20 с (рис. 4.8).

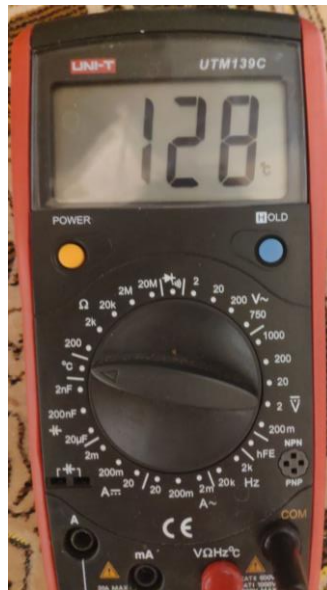


Рисунок 4.8 – Максимальне значення температури ГШ

Після цього доріжка провідник почала відшаровуватися від діелектричної основи і деформуватись (рис. 4.9).

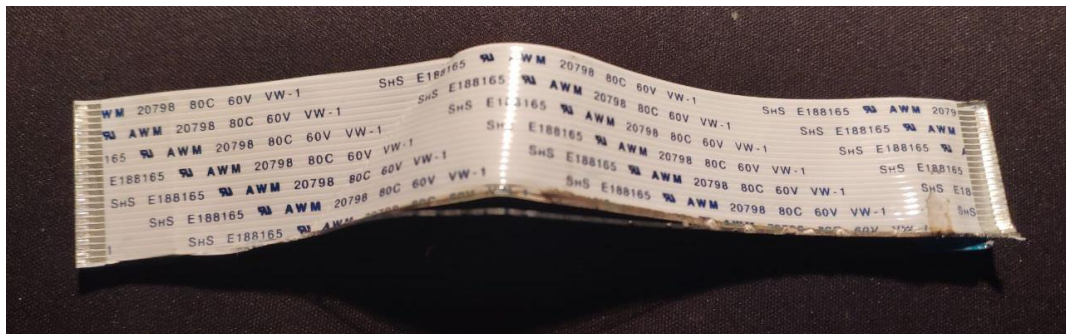


Рисунок 4.9 – Деформація ГШ

Слід зазначити що максимальна деформація відбулась ближче до середини ГШ, тоді як по краях, деформація меш значна. Роз'єм до якого був підключений гнучкий шлейф взагалі лишився візуально не ушкодженим (рис. 4.10).



Рисунок 4.10 – Роз’ємне з’єднання гнучкого шлейфа з друкованою платою після експерименту

Очевидно що струм для даного виду ГШ був дещо перевищений, але теоретичні розрахунки показали нам температуру нижче фактичної при тих самих вхідних даних, це може означати, що у даному випадку доріжка провідника фактично відрізняється від своїх номінальних розмірів заявлених виробником, або у розрахунках не вірні деякі данні теплопровідності матеріалу діелектрика, а також якість мідного провідника від яких на пряму залежить нагрів поверхні ГШ, це свідчить про те що математичні розрахунки не дають точних даних про всі фізичні процеси які відбуваються при проходженні струму, і нагріванні поверхні гнучкого шлейфа.

4.3 Охорона праці

Відповідно до [21], охорона праці – це система збереження життя та здоров'я, соціально-економічні, організаційно-технічні, санітарно-гігієнічні, лікувально-профілактичні, реабілітаційні та інші заходи.

Обов'язки щодо забезпечення безпечних умов праці та охорони праці покладаються на роботодавця. Роботодавець зобов'язаний забезпечити безпеку працівників під час експлуатації будівель, споруд, обладнання, здійснення технологічних процесів, а також застосовуваних у виробництві інструментів,

сировини та матеріалів. Крім того, роботодавець зобов'язаний забезпечити відповідні вимоги охорони праці; умови праці на кожному робочому місці; режим праці та відпочинку працівників, відповідно до трудового законодавства, та інших нормативних правових актів, що містять норми трудового права.

Щоб уникнути можливості ураження чи шкідливого впливу одного чи кількох із зазначених чинників обов'язковим є виконання усіма співробітниками заходів з охорони праці та нижченаведених санітарно-гігієнічних норм:

- норм з електробезпеки;
- норм пожежної безпеки;
- норм природного та штучного освітлення;
- норм мікроклімату;
- норм шуму.

Крім перерахованих вище шкідливих і небезпечних виробничих факторів необхідно розглянути питання, що стосуються заходів, щодо запобігання та ліквідації наслідків виникнення небезпечних ситуацій.

Шкідливими факторами природного та штучного освітлення є:

- відсутність або недостатній рівень необхідного природного освітлення;
- відсутність або недостатній рівень необхідного штучного освітлення;
- надмірна яскравість світла;
- знижена світлова та колірна контрастність;
- прямий та відбитий блиск;
- підвищена мерехтіння світлового потоку.

Напружена зорова робота в умовах недостатнього освітлення сприяє розвитку короткозорості. При нестачі освітлення падає швидкість розрізнення предметів, також це веде до втоми центральної нервової системи, і взагалі до погіршення емоційного стану людини. Щоб уникнути негативних наслідків необхідно збільшити кількість ламп, збільшити якість освітлення, розширити віконний отвір.

Системи природного, штучного та комбінованого освітлення слід проектувати з урахуванням необхідності забезпечення на робочих місцях

(постійних і непостійних) нормованих показників: коефіцієнт природного освітлення, освітленість робочої поверхні.

Заходи, щодо виконання норм мікроклімату, вентиляції та опалення призначені для запобігання несприятливих дії мікроклімату робочих місць, виробничих приміщень на самопочуття, функціонального стану, працездатності та здоров'я людини. Показниками, що характеризують мікроклімат у виробничих приміщеннях, є: температура повітря, температура поверхонь, відносна вологість повітря, швидкість руху повітря.

Вплив мікроклімату на самопочуття людини значуще і суттєво, залежить від швидкості руху та вологості навколишнього повітря – чим вище показник відносної вологості, тим швидше настає перегрів організму. Недостатня вологість, у свою чергу, може негативно впливати на організм, що може стати причиною пересихання та розтріскування шкіри та слизової оболонки, а також подальшого зараження хвороботворними мікро організмами. Тривала дія високої температури при підвищеній вологості може призвести до гіпертермії, або накопичення теплоти та перегріву організму, а знижені показники температури, особливо при підвищеній вологості повітря, можуть бути причиною гіпотермії, або переохолодження.

Електроживлення приміщень здійснюється від силового розподільчого щита однофазного змінного струму з чинним значенням напруги 220 В.

Таким чином, відповідно до правил влаштування електроустановок, всі електроприлади, що використовуються в приміщенні, відносяться до низьковольтних з напругою живлення до 1000 В. Усі електроприймачі відносяться до електроприймачів III категорії. Приміщення, згідно з класифікацією ПВЕ, є сухим приміщеннями без підвищеної небезпеки.

Електробезпека в приміщенні повинна забезпечуватися такими заходами:

- для захисту від напруги дотику всі струмопровідні частини повинні бути ізольовані;
- для захисту від ураження електричним струмом, шляхом виникнення потенціалу на провідних корпусах електроприладів необхідна наявність

захисного заземлення; опір заземлювального пристрою в будь-яку пору року має бути не більше 4 Ом, при цьому перетин заземлюючої жили має бути не менше 4 мм² для мідних провідників, не менше 6 мм² – для алюмінієвих та не менше 20 мм² – для сталевих, для захисту від струмів короткого замикання необхідна наявність швидкодіючих пристроїв захисту.

При роботі в приміщенні, з метою забезпечення електробезпеки користувачів комп'ютерів, повинні виконуватись такі вимоги:

- усі вузли одного персонального комп'ютера та підключене до нього периферійне обладнання повинні живитися від однієї фази електромережі;
- корпуси системного блоку та зовнішніх пристроїв повинні бути заземлені радіально з однією загальною точкою;
- для аварійного відключення комп'ютерного обладнання повинен використовуватися окремий щит з автоматами захисту та загальним рубильником;
- всі з'єднання персонального комп'ютера та зовнішнього обладнання повинні проводитися при вимкненому електроживленні.

Для запобігання електротравматизму велике значення має правильна організація обслуговування робочого місця, проведення ремонтних, монтажних та профілактичних робіт.

Ремонт, розбирання та складання, налагодження електротехнічного обладнання може виконувати лише підготовлений персонал.

Кожному необхідно знати заходи первинної медичної допомоги при ураженні електричним струмом. У будь-якому робочому приміщенні необхідно мати медичну аптечку.

Відповідно до правил визначення категорій приміщень, будівель та зовнішніх споруд з вибухопожежної та пожежної небезпеки, що регламентуються, будівлі відносяться до категорії «В», так як у приміщенні відсутні тверді горючі та важко горючі речовини. До горючих матеріалів відносяться шафи, столи, стільці та документація .

Для запобігання пожежі вживаються такі заходи:

- у приміщенні повинні бути відсутні нагрівальні прилади, що не використовуються;
- корпуси рубильників і розеток розмістити на жаростійких щитках;
- нагрівальні прилади розташувати на азбестових килимках та прокладках;
- роботи з легкозаймистими речовинами повинні проводитися поза межами приміщення;
- паління в приміщеннях суворо заборонено.

При займанні, виникненні пожежі, необхідно відключити електроприлади від електромережі (якщо це зробити неможливо, то необхідно відключити живильну мережу автоматичним або пакетним вимикачем, або рубильником на силовому щиті), викликати пожежну команду і приступити до гасіння пожежі засобами пожежогасіння. Слід пам'ятати, що для гасіння пожежі на установках, що знаходяться під напругою, можна скористатися тільки вуглекислотними або порошковими вогнегасниками. При сильному загорянні, необхідно терміново викликати електрика і знеструмити приміщення, після чого для гасіння пожежі можна використовувати пінні вогнегасники та воду

Відповідно до вимог пожежної безпеки повинен бути план евакуації, евакуаційна карта та інструкція «Про порядок проведення евакуації людей та обладнання у разі пожежі». Приміщення повинно бути обладнане засобами пожежогасіння (вуглекислотними вогнегасниками).

4.4 Висновки до розділу 4

На основі виконаних досліджень можна зробити деякі висновки:

- математична модель випробувань не дає точне та оптимальне співвідношення між граничним струмом і необхідним перерізом провідника для реальних умов;

– важливо завжди враховувати результати експерименту та аналітичні припущення, щоб зробити висновок;

– максимальна деформація відбулась ближче до середини ГШ, тоді як з країв деформація меш значна, так трапляється через те, що розсіювання тепла відбувається краще само по краях, через те, що шлейф під'єднаний до з'єднувача і він сприяє передачі тепла на основу, до якої припаяний;

– експеримент є невід'ємною частиною досліджень, без нього не вдасться об'єктивно оцінити всі параметри гнучкого шлейфу.

Отримані висновки створюють сприятливі умови для розробки мобільних роботів і проведення успішних випробувань гнучких комутаційних структур.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено аналіз літератури за відповідною темою, визначені основні типи систем і пристроїв, де можуть застосовуватись гнучкі комутаційні структури, включаючи мобільних роботів, розглянуто структуру гнучких друкованих плат та сучасні методи випробовування гнучких комутаційних структур і друкованих плат різних типів.

На основі існуючих методів випробовування гнучких комутаційних структур, а також жорстких друкованих плат було розроблено власний метод випробовування, в його основі закладена математична модель, яка порівнюється з реальними експериментами, на основі чого можна зробити висновки про якість та відповідність заявленим характеристикам тестового зразка.

У першому розділі було розглянуто, область застосування, предмет дослідження, складові матеріали ГКС і галузі застосування. Також доведена актуальність вирішення поставленої задачі та поставлені задачі дослідження.

У другому розділі детально розглянутий і вивчений технологічний процес виготовлення та контролю гнучких структур з полііміду для кращого розуміння їх конструкції та властивостей.

У третьому розділі було розглянуто основні сучасні методи випробовування гнучких комутаційних структур, а також жорстких друкованих плат, на основі цієї інформації розроблений найбільш оптимальний метод для випробовування механічних властивостей гнучких комутаційних структур для мобільних роботів.

Четвертий розділ містить розробку методу випробовування механічних властивостей гнучких комутаційних структур для мобільних роботів, математичну модель та розрахунок основних параметрів плати, таких як перегрів мідних частин гнучкого шлейфа. Також у цьому розділі проведено випробування зі стійкості до струмового навантаження на провідник та діелектричну основу гнучкого шлейфа. Також розглянуті питання охорони

праці.

У кваліфікаційній роботі проведений експеримент з електричного впливу на нагрівання гнучкого шлейфа, результати експерименту порівняні з математичною моделлю та виявлені відхилення в цих результатах, на основі цього зроблені такі висновки:

– математична модель не може дати точне та оптимальне співвідношення між граничним струмом і необхідним перерізом провідника для реальних умов, тому що не може описати усі процеси, які проходять під час проведення експерименту, але вона буде доцільною для попередніх розрахунків перед експериментами;

– розміри провідників можуть фактично відрізнятися від номінальних розмірів, заявлених виробником, а також може відрізнятися якість мідного провідника, від яких напряду залежать результати розрахунків.

Підсумувавши, можна зробити такий висновок – експеримент є невід'ємною частиною досліджень, без нього не вдасться об'єктивно оцінити всі параметри гнучкого шлейфу, не математична модель і навіть моделювання в системах автоматизованого проектування не дадуть точних результатів, тому що є всього лише теоретичними розрахунками, які не можуть повторити реальний експеримент. Тому при розробці мобільних роботів важливо проводити реальні випробування всіх комутаційних структур, включаючи гнучкі, для того, щоб фактично переконатися у правильності їх роботи під різними механічними навантаженнями, включаючи і стійкість до струмового навантаження.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами»; «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»; «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. В. Токарева, Г. В. Пономарьова. Харків: ХНУРЕ, 2021. 36 с.
2. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
3. Бездітко А. Ю. Розроблення методу випробовування механічних властивостей гнучких комутаційних структур для мобільних роботів / А. Ю. Бездітко // X Міжнародна науково-практична конференція “MODERN RESEARCH IN WORLD SCIENCE”, 25-27.12.2022. Львів. С. 51-53.
4. Друковані плати на підставі з високою теплопровідністю. URL: <http://um.co.ua/1/1-4/14974.html> (дата звернення : 10.12.2022).
5. Багатошарові друковані плати. URL: bit.ly/3DXJ9rZ (дата звернення : 10.12.2022).
6. Виготовлення друкованих плат. URL: <https://renome.biz/uk/izgotovlenie-pечатnih-plat-dlja-jelektroniki/> (дата звернення : 27.11.2022).
7. Що таке електролітична мідь. URL: <https://uk.lamscience.com/what-is-electrolytic-copper> (дата звернення : 10.11.2022).
8. Технологія виготовлення друкованих плат. URL: <https://bit.ly/3U36kGU/> (дата звернення : 05.12.2022).
9. IPC-2223A. Sectional Design Standard for Flexible Printed Boards. URL: www.ipc.org/ (дата звернення : 18 12 2022).

10. Flexible circuit board material selection. URL: <https://blog.epectec.com/flexible-circuit-board-material-selection/> (дата звернення : 15.12.2022).

11. Pcb testing methods you need to URL: <https://blog.matric.com/pcb-testing-methods> (дата звернення : 01.12.2022).

12. How to Test a Circuit Board. URL: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-how-to-test-a-circuit-board> (дата звернення : 11.11.2022).

13. Новоселов С. П., Боцман А. С., Невлюдова В. В. Экспериментальная установка для исследования влияния механических вибраций на выходные параметры радиоэлектронных средств на основе гибких модулей // Приборы и методы измерений. 2015. Т. 6, № 2. С. 156-162.

14. Brooks, Douglas G., и Johannes Adam. «Trace Currents and Temperatures Revisited» Copyright Douglas Brooks, Kirkland, WA. Note15, 2015. P. 358-360.

15. Пат. 108066 України, МПК G01M 7/02. Стенд для динамічних випробувань гнучких комутаційних шлейфів та МЕМС-компонентів / О. С. Боцман, І. В. Жарікова, В. В. Невлюдова, І. Ш. Невлюдов, С. П. Новоселов; заявл. 12.02.2016; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12. 3 с.

16. Adam J., Brooks D. G. «In Search For Preece and Onderdonk», UltraCAD, 2015. P. 28-30.

17. Гнучкі друковані плати. Переваги та використання в електроніці. URL: bit.ly/3h2lsFP (дата звернення : 02.12.2022).

18. Fjelstad J. Flexible Circuit Technology. Third Edition. Publishing Inc. USA. 2006. P. 260-265.

19. Hobbs G. HALT & HASS the accepted quality and reliability paradigm. 19 May 2008. P. 78-80.

20. PCB Trace Width Calculator. URL: <http://circuitcalculator.com/wordpress/2006/01/31/pcb-trace-width-calculator/> (дата звернення : 03.12.2022).

21. Дзюндзюк Б. В. Охорона праці. Збірник задач: навч. посібник/
Б. В. Дзюндзюк. Харків: ХНУРЕ, 2006. 236 с.