

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)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Удосконалення методу автоматизованої пайки BGA компонентів
(тема)

Виконав: студент 2 курсу, гр. КІТІВм-19-1
Кононенко М.Д.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
освітньої програми Комп'ютерно-інтегровані
Технологічні процеси і виробництва
(код і повна назва напрямку)

Тип програми освітньо-професійна
(повна назва освітньої програми)

Керівник зав. кафедри Невлюдов І.Ш.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.
(прізвище, ініціали)

2020 р.

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'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Кононенко Максиму Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення методу автоматизованої пайки BGA
компонентів

затверджена наказом по університету від _____ 02.11. 2020 р. № _____ Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 14.12.2020 р.

3. Вихідні дані до роботи BGA-мікросхема 47 мм x 5 мм x 47 мм, маска зі склотекстоліту 50 мм x 1 мм x 50 мм, 3D-модель процесу пайки, 3D-модель маски зі склотекстоліту, програмне забезпечення Ansys Discovery SpaceClaim, PCAD та MatLab/Simulink, час процесу пайки 260 с.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Аналіз особливостей процесу монтажу та пайки BGA-мікросхем;

4.2 Порівняння методів пайки BGA- мікросхем;

4.3 Розробка методу контролю температури в зоні нагріву під час процесу пайки;

4.4 Розробка імітаційної моделі процесу пайки;

4.5 Проведення експериментальних досліджень;

4.6 Охорона праці в процесі пайки;

4.7 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 14 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	<i>Отримання завдання</i>	02.11.2020	Вик
2	<i>Аналіз різновидів корпусів, особливостей монтажу та пайки інтегральних мікросхем</i>	08.11.2020	Вик
3	<i>Аналіз методів пайки BGA-компонентів</i>	14.11.2020	Вик
4	<i>Розробка методу контролю температури в зоні нагріву під час процесу пайки</i>	19.11.2020	Вик
5	<i>Проведення експериментальних досліджень</i>	21.11.2020	Вик
6	<i>Охорона праці в процесі пайки</i>	22.11.2020	Вик
7	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	29.11.2020	Вик
8	<i>Подання на підпис керівнику атестаційної роботи</i>	30.11.2020	Вик
9	<i>Подання роботи на підпис зав. кафедри</i>	07.12.2020	Вик
10	<i>Подання роботи на рецензію.</i>	07.12.2020	Вик
11	<i>Подання роботи до ЕК</i>	14.12.2020	

Дата видачі завдання 02 листопада 2020 року

Студент

(підпис)

Кононенко М.Д.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

зав. кафедри Невлюдов І.Ш.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 97 с., 2 табл., 58 рис., 1 дод., 38 джерел.

3D-МОДЕЛЮВАННЯ, BGA-МІКРОСХЕМИ, АВТОМАТИЧНА ПАЙКА, ТЕМПЕРАТУРНИЙ ПРОФІЛЬ.

Об'єкт дослідження – інтегральні мікросхеми в корпусі BGA.

Предмет дослідження – модель автоматизованого процесу пайки BGA-компонентів.

Мета магістерської атестаційної роботи – розробка методу автоматизованого контролю за фактичною температурою в зоні нагріву.

Методи дослідження – теорія автоматичного управління, розробка моделі контролю за автоматизованим процесом пайки BGA-мікросхем, експерименти в імітаційній моделі.

В ході виконання атестаційної роботи проведено аналіз різновидів сучасних інтегральних мікросхем. Виявлено переваги та недоліки використання інтегральних мікросхем в корпусі BGA. Проведено аналіз методів монтажу та пайки BGA-мікросхем. На основі проведеного аналізу розроблено 3D-модель технологічного рішення для удосконалення процесу пайки BGA-мікросхем, а саме маску зі склотекстоліту, з вмонтованими на неї датчиками температури. Створено імітаційну модель процесу пайки BGA-мікросхем, з можливістю регулювання температури в залежності від фактичних показників датчиків температури на корпусі мікросхеми. Проведені експериментальні дослідження.

За результатами наукового дослідження опубліковано статтю у збірнику «Автоматизація та приладобудування» «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2020 (випуск 2).

ABSTRACT

Explanatory note contains: 97 pages, 2 tables, 58 drawings, 1 adding, 38 sources.

3D-SIMULATION, BGA- MICROCHIPS, AUTOMATIC SOLDERING, REFLOW PROFILE.

The object of research is the integrated circuits in BGA package.

The subject of research is the model of the automated process of BGA-components soldering.

The purpose of the master's certification work is the development of a method for automated control over the actual temperature in the heating zone.

Research methods – automatic control theory, development of a control model for automated process of BGA-components soldering, experiments in a simulation model.

During of the certification work, an analysis of the varieties of modern integrated circuits was carried out. Founded the advantages and disadvantages of using integrated circuits in a BGA package. The analysis of the methods of mounting and soldering BGA chips was carried out. Based on the analysis, developed a 3D model of a technological solution to improve the soldering process of BGA microcircuits, and more specifically, a glass fiber mask with temperature sensors built into it. Created a simulation model of the soldering process for BGA chips with the ability to regulate the temperature depending on the actual readings of temperature sensors on the chip package. Experimental research carried out.

According to the results of scientific research, an article was published in the collection «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2020 (issue 2).

ЗМІСТ

	с
Перелік скорочень	8
Вступ.....	9
1 Аналіз різновидів корпусів інтегральних мікросхем, монтажу та процесу пайки друкованих плат	11
1.1 Аналіз різновидів корпусів для інтегральних мікросхем.....	11
1.2 Аналіз переваг та недоліків використання BGA компонентів	15
1.3 Аналіз різновидів корпусів типу BGA	18
1.4 Аналіз особливостей монтажу друкованих плат	22
1.5 Аналіз особливостей процесу пайки друкованих плат	25
1.6 Постановка задач досліджень	30
2 Дослідження технології монтажу та пайки мікросхем в корпусі BGA	32
2.1 Особливості монтажу BGA-компонентів на друковану плату.....	32
2.2 Обладнання для монтажу та пайки BGA-мікросхем.....	37
2.3 Порівняння методів пайки конвекційним нагрівом та ІЧ-випроміненням	40
2.4 Розрахунки залежності температури пайки методом конвекції від дистанції між джерелом нагріву та друкованою платою.....	42
2.5 Розрахунки залежності температури пайки ІЧ-випромінюванням від дистанції між джерелом нагріву та друкованою платою	45
2.6 Контроль якості паяних з'єднань та дефекти пайки BGA-компонентів	50
2.7 Висновки до 2 розділу	53
3 Розробка технологічного рішення для моніторингу фактичної температури в робочій зоні під час автоматичного процесу пайки BGA-компонентів	54
3.1 Розробка 3D-моделі маски зі склотекстоліту для отримання фактичної температури в робочій зоні під час автоматичного процесу пайки BGA-компонентів.....	54
3.2 Технічні характеристики та принцип роботи датчиків температури для	

отримання фактичної температури в робочій зоні під час процесу пайки BGA-компонентів.....	58
3.3 Трасування маски зі склотекстоліту з вмонтованими на неї термісторами NTC-GT004, та підключення до плати Arduino	61
3.4 Обчислення показників температури з термісторів	66
3.5 Фізико-механічні, електричні та температурні характеристики маски зі склотекстоліту	68
3.6 Розрахунки вартості та область застосування маски зі склотекстоліту .	70
3.7 Висновки до 3 розділу	72
4 Розробка імітаційної моделі регулювання температури під час процесу автоматичної пайки BGA-компонентів та проведення експериментів	73
4.1 Дослідження оптимального температурного профілю під час процесу пайки BGA-мікросхем	73
4.2 Розробка імітаційної моделі регулювання температури під час процесу пайки BGA-мікросхем в програмному забезпеченні Matlab/Simulink та проведення експериментів	76
4.3 Техніка безпеки в процесі пайки та розрахунки вентиляції виробничих приміщень	87
4.4 Висновки до 4 розділу	90
Висновки	91
Перелік джерел посилання	92
Додаток А Демонстраційний матеріал у вигляді презентації	96

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

BGA – ball grid array;
CBGA – ceramic ball grid array;
DIP – dual in-line package;
EBGA – thermal enhanced ball grid array;
FC – flip chip;
FC-BGA – flip chip ball grid array;
IPC – institute for printed circuits;
LGA – land grid array;
MBGA – metal ball grid array;
MSL – moisture sensitivity level;
NTC – negative temperature coefficient;
PBGA – plastic ball grid array;
PGA – pin grid array;
PLCC – plastic leaded chip carrier;
PTC – positive temperature coefficient;
SO – small-outline integrated circuit;
QFP – quad flat package;
SIP – single in-line package;
SMD – surface-mount device;
SMT – surface mounting technology;
SOIC – small-outline integrated circuit;
TBGA – tape ball grid array;
THT – through hole technology;
АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;
ІМС – інтегральна мікросхема;
САПР – система автоматизованого проектування.

ВСТУП

Корпус для інтегральної мікросхеми – це герметична конструкція, що служить для захисту кристала інтегральної схеми від зовнішніх факторів, та забезпечення надійного електричного з'єднання схеми з зовнішніми ланцюгами інтегральної схеми. BGA (Ball grid array – масив шариків) – тип корпусу інтегральної мікросхеми, який використовується в майже в кожному сучасному електрообладнанні, такому як смартфони, ноутбуки, комп'ютери та багато інших. Виводи BGA-мікросхем являють собою шарики з припою, які нанесені на контактні майданчики з іншого боку мікросхеми. При підвищенні температури ці шарики починають плавитися, що дозволяє точно розташувати мікросхему на друкованій платі. Після охолодження шарики утворюють міцне з'єднання корпусу мікросхеми до друкованої плати.

Головною перевагою мікросхем в корпусі BGA є висока щільність розміщення контактів на друкованій платі невеликих розмірів, що дозволяє розмістити сотні виводів в одному корпусі з дотриманням достатньої відстані між ними. Одночасно з цим, це є її найслабшим місцем, тому що з'являється висока чутливість до механічних навантажень, таких як вплив від вібрації, ударів, або до навантаження, що з'являється в процесі теплового розширення корпусу інтегральної мікросхеми та плати на яку вона встановлена. Як наслідок, контакт між шариками припою і друкованою платою порушується, і мікросхема перестає виконувати свої функції.

Таким чином, метою атестаційної роботи магістра є удосконалення автоматичного процесу пайки інтегральних мікросхем в корпусі BGA, за рахунок точного моніторингу за температурою в зоні нагріву в процесі автоматизованої пайки, що дасть можливість регулювати оптимальний температурний профіль пайки. Таким чином, можна підвищити надійність паяного з'єднання, та уникнути появи дефектів пайки.

Таким чином, робота є актуальною, тому що основною проблемою в процесі пайки BGA-мікросхем є складність контролю температури в робочій зоні, вирішення даної проблеми дає можливість мінімізувати шанси появи дефектів паяних з'єднань.

Об'єкт дослідження – інтегральні мікросхеми в корпусі BGA.

Предмет дослідження – модель автоматизованого процесу пайки BGA-компонентів.

Мета магістерської атестаційної роботи – розробка методу автоматизованого контролю за фактичною температурою в зоні нагріву.

Методи дослідження – теорія автоматичного управління, розробка моделі контролю за автоматизованим процесом пайки BGA-компонентів, експерименти в імітаційній моделі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати переваги інтегральних мікросхем в корпусі BGA в порівнянні з іншими типами корпусів;
- проаналізувати методи монтажу та пайки BGA-мікросхем;
- проаналізувати переваги пайки BGA-мікросхем методом конвекційного нагріву та нагріву ІЧ-випромінюванням;
- розробити 3D-модель маски зі склотекстоліту з вмонтованими на неї датчиками температури для виміру температури в зоні нагріву під час процесу пайки;
- розробити імітаційну модель процесу пайки з можливістю регулювання температури.

Робота виконана згідно методичних вказівок [1], за вимогами ДСТУ 3008:2015 [2].

1 АНАЛІЗ РІЗНОВИДІВ КОРПУСІВ ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ, МОНТАЖУ ТА ПРОЦЕСУ ПАЙКИ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

1.1 Аналіз різновидів корпусів для інтегральних мікросхем

Для того, щоб напівпровідниковий елемент працював максимально надійно протягом багатьох часів роботи, необхідно щоб кожен чіп залишався захищеним від навколишніх факторів і можливих перенавантажень. Інтегральні мікросхеми (ІМС) – це одні із найважливіших електронних компонентів, які містять в собі транзистори, резистори, діоди та інші активні або пасивні елементи електроніки, число яких може досягати декількох тисяч. Корпус для мікросхеми являє собою оболонку, яка покриває матеріал самої схеми, щоб захистити її від корозії або інших фізичних пошкоджень, та забезпечити можливість установки електричних контактів, які будуть з'єднувати мікросхему з друкованою платою. Існує багато різновидів ІМС, тому слід використовувати різні типи корпусів для них, оскільки різні типи схем мають різні потреби, коли справа доходить до їх використання на друкованій платі.

При виробництві напівпровідникових компонентів вибір корпусу інтегральної мікросхеми є останнім етапом процесу. На цьому етапі напівпровідниковий елемент покривається оболонкою, яка захищає ІМС від можливих ушкоджень, спровокованих зовнішніми факторами або корозійним впливом. Фактично, корпус схеми являє собою кожух, який призначений для захисту блоку, а також для забезпечення хорошого електричного з'єднання контактів, що передають сигнали на друковану плату електронного пристрою [3].

На сьогодні, інтегральні мікросхеми можуть випускатися у двох основних варіантах виконання – в корпусному або безкорпусному виді. Безкорпусна ІМС являє собою відкритий кристал, який використовується для

монтажу в гібридну мікросхему. Для захисту від зовнішніх факторів інтегральні мікросхеми встановлюють в корпус із пластику або кераміки.

Основні типи корпусів для інтегральних мікросхем:

- DIP або DIL корпус;
- SIP або SIL корпус;
- SOIC корпус;
- QFP корпус;
- PGA корпус;
- LGA корпус;
- BGA корпус.

DIP (Dual In-Line Package) – корпус, який має прямокутний вигляд і два паралельних рядки електричних з'єднувальних штирів (рисунок 1.1). Цей корпус є найпоширенішим типом корпусів, застосовується для мікросхем, підсилювачів, генераторів та інших електричних компонентів. Монтаж виконується в отвори друкованої плати. Може бути виконаний з пластику або кераміки. Число виводів вказується в назві корпусу і може становити від 4 до 40 виводів.

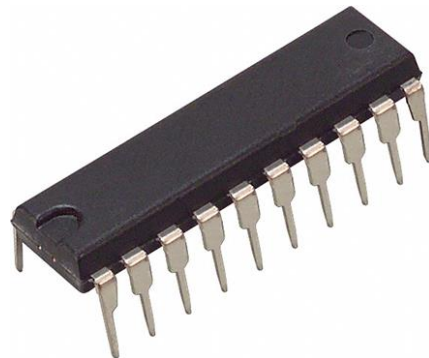


Рисунок 1.1 – Корпус DIP-20 [4]

SIP (Single In-line Package) – має плоский корпус для вертикального монтажу в отвори друкованої плати (рисунок 1.2). В назві вказується число виводів.

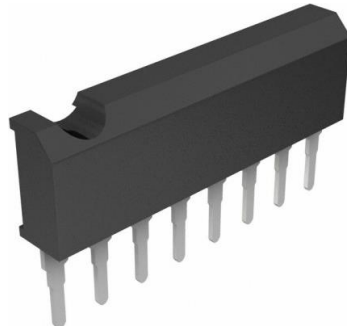


Рисунок 1.2 – Корпус SIP-8 [4]

SOIC (Small-Outline Integrated Circuit) – малогабаритний пластиковий корпус, призначений для поверхневого монтажу, який займає на друкованій платі менше площі ніж аналогічний корпус DIP, а також має меншу товщину (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Корпус SOIC-16 [4]

QFP (Quad Flat Package) – представляє собою плоский корпус з чотирма рядами контактів розташованими по краях (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Корпус QFP [4]

PGA (Pin Grid Array) – матриця з виводами у вигляді штирів. Являє собою прямокутний або квадратний корпус, в нижній частині якого розташовані виводи у вигляді штирів (рисунок 1.5).

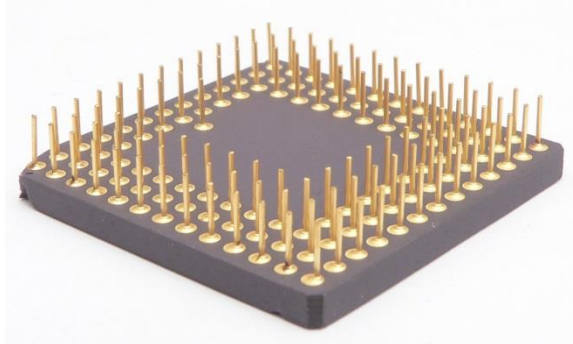


Рисунок 1.5 – Корпус PGA [4]

LGA (Land Grid Array) – тип корпусів мікросхем з матрицею контактних майданчиків. Найчастіше використовуються в комп'ютерній техніці для процесорів (рисунок 1.6).

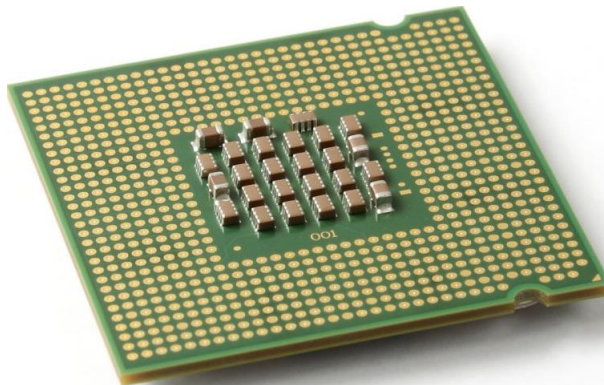


Рисунок 1.6 – Корпус LGA [4]

BGA (Ball Grid Array) – матриця з шариків. Корпус в якому усі виводи замінені на шарики припою (рисунок 1.7). На одній мікросхемі такого типу можна розмістити сотні шариків-виводів, це дозволяє економити дуже багато місця на друкованій платі. Саме тому мікросхеми в корпусі BGA використовують у виробництві мобільних телефонів, ноутбуків, планшетах та інших мікроелектронних пристроях [4].

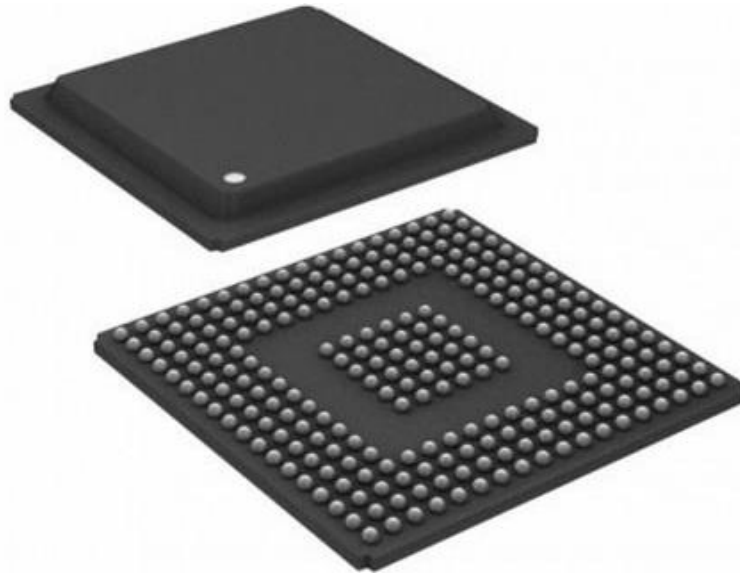


Рисунок 1.7 – Корпус BGA [4]

1.2 Аналіз переваг та недоліків використання BGA компонентів

На сьогоднішній день в більшості електронних пристроїв, обладнанні та багатьох портативних електронних пристроїв широко використовуються друковані плати мініатюрного розміру з малими формфакторами. Такі друковані плати об'єднані з іншими мініатюрними SMT-компонентами, які щільно розташовані по всій друкованій платі. Ball grid array (BGA) – масив шариків, найбільш популярний та компактний корпус інтегральної мікросхеми серед компонентів поверхневого монтажу.

До контактних майданчиків BGA-мікросхем чіпляють шарики з припою, які знаходяться на зворотному боці мікросхеми. Такі шарики починають плавитися під час процесу нагріву, що дозволяє точно розташувати мікросхему на друкованій платі. В результаті з'являються друковані плати зі з'єднаннями високої щільності, легкої ваги і невеликі за розміром. Виводи розташовані у вигляді «масиву» під корпусом, утворюючи сітку контактів. Це призводить до того, що BGA-мікросхема займає менше місця на друкованій платі, збільшує продуктивність і реалізує більше функцій на платі.

Використання корпусів типу BGA дає багато переваг в порівнянні з іншими корпусами, а саме:

- підвищена щільність контактів;
- підвищена продуктивність;
- краща теплопровідність;
- більш низька індуктивність;
- надійність.

Для підвищення продуктивності, характеристик або ціни виробники збільшують кількість виводів в корпусі, але ставлять під загрозу якість, оскільки виводи будуть розташовані дуже близько один до одного, а паяльні з'єднання можуть виявитися слабкими та ненадійними в процесі роботи мікросхеми. Використовуючи корпуси типу BGA можна отримати сотні виводів на одному корпусі без шкоди для якості пайки або надійності корпусу.

Зменшена відстань та індуктивність між корпусом BGA і друкованою платою знижує тепловий опір між двома компонентами, що забезпечує кращу теплопровідність через плату. До того ж це хороший спосіб для виводу тепла напряду від кристалу. Це значно знижує ймовірність перегріву і термічних ушкоджень мікросхеми.

Оскільки суміжні провідники мають меншу довжину в порівнянні з довгими дротами, це знижує індуктивність сигналів, що покращує їх електричні характеристики в наслідок зниження індуктивності.

Більшість конкурентів BGA-мікросхем мають дуже тонкі штифти, які легко пошкодити навіть під час дуже обережного процесу монтажу. Їх практично неможливо відремонтувати, якщо штифти пошкоджені то від них майже немає сенсу. BGA не страждають від цього недоліку, оскільки з'єднання забезпечуються контактними майданчиками з шариками припою, які важко пошкодити.

В підсумку, всі ці фактори призводять до набагато кращих електричних характеристик корпусів типу BGA в порівнянні з іншими

технологіями пакування корпусів інтегральних схем. Використання даної технології забезпечує чудові характеристики пайки та високу швидкість роботи.

Недоліки використання BGA-компонентів:

- складний контроль якості паяних з'єднань;
- складний процес пайки;
- відносно дорого.

Хоча використання корпусів типу BGA допомагає поліпшити характеристики друкованої плати та схеми в цілому, вони не позбавлені недоліків. Основна проблема мікросхем в таких корпусах полягає в неможливості оглянути корпус після того, як він був припаяний до друкованої плати. Таким чином, може бути складно виявити будь-які потенційні несправності та виправити їх, оскільки не є можливим оглянути поверхню, як це було б, наприклад, з корпусом типу PGA. Для розв'язання цієї проблеми необхідно використовувати рентгенові промені або комп'ютерну томографію для перевірки пошкоджень в паяних з'єднаннях. Такий процес може дорого коштувати.

Обладнання, необхідне для надійної пайки корпусів BGA, коштує дорого. Процес пайки компонентів вручну дуже складна задача, паяне з'єднання може бути ненадійним.

Інтегральні схеми BGA вимагають особливої уваги як під час експлуатації, так і під час процесу пайки. Контакти BGA тендітні, і неправильне поводження під час пайки призводить до пошкодження контактів і зміщення інтегральної схеми BGA, яка не може бути відновлена і може викликати пошкодження схеми.

Паяні з'єднання мікросхеми в корпусі BGA з контактним майданчиком друкованої плати схильні до згинальних напружень і «втоми», які викликані малюнком нагріву в процесі пайки оплавленням. В результаті можуть утворюватися тріщини під гострим кутом між паяним з'єднанням і контактною площадкою друкованої плати [5].

1.3 Аналіз різновидів корпусів типу BGA

Корпус BGA – це різновид технології «Flip Chip» (FC), в якій кристал електрично з'єднується з підкладкою корпусу друкованої плати. Інтегральна мікросхема перевернута або повернена лицьовою стороною вниз для з'єднання з підкладкою за допомогою припою. На відміну від технології «Wire Bond», в якій кристал з'єднується з підкладкою за допомогою тонкого електричного дроту, технологія FC перевертає мікросхему лицьовою стороною вниз і забезпечує електричне з'єднання безпосередньо з підкладкою корпусу друкованої плати. Корпуси типу BGA розрізняють на такі види:

- PBGA;
- TBGA;
- CBGA;
- MBGA;
- EBGA;
- FC-BGA;
- Micro BGA.

PBGA (Plastic ball grid array) – пластиковий масив шариків (рисунок 1.8). На сьогодні такий корпус отримав найширше розповсюдження і застосування. PBGA являє собою корпус підкладки на основі ламінату з порожнистим корпусом, в якому матриця прикріплюється до підкладки звичайним способом штампування. Сполучений пристрій і вся збірка монтується поверх і прикріплюються шарики припою, щоб сформувати корпус. Таке пакування забезпечує економічне пакувальне рішення, пропонуючи більш високу щільність у порівнянні з традиційними корпусами з рамкою для виводів. Вдосконалені можливості проектування і моделювання дозволяють оптимізувати корпус, необхідний для досягнення максимальних електричних і теплових характеристик. Корпус PBGA виготовляється в діапазоні розмірів від 17 мм x 17 мм до 35 мм x 35 мм, з кроком шариків 0,8

мм та 1 мм, для того щоб забезпечити кількість шариків від 208 до 976. Корпуси PBGA доступні з 2 або 4 шарами підкладки.

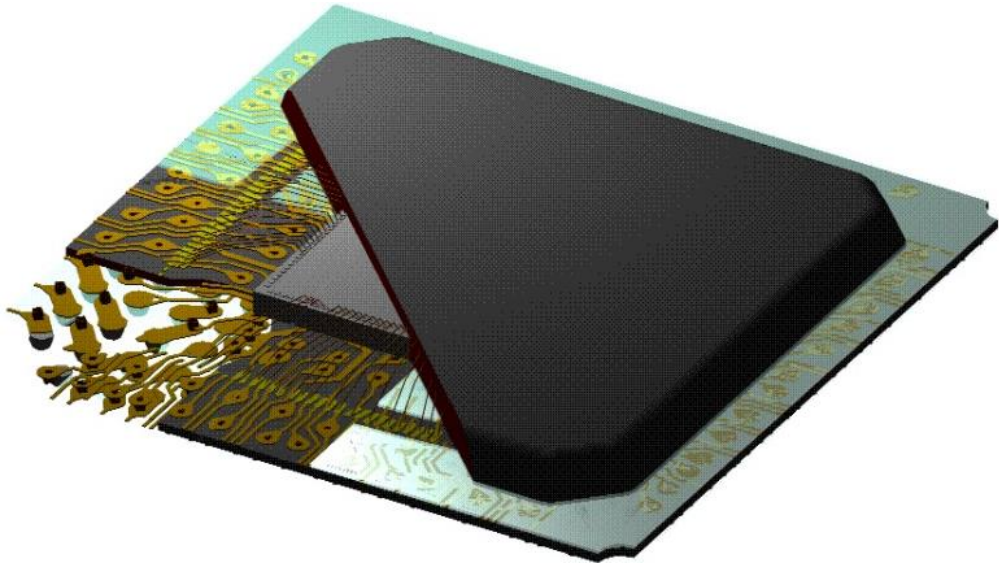


Рисунок 1.8 – Корпус PBGA [6]

TBGA (Tape ball grid array) – стрічкова сітка з шариками, здатна ефективно зменшити товщину корпусу і забезпечити відмінні електричні характеристики (рисунок 1.9). Більш того, позитивний ефект розсіювання тепла може бути отриманий, коли радіатор і мікросхема звернені лицьовою стороною вниз. Таким чином, TBGA підходить для високоефективного електрообладнання з тонкими корпусами. Для мікросхем звернених вниз слід вибирати технологію перевернутого кристалу, а для мікросхем, звернених вгору, слід вибирати дровове з'єднання. Треба зазначити, що TBGA має більш високу вартість ніж PBGA.

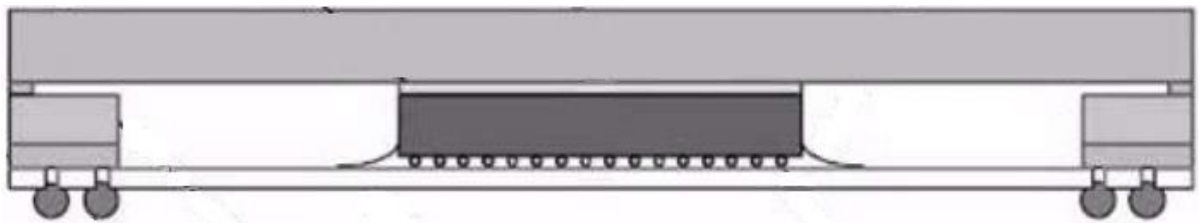


Рисунок 1.9 – Корпус TBGA [6]

CBGA (Ceramic ball grid array) – керамічна сітка з шариками (рисунок 1.10). Цей вид BGA-корпусу має кераміку в якості матеріалу підкладки та олов'яні шарики припою (співвідношення між оловом і свинцем: 10:90) з високою температурою плавлення. Такий тип з'єднання відрізняється чудовою теплопровідністю і електричними характеристиками. Крім того, CBGA має відмінну надійність, але має високу вартість. Тому корпусу CBGA більше підходять для автомобілів або високоефективних мікросхем.

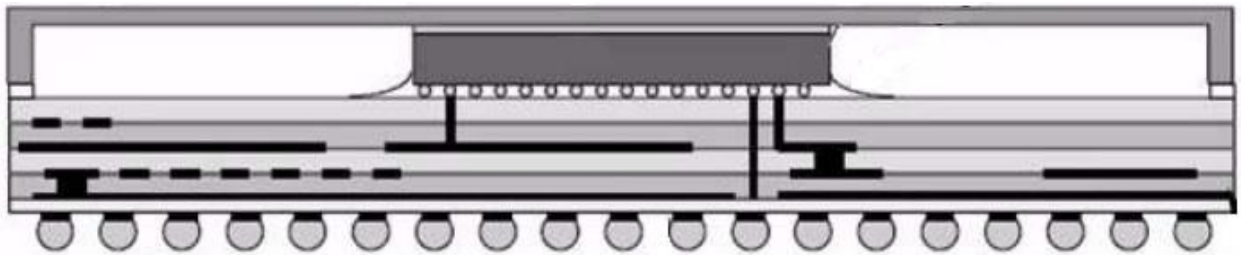


Рисунок 1.10 – Корпус CBGA [6]

MBGA (Metal ball grid array) – решітка з металевими шариками. Корпус розроблений компанією «Olin» з використанням металокераміки в якості підкладки. Ланцюги на підкладці виготовляються методом напилення зі стороною чіпу вниз і дротовим з'єднанням в якості внутрішнього сполучення. MBGA також може забезпечити відмінні електричні характеристики та ефект розсіювання тепла.

EBGA (Thermal enhanced ball grid array) – теплова посилена сітка з шариками (рисунок 1.11). Це ще одна форма PBGA з єдиною різницею в структурі, що полягає в додаванні радіатора. Чіп прикріплений безпосередньо до радіатора лицьовою стороною вниз, а електричне з'єднання між мікросхемою і друкованою платою здійснюється за допомогою дротового зв'язку. Метод герметизації виглядає наступним чином: перегородка будується на підкладці навколо чіпу, а потім використовується рідкий компаунд.

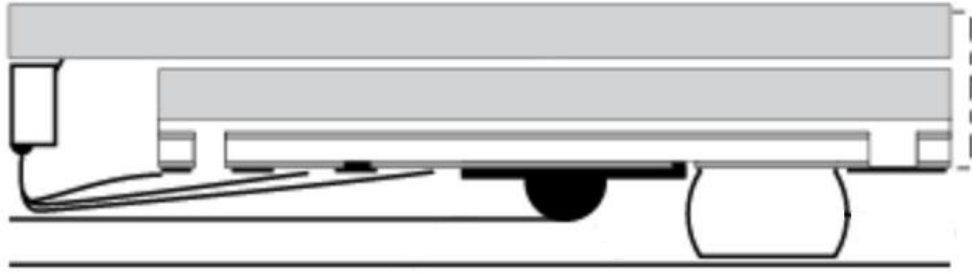


Рисунок 1.11 – Корпус EBGA [6]

FC-BGA (Flip chip ball grid array) – перевернута решітка з шариками (рисунок 1.12). Подібно CBGA з точки зору структури, але з використанням смоли Bismaleimide Triazine для заміни керамічної підкладки, FC-BGA економить більше. Крім того, такий корпус здатний скорочувати внутрішні ланцюги, ефективно покращуючи електричні характеристики. Матеріал, що використовується в металевій опуклості в більшості випадків використовує сплав олова та свинцю, тому цей тип матеріалу буде мати великий поверхневий натяг під час процесу плавлення. В результаті стружку можна витягати в положення корекції без застосування точного обладнання для суміщення стружки.

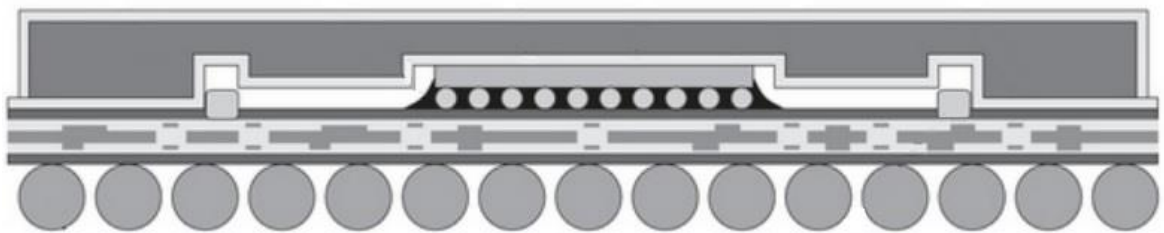


Рисунок 1.12 – Корпус FC-BGA [6]

Micro BGA – це тип корпусу в архітектурі якого використовується дуже мала відстань між кульками припою, що дозволяє корпусу бути лише трохи більше, ніж сам чіп. Micro BGA працює зі стороною мікросхеми вниз і з пакувальної стрічкою в якості підкладки. Між стружкою і стрічкою знаходиться шар еластомеру, що знімає напруження, викликане тепловим розширенням. З'єднання між стрічкою і мікросхемою здійснюється за

допомогою спеціальних срібних контактів з позолотою, а з'єднання між основною платою і зовнішнім середовищем здійснюється через BGA. Суттєва перевага мікро BGA полягає в його мініатюризації і невеликій вазі, що дозволяє широко застосовувати його в пристроях з обмеженим простором. Крім того, він підходить для зберігання мікросхем з невеликою кількістю контактів [6].

1.4 Аналіз особливостей монтажу друкованих плат

Інтегральні мікросхеми є одними з найважливіших елементів багатьох електричних пристроїв. Вони кріпляться на пластини із діелектрика різними видами монтажу друкованих плат. Припій забезпечує підключення виводів мікросхеми в загальний електропровідний ланцюг, і створення контакту з іншими робочими вузлами на друкованій платі. Різновидності монтажу можна поділити за такими параметрами: за кількістю залучених для монтажу сторін плати (односторонній або двосторонній монтаж), за типами залучених компонентів (вивідний, поверхневий або змішаний монтаж), по розташуванню компонентів на двосторонньому модулі (змішано-рознесений або змішаний монтаж). Основні види монтажу електронних модулів:

- поверхневий монтаж;
- змішано-рознесений монтаж;
- змішаний монтаж;
- односторонній вивідний і поверхневий монтаж;
- односторонній вивідний монтаж.

Поверхневий монтаж на друкованій платі може бути одностороннім або двостороннім. Використовуючи даний метод здійснюється мінімальне число технологічних операцій.

Використовуючи односторонній монтаж на діелектричну підкладку друкованої плати наносять пасту припою методом трафаретного друку. Кількість припою, що буде нанесено на друковану плату, має реалізовувати

головні електрофізичні характеристики електричних елементів, що вимагає відповідного контролю. Після цього необхідно зафіксувати та правильно спозиціонувати компонент на платі. Потім виконують пайку компонента шляхом оплавлення дозованого припою. Останнім кроком технологічного циклу монтажу виконується візуальний контроль паяних з'єднань, а також функціональний контроль та контроль всередині схеми.

Для двостороннього поверхневого монтажу існують різні способи реалізації. Перший спосіб передбачає початок технологічного процесу монтажу з нанесення пасти для паяння на нижню сторону плати. Після цього в місцях встановлення електричних компонентів наносять необхідну дозу клею і починають установку компонентів. В печі відбувається процес полімеризації клею і, одночасно з цим, відбувається процес оплавлення пасти припою. Потім плату перегортають іншою стороною, наносять на неї пасту припою та кріплять компоненти на верхню сторону плати, після чого плавиться верхня сторона. Для такого способу монтажу використовуються піч з одностороннім нагрівом.

При другому способі реалізації двостороннього поверхневого монтажу необхідно використовувати піч з двостороннім нагрівом.

При використанні змішано-рознесеного монтажу електричні модулі, які встановлюються в отвори (ТНТ-компоненти), розміщуються на верхній стороні друкованої плати, а електричні модулі для поверхневого монтажу – на нижній. Такий вид монтажу потребує процесу пайки подвійною хвилею припою.

Використання даного виду монтажу передбачає таку послідовність операцій: на поверхню друкованої плати необхідно нанести клей, на який кріпляться SMD-компоненти, в печі відбувається процес полімеризації клею. Потім необхідно провести установку компонентів в отвори, промити модуль і вже потім виконуються операції контролю.

Змішаний монтаж є одним з найскладніших видів монтажу. Прикладом реалізації такого виду монтажу є встановлення на одній стороні

друкованої плати SMD та THT-компонентів, а на іншій тільки SMD-компонентів.

Існує декілька видів реалізації змішаного монтажу. В першому з них на нижню сторону друкованої плати наносять спеціальний клей, а на вже на клей кріплять SMD-компоненти. На іншу сторону друкованої плати необхідно нанести паяльну пасту, а на неї потім кріпляться SMD-компоненти. Паяльну пасту можна наносити як методом дозування, так і методом трафаретного друку. В першому випадку процес нанесення паяльної пасти та клею можна виконати на одному і тому ж обладнанні – це скорочує час та витрати. Проте такий спосіб нанесення пасти не може використовуватись на промисловому виробництві через низьку стабільність та невелику швидкість процесу в порівнянні з трафаретним друком, і можливий лише в умовах нестачі трафарету або недоцільність його виготовлення. Подібна проблема може скластися при виробництві великої кількості електронних компонентів, коли з'являються значні витрати на виготовлення трафаретів. Витрати з'являються через велику кількість проблем технічного забезпечення при невеликих серіях виробництва.

Далі проводиться групова пайка усіх SMD-компонентів встановлених на верхній стороні друкованої плати. Процес пайки здійснюється методом оплавлення пасти припою або методом дозування. Ця операція є останнім кроком, який завершує технологічний цикл монтажу компонентів на друковану плату. Далі проводять візуальний контроль паяних з'єднань.

В другому випадку реалізації змішаного монтажу виконується інша послідовність виконання операцій. Перший етап: монтаж і пайка, з використанням пасти припою через трафарет, складних компонентів для поверхневого монтажу (PLCC, BGA, SO) на верхній стороні друкованої плати. Другий етап: після фіксації компонентів в отворах плати необхідно перевернути плату іншою стороною, нанести спеціальний клей та встановити всі інші компоненти. Потім вони, одночасно з контактами компонентів на іншій стороні плати, паяються подвійною хвилею припою. Використовуючи

такий спосіб монтажу можливе застосування обладнання, що забезпечує ефективну пайку компонентів як процесом розплавлення припою з однієї сторони плати, так і пайку хвилею припою з іншої сторони.

Використовуючи змішаний монтаж друкованої плати зростає кількість операцій контролю під час процесу пайки через велику складність монтажу плати при наявності компонентів на обох сторонах друкованої плати. Також з'являється необхідність в більшому контролі за якістю паяних з'єднань.

Односторонній вивідний і поверхневий монтаж є одним із стандартних технологій монтажу на поверхню друкованої плати. Спосіб монтажу компонентів такого типу здійснюється наступним чином: по перше необхідно нанести пасту припою на поверхню друкованої плати та встановити SMD-компоненти. По друге необхідно встановити компоненти ТНТ на оплавлену в печі пасту припою. Далі необхідно виконати пайку хвилею припою, після чого виконати промивку та зробити візуальний контроль паяних з'єднань друкованої плати.

Використання процесу пайки хвилею припою є стандартним методом одностороннього вивідного монтажу. Процес монтажу дуже простий: по перше необхідно закріпити ТНТ-компоненти на платі, далі, на спеціальному обладнанні, необхідно виконати пайку хвилею припою, а потім необхідно виконати візуальний контроль паяних з'єднань. Реалізація цього методу є дуже простою, можна використовувати як ручний, так і напівавтоматичний процес установки компонентів [7]–[9].

1.5 Аналіз особливостей процесу пайки друкованих плат

Створення електронного модуля починається з механічного з'єднання деталей і електронних компонентів в необхідній послідовності для того, щоб забезпечити їх правильне розташування і взаємодію для забезпечення необхідних технічних вимог. Такий електронний модуль складається з друкованої плати та розміщених на ній електронних компонентів. Друкована

плата є головним компонентом конструкції модуля. Вона виконує функції носія компонентів і встановлення електричних провідників.

Процесом пайки називають механічне з'єднання двох деталей за допомогою легкоплавкого сплаву. Процес пайки більше схожий на склеювання компонентів, де в ролі клею виступає розігрітий припій – сплав, що має низьку температуру плавлення.

Залежно від послідовності установки електронних компонентів пайка друкованих плат буває двох видів: групова – процес пайки проходить по всіх компонентах друкованої плати, або індивідуальна – процес пайки лише одного конкретного компонента.

Залежно від способу застосування технологій та обладнання виділяють такі види пайки друкованих плат:

- хвилею припою;
- у парогазовій фазі;
- інфрачервоним нагрівом;
- конвекційним методом;
- лазерним способом.

Пайка хвилею припою є ефективним та дешевим методом пайки, що дозволяє автоматизувати процес пайки для промислових виробництв. На сьогоднішній день пайка хвилею припою використовується як для пайки ТНТ-компонентів (більшою мірою), так і SMD-компонентів.

Переваги методу пайки хвилею припою:

- велика ефективність процесу;
- швидкість та економічність;
- процес пайки не залежить від розміру і щільності компонентів що спаюються;
- знижене навантаження на компоненти за рахунок низької температури пайки.

Процес пайки досить простий: для початку треба підготувати плату – спершу на неї наносять рідкий флюс за допомогою методу рівномірного

розпорошування, а потім підігрівають плату конвекційним методом, або за допомогою інфрачервоного випромінювання. Далі друковану плату запускають по конвеєру та занурюють її у ванну з розплавленим припоєм. Всередині ванни формується неперервний потік який утворює хвилю. Друкована плата, з розташованими на ній компонентами, накривається хвилею розплавленого припою до рівня виводів компонентів, що знаходяться на нижній поверхні плати. Під час процесу відбувається досконале змочування виводів компонентів і нанесених майданчиків контактів. Припій проникає в отвори скрізь вільні канали, і таким чином формує надійні паяні з'єднання.

Пайка методом розплавлення дозованого припою використовується лише для гібридного компонування (монтуються як THT-компоненти, так і SMD-компоненти) друкованих плат з поверхневим монтажем. Цей метод значно відрізняється від інших методів пайки. Процес стартує з нанесення пасти припою методом трафаретного друку на контактні площадки друкованої плати. Далі на поверхню плати кріпляться компоненти. Іноді пасту припою висушують після нанесення, з метою позбавлення з її складу летких інгредієнтів або зменшення шансу зсуву компонентів безпосередньо перед пайкою. Наступним кроком є розігрів плати до температури розплавлення виводів компонентів. В результаті з'являються паяні з'єднання між виводом компонента та контактним майданчиком друкованої плати. Такий метод пайки використовується для плат без вмонтованих в отвори компонентів, тобто тільки для плат з SMD-компонентами будь-яких типів.

Одним із різновидів пайки розпаленням дозованого припою є метод пайки в парогазовій фазі. В процесі пайки пари спеціальної рідини конденсуються на друкованій платі, тим самим утворюючи теплоту пароутворення на відкритих ділянках плати. Таким чином паста припою розплавляється та утворює виїмку між виводом компонента та контактним майданчиком плати. Далі треба остуджувати плату, щоб її температура досягла температури рідини, в цей момент процес конденсації припиняється,

тим самим закінчується нагрів пасти припою. Перед початком процесу необхідно трошки розігріти плату з компонентами з метою зменшення термічного впливу на компоненти, на плату та на паяні з'єднання, тому що підвищення температури плати, від її початкової температури (наприклад, кімнатної температури), до температури розплавлення припою, відбувається дуже стрімко і не піддається регулюванню. Рідина, що використовується під час пайки, являє собою інертний фотовуглець. Її температура дорівнює температурі розплавлення припою, вона також не регулюється.

Недоліком методу пайки в парогазовій фазі є те, що при використанні таких компонентів, як чіп-конденсатори або чіп-резистори, може з'явитись проблема, яку називають «ефект перекидання компонента». Причина її появи до кінця не відома, і технології для уникнення цього поки що не існує. При появі такого ефекту необхідно змінювати параметри процесу пайки до тих пір, поки не припиниться перекидання компонентів.

Лазерна пайка, або пайка променем лазера, відноситься до індивідуального (селективного) методу пайки, оскільки процес пайки відбувається на кожному окремому виводі або на ряді виводів компонента. Проте це не є недоліком, тому що безконтактність прикладення теплової енергії дає можливість підвищити швидкість монтажу аж до 10 з'єднань в секунду і наблизитися за швидкістю до пайки в парогазовій фазі або ІЧ-випромінюванням.

Лазерна пайка має багато переваг в порівнянні з іншими методами. Під час процесу пайки плата і корпуси компонентів майже не нагріваються, це дає можливість монтувати елементи, чутливі до впливу тепла. Враховуючи низьку температуру пайки та обмежений простір подачі тепла різко знижуються температурний та механічний вплив напруги між виводом компонента та його корпусом. Також не є критичним вибір матеріалу для підставки плати. Короткочасні дії тепла знижують товщину шару припою, який має дрібнозернисту структуру, що добре впливає на надійність паяного з'єднання. Обладнання для лазерної пайки може бути повністю

автоматизованим.

Також використання методу лазерної пайки дає можливість монтажу плат з високою щільністю компонування елементів (з розмірами контактних майданчиків до 25 мкм), без появи перемичок з сусідніми з'єднаннями або їх пошкодженням. Якщо використовувати добре просушену паяльну пасту відпадає необхідність використовувати паяльні маски, тому що під час пайки лазером не утворюються шарики припою або перемички. Також немає необхідності розігрівати друковану плату перед початком процесу пайки.

Конвекційна пайка оплавленням – це простий та один із найпоширеніших методів пайки, в якому нагрів друкованої плати, встановлених компонентів і розплавлення припою відбувається за рахунок примусової конвекції гарячого повітря. Конвекція – явище при якому перенесення тепла в рідинах, газах або сипких середовищах відбувається потоками самої речовини (в даному випадку – газів).

Пайка методом конвекції може відбуватись в камерних або конвеєрних печах. В камерних печах процес формування температурного профілю пайки відбувається за рахунок зміни температури потоку повітря протягом деякого часу всередині замкнутої камери, в середині якої встановлена друкована плата з нанесеною паяльною пастою і встановленими компонентами.

Метод пайки інфрачервоним випромінюванням є одним з кращих способів пайки компонентів на друкованій платі. Основним способом подачі тепла, який застосовується при використанні цього методу, є ІЧ-випромінювання. Такий вид подачі тепла має велику перевагу перед пайкою методом теплопередачі за рахунок теплопровідності або конвекції завдяки тому, що це єдиний спосіб теплопередачі, який забезпечує подачу теплової енергії по всій площі компонента, що монтується на друковану плату. Інші методи пайки постачають подачу теплової енергії лише на ту поверхню, яка монтується на друковану плату. В порівнянні з пайкою в парогазовій фазі, в процесі пайки з ІЧ-випромінюванням швидкість нагріву можна регулювати

змінною потужності кожного окремого випромінювача і швидкості руху конвеєра з друкованою платою. Таким чином термічні напруги в компонентах і платах можуть бути знижені за рахунок поступового нагрівання елементів. Головним недоліком пайки з ІЧ-нагріванням є те, що потужність енергії випромінювання, що впливає на компоненти та плати, на пряму залежить від матеріалів, з яких вони виготовлені. Виходячи з цього, нагрівання відбувається нерівномірно в межах одного пристрою, що монтується.

Іноді, в обладнанні для пайки ІЧ-нагріванням замість ламп ІЧ-випромінювання застосовуються панельні випромінювальні системи. В такому обладнанні випромінювання має більшу довжину хвилі, ніж випромінювання традиційних джерел для пайки друкованих плат. Випромінювання в таких установках не нагріває саму плату з гібридним компонуванням, а поглинається технологічним середовищем, що в свою чергу подає тепло на друковану плату за рахунок конвекції. Такий спосіб пайки запобігає появи ряду недоліків, властивих звичайному методу пайки з ІЧ-нагріванням, таких як нерівномірне нагрівання окремих областей гібридного компонування, або неможливість пайки компонентів в корпусах, непрозорих для інфрачервоного випромінювання [7]–[10].

1.6 Постановка задач досліджень

Процес пайки BGA-мікросхем дуже не простий, та вимагає великої точності від обладнання та оператора, який виконує операцію пайки та контроль за цим процесом. Проаналізувавши особливості пайки BGA-мікросхем та дефекти, що виникають в паяних з'єднаннях, очевидно що процес пайки можна удосконалити за рахунок можливості отримати фактичну температуру в зоні нагріву, що діє на мікросхему. Це дасть можливість регулювати температуру в процесі пайки та мінімізувати можливість появи дефектів пайки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати методи монтажу та пайки BGA-мікросхем;
- проаналізувати переваги пайки BGA-мікросхем методом конвекційного нагріву та нагріву ІЧ-випромінюванням;
- проаналізувати причини появи дефектів паяних з'єднань в процесі пайки BGA-мікросхем;
- виконати розрахунки залежності температури пайки методом конвекції від дистанції між джерелом нагріву та друкованою платою;
- виконати розрахунки залежності температури пайки ІЧ-випромінюванням від дистанції між джерелом нагріву та друкованою платою.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МОНТАЖУ ТА ПАЙКИ МІКРОСХЕМ В КОРПУСІ BGA

2.1 Особливості монтажу BGA-компонентів на друковану плату

Беручи до уваги відносно високу вартість мікросхем в корпусі типу BGA (особливо мікропроцесорних) та технічну складність їх заміни, стає очевидним прагнення до зменшення дефектів в процесі монтажу та мінімізації пошкоджень в процесі пайки компонентів такого типу.

Мікропроцесорні BGA-корпуси, особливо корпус PBGA, є дуже чутливими до поглинання вологи з навколишнього повітря. Стандарт IPC/JEDEC J-STD-020C [11] розрізняє 8 рівнів чутливості електронних елементів до вологи. Термін придатності компонента після відкриття упаковки наведений в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Термін придатності компонента після відкриття упаковки за стандартом IPC/JEDEC J-STD-020C

MSL	Термін придатності	Умови
1	Не обмежено	$\leq + 30\text{ }^{\circ}\text{C} / 80\% \text{ RH}$
2	1 рік	$\leq + 30\text{ }^{\circ}\text{C} / 60\% \text{ RH}$
2a	4 тижні	
3	148 годин	
4	72 години	
5	48 годин	
5a	24 години	
6	Час на етикетці	

Період з моменту відкриття захищеного від вологи вакуумного пакування до початку пайки визначає термін придатності компонента. MSL1

– найкращий рівень, означає, що компонент не потребує ні спеціального вакуумного пакування, ні обробки температурою перед процесом його монтажу. Компоненти з рівнем чутливості до вологи MSL1 мають необмежений термін придатності.

Для звичної технології «олово-свинець» і температурах пайки, які не будуть перевищувати 230 °С, захищене вакуумне пакування необхідне лише для інтегральних схем більшого розміру, таких як BGA або PQFP – вони застосовують більше число виводів. При переході на технологію пайки без використання свинцю та застосування температури яка на 35 °С буде перевищувати температуру звичайної пайки, необхідно використовувати компоненти зі зниженим, хоча б на один показник, рівень MSL для елементів в пластмасових корпусах середніх та малих розмірів. Після закінчення терміну придатності передбаченого класифікацією MSL, безпечне використання елемента можливе лише після процесу просихання, який потребує обробки теплом в печі протягом від 24 годин до 48 годин при температурах від 90 °С до 125 °С. Для того, щоб виконати усі умови зберігання чутливих до вологи компонентів, при цьому не втрачати час на процес просихання, має сенс оснастити приміщення шафами сухого зберігання (рисунок 2.1) [12].



Рисунок 2.1 – Шафи сухого зберігання [12]

SMT (Surface Mount Technology) – технологія поверхневого монтажу та пов'язані з нею компоненти для поверхневого монтажу значно прискорюють збірку друкованої плати, оскільки компоненти просто встановлюються на плату і немає потреби використовувати отвори для електричних елементів. Майже усі сучасні пристрої, які виготовляються в промислових масштабах, використовують технологію поверхневого монтажу, тому що вона дозволяє отримати багато переваг при виробництві друкованих плат. Враховуючи розміри компонентів SMT, їх використання дозволяє розмістити набагато більше електроніки, займаючи набагато менше простору. Крім розміру, SMT дає можливість використовувати автоматизований процес збірки та пайки друкованих плат, що, в свою чергу, забезпечує хороше підвищення надійності, а також величезну економію витрат. В сучасному світі технологія поверхневого монтажу є найголовнішою технологією, яка використовується для збірки друкованих плат у виробництві електроніки [13]–[15].

Для досягнення максимально точного встановлення BGA-мікросхеми на друковану плату необхідно дуже ретельно зіставити її за реперними позначеннями. Реперні позначення – це елементи малюнка друкованої плати, які використовуються для корекції похибок в процесі виготовлення або збірки плати. Вони розпізнаються системою технічного зору обладнання для збірки друкованої плати, після чого в систему координат автоматичного обладнання задається корекція з урахуванням різниці між вимірним і номінальним становищем малюнка друкованої плати.

На більшості готових друкованих плат реперні знаки та шовкографічний контур вже нанесені, тому можна з легкістю зрозуміти куди необхідно встановити компонент. В тому ж разі якщо їх немає, то необхідно скористуватися спеціальними центрувальними рамками у вигляді прямокутної металевої пластини з прямокутним отвором посередині. Периметр рамки, що знаходиться на друкованій платі зовні, повинен відповідати зовнішньому периметру компонента, а периметр рамки що

знаходиться всередині, повинен збігатися з кордоном контактних майданчиків на платі. Рамку необхідно помістити на плату таким чином, щоб контур, який знаходиться всередині, ліг по периметру поля контактних майданчиків, і вже потім позиціюється сам компонент.

Для автоматичної серійної установки BGA-компонентів використовують системи відеосуміщення. Такі системи дозволяють в режимі реального часу спостерігати на моніторі та, при необхідності, одразу скоригувати точність суміщення зображень виводів BGA-мікросхеми та контактних майданчиків плати. Для того, щоб отримати максимально точне зображення, використовуються спеціальні камери з високою роздільною здатністю. Процес відеосуміщення починається з точного сполучення шарикових виводів BGA-мікросхеми та контактних майданчиків друкованої плати (рисунок 2.2). Далі, між мікросхемою та місцем посадки на платі, розташовується блок оптики з розділенням зображення та дихроїстичною (розділяє на два кольори) призмою. Потім, на екрані монітора, оператору відображається два збільшених зображення в різних кольорах: контактні майданчики плати та виводи BGA-мікросхеми. В процесі використовується освітлення, що запобігає появи тіней за допомогою галогенних ламп або світлодіодів. Далі необхідно досягти візуального накладення обох зображень до їх повного суміщення, для цього оператор повинен користуватися джойстиком точного переміщення плати по осях X та Y [14]–[16].

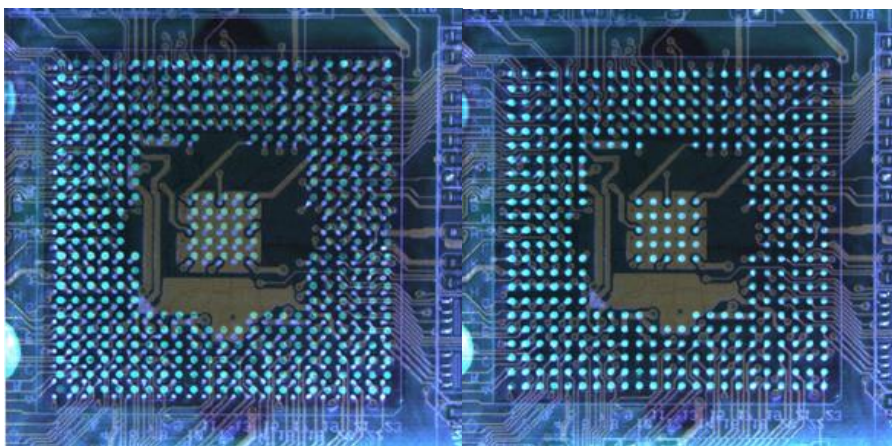


Рисунок 2.2 – Суміщення шарикових виводів з посадочним місцем плати [16]

Монтаж BGA-компонентів може відбуватися в ручному, напівавтоматичному та автоматичному режимах. В ручному режимі нема потреби використовувати спеціальне обладнання, але необхідна висока кваліфікація оператора. Ефективність у ручного виду монтажу дуже низька. Саме тому на виробництві використовуються автоматичні та напівавтоматичні системи.

Основний метод монтажу мікросхем в корпусі BGA – оплавлення із застосуванням конвекції. Використовуючи даний спосіб важливо стежити за точністю дотримання температурного режиму та використовувати обладнання та інструменти високої якості. Під час процесу монтажу необхідно:

- термостіл;
- ремонтна станція;
- конвекційна піч;
- термоповітряна станція.

Якісне виконання поставленого завдання монтажу BGA-мікросхеми можливе лише за умови використання професійного обладнання. Воно дає можливість підібрати оптимальний наконечник, або встановити необхідну температуру для роботи. Якщо крок пайки менш ніж 1 мм рекомендується застосовувати спеціалізований автоматичний центр для ремонту.

Термостіл дає можливість нагріти компоненти до необхідної температури за мінімальний час. Для хорошого налаштування конвекційного режиму необхідно вибрати відповідний термопрофіль (дані будуть збережені в пам'яті пристрою). Якщо необхідно виконати пайку в рамках дрібносерійного виробництва, з високою продуктивністю застосовується конвекційна піч. Головною перевагою автоматичного обладнання цього типу стає рівномірне прогрівання з мінімальними температурними навантаженнями.

При монтажі інтегральних мікросхем в корпусі BGA додатково використовують:

- пасту припою;
- флюс;
- захист від вологи;
- рідину для відмивання.

Пасту припою підбирають в залежності від потрібного рівня змивання, в'язкості, або змісту галогенів. На контактному майданчику розміщаються контактні мікроотвори, завдяки чому відбувається компенсація нестачі припою. Основним захистом від зовнішніх факторів та вологи служить вологозахисне покриття. Застосовуються акрилові, силіконові, поліпарааксилінові, епоксидні склади пасти.

Під час процесу монтажу BGA-мікросхеми флюс може використовуватися в рідкій або гелеобразній формі. Головною функцією флюсу є захист поверхні від окислення, поверхневого натягу, розчинення сульфідів та оксидів. Під час роботи з шаблонами необхідно брати до уваги той факт, що існують склади флюсу, які здатні деформувати або пошкодити шаблони [16]–[18].

2.2 Обладнання для монтажу та пайки BGA-мікросхем

Для автоматичного монтажу інтегральних мікросхем в корпусі типу BGA на виробництві, як правило, використовуються автоматичні та напівавтоматичні системи.

Напівавтоматичний центр технічного обслуговування BGA-мікросхем ProfPlacer дає можливість гарантувати велику точність та високу повторюваність монтажу BGA-компонентів (рисунок 2.3). Таке обладнання забезпечує мінімізацію впливу людського фактора. Для максимально точного розташування чіпу і плати в ньому є лазерний вказівник цілі, що вмонтований в установчу головку. Після фіксації чіпу високоточна камера

виїжджає над друкованою платою. Зображення з камери дублюються на LCD монітор, в якому можна побачити процес суміщення шарикових виводів мікросхеми та контактних майданчиків плати. Контроль за процесом суміщення ведеться за допомогою мікрометричних гвинтів керування. Після суміщення BGA-мікросхеми починається пайка (по заздалегідь підібраній автоматизованій програмі) [18].



Рисунок 2.3 – Напівавтоматичний центр технічного обслуговування BGA ProfPlacer [18]

Обладнання для монтажу SMD-компонентів на друковані плати Quadra DVC EVO має у своєму арсеналі дві головки для установки модулів (рисунок 2.4). В такому обладнанні використовується процес цифрового відеоцентрування компонентів «на льоту». Одночасно з цим він може бути укомплектований додатковою головкою дозування для нанесення пасти припою або клею на друковані плати. Такі переваги Quadra DVC EVO дають можливість монтувати широкий перелік SMD-компонентів, включаючи BGA-мікросхеми [18].

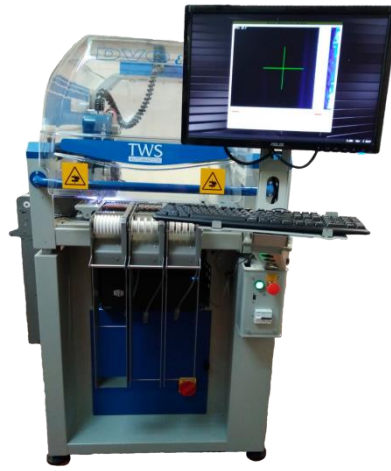


Рисунок 2.4 – Автомат Quadra DVC EVO [18]

Високоточний, інтелектуальний, модульний автомат для установки SMD компонентів RS-1 (рисунок 2.5). Автомат має головку з вісьмома вакуумними наконечниками, яка може підлаштовуватися по висоті знаходження від поверхні друкованої плати в діапазоні від 1 мм до 25 мм в залежності від розмірів компонентів, що встановлюються. Це дало можливість значно покращити його функціональні можливості та збільшити продуктивність. Також RS-1 оснащений лазерною системою центрування, роздільна здатність якої в багато разів вище інших відеосистем центрування. Така роздільна здатність дає можливість встановлювати навіть найменші компоненти. Крім того, вона дозволяє проводити 3D вимірювання компонентів [18].



Рисунок 2.5 – Автомат для установки SMD компонентів RS-1 [18]

Монтаж BGA-мікросхем – складне завдання навіть для досвідчених спеціалістів. Сотні виводів з малим кроком та велика площа корпусу значно ускладнюють завдання монтажу. Тому вимоги до обладнання для монтажу BGA-компонентів надзвичайно високі.

Обладнання для пайки та монтажу BGA-компонентів повинно забезпечувати [18]:

- рівномірний нагрів плати;
- дотримання температурних режимів під час роботи;
- можливість роботи з габаритними платами;
- універсальність.

2.3 Порівняння методів пайки конвекційним нагрівом та ІЧ-випроміненням

BGA-компоненти, як і багато інших подібних компонентів, при високій складності їх монтажу мають блискучу особливість самоцентрування в момент розплавлення припою і формування паяного з'єднання. Така особливість обумовлена силами поверхневого натягу під час процесу змочування розплавленим припоєм компонентів що з'єднуються. Ефект самоцентрування нівелює дефект суміщення та зрушення компонентів відносно один одного, та виконується при дотриманні таких умов: припій повинен змочити поверхні які з'єднуються, корпус повинен мати можливість зміщення. Під час процесу пайки BGA-мікросхем слід мати на увазі, що під час монтажу корпусів, які мають багато виводів (зі стороною 30 мм або більше), необхідно дотримуватись жорстких вимог з копланарності як корпусу, так і друкованої плати в місці монтажу компонента. Такі умови повинні виконуватися в тому числі в момент нагрівання обох деталей до температури пайки. Певною мірою некомпланарність може бути збалансована товщиною шару пасти припою, яка буде нанесена на ламелі друкованої плати. Найчастіше це 0,15 мм та визначається товщиною

трафарету. Реакцію друкованої плати, за ознакою короблення, при температурних впливах важко спрогнозувати, вона мінімізується конструктивними особливостями. Головними з таких особливостей є симетрія поперечного перерізу багат шарових друкованих плат, структура багат шарових друкованих плат з фольгою на зовнішніх шарів, баланс міді. Подібні процеси можуть відбуватися в динамічному режимі при механічних впливах (вібрації, ударах, прискоренні), і повинні бути вирішені оптимізацією конструкційних рішень фіксації друкованої плати в корпусі.

В сучасному світі пайка SMD-компонентів може здійснюватися багатьма методами, але для пайки BGA-мікросхем підходять далеко не всі з них. Нині основним методом є оплавлення з використанням примусової конвекції – це коли повітря розігрівається в стислом просторі за допомогою подачі додаткового гарячого повітря зі швидкістю, достатньою для його змішування та вирівнювання температури у повному обсязі. Це і є основною відмінністю конвекційного методу від звичного термофену, який обігрівляє елемент постійним потоком повітря з температурою, що перевищує температуру оплавлення припою на величину, яка може бути значно більшою необхідної різниці в 25 °C, що запобігає локальний перегрів та потенційні дефекти паяних з'єднань.

При використанні інфрачервоного методу температура в кожній окремій області пайки може трішки відрізнятись одна від одної, тому що окремі ділянки плати мають ефект віддзеркалення, тому коли найхолодніші точки плати ще не досягнули необхідної температури пайки, найгарячіші – стають перегрітими.

Пайка методом конвекційного нагріву використовуються на підприємствах серійного та масового виробництва, або при відновленні електронних компонентів. У печах конвекційного нагріву створюються зони нагріву, температура в яких повинна відповідати заданому профілю пайки. Такий метод пайки позбавлений недоліку можливого перегріву корпусу на відміну від інфрачервоного. Але з'являється проблема локальної підтримки

температури в зонах нагріву. Для того, щоб цього уникнути необхідно, щоб зона пайки була ізольована від зовнішнього середовища.

Для пайки або ремонту електронних компонентів застосовують термоповітряні паяльні станції. Використовуючи різні насадки можна монтувати корпуси різного типу. Процес пайки електронних компонентів за допомогою термоповітряних паяльних станцій має два основних недоліки: прогрів контактних майданчиків компонента відбувається нерівномірно, та складність контролю температури в зоні нагріву, що при тривалому впливі високої температури призведе до виведення його з ладу [17], [20]–[24].

2.4 Розрахунки залежності температури пайки методом конвекції від дистанції між джерелом нагріву та друкованою платою.

Передача тепла від термофену до поверхні друкованої плати розраховується за формулою (2.1):

$$Q = \frac{\lambda S t \Delta T}{l}, \quad (2.1)$$

де λ – теплопровідність повітря;

S – площа зони нагріву;

t – час нагріву;

$\Delta T = T_{\text{джер}} - T_{\text{среди}}$ – різниця температур між джерелом тепла та навколишньою середою;

l – відстань від джерела тепла до поверхні корпусу.

Для розрахунку кількості тепла в робочій зоні (2.2) потрібно враховувати особливості конструкції (рисунок 2.6), які впливають на розсіювання повітря при виході з сопла насадки термофену (кут розсіювання, який залежить від конструкції сопла).

$$K_r = \frac{r}{l \cdot \tan \alpha + r}, \quad (2.2)$$

де r – радіус сопла насадки;

α – відстань, на яку розсіюється повітря при виході з сопла.

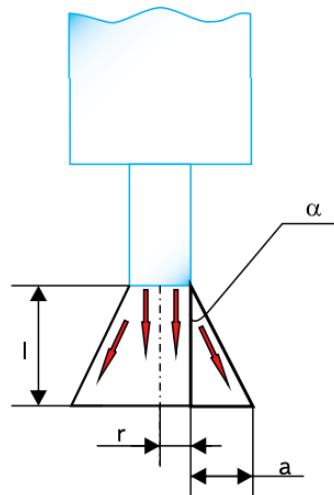


Рисунок 2.6 – Розподілення потоку повітря

Тоді кількість тепла, що виділяється в робочій зоні можна розрахувати за формулою (2.3):

$$Q = K_r [(\lambda St \Delta T) / l]. \quad (2.3)$$

Температура нагріву в робочій зоні залежить від часу, умов теплообміну і теплоємності матеріалу плати (2.4):

$$T_H = T_T \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_H}} \right), \quad (2.4)$$

де T_T – температура теплоносія;

τ_H – постійна часу нагріву (2.5).

$$\tau_H = \frac{C_T}{(\alpha \cdot S)}, \quad (2.5)$$

де C_T – теплоємність матеріалу друкованої плати;

α – коефіцієнт теплообміну джерела тепла з поверхнею друкованої плати (2.6).

$$\alpha = \frac{P}{(S \cdot \Delta T)}, \quad (2.6)$$

де P – потужність конвекційного нагріву (2.7).

$$P = K_r \frac{\partial Q}{\partial t} = K_r \frac{\lambda S \Delta T}{l}. \quad (2.7)$$

Вихідні данні для розрахунку потужності нагріву: різниця температур $\Delta T = 255 \text{ }^\circ\text{C}$, відстань від джерела $l = 4 \text{ мм}$, 8 мм та 12 мм , час нагрівання $t = 20 \text{ с}$, середня теплопровідність повітря λ від $80 \text{ }^\circ\text{C}$ до $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Результати розрахунків потужності конвекційного нагріву наведені у вигляді залежності зображені на рисунку 2.7.

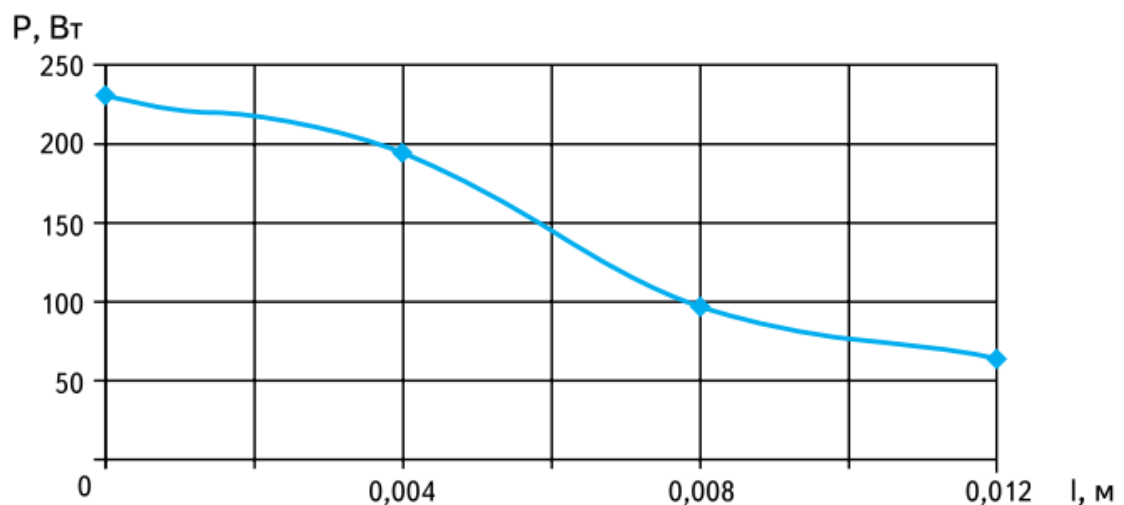


Рисунок 2.7 – Залежність потужності в зоні нагріву від відстані до поверхні плати

Залежність температури в зоні нагріву від часу при різних відстанях від джерела зображена на рисунку 2.8.

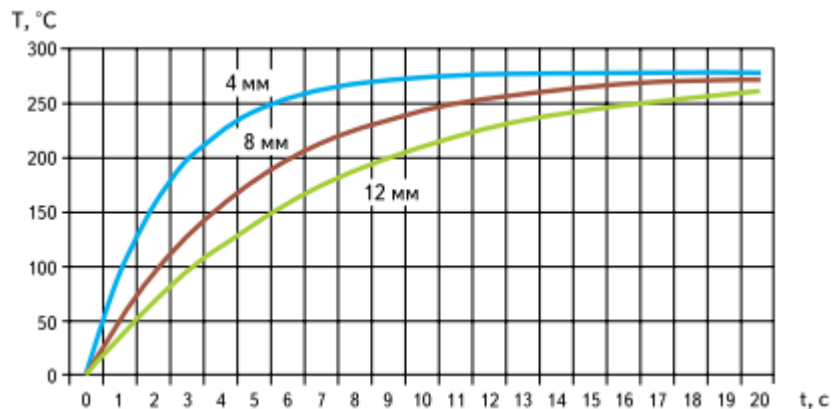


Рисунок 2.8 – Залежність температури в зоні нагріву від часу при різних відстанях від джерела

Температура, під час процесу пайки BGA-компонентів методом конвекції, пропорційна температурі прогрітого повітря, швидкості його руху та залежить від відстані до поверхні зони, що нагрівається. Оптимальна дистанція від зони що нагрівається до насадки термофену не повинна перевищувати 5 мм [17], [20]–[24].

2.5 Розрахунки залежності температури пайки ІЧ-випромінюванням від дистанції між джерелом нагріву та друкованою платою

Метод нагріву інфрачервоним випромінюванням широко використовується при пайці електронних компонентів як в дрібносерійному, так і в серійному виробництві. Застосування джерел нагріву ІЧ-випромінюванням для пайки та монтажу компонентів з великим числом виводів дає можливість точного контролю температури пайки, в той час як для методу конвекційного нагріву це проблематично.

У сучасному обладнанні для пайки ІЧ-випромінюванням замість галогенних ламп все частіше використовуються потужні керамічні нагрівачі

(рисунок 2.9). По боках передньої чорної нагрівальної панелі вмонтована електрична спіраль для нагріву. Максимальна продуктивність в зоні високих температур досягається за рахунок використання позолоченого покриття задньої частини, спеціальної чорної емалі та вбудованої теплоізоляції.



Рисунок 2.9 – Керамічний інфрачервоний випромінювач SHTS [25]

Через надійність монтажу нагрівальної спіралі, такий високотемпературний ІЧ-випромінювач можна використовувати незалежно від його положення. На зворотній стороні спіралі знаходиться патрон для кріплення. Для захисту нагрівальної спіралі та кераміки високотемпературні випромінювачі покриті глазур'ю.

Обладнання такого типу здатне віддавати до 98 % енергії випромінювання та об'єднувати в собі експлуатаційні та конструктивні вимоги до ІЧ-нагрівачів з вимогами до енергоощадження. Це дає можливість оператору для оптимального вирішення завдань енергоємного нагріву:

- робоча температура 860 °С;
- максимальна потужність нагріву на квадратний метр;
- максимально допустима температура 900 °С;
- діапазон довжини хвилі від 2 мкм до 10 мкм.

Головним недоліком інфрачервоних випромінювачів є більший температурний вплив на корпус компонента (рисунок 2.10) [17], [20]–[24].

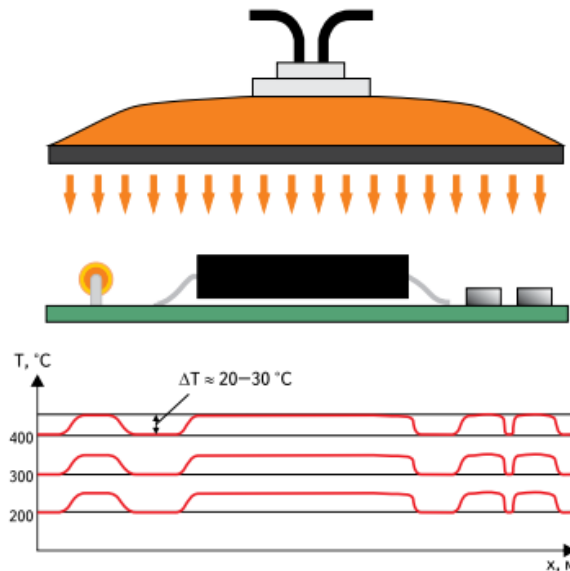


Рисунок 2.10 – Розподілення температури в зоні нагріву ІЧ-випромінювача

Розрахунок температури в зоні ІЧ-нагріву починається з розрахунку інтенсивності потоку випромінення (2.8):

$$I = 2 \frac{P_D}{\sqrt{x^2 + h^2}}, \quad (2.8)$$

де P_D – потужність джерела;

h – висота від джерела ІЧ-випромінення до поверхні;

x – довжина зони нагріву.

Інтенсивність прямого випромінення розраховується за формулою (2.9):

$$I = 2 \int_0^x \frac{P_D}{\sqrt{x^2 + h^2}} dx. \quad (2.9)$$

Температура в зоні ІЧ-нагріву розраховується за формулою (2.10):

$$T_H = \sqrt[4]{\frac{I + KT_c^4}{K}} - 273, \quad (2.10)$$

де K – постійна Стефана-Больцмана.

Температура в зоні нагріву також залежить від часу впливу (2.11):

$$T_{\text{нагр}} = T_H \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_H}} \right), \quad (2.11)$$

де $T_{\text{нагр}}$ – температура в зоні нагріву;

τ – час впливу теплового потоку;

τ_H – постійна часу нагріву (2.12):

$$\tau_H = \frac{C_T}{(\alpha \cdot S_H)}, \quad (3.12)$$

де S_H – площа зони нагріву, яка обмежена геометричними розмірами відбивача;

C_T – теплоємність матеріалу друкованої плати;

α – коефіцієнт теплообміну з поверхнею плати (2.13):

$$\alpha = \frac{P_H}{(S_H \cdot \Delta T)}, \quad (2.13)$$

де ΔT – різниця температури нагріву та навколишньої середи;

P_H – потужність в зоні нагріву (2.14).

$$P_H = I \cdot S_H. \quad (2.14)$$

Залежність потужності ІЧ-випромінювача, яка виділяється в зоні ІЧ-нагріву, від відстані компонентів на друкованій платі до джерела випромінювання зображена на рисунку 2.11.

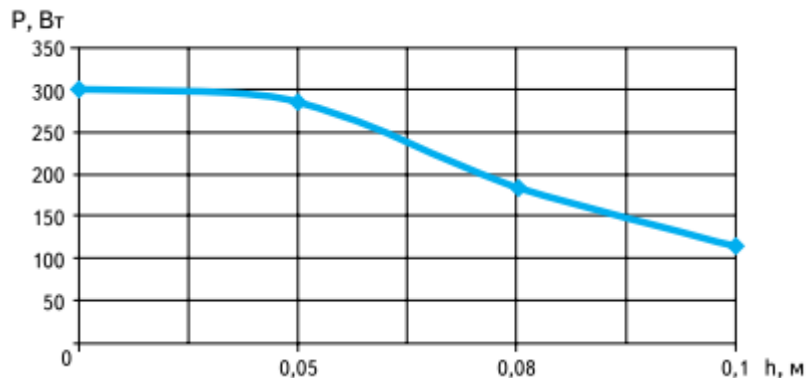


Рисунок 2.11 – Залежність потужності ІЧ-нагріву від відстані до поверхні друкованої плати

Залежність температури в зоні нагріву від часу при різній відстані до ІЧ-випромінювача відображена на рисунку 2.12.

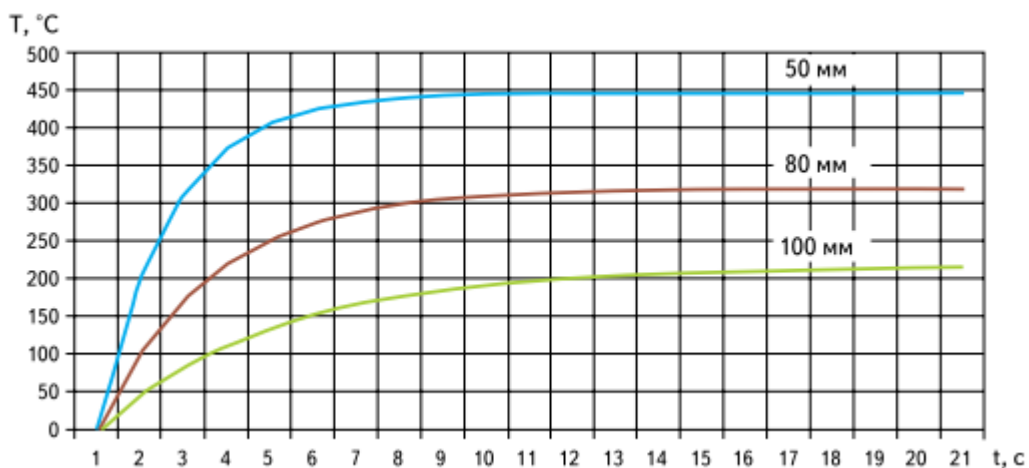


Рисунок 2.12 – Залежність температури в області пайки від часу та відстані до джерела випромінювання

Як видно з графіків залежності при збільшенні відстані від джерела ІЧ-випромінювання значно змінюється температура. Це пов'язано з тим, що зростає зона нагріву компонента, тому кількість переданого тепла розсіюється на більшу площу. Проте метод пайки ІЧ-випромінюванням не настільки чутливий до зміни відстані від джерела, як метод конвекції, тому що повітря не є перешкодою для ІЧ-випромінювання, в той час, як температура, що переноситься потоком повітря від термофену, розсіюється

при виході з сопла внаслідок конвекційного механізму теплообміну.

2.6 Контроль якості паяних з'єднань та дефекти пайки BGA-компонентів

Забезпечення оптимальних умов для створення надійного паяного з'єднання є одною з головних проблем, що з'являються під час процесу пайки мікросхем в корпусі BGA. Максимальна надійність електронного компонента та паяних з'єднань повинна розроблятися на етапі проектування (вибір матеріалів, методу пайки та монтажу), а реалізовуватися в процесі роботи виробництва після повної оптимізації та налаштування параметрів технології монтажу та пайки, в тому числі нанесення дозованої пасти припою та вибору режимів пайки.

Ще одна проблема пайки BGA-мікросхем це збільшення кількості контактних виводів та зменшення відстані між ними. Дана проблема з'явилась в результаті постійного збільшення функціональності сучасних пристроїв, на фоні тенденції до все більшої мініатюризації таких пристроїв. Одночасно з цим необхідно забезпечити на високому рівні якість сигналу та по можливості мінімізувати вартість виробництва.

BGA-мікросхеми є одними з найскладніших компонентів для позиціонування при монтажі, пайці та контролю паяних з'єднань. Для візуального контролю паяних з'єднань інтегральних мікросхем в корпусі BGA необхідне використання профільного обладнання, наприклад систем візуального контролю, або систем рентгенівського контролю.

Обладнання для рентгенографії має великий потенціал для перевірки паяних з'єднань шарикових виводів. Зазвичай рентгенівське контрольне обладнання має необхідне програмне забезпечення, що дає можливість оцінити певні дефекти паяних з'єднань в автоматичному режимі, виключаючи вплив суб'єктивного фактору [12].

Дефекти пайки BGA-мікросхем що виникають найчастіше:

- ефект «попкорну»;
- пустоти в паяному з'єднанні контактної майданчика друкованої плати з шариком BGA;
- тріщини та розриви в паяних з'єднань;
- відсутність змочування контактних майданчиків;
- перегрів шарикових виводів;
- деформація або деструкція паяних з'єднань.

Ефект «попкорну» виникає якщо не дотримуватись вимог до збереження компонентів. Якщо компонент поглинає багато вологи, то під час нагрівання може виникнути формування збиткової кількості припою на паяних з'єднаннях або виникнення перемичок (рисунок 2.13). Також це може призвести до пошкодження мікросхеми. Для того, щоб уникнути цього дефекту необхідно забезпечити зберігання BGA-компонентів у вакуумному пакуванні, або використовувати шафи сухого зберігання.



Рисунок 2.13 – Ефект «попкорну» [26]

Тріщини та розриви в паяних з'єднань можуть з'являтися при низькій температурі або нестачі часу пайки (рисунок 2.14). Метод контролю – візуальний або рентген. Запобігти виникненню такого дефекту може підвищення температури та часу пайки.

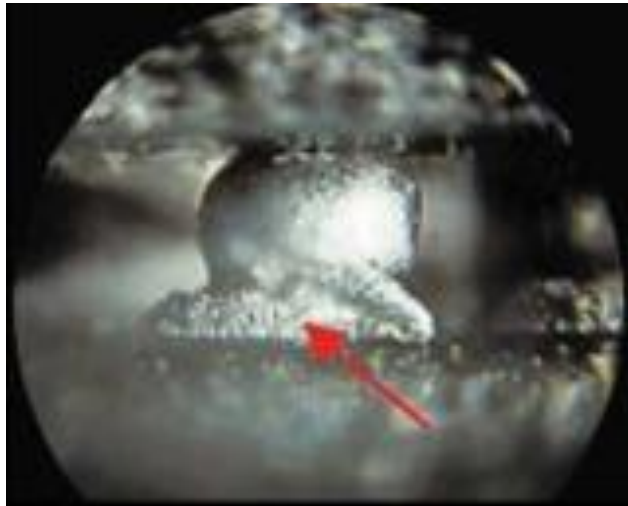


Рисунок 2.14 – Тріщини та розриви паяних з'єднань [26]

Відсутність змочування контактних майданчиків – відсутність або поганий електричний та механічний контакт паяного з'єднання (рисунок 2.15). Запобігти виникненню такого дефекту можна використовуючи вакуумне пакування друкованих плат.

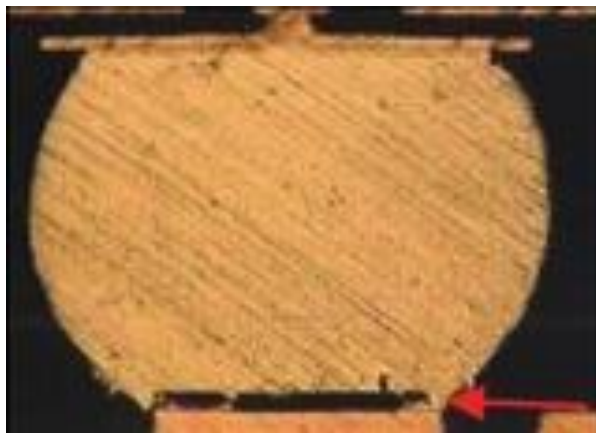


Рисунок 2.15 – Відсутність змочування контактних майданчиків [26]

Перегрів шарикових виводів – бугриста, матова та нерівна поверхня паяних з'єднань (рисунок 2.16). Виникає при надмірній температурі під час процесу пайки. Для того, щоб запобігти виникненню такого дефекту необхідно скорегувати температурний профіль пайки.



Рисунок 2.16 – Перегрів шарикових виводів [26]

Деформація або деструкція паяних з'єднань призводить до зниження механічної цілісності паяних з'єднань (рисунок 2.17). Може виникати в результаті вібрації під час пайки в конвеєрній печі. Для того, щоб запобігти виникненню такого дефекту необхідно запобігти виникненню вібрації в процесі пайки [26].



Рисунок 2.17 – Деформація паяних з'єднань [26]

2.7 Висновки до 2 розділу

У другому розділі розглянуто особливості монтажу та пайки BGA-мікросхем, розглянуті різновиди обладнання для пайки. Порівняно пайку методом конвекційного нагріву з методом ІЧ-нагріву. Також, проаналізовані причини появи дефектів пайки BGA-мікросхем, та способи запобігання їх появи.

3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО РІШЕННЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ФАКТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ В РОБОЧІЙ ЗОНІ ПІД ЧАС АВТОМАТИЧНОГО ПРОЦЕСУ ПАЙКИ BGA-КОМПОНЕНТІВ

3.1 Розробка 3D-моделі маски зі склотекстоліту для отримання фактичної температури в робочій зоні під час автоматичного процесу пайки BGA-компонентів

Процес пайки BGA-компонентів дуже не простий, та вимагає великої точності від обладнання та оператора, який виконує операцію пайки та контроль за цим процесом. Через те, що шарикові виводи BGA-мікросхеми знаходяться дуже близько один від одного, основним критерієм успішної пайки є точний контроль та регулювання температурного профілю під час пайки мікросхеми. Такі дефекти, як: ефект «попкорну» (коли в центрі мікросхеми відсутні паяні з'єднання), тріщини та розриви в паяному з'єднанні та утворення пустот в паяному з'єднанні можна з легкістю звести до мінімуму, або повністю уникнути їх появи, завдяки точному контролю за температурою під час процесу пайки мікросхеми.

Для того, щоб спостерігати за температурою, що діє безпосередньо на корпусі мікросхеми в процесі пайки, розроблено маску зі склотекстоліту з вмонтованими на неї датчиками температури. Такий спосіб спостереження за температурою дозволить точно регулювати температурний профіль пайки та запобігти виникнення дефектів пайки BGA-мікросхем. На рисунку 3.1 зображена 3D-модель процесу пайки з використанням маски зі склотекстоліту з вмонтованими датчиками температури.

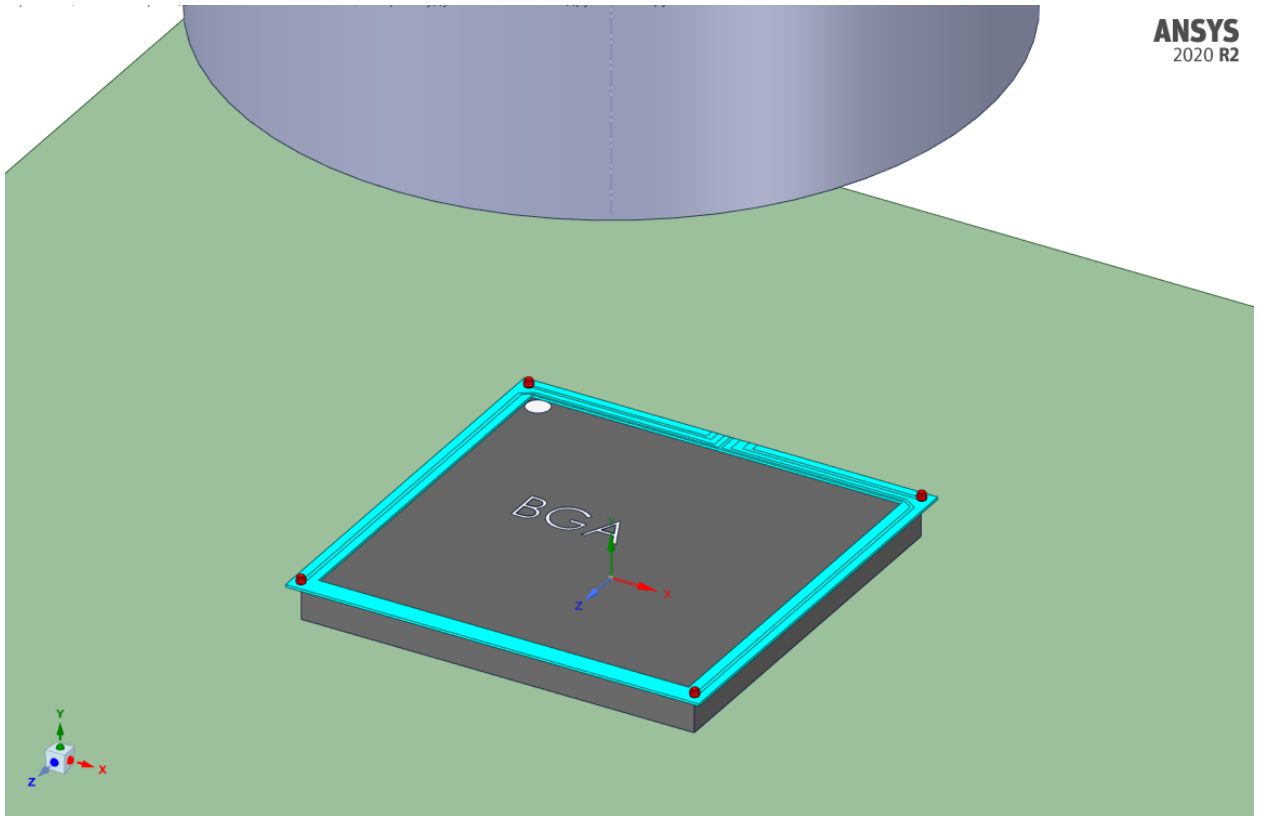


Рисунок 3.1 – 3D-модель процесу пайки з використанням маски зі склотекстоліту з вмонтованими датчиками температури

На рисунку 3.2 можна побачити, що така маска розташована по краях корпусу BGA-мікросхеми, та не заважатиме потоку повітря конвекційного нагріву або променям ІЧ-випромінювача, тому що кристал мікросхеми залишається відкритим, а потік гарячого повітря або промені ІЧ-випромінювача будуть прогрівати шарикові виводи в повній мірі. Це є дуже важливим, тому що для уникнення дефектів паяних з'єднань BGA-мікросхеми необхідно, щоб усі шарики рівномірно прогрівались в процесі пайки.

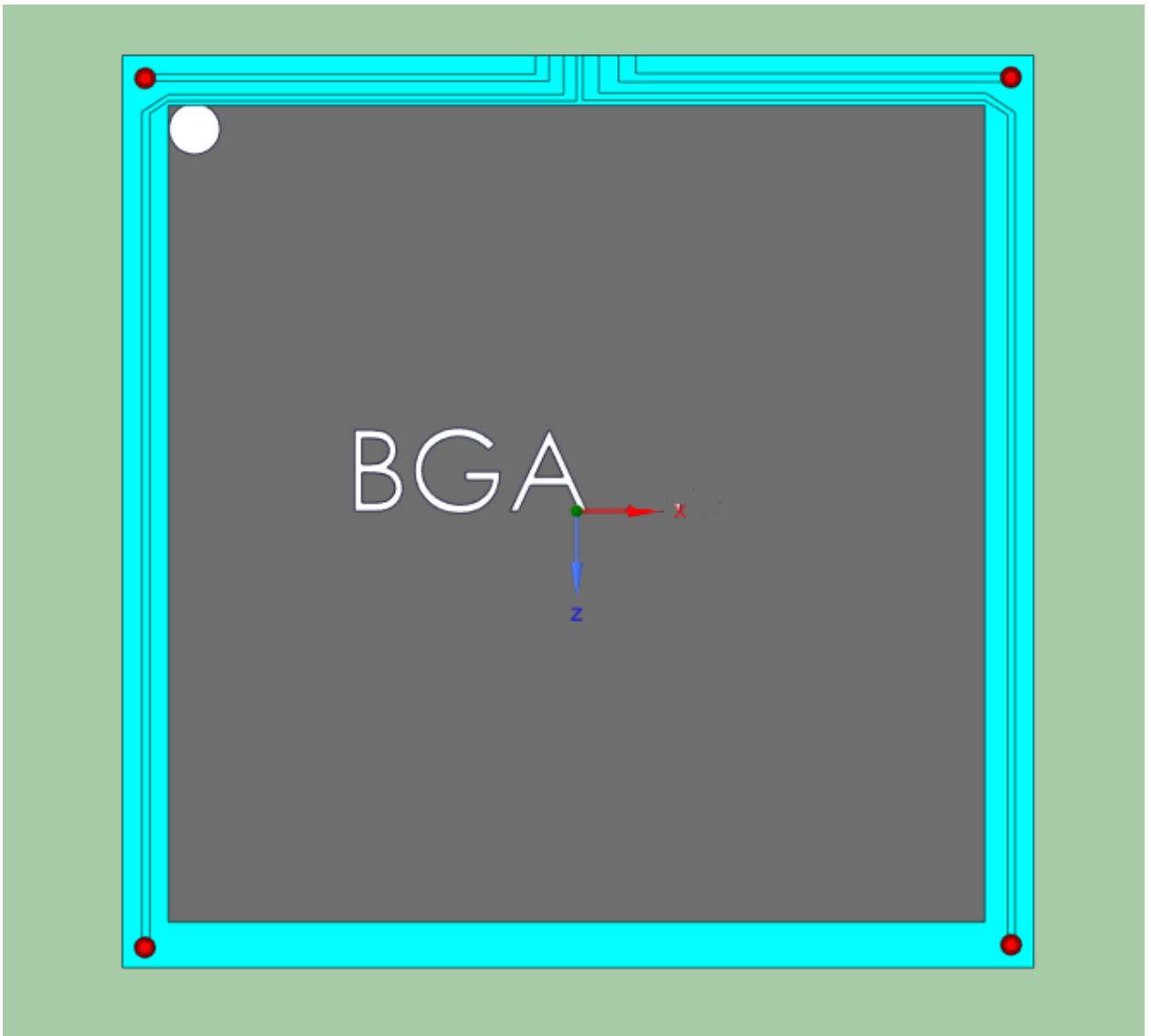


Рисунок 3.2 – Маска зі склотекстоліту з вмонтованими датчиками температури (вид зверху)

На рисунку 3.3 можна побачити що датчики температури розташовані в безпосередній близькості від шарикових виводів BGA-мікросхеми, що дозволяє отримати максимально точні дані про стан температури під час процесу пайки. Це допоможе контролювати та регулювати температурний профіль пайки, та дозволить уникнути появи дефектів паяних з'єднань.

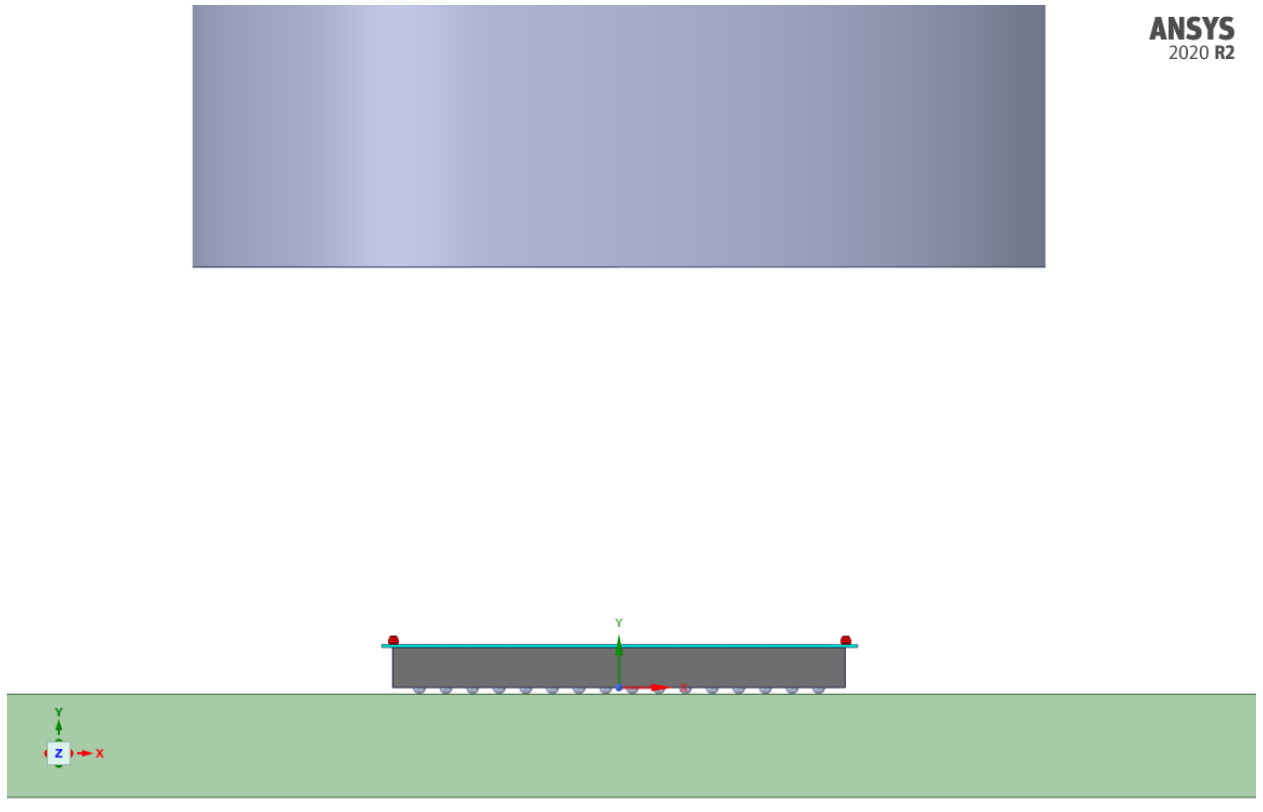


Рисунок 3.3 – Маска зі склотекстоліту з вмонтованими датчиками температури (вид збоку)

3D-модель процесу пайки з використанням маски з вмонтованими датчиками температури розроблена в програмному забезпеченні Ansys Discovery SpaceClaim. Програма є дуже простим та зручним інструментом, що дозволяє створювати, вносити зміни та доопрацьовувати 3D-моделі та CAD-моделі. Основі можливості Ansys Discovery SpaceClaim [28]:

- наглядне, ефективне та швидке створення 3D-моделей деталей, збірних елементів або креслень;
- можливість імпорту та доопрацювання сторонніх CAD-моделей;
- доопрацювання та підготовка будь-яких моделей для 3D-друку;
- імпорт, створення креслень та доопрацювання деталей для подальшого виробництва.

3.2 Технічні характеристики та принцип роботи датчиків температури для отримання фактичної температури в робочій зоні під час процесу пайки BGA-компонентів

Беручи до уваги те, що оптимальний температурний профіль процесу пайки BGA-мікросхем виконується за температури від 0 °C до 300 °C, основною технічною характеристикою для усіх елементів є робоча температура. Також, важливими є розміри елементів, тому що вони повинні монтуватись на обмежену поверхню, яка повинна відповідати більшості мікросхемам в корпусі BGA різних типів та розмірів.

Очевидно, що для досягнення максимальної точності вимірювання температури під час процесу пайки, необхідно використовувати надійні та точні датчики температури. Одночасно з цим, такий датчик повинен бути невеликого розміру та вимірювати температуру в діапазоні від 0 °C до 300 °C. Ідеально до таких вимог підійшов NTC термістор NTC-GT004 (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – термістор NTC-GT004 [29]

Основною перевагою використання термісторів є велике значення температурного коефіцієнта, це означає що зміна опору в залежності від температури буде значною. Термістори бувають двох типів: PTC-термістори

– збільшують свій опір в залежності від зміни температури, та NTC-термістори – зменшують свій опір в залежності від зміни температури.

Повні технічні характеристики термістору NTC-GT004 наведені в таблиці 3.1 [29].

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики термістору NTC-GT004

Тип	Термістор, NTC
Модель	NTC-GT004
Номінальна потужність	35 мВт
Технологія	Керамічний склад
Тип монтажу	Для поверхневого монтажу
Робоча температура	Від -50 °C до 300 °C
Точність	Від 1% до 10%
Зонд	Скляний, герметичний
Форма	Радіальна, осьова

Основні переваги термістору NTC-GT004:

- висока термостійкість. Робоча температура від -50 °C до 300 °C;
- висока точність, стабільність та надійність;
- низька ціна;
- зонд виконано зі скла, що дозволяє використовувати його в умовах високої температури та високої вологості;
- високий діапазон опору;
- швидкий час відгуку.

NTC-GT004 широко використовується в 3D-принтерах. Невеликий розмір дає можливість швидко реагувати навіть на невеликі зміни температури.

Основним параметром, що характеризує ступінь зміни опору в залежності від температури, є коефіцієнт температурної чутливості. Такий коефіцієнт розраховується залежно від значень опору при деяких фактичних

значень температури, наприклад 25 °С та 300 °С. Коефіцієнт температурної чутливості розраховується за формулою (3.1):

$$B = \frac{\ln(R_1) - \ln(R_2)}{((1:T_1) - (1:T_2))}, \quad (3.1)$$

де R_1, R_2 – опір при температурах T_1 та T_2 .

Виходячи з формули (3.1) можна отримати R_1 за формулою (3.2):

$$R_1 = R_2 \cdot e^{(B \cdot (1:T_1) - (1:T_2))}. \quad (3.2)$$

Згідно з формули (3.2) можна отримати T_1 за формулою (3.3):

$$T_1 = \frac{1}{(\ln(R_1) - \ln(R_2)) : B + (1:T_2)}. \quad (3.3)$$

Через те, що різні типи термісторів мають низький ступінь лінійності параметрів, тому навіть при схожих значеннях коефіцієнту температурної чутливості, можуть по різному змінювати опір при різних значеннях температури. Одним із способів для отримання фактичної температури є зберігання таблиці, в яку заносяться значення, що будуть попередньо розраховані в залежності від даних, що надходять з аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), в залежності від тієї чи іншої температури.

Для того, щоб зменшити кількість пам'яті, що буде задіяна під час роботи, необхідно зберігати значення лише для певних показників температури, а потім знаходити їх в таблиці, а проміжні значення отримувати за допомогою лінійної інтерполяції. Для отримання фактичної температури під час процесу пайки з точністю до 0,3 °С, можна зберігати значення з кроком 5 °С. Точність вимірювань можна підвищити за рахунок зменшення

кроку таблиці. Так при кроці 2 °С можна домогтися точності до 0,1 °С в широкому діапазоні вимірювань [30].

Зазвичай, виробники що виготовляють та розробляють термістори, разом з ним представляють таблицю з заздалегідь розрахованими змінами опору в залежності від температури. Значення в таких таблицях зазвичай прив'язані до сітки температур з кроком 5 °С. Тому використовуючи формулу (3.2) можна з легкістю розрахувати фактичну температуру в зоні нагріву під час процесу пайки. Графік залежності опору термістора NTC-GT004 від температури зображено на рисунку 3.5.

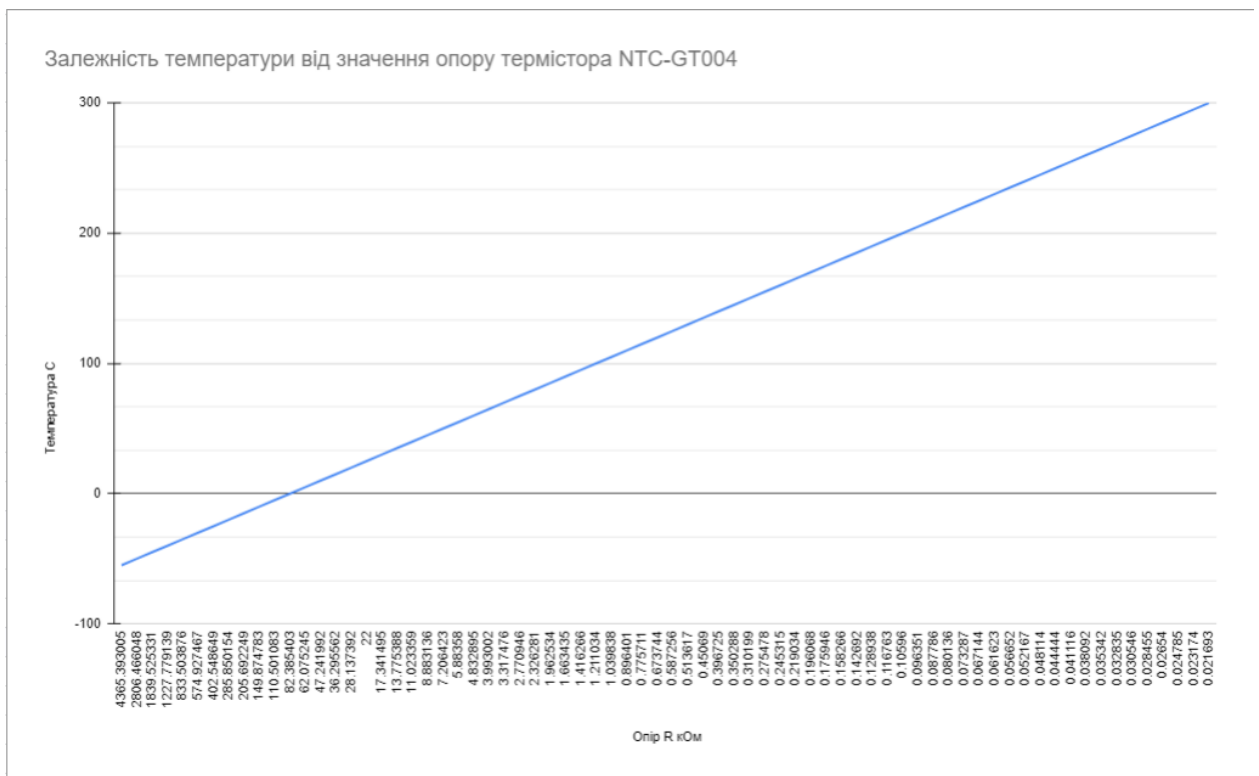


Рисунок 3.5 – Залежність опору термістора NTC-GT004 від температури

3.3 Трасування маски зі склотекстоліту з вмонтованими на неї термісторами NTC-GT004, та підключення до плати Arduino

Трасування є важливим елементом проектування маски для моніторингу температури в зоні нагріву під час процесу пайки. Через те, що

пайка мікросхем в корпусі BGA вимагає великої точності при невеликих розмірах мікросхеми, трасування елементів необхідно виконувати максимально точно та на обмеженій області. Трасування елементів виконано в програмному забезпеченні системи автоматизованого проектування (САПР) – P-CAD.

Першим кроком трасування елементів в P-CAD є створення схематичного зображення елемента за допомогою P-CAD Symbol Editor. На рисунку 3.6 можна побачити створення елемента термістор. Таким чином створено схематичні зображення для усіх елементів схеми підключення.

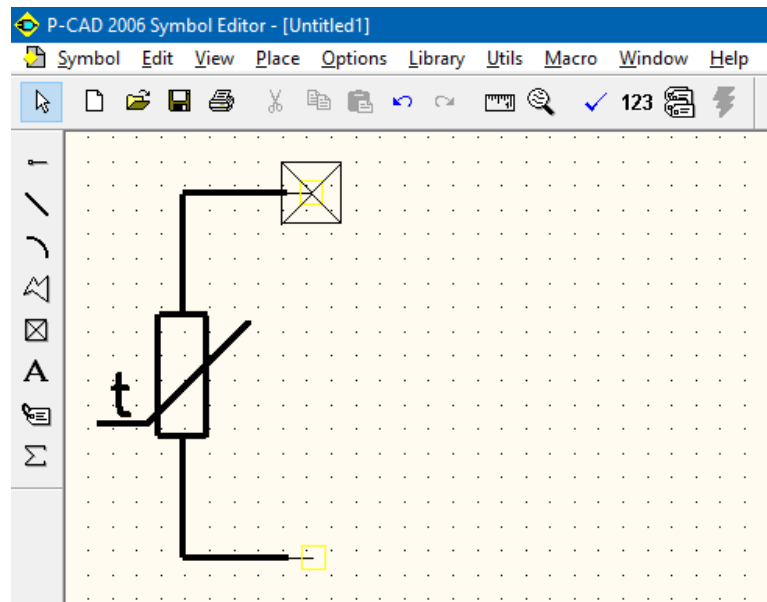


Рисунок 3.6 – Схематичне зображення термістора NTC-GT004

Наступним кроком є створення посадкового місця компонента за допомогою P-CAD Pattern Editor. На рисунку 3.7 можна побачити створене посадкове місце для компоненту термістор. Таким чином створені посадкові місця для усіх елементів схеми підключення.

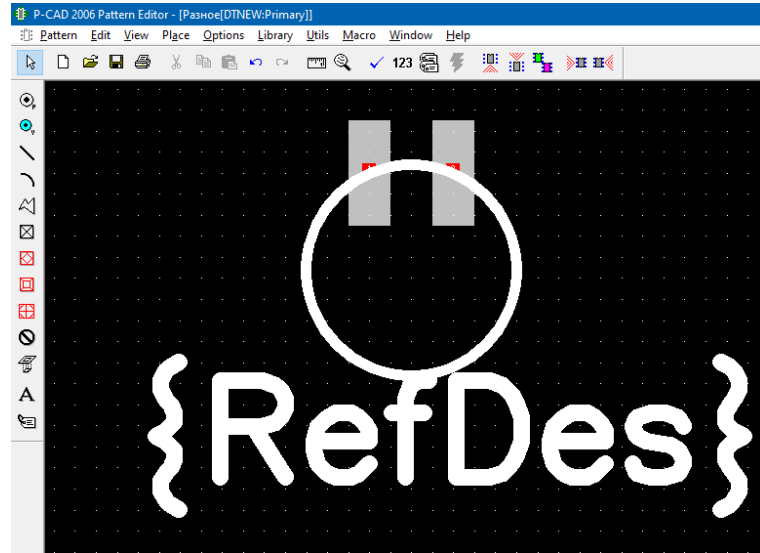


Рисунок 3.7 – Посадкове місце термістора NTC-GT004

Далі необхідно створити бібліотечні компоненти та об'єднати виводи компонентів схеми з виводами на посадковому місці (рисунок 3.8). Для цього скористався програмою P_CAD Library Executive.

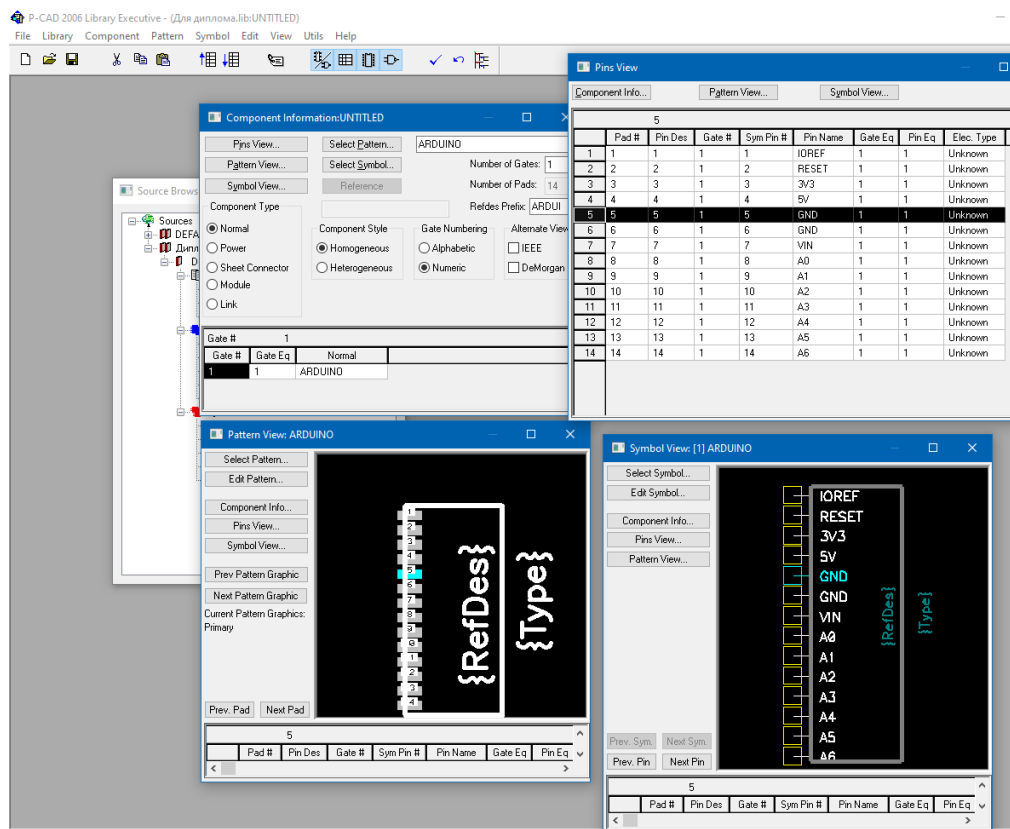


Рисунок 3.8 – Об'єднання виводів схематичного компоненту Arduino з виводами його посадкового місця

Наступним кроком трасування елементів в P-CAD є створення принципової та повної схеми підключення виводів елементів між собою. Для цього необхідно скористатися програмним забезпеченням P-CAD Schematic. На рисунку 3.9 зображено принципову схему підключення термістора NTC-GT004 до Arduino.

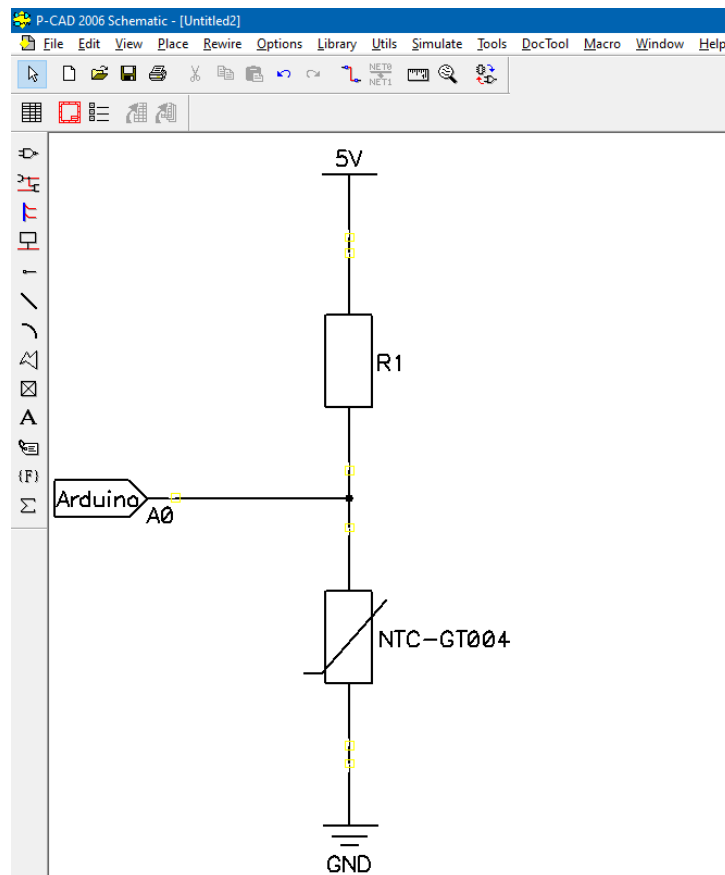


Рисунок 3.9 – Принципова схема підключення термістора NTC-GT004 до Arduino

Повна схема підключення чотирьох термісторів NTC-GT004 до Arduino зображено на рисунку 3.10.

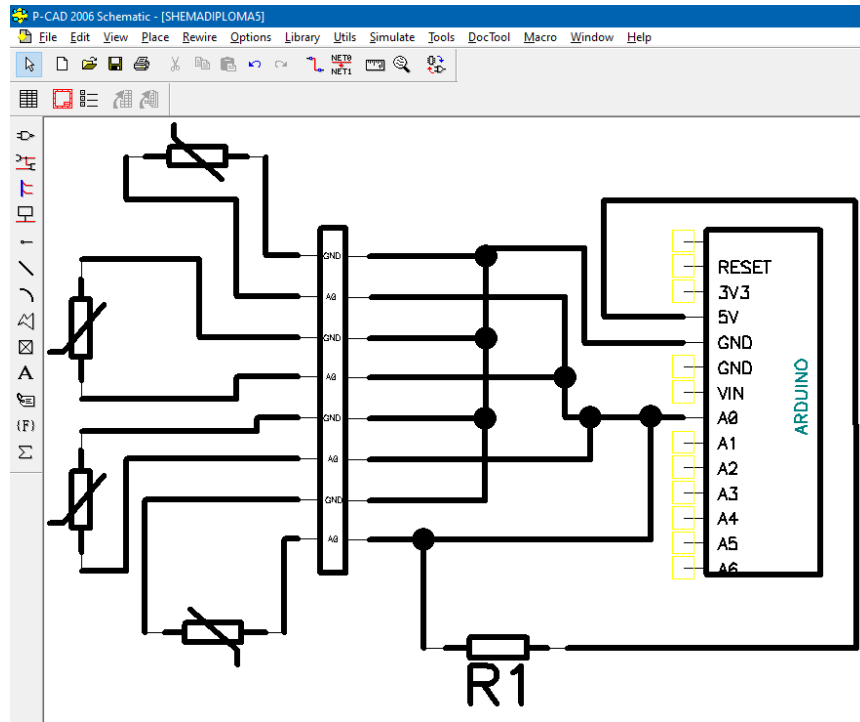


Рисунок 3.10 – Повна схема підключення чотирьох термісторів NTC-GT004 до Arduino

Для того, щоб розрахувати температуру під час процесу пайки BGA-мікросхеми, необхідно виміряти опір що надходить з термістора. При цьому на Arduino немає свого вимірювача опору, проте є можливість розрахувати напругу за допомогою АЦП. Таким чином необхідно перетворити опір в напругу, для цього необхідно додати послідовно до схеми резистор R1. На рисунку 3.10 підключимо вузол з'єднання резистора і термістора до аналогового входу A0 плати Arduino, щоб вимірювати напругу в цій точці.

Наступним кроком трасування маски з вмонтованими на неї термісторами є прокладення доріжок, що будуть надходити від термісторів до Arduino (рисунок 3.11). Для цього скористався програмним забезпеченням P-CAD PCB.

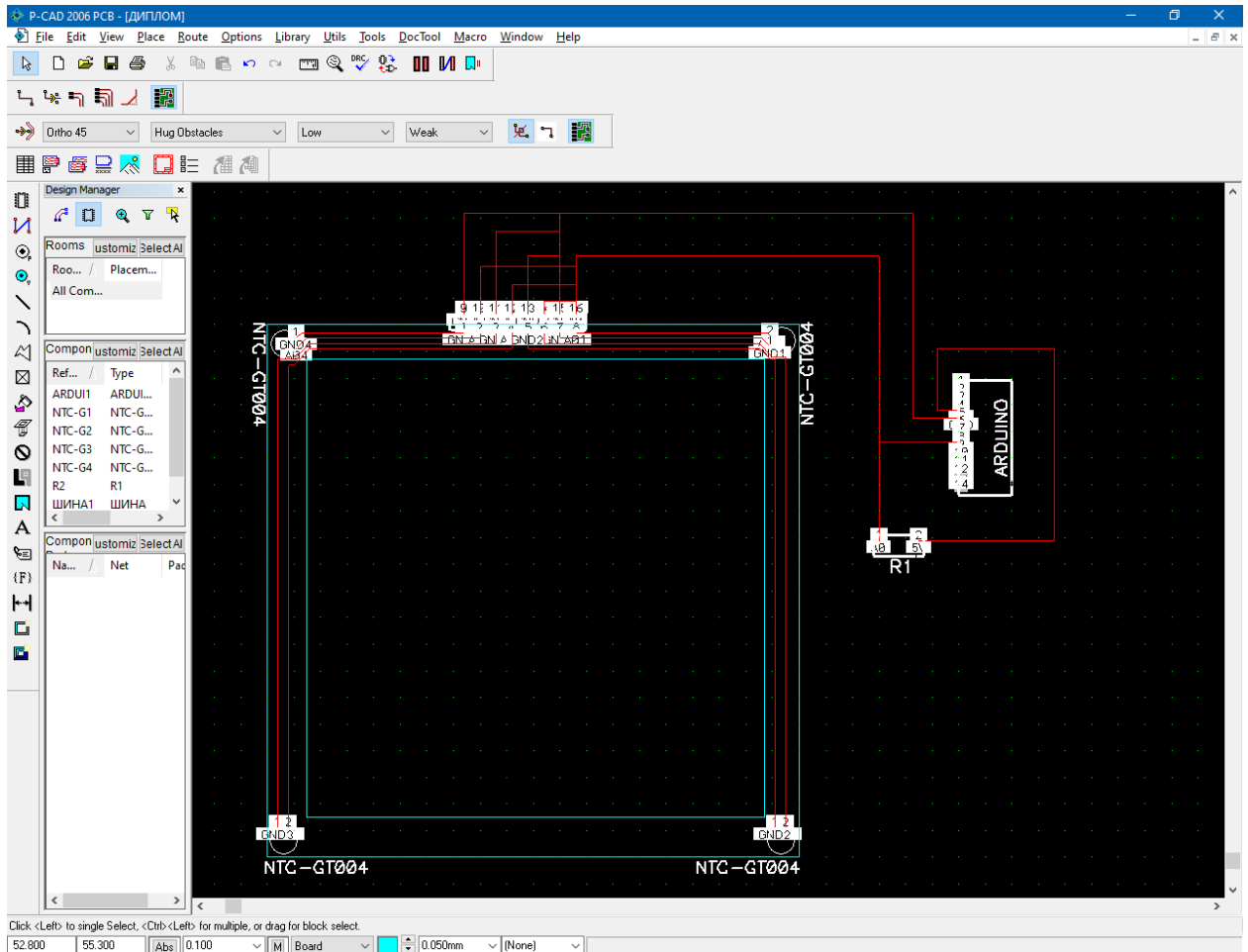


Рисунок 3.11 – Трасування доріжок на масці

3.4 Обчислення показників температури з термісторів

Для розрахунку температури необхідно перетворити показники опору термісторів в цифровий показник температури. Для цього необхідно підключити вихід термістора до аналогового входу Arduino A0. У процесор Arduino можна завантажити програму, яка буде керувати такими компонентами за заданим алгоритмом (скетчем) [31].

Щоб обчислити значення температури в робочій зоні в процесі пайки BGA-мікросхеми скористаємося формулою Стейнхарта-Харта (3.4) [32]:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C (\ln R)^3, \quad (3.4)$$

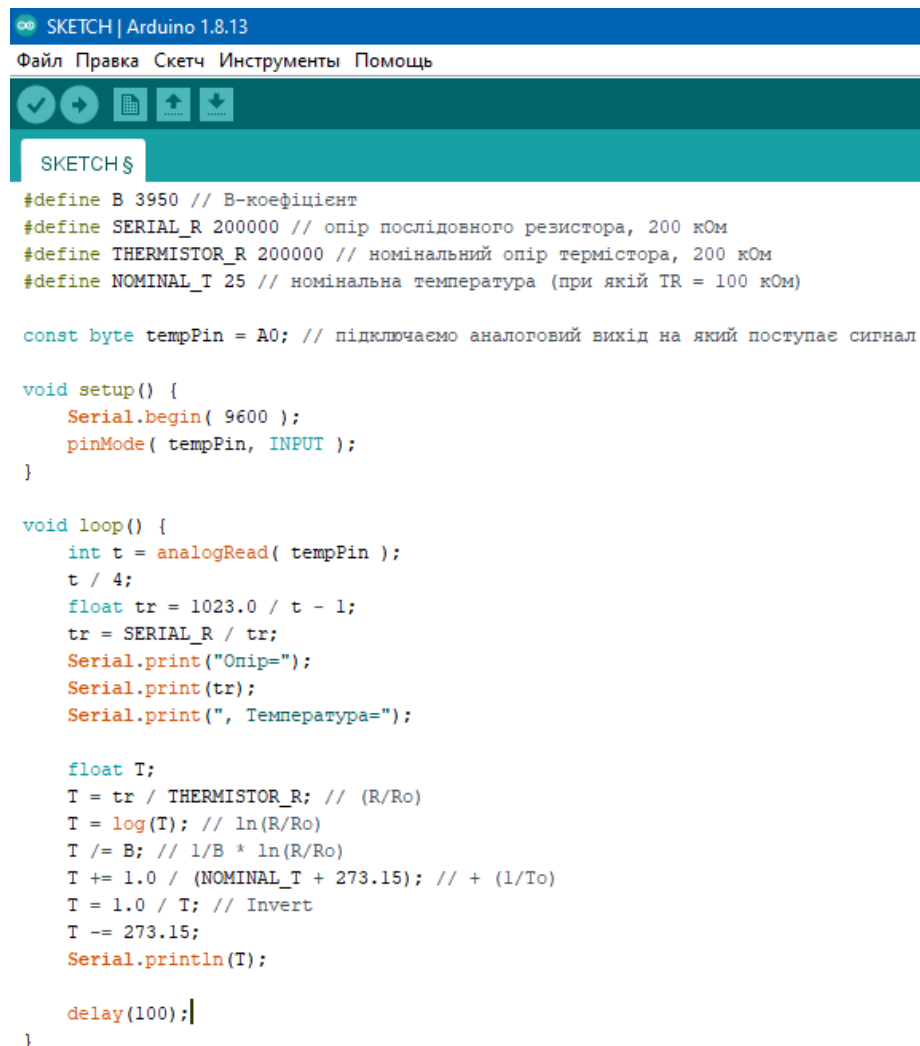
де А, В та С – параметри, які залежать від специфікації датчику.

Для того, щоб не шукати ці параметри, скористуємося модифікованою формулою для обчислення температури (3.5):

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln \left(\frac{R}{R_0} \right), \quad (3.5)$$

- де T_0 – кімнатна температура в Кельвінах;
 T – температура в Кельвінах, яку ми шукаємо;
 R – вимірний опір термістора;
 R_0 – номінальний опір термістора.

Скетч для розрахунку температури в робочій зоні в процесі пайки BGA-мікросхеми зображено на рисунку 3.12.



```

SKETCH | Arduino 1.8.13
Файл Правка Скетч Инструменты Помощь

SKETCH §
#define B 3950 // B-коэффициент
#define SERIAL_R 200000 // опір послідовного резистора, 200 кОм
#define THERMISTOR_R 200000 // номінальний опір термістора, 200 кОм
#define NOMINAL_T 25 // номінальна температура (при якій TR = 100 кОм)

const byte tempPin = A0; // підключаємо аналоговий вихід на який поступає сигнал

void setup() {
  Serial.begin( 9600 );
  pinMode( tempPin, INPUT );
}

void loop() {
  int t = analogRead( tempPin );
  t / 4;
  float tr = 1023.0 / t - 1;
  tr = SERIAL_R / tr;
  Serial.print("Onip=");
  Serial.print(tr);
  Serial.print(", Температура=");

  float T;
  T = tr / THERMISTOR_R; // (R/Ro)
  T = log(T); // ln(R/Ro)
  T /= B; // 1/B * ln(R/Ro)
  T += 1.0 / (NOMINAL_T + 273.15); // + (1/To)
  T = 1.0 / T; // Invert
  T -= 273.15;
  Serial.println(T);

  delay(100);
}

```

Рисунок 3.12 – Скетч для розрахунку температури в робочій зоні

3.5 Фізико-механічні, електричні та температурні характеристики маски зі склотекстоліту

Склотекстоліт листовий складається з пластин, які складені з композиційного пресованого матеріалу, що складається з декількох слоїв склотканини, які залежать від марки матеріалу та товщини листа. Він буває різних марок, що відрізняються між собою залежно від робочої температури, механічних та електричних характеристик.

Очевидно, що під час процесу пайки BGA-мікросхем маска зі склотекстоліту буде схильна до великого перепаду температур, тому її робоча температура повинна бути приблизно 300 °C. Ідеально з цією задачею справляється листовий склотекстоліт марки КАСТ-В – шаруватий пресований матеріал, виготовлений на основі модифікованих фенольних смол резольного типу та скляних конструкційних тканин. КАСТ-В відрізняється низькою теплопровідністю, досить високими діелектричними характеристиками. Витримує короткочасний вплив температури до 750 °C. Склотекстоліт марки КАСТ-В використовується як конструкційний матеріал, призначений для виготовлення виробів, які тривалий час працюють в екстремальних температурних умовах експлуатації [33].

Розміри маски зі склотекстоліту повинні відповідати розмірам корпусу BGA, тому що мікросхеми мають багато варіантів розмірів. На рисунку 3.13 можна побачити розміри маски зі склотекстоліту відносно мікросхеми в корпусі BGA (вид зверху).

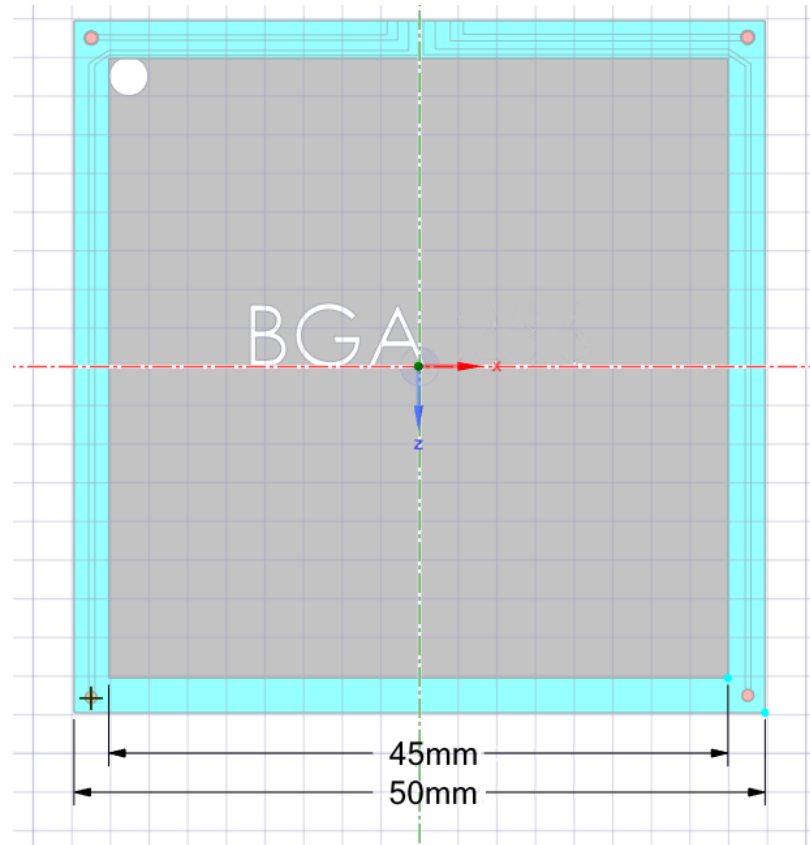


Рисунок 3.13 – Розміри маски зі склотекстоліту відносно мікросхеми в корпусі BGA (вид зверху)

На рисунку 3.14 можна побачити розміри маски зі склотекстоліту відносно мікросхеми в корпусі BGA (вид збоку).

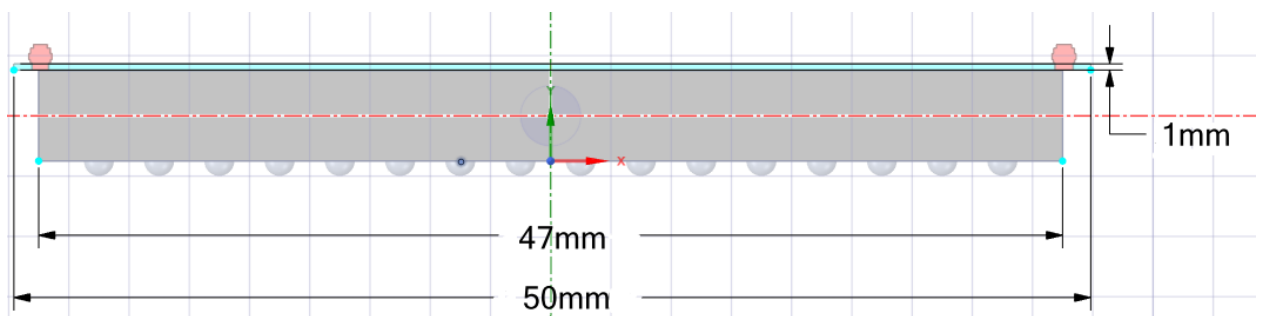


Рисунок 3.14 – Розміри маски зі склотекстоліту відносно мікросхеми в корпусі BGA (вид збоку)

Склотекстоліт легко піддається любым видам механічної обробки, тому таку маску можна розробити під майже усі типи та розміри корпусів BGA-мікросхем.

3.6 Розрахунки вартості та область застосування маски зі склотекстоліту

Враховуючи простоту конструкції та невелику кількість електричних елементів, вартість такої маски буде дуже низькою. Наприклад, якщо замовляти термістори NTC-GT004 оптом, то за 1000 штук треба віддати усього, в середньому, 88 гривень. Тобто, враховуючи ціну за доставку, за 4 термістора необхідно віддати 50 копійок. Ціна за термістори напряму залежить від країни з якої робити замовлення. Очевидно, що максимально економічний варіант це замовити термістори оптом з Китаю.

Схожа ситуація з матеріалом з якого виконана маска. Склотекстоліт КАСТ-В можна знайти в Україні, але ціни будуть відрізнятись в більшу сторону від склотекстоліту інших марок. Якщо звичайний склотекстоліт можна знайти за цінами від 200 гривень за кілограм, то склотекстоліт марки КАСТ-В починається від 550 гривень за кілограм. Склотекстоліт КАСТ-В має підвищену теплостійкість та кращі механічні властивості в порівнянні з іншими марками, відрізняється низькою теплопровідністю, досить високими діелектричними характеристиками, саме тому ціна на нього вища за звичайний склотекстоліт. Але в процесі пайки маска повинна витримувати великі перепади температур, тому економити на матеріалах, з якого вона буде виконана, погана ідея. Очевидно, що розрахувати повну вартість однієї конкретної маски дуже важко, але враховуючи що склотекстоліт продається кілограмами, а для виготовлення однієї невеликої маски необхідно лише пару десятків грамів, повна ціна буде невисокою.

Зважаючи на ефективність маски в можливості моніторингу за температурою в зоні нагріву під час пайки BGA-мікросхем, область застосування маски дуже велика, але найбільший попит на такий вид контролю буде в майстерні з ремонту електроапаратури. Процес ремонту BGA-мікросхеми дуже складний, та вимагає дотримання багатьох кроків максимально чітко і якісно. Такий ремонт називають «Reballing» – це процес

відновлення мікросхеми, що полягає в нанесенні нових шариків припою. Сама процедура ремонту складається з [34]:

- демонтаж мікросхеми після попереднього нагріву;
- очищення друкованої плати від залишків старого припою;
- нанесення нових шариків припою на мікросхему;
- установка мікросхеми на місце;
- пайка мікросхеми на друковану плату.

Саме в процесі пайки мікросхеми знадобиться маска зі склотекстоліту для контролю фактичної температури в зоні нагріву в процесі пайки. Це дозволить виконати якісну пайку мікросхеми та уникнути дефектів пайки, що, в свою чергу, дозволить зекономити багато часу та грошей.

Процес нанесення нових шариків припою дуже кропітливий та займає багато часу, тому для автоматизації цього процесу придумані спеціальні трафарети для нанесення нових шариків (рисунок 3.15).

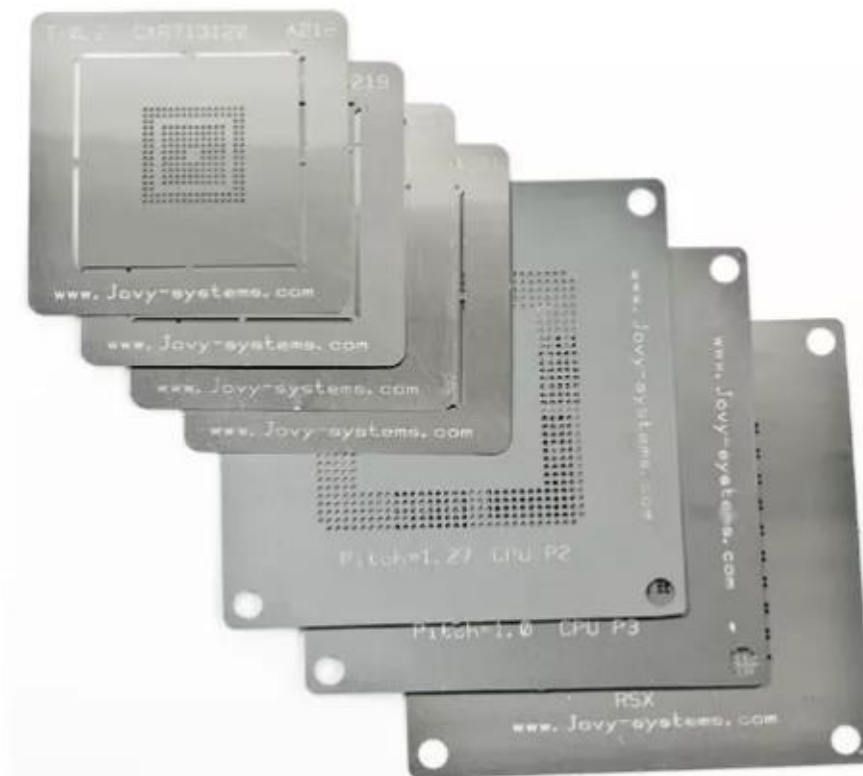


Рисунок 3.15 – Набір трафаретів для нанесення нових шарикових виводів BGA-мікросхеми [19]

Кожен окремий трафарет відповідає різним формам малюнку шарикових виводів. Ціна такого набору починається від 1400 гривень. Очевидно, якщо додати до такого набору декілька масок зі склотекстоліту для контролю фактичної температури в зоні нагріву в процесі пайки, це не сильно вплине на фінальну ціну за весь набір, але забезпечить можливість виконувати якісний ремонт BGA-мікросхем, та уникнути виникненню дефектів в процесі пайки.

3.7 Висновки до 3 розділу

В третьому розділі, за допомогою програмного забезпечення Ansys Discovery SpaceClaim, виконано розробку 3D-моделі маски зі склотекстоліту для отримання фактичної температури в робочій зоні під час автоматичного процесу пайки BGA-компонентів. Наведені основні технічні характеристики датчиків температури та матеріалу, з якого виконана маска. Також, в програмному забезпеченні P-CAD, виконано трасування маски зі склотекстоліту з вмонтованими на неї термісторами NTC-GT004, та підключення до плати Arduino. Також, наведені розрахунки вартості та область застосування такої маски.

4 РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПІД ЧАС ПРОЦЕСУ АВТОМАТИЧНОЇ ПАЙКИ BGA-КОМПОНЕНТІВ ТА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1 Дослідження оптимального температурного профілю під час процесу пайки BGA-мікросхем

Мікросхеми в корпусі BGA представляють собою один з найскладніших компонентів в технології поверхневого монтажу, та викликають багато труднощів під час процесу пайки як у досвідчених майстрів пайки, так і новачків. Через те що пайка BGA-компонентів є дуже складною задачею, більшість дефектів BGA-мікросхем виникають в результаті недосконалого процесу пайки мікросхеми. Для мінімізації виникнення дефектів пайки необхідно чітко дотримуватись рекомендацій до пайки та чітко слідкувати за температурним профілем пайки. Навіть невелике відхилення від оптимального температурного профілю може привезти до виникнення дефектів паяних з'єднань. Фактори, що впливають на вибір температурного профілю пайки:

- компоненти;
- обладнання;
- досвід майстра;
- друковані плати.

Факторів, що впливають на якість паяного з'єднання дуже багато: розповзання пасти припою, погане змочування, утворення перемичок між з'єднаннями, відсутність контакту, деформація паяних з'єднань, поява пустот та багато інших. Для уникнення появи таких дефектів необхідно використовувати оптимальний температурний профіль. Стандарт IPC/JEDEC J-STD-020C [11] рекомендує оптимальний температурний профіль для пайки BGA-мікросхем (рисунок 4.1).

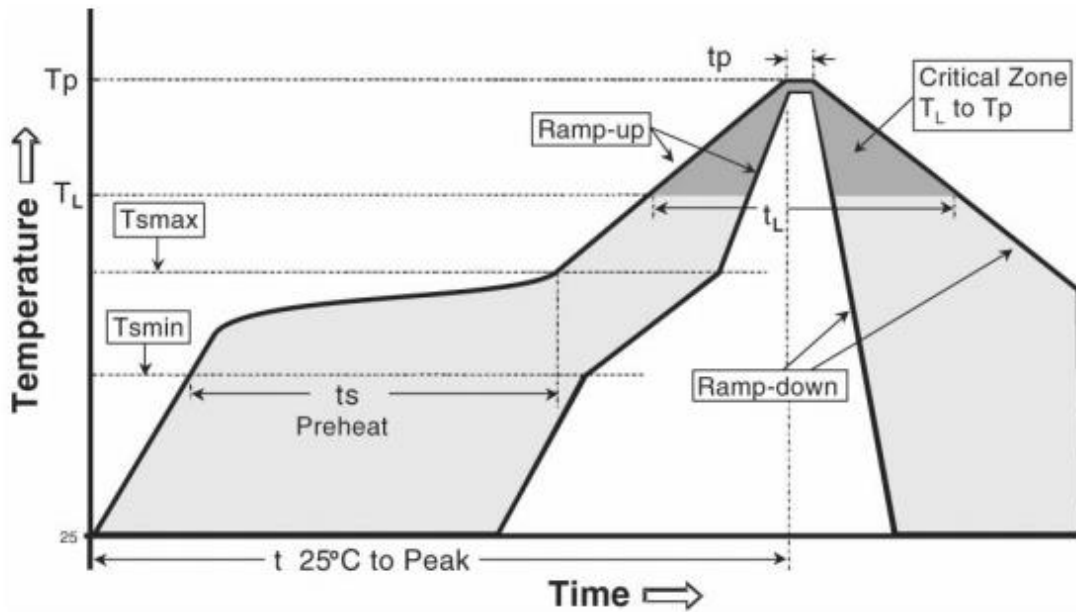


Рисунок 4.1 – Оптимальний температурний профіль пайки, рекомендований стандартом IPC/JEDEC J-STD-020C [11]

Стандарт IPC/JEDEC J-STD-020C рекомендує розділяти стадії процесу пайки на такі стадії:

- стадія попереднього нагріву;
- стадія стабілізації;
- стадія оплавлення;
- стадія охолодження.

Стадія попереднього нагріву дозволяє зменшити тепловий ефект на компоненти та друковану плату до початку основного процесу пайки. На цій стадії відбувається випарування розчинника з паяльної пасти. Рекомендована температура під час цієї стадії приблизно від 0 °C до 130 °C, а швидкість підвищення нагріву – від 0,5 °C/с до 1 °C/с. Перевищення швидкості нагріву може призвести до передчасного випарування розчинника, що може призвести до появи такого дефекту, як неповне оплавлення паяльної пасти.

Стадію стабілізації також називають стадією вирівнювання температури. На цій стадії підвищення температури проходить дуже рівномірно та повільно через те, що необхідно забезпечити рівномірний нагрів усіх компонентів мікросхеми до однакової температури. При

підвищені температури до 150 °C відбувається активація флюсу. Оптимальний час стадії стабілізації 30 секунд. По завершенню стадії стабілізації температура пайки повинна бути приблизно від 150 °C до 170 °C. Необхідно дотримуватись рекомендацій до стадії стабілізації інакше можуть виникнути такі дефекти пайки, як: ефект «попкорну» та розповзання пасти припою.

На стадії оплавлення під час процесу пайки BGA-мікросхеми температура досягає значень, необхідних для розплавлення пасти припою, та відбувається формування паяних з'єднань. Температура, необхідна для формування надійного паяного з'єднання, повинна бути в межах від 235 °C до 260 °C, та перевищувати межу правління паяльної пасти в середньому на 35 °C. Час, за який відбувається процес пайки BGA-мікросхеми на стадії оплавлення, повинен бути в межах від 30 с до 90 с, а краще не перевищувати 60 с, зі швидкістю підвищення температури від 2 °C/с до 4 °C/с. Якщо температура буде нижчою за рекомендовані показники, то є можливість появи таких дефектів як погане змочування, відсутність контакту, ефект «холодна пайка» та появи пустот в паяних з'єднаннях. Якщо фактична температура пайки в зоні нагріву буде вищою за оптимальний температурний профіль, існує великий шанс появи таких дефектів, як: окислення паяних з'єднань та перегрів шарикових виводів.

Стадія охолодження повинна забезпечити максимально міцне та надійне паяне з'єднання. Для цього необхідно поступово та рівномірно зменшувати швидкість охолодження до температури рівної 130 °C, зі швидкістю зменшення температури 4 °C/с. Якщо не дотримуватись рекомендацій на стадії охолодження можлива поява такого дефекту, як деформація та деструкція паяних з'єднань.

4.2 Розробка імітаційної моделі регулювання температури під час процесу пайки BGA-мікросхем в програмному забезпеченні Matlab/Simulink та проведення експериментів

Беручи до уваги те, що за допомогою маски зі склотекстоліту, з вмонтованими на неї датчиками температури, з'явилась можливість отримувати фактичну температуру під час процесу пайки, має сенс користуватися цими даними для точного регулювання температурного профілю пайки BGA-мікросхеми. Тобто, за формулою (4.1) можна розрахувати середню температуру, та змінювати налаштування температурного профілю в реальному часі, в залежності від показників, що надходять з датчиків температури:

$$\Delta T = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{a}, \quad (4.1)$$

де T_1, T_2, T_3 , та T_4 – температура, що надходить з датчиків температури;
 a – кількість датчиків температури.

Таким чином можна удосконалити процес пайки BGA-компонентів, за рахунок запобігання виникнення дефектів паяних з'єднань під час процесу пайки мікросхеми.

Системи керування в обладнанні для пайки BGA-мікросхем повинні забезпечувати рівномірне та стабільне нагрівання згідно заданого температурного профілю пайки, тобто, по своїй суті, являються регуляторами температури.

На сьогодні, регулятори температури в обладнанні для пайки BGA-мікросхем представляють собою наступні функціональні елементи (рисунок 4.2):

– ручного або автоматичного пристрою «З», що задає оптимальний температурний профіль;

- обчислювального пристрою «ОП», необхідного для порівняння фактичного та заданого температурного профілю пайки;
- регулятора температури (виконавчого елемента «ВЕ»). Завдяки ньому можна змінювати температурний профіль під час процесу пайки;
- датчика температури «ДТ».

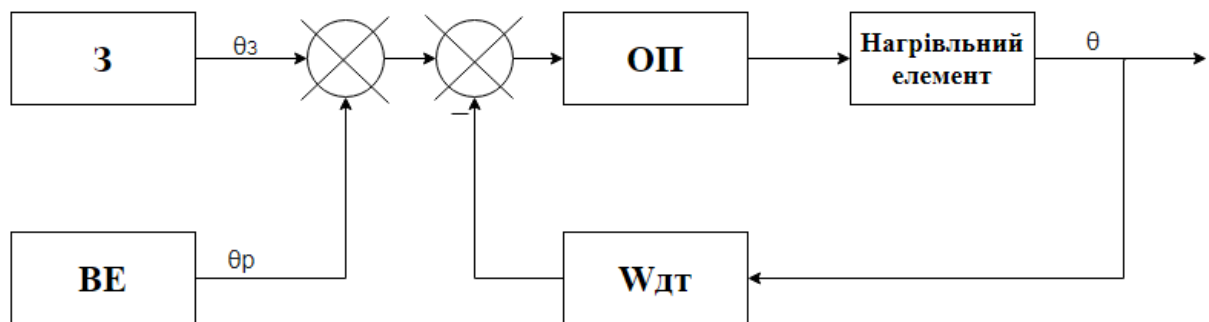


Рисунок 4.2 – Функціональна схема системи регулювання температури під час процесу пайки BGA-компонентів

Структурна схема регулювання температури під час процесу пайки BGA- компонентів представлена на рисунку 4.3.

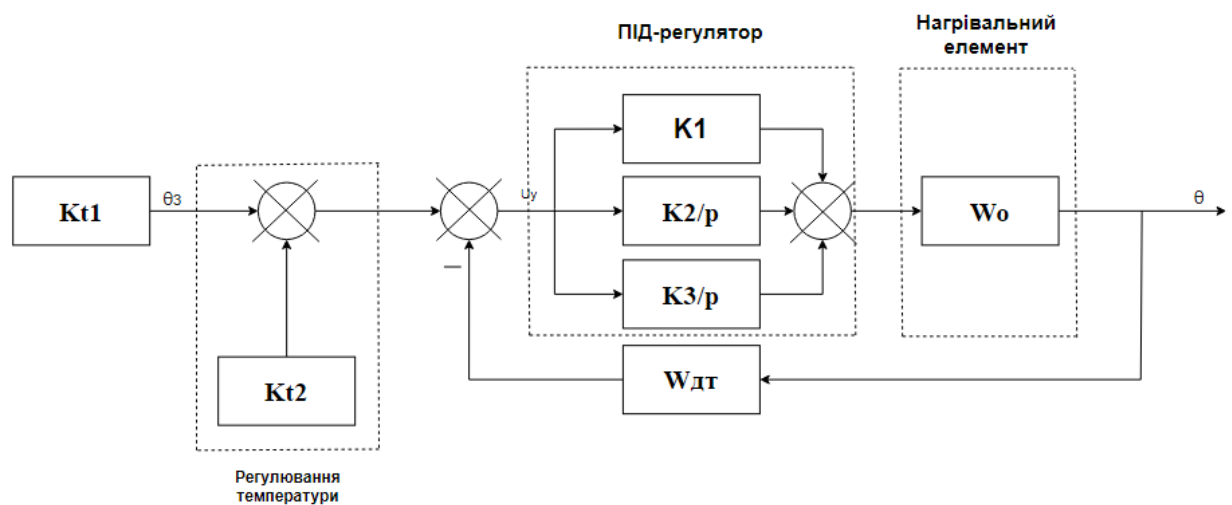


Рисунок 4.3 – Структурна схема регулювання температури під час процесу пайки BGA-компонентів

Незважаючи на те, що регулювання температури під час процесу пайки є складним об'єктом управління, система регулювання температури дуже проста. На рисунку 4.3 K_{t1} виконує роль сигналу збудження у виді оптимального температурного профілю пайки BGA-мікросхем. K_{t2} представлений у виді регулятора температури, необхідного для регулювання температурного профілю, в залежності від фактичної температури в зоні нагріву ΔT , що надходить з датчиків температури в процесі пайки BGA-мікросхеми. Регулювання температури відбувається в ручному режимі. ПІД-регулятор необхідний для формування сигналу управління, з метою підвищення точності та якості регулювання температурного профілю під час пайки. Інформація про стан температурного профілю поступає на нагрівальний елемент та приводить у дію сопло або ІЧ-випромінювач згідно з заданою температурою. Датчик температури в системі необхідний для порівняння температури між нагрівальним елементом та температурним профілем пайки.

Таке представлення системи регулювання температури під час процесу пайки BGA-компонентів дозволяє вирішувати багато проблем з виникненням дефектів паяних з'єднань, а також підвищити якість та надійність пайки. Технологічний процес пайки BGA-мікросхем потребує рівномірного нагріву та постійного контролю за виконанням оптимального температурного профілю пайки. Модель регулювання температури під час процесу пайки BGA-компонентів представлена на рис. 4.3 дозволяє задати оптимальний температурний профіль пайки, вести контроль за станом температури під час пайки та регулювати температуру нагрівального елемента, згідно з фактичними показниками температури в зоні нагріву, що надходять з корпусу BGA-мікросхеми.

Для дослідження системи на рисунку 4.3 необхідно використовувати методи структурного моделювання, що підходять для аналізу та синтезу систем автоматичного керування. Для розв'язання такої задачі ідеально підходить пакет прикладних програм Simulink Matlab/Simulink [35], який має

велику кількість типових бібліотек елементів, та дозволяє проводити аналіз систем різних видів та складності [36]. Імітаційна модель регулювання температури під час процесу пайки зображена на рисунку 4.4.

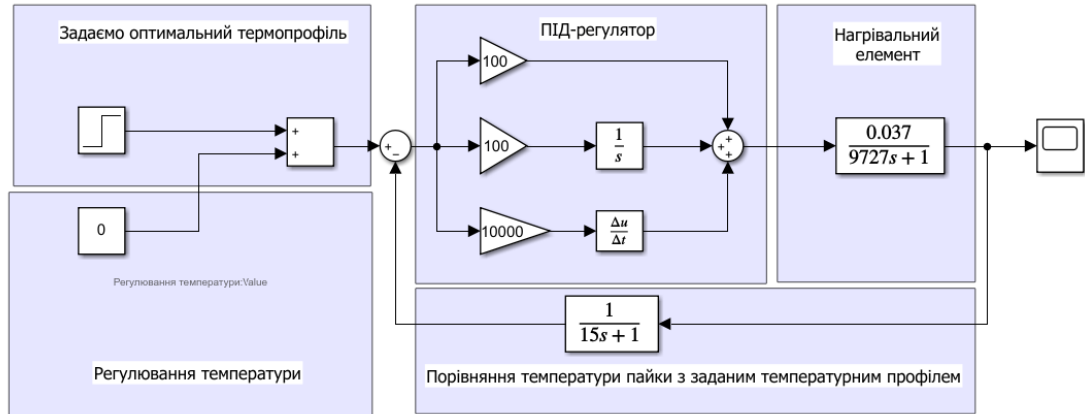


Рисунок 4.4 – Імітаційна модель регулювання температури під час процесу пайки BGA-компонентів в Matlab/Simulink

Імітаційна модель дозволяє проводити дослідження регулювання температури в системі таким же чином, як і на реальному професійному обладнанні. На рисунку 4.5 показані динамічні характеристики оптимального температурного профілю пайки залежно від заданого часу виконання імітації.

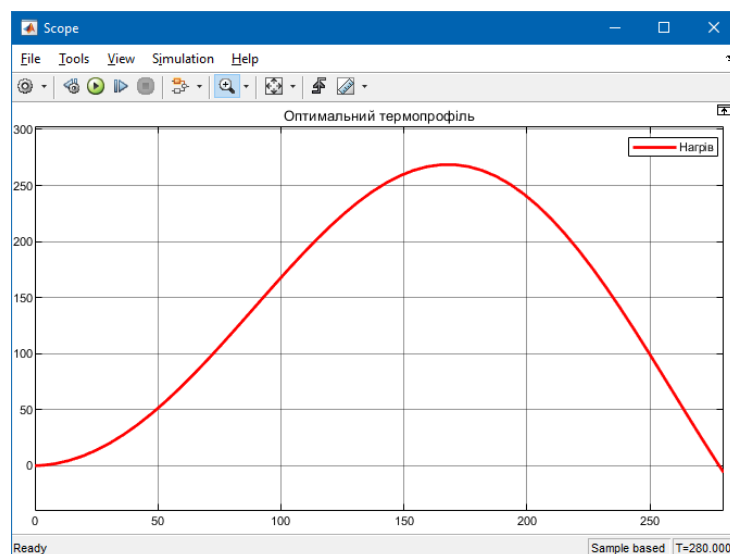


Рисунок 4.5 – Динамічні характеристики оптимального температурного профілю пайки

Як видно з результатів симуляції, оптимальний температурний профіль задано вірно, підвищення та зменшення температури проходить рівномірно, температура досягає оптимальних значень на всіх стадіях процесу пайки.

Якщо в процесі пайки BGA-мікросхеми фактична температура в зоні нагріву буде відрізняться від заданого температурного профілю, можна з легкістю додати або зменшити показники температури за допомогою регулятора температури. На рисунку 4.6 зображено динамічні характеристики показників температури під час процесу пайки, якщо на стадії оплавлення збільшити температуру на додаткових 30 °C, за допомогою регулятора температури.

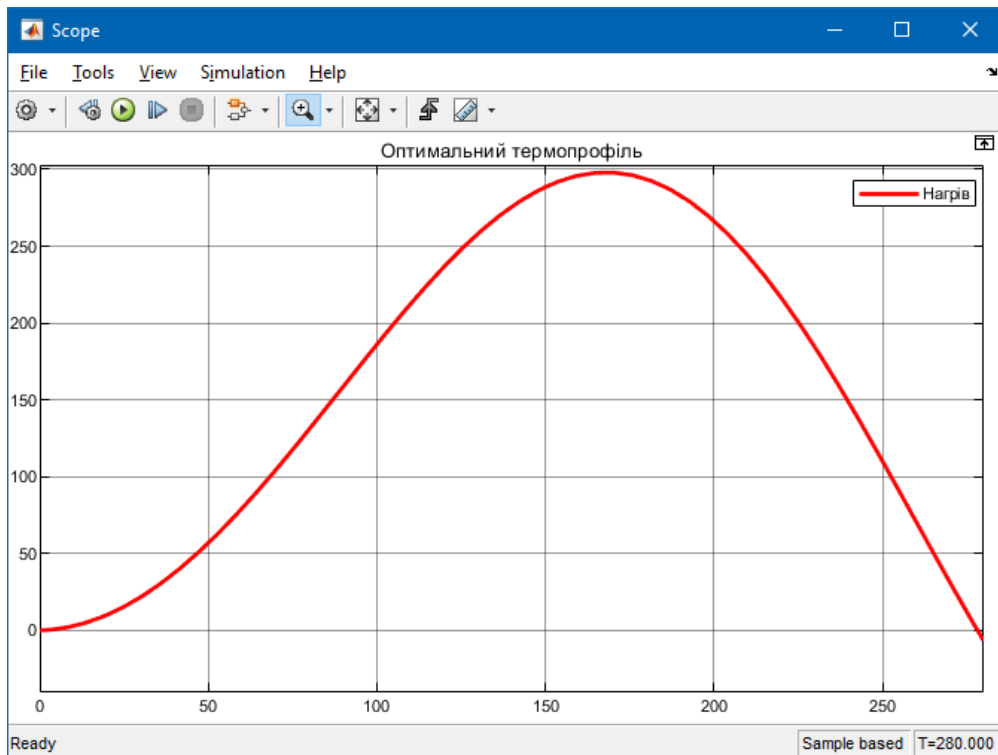


Рисунок 4.6 – Динамічні характеристики температури під час процесу пайки, якщо на стадії оплавлення збільшити температуру на додаткових 30 °C

Як видно з результатів симуляції, регулювання оптимального температурного профілю в залежності від фактичних показників температури в зоні нагріву мікросхеми є важливим показником успішної пайки BGA-

компонентів, та дозволить уникнути більшість дефектів пайки.

Однак, така симуляція процесу пайки BGA-мікросхеми не враховує усіх факторів, що впливають на фактичну температуру в зоні нагріву. Ще одним фактором, який необхідно врахувати при симуляції процесу пайки, це відстань нагрівального елемента до зони нагріву (рисунок 4.7). Очевидно, що мікросхеми бувають різних розмірів, та для кожного конкретного розміру мікросхеми необхідно використовувати різну відстань від зони нагріву (на платі) до нагрівального елемента. Для вирішення даної проблеми необхідно побудувати удосконалену імітаційну модель, що враховуватиме відстань від зони нагріву до нагрівального елемента.

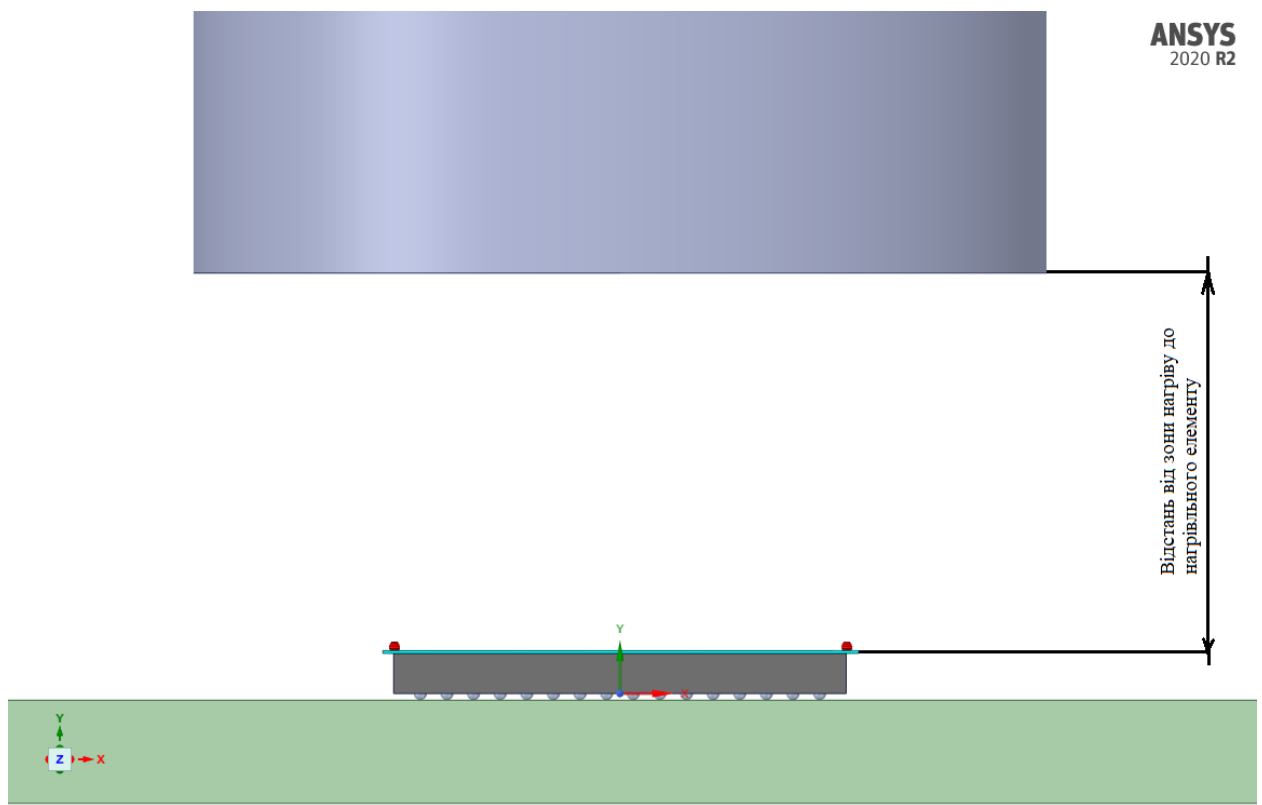


Рисунок 4.7 – Відстань від зони нагріву до нагрівального елемента

На рисунку 4.8 зображена структурна схема регулювання температури під час процесу пайки BGA-компонентів з урахуванням відстані від зони нагріву до нагрівального елемента.

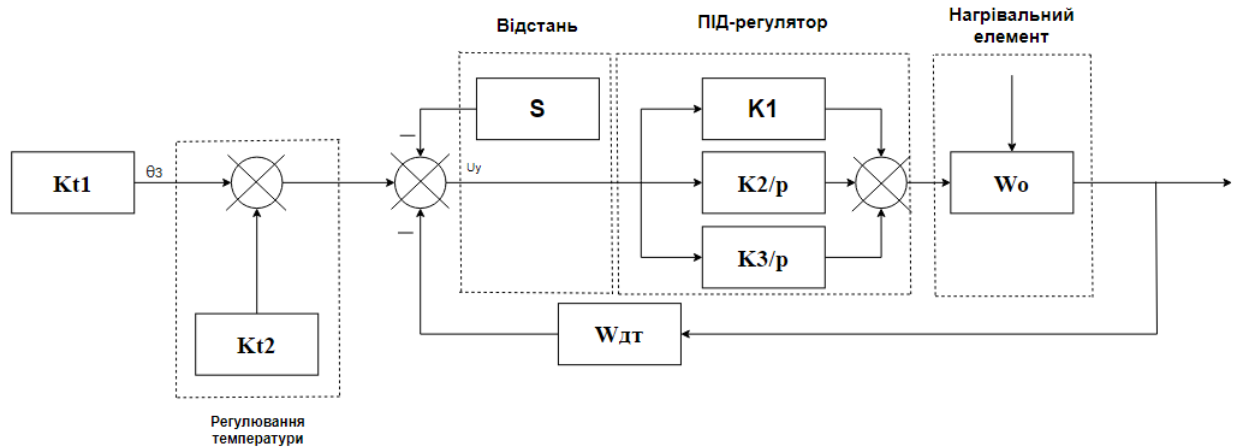


Рисунок 4.8 – Структурна схема регулювання температури під час процесу пайки BGA-компонентів з урахуванням відстані від зони нагріву до нагрівального елементу

Імітаційна модель процесу пайки BGA-компонентів з урахуванням відстані від зони нагріву до нагрівального елементу зображена на рисунку 4.9.

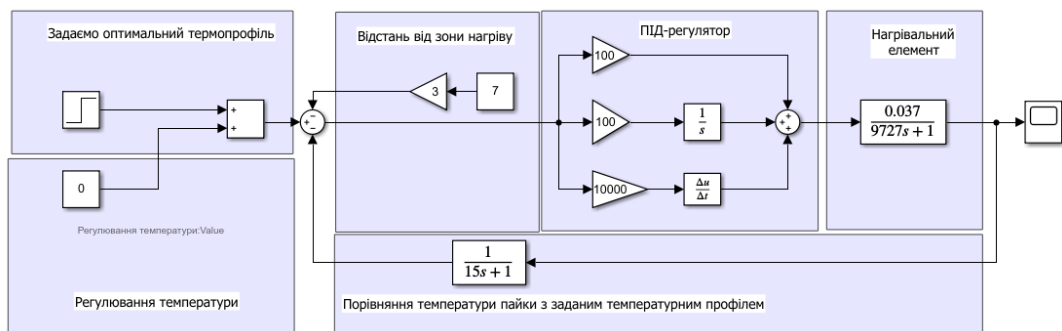


Рисунок 4.9 – Імітаційна модель процесу пайки BGA-компонентів з урахуванням відстані від зони нагріву до нагрівального елементу

Результати симуляції процесу пайки BGA-мікросхеми з урахуванням відстані від зони нагріву до нагрівального елементу зображені на рисунку 4.10. Результати розраховані для відстані 20 см.

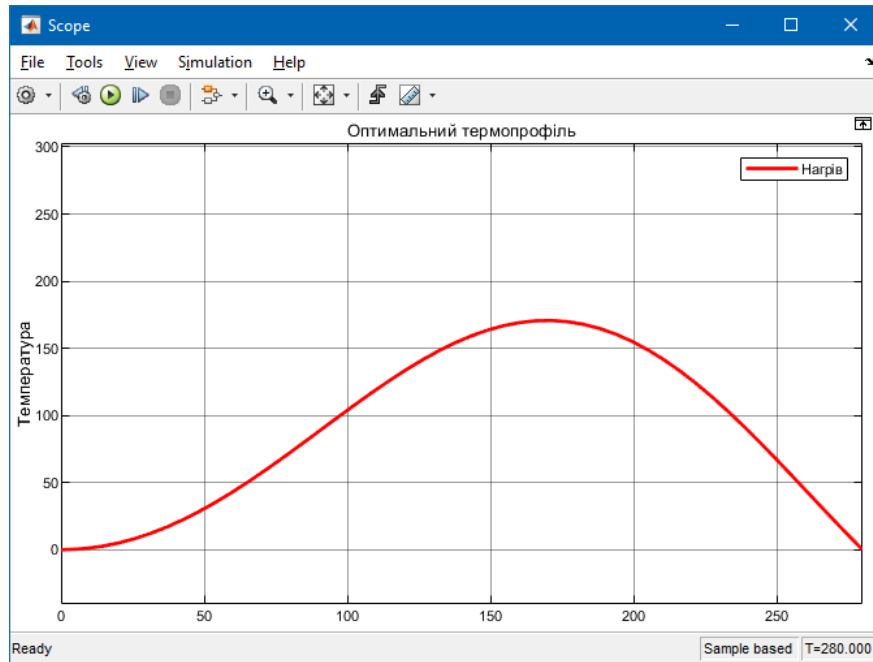


Рисунок 4.10 – Результати симуляції процесу пайки BGA-мікросхеми коли відстань від зони нагріву до нагрівального елемента 20 см

Результати симуляції процесу пайки BGA-мікросхеми з урахуванням відстані від зони нагріву до нагрівального елемента зображені на рисунку 4.11. Результати розраховані для відстані 2 см.

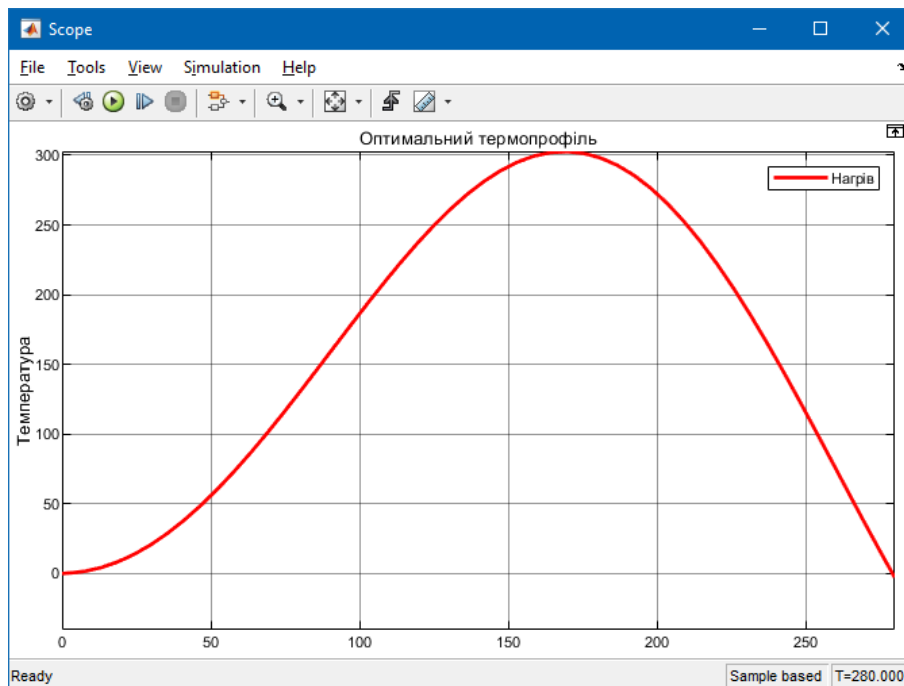


Рисунок 4.11 – Результати симуляції процесу пайки BGA-мікросхеми коли відстань від зони нагріву до нагрівального елемента 2 см

Як видно з результатів симуляції, відстань від зони нагріву до нагрівального елементу є дуже важливим фактором, що впливає на максимальну температуру в зоні нагріву. Якщо сопло для конвекційного нагріву або ІЧ-випромінювач піднести занадто близько до зони нагріву, максимальна температура, що діє на паяні з'єднання, буде перевищувати за оптимальний температурний профіль. В разі, якщо відстань від зони нагріву до нагрівального елементу буде занадто великою, температура пайки буде занадто низькою. Результати симуляції показують, що при непарильному виборі оптимальної відстані від зони нагріву до нагрівального елементу буде порушено оптимальний температурний профіль пайки, та підвищиться імовірність появи дефектів пайки BGA-мікросхем. Це ще раз доказує необхідність використання маски зі склотекстоліту, з вмонтованими на неї датчиками температури, для контролю температури в зоні нагріву, та регулювання оптимального температурного профілю в процесі пайки.

Ще один параметр, який необхідно враховувати в процесі пайки BGA-мікросхеми це потужність потоку повітря при конвекційному нагріві, або потужність ІЧ-випромінювання в процесі пайки з використанням ІЧ-випромінювача. Це важливий параметр, який впливає на температуру пайки в зоні нагріву. На рисунку 4.12 зображена структурна схема регулювання температури під час процесу пайки BGA-компонентів з урахуванням відстані від зони нагріву до нагрівального елементу, та можливістю регулювання потужності нагрівального елементу.

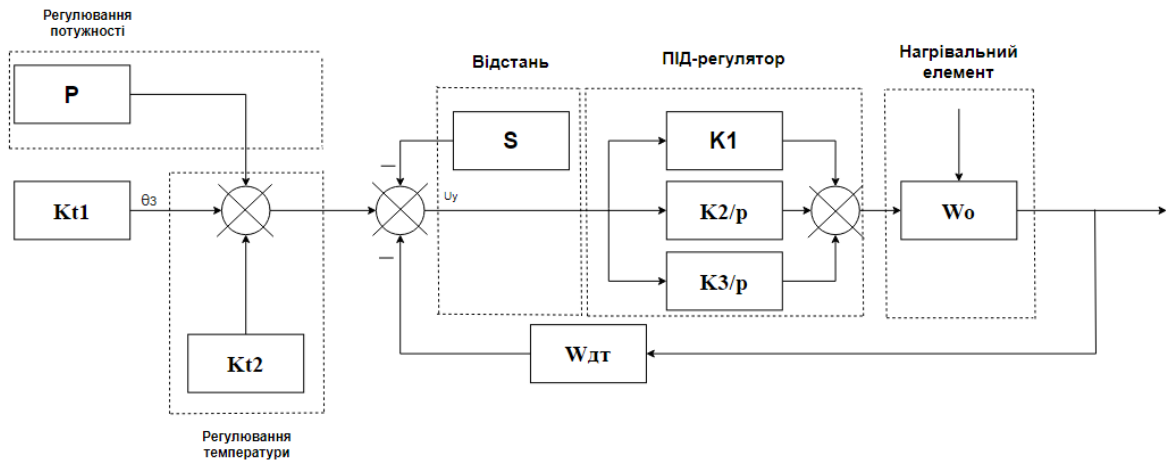


Рисунок 4.12 – Структурна схема регулювання температури під час процесу пайки BGA-компонентів з урахуванням відстані від зони нагріву до нагрівального елемента, та можливість регулювання потужності нагрівального елемента

Імітаційна модель регулювання температури під час процесу пайки BGA-компонентів з урахуванням відстані від зони нагріву до нагрівального елемента, та можливість регулювання потужності нагрівального елемента зображена на рисунку 4.13.

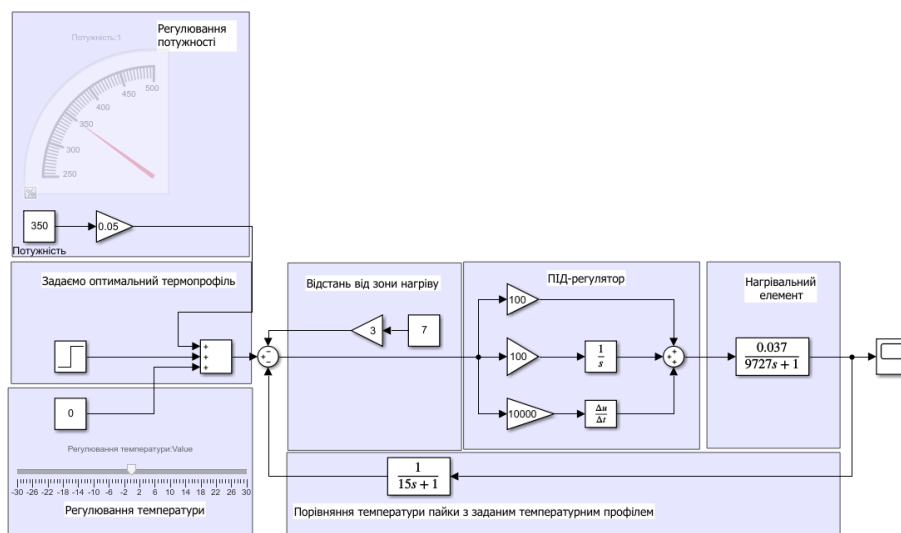


Рисунок 4.13 – Імітаційна модель регулювання температури під час процесу пайки BGA-компонентів з урахуванням відстані від зони нагріву до нагрівального елемента, та можливість регулювання потужності нагрівального елемента

На рисунку 4.14 можна побачити результати симуляції, коли оператор процесу пайки обрав неправильну потужність та відстань від зони нагріву до нагрівального елемента. Оператор помилково обрав потужність нагрівального елемента в 500 Вт, та відстань від зони нагріву до нагрівального елемента лише 3 см.

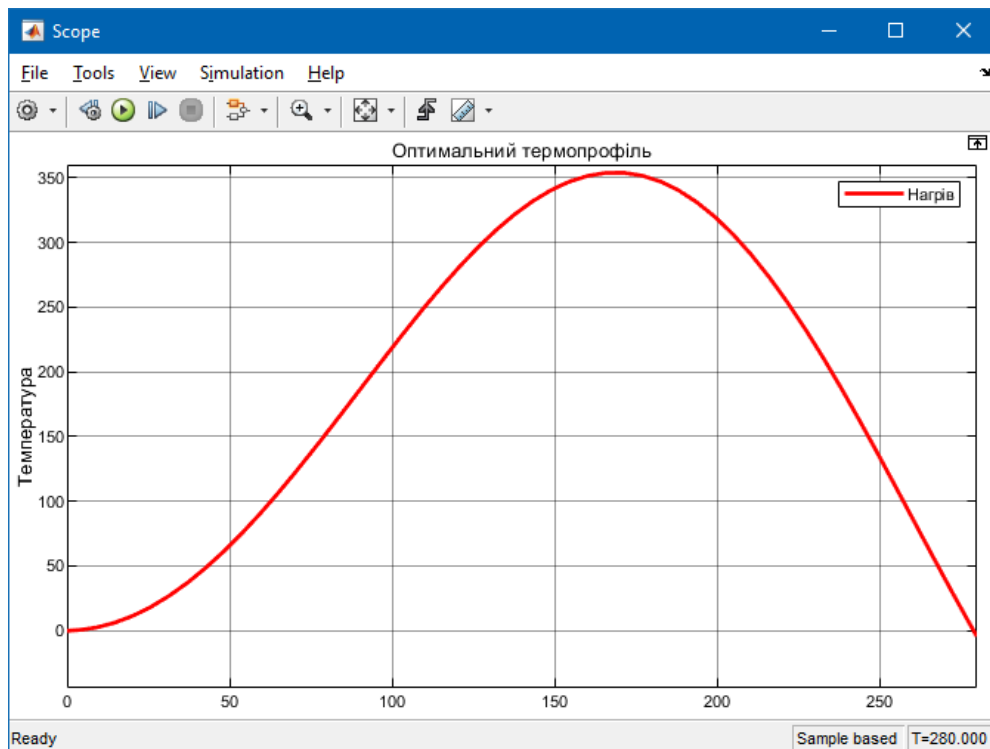


Рисунок 4.14 – Результати симуляції при потужності нагрівального елемента 500 Вт та відстані від зони нагріву до нагрівального елемента 3 см

Як видно з результатів симуляції, температура в робочій зоні може значно відрізнятись від оптимального температурного профілю. Це особливо помітно, якщо помилитись з вибором потужності та вибором відстані від зони нагріву до нагрівального елемента, коли максимальна температура може відрізнятись від оптимальної на 100 °С, що призводить до появи дефектів пайки. Це доказує необхідність використання маски для контролю температури в зоні нагріву, завдяки чому з'являється можливість регулювати температуру в процесі пайки BGA-мікросхеми, та уникнути появи дефектів паяних з'єднань.

4.3 Техніка безпеки в процесі пайки та розрахунки вентиляції виробничих приміщень

Будь-які контакти з розплавленими металами та активними хімічними речовинами можуть бути потенційною загрозою, та представляти реальну небезпеку отримання опіків та проблем сітківки очей. До того ж випари, що виділяються в процесі пайки, можуть завдати шкоди легеням, і як наслідок, всьому організму. Саме тому техніка безпеки в процесі пайки будь-яким способом та в будь-яких умовах (вдома або на виробництві) є одним з найважливіших питань, яким повинна приділятися найпильніша увага.

В процесі пайки припою та флюсів слюсар повинен користуватися тяжкозапальним одягом та темними окулярами, що оберігають очі від дії променевої енергії та бризок металу з солями. Необхідно, щоб приміщення, в якому проводиться плавлення припою та флюсів, мало хорошу вентиляцію та постійно провітрювалось.

Для уникнення вибухів при виконанні паяльних робіт забороняється використовувати в процесі пайки елементів, що знаходяться під тиском, а також ємностей з-під легкозаймистих матеріалів без попередньої обробки [37].

Механічну вентиляцію необхідно передбачати:

а) якщо метеорологічні умови та чистота повітря не можуть бути забезпечені вентиляцією з природною вентиляцією;

б) для приміщень та зон без природного провітрювання.

Допускається проектувати змішану вентиляцію з частковим застосуванням систем природної вентиляції (ежекційну систему вентиляції і використання стато-динамічних дефлекторів як систем природної і комбінованої вентиляції) для подачі або видалення повітря [38].

Природну вентиляцію для виробничих приміщень слід розраховувати:

а) на різницю густини зовнішнього та внутрішнього повітря при розрахункових параметрах перехідного періоду року для всіх опалюваних

приміщень, а для приміщень з надлишками теплоти – за розрахунковими параметрами теплого періоду року;

б) на дію вітру при швидкості 1 м/с у теплий період року – для приміщень без надлишків теплоти.

Повітряне душування зовнішнім повітрям постійних робочих місць слід передбачати:

а) у разі опромінення променистим тепловим потоком зі щільністю більше 140 Вт/м²;

б) для забезпечення концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони при відкритих технологічних процесах, які супроводжуються виділенням шкідливих речовин, і неможливістю улаштування укриття або місцевої витяжної вентиляції [38].

Аварійну вентиляцію для приміщень, в яких можливе раптове надходження великої кількості шкідливих або горючих газів, пари або аерозолів, слід передбачати відповідно до вимог технологічної частини проекту, враховуючи неможливість одночасної аварії технологічного та вентиляційного обладнання [38].

Повітроводи систем кондиціонування повітря та вентиляції, у тому числі повітряного опалення, слід теплоізулювати. Фактор товщини шару теплоізоляції, що забезпечує неутворення конденсату розраховують за формулою (4.2):

$$C = \frac{2 \cdot \lambda}{a_e} \left(\frac{t_{im} - t_e}{\Delta t} - 1 \right), \quad (4.2)$$

де λ – теплопровідність шару теплоізоляції;

a_e – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні теплоізоляції;

t_{im} – температура середовища в трубопроводі на виході із джерела;

t_e – температура оточуючого теплопровід повітря;

Δt – різниця температур між температурою зовнішньої поверхні теплоізоляції та температури оточуючого повітря.

Вихідні дані: температура середовища в трубопроводі на виході із джерела $t_{im} = -19$ °С, температура оточуючого теплопровід повітря $t_e = 19$ °С, коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні теплоізоляції $a_e = 6$ Вт, теплопровідність шару теплоізоляції $\lambda = 0,04$ Вт, різниця температур $\Delta t = 3,1$ °С. Підставимо відповідні значення у формулу (4.2):

$$C' = \frac{2 \cdot 0,04}{6} \left(\frac{|-19-19|}{3,1} - 1 \right) = 0,176.$$

Товщину шару теплоізоляції, що забезпечує неутворення конденсату знаходять за діаметром трубопроводу $d = 0,108$ м та фактором товщини шару теплоізоляції $C' = 0,176$ м. Відповідно до цих даних товщина шару теплоізоляції, за якої не відбувається конденсація водяної пари, становить $\delta = 70$ мм.

Визначення повітрообміну у виробничому приміщенні необхідне для виведення шкідливих домішок з повітря розраховується за формулою:

$$L = V_{\text{пом}} \cdot K_{\text{п}}, \quad (4.3)$$

де $V_{\text{пом}}$ – об'єм приміщення;

$K_{\text{п}}$ – мінімальна кратність повітрообміну.

Визначимо повітрообмін для виробничого приміщення $78,4$ м³ за формулою (4.3)

$$L = 78,4 \cdot 8 = 627,2 .$$

Отже, для виробничого приміщення $78,4$ м³ повітрообмін повинен складати $627,2$ м³/год.

4.4 Висновки до 4 розділу

В четвертому розділі досліджено особливості температурного профілю пайки та причини появи дефектів паяних з'єднань BGA-мікросхем. Розроблену імітаційну модель пайки, яка враховує багато факторів, що впливають на температурний профіль пайки. Доказано ефективність та необхідність контролю температури в робочій зоні. Опрацьовані норми охорони праці під час процесу пайки у виробничому приміщенні.

ВИСНОВКИ

В ході виконання атестаційної роботи розглянуті різновиди корпусів інтегральних мікросхем, переваги та недоліки використання мікросхем в корпусі BGA. Також, розглянуті особливості монтажу та пайки мікросхем на друковану плату.

В другому розділі розглянуті особливості монтажу та пайки BGA-мікросхем, різновиди обладнання та процес монтажу мікросхем на друковану плату. Також, розглянуті особливості процесу пайки BGA-мікросхем методом конвекційного нагріву, та методом нагріву ІЧ-випроміненням, виконані розрахунки залежності температури нагріву від відстані між нагрівальним елементом та зоною нагріву. Також, розглянуті основні дефекти паяних з'єднань, що виникають в процесі пайки BGA-мікросхем, визначені способи та методи уникнення появи дефектів пайки.

В третьому розділі розроблено 3D-модель маски зі склотекстоліту, для отримання фактичної температури в робочій зоні під час автоматичного процесу пайки BGA-компонентів. Розглянуті методи досягнення поставленої задачі, особливості та характеристики елементів, що задіяні для отримання фактичної температури в робочій зоні під час автоматичного процесу пайки.

В четвертому розділі розглянуті особливості оптимального температурного профілю в процесі пайки BGA-мікросхем (від 0 °C до 260 °C), особливості та причини появи дефектів пайки. Розроблена імітаційна модель процесу пайки з можливістю регулювання температурного профілю в процесі пайки, в залежності від фактичних показників температури в робочій зоні. В процесі аналізу результатів імітації процесу пайки доказано практичну ефективність та необхідність використання маски зі склотекстоліту, для мінімізації появи дефектів пайки BGA-мікросхем. Розглянуто питання охорони праці в галузі автоматизації та пайки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з «Розробки й оформлення магістерської атестаційної роботи» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітні програми: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерноінтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І.Ш. Невлюдов, В.В. Косенко, В.В. Євсєєв. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 55 с.

2. ДСТУ 3008-15. Документація. звіти у сфері науки і техніки. структура і правила оформлення [Текст] – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017. – 29 с.

3. Что такое интегральная микросхема [Електронний ресурс] / Режим доступу: www/ URL: <https://radiostorage.net/538-что-такое-integralnaya-mikroskhema-ims.html>.

4. Корпуса микросхем [Електронний ресурс] / Режим доступу: www/ URL: <https://www.ruselectronic.com/tipy-korpusov-mikroskhem/>.

5. Ball Grid Array (BGA) advantages disadvantages and its types [Електронний ресурс] / Режим доступу: www/ URL: <https://www.raypcb.com/ball-grid-array-bga-advantages-disadvantages-and-its-types/>.

6. A Brief Introduction of BGA Package Types [Електронний ресурс] / Режим доступу: www/ URL: <https://www.pcbcart.com/article/content/introduction-of-bga-package-types.html>.

7. Косенко А. А. Основы теории и технологии пайки: уч. пособ. для студентов по направлению «Сварка» дневной, заочной и дистанционной формы обучения / А. А. Косенко, В. Н. Алистратов, И. В. Захарова. – 2-е изд. – Мариуполь : ПГТУ. – 2015. – 280 с.

8. Виды пайки [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: https://naf-st.ru/articles/pcb/pcb06](http://www.naf-st.ru/articles/pcb/pcb06).
9. K. Gaffney Lead-free flip chip process development Proceedings of 2000 Electronic Components and Technology Conference / J. Poarch, and D. Delaney, // IEEE. – 2000. – P. – 129-133.
10. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. – 366 с.
11. IPC/JEDEC J-STD-020C. Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Non-hermetic Solid State Surface Mount Devices. Generic Standard on Printed Board Design. – 2004. – 20 с.
12. Лейтес И. А. Монтаж компонентов в корпусах BGA [Текст] / И. А. Лейтес // Технологии в электронной промышленности. – 2014. – № 8. – 10 с.
13. Нинг-Ченг-Ли Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и flip chip технологии [Текст] // Издательский Дом «Технологии». – 2006. – 392 с.
14. Лейтес И. А. Бессвинцовая директива: что нас ожидает в ближайшем будущем [Текст] / И. А. Лейтес // Производство электроники. – 2006. – № 4. – 10 с.
15. Ланин В. Л. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники [Текст] / В. Л. Ланин, А. П. Достанко, Е. А. Телеш // Минск: Издательский Центр БГУ. – 2007. № 4 – 20 с.
16. Установка и пайка BGA компонентов на смонтированную плату [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: http://www.elinform.ru/articles_111.htm](http://www.elinform.ru/articles_111.htm).
17. Ланин В.В. Монтаж и демонтаж BGA, CSP, Flip-Chip, QFP [Текст] / В.В. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2011. – № 1. – 12 с.
18. Монтаж интегральных микросхем [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: https://studopedia.org/1-91597.html](http://www.studopedia.org/1-91597.html).

19. Оборудование для монтажа и пайки BGA-микросхем [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: https://sovtest-ate.com/equipment/montag-demontag-bga/](http://www.sovtest-ate.com/equipment/montag-demontag-bga/).

20. Яковлев А. М. Монтаж и демонтаж BGA, CSP, Flip Chip на ремонтных центрах: инфракрасное излучение для гарантии контроля процесса и уменьшения денежных затрат [Текст] / А. М. Яковлев // Поверхностный монтаж. – 2009. – № 5. – 14 с.

21. Ланин В. Л. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники / В.Л. Ланин, А. П. Достанко, Е.В. – Минск: Изд. центр БГУ. – 2007. – 574 с. – ISBN 978–985–476– 568–6.

22. Chiu T. C. Effect of Thermal Aging on Board Level Drop Reliability for Pb-free BGA Packages Proc 54th Electronic Components & Technology Conf, Las Vegas, NV. – 2004. – pp. 1256-1262.

23. Ланин В. Л. Монтаж и демонтаж электронных компонентов [Текст] / В. Л. Ланин, В. В. Парковский // Компоненты и технологии. – 2009. – № 3. – 21 с.

24. Как перепаять BGA микросхему [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: https://www.ruselectronic.com/pajka-bga-mikroskhjem/](http://www.ruselectronic.com/pajka-bga-mikroskhjem/)

25. Инфракрасный нагреватель SHTS [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: https://www.ruprom.ru/product/182752](http://www.ruprom.ru/product/182752).

26. Дефекты пайки BGA-микросхем [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: http://www.smtservice.ru/montag/bga_defects.php](http://www.smtservice.ru/montag/bga_defects.php).

27. Способы устранения дефектов пайки BGA-микросхем [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: http://aim.avanteh.ru/podderzhka/karmannyi-spravochnik-po-paike/defekty-paiki-bga-ehffekt-popkorna-golova-na-podushke-sposoby-ikh-ustraneniya/?L=0](http://aim.avanteh.ru/podderzhka/karmannyi-spravochnik-po-paike/defekty-paiki-bga-ehffekt-popkorna-golova-na-podushke-sposoby-ikh-ustraneniya/?L=0).

28. Ansys Discovery SpaceClaim [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: https://www.cadfem-cis.ru/products/ansys/3d-design/spaceclaim/](https://www.cadfem-cis.ru/products/ansys/3d-design/spaceclaim/).

29. NTC-GT004 [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www/ URL: https://russian.alibaba.com/product-detail/300-degrees-celsius-ntc-thermistor-cost](http://www/URL:https://russian.alibaba.com/product-detail/300-degrees-celsius-ntc-thermistor-cost).
30. Измерение температуры при помощи NTC термистора [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www/ URL: https://aterlux.ru/article/ntcresistor#FORMULA3](http://www/URL:https://aterlux.ru/article/ntcresistor#FORMULA3).
31. What is Arduino [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www/ URL: https://www.arduino.cc](http://www/URL:https://www.arduino.cc).
32. Ардуино, терморезистор NTC [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www/ URL: https://robotclass.ru/tutorials/arduino-thermistor-100k/](http://www/URL:https://robotclass.ru/tutorials/arduino-thermistor-100k/).
33. Стеклотекстолит КАСТ-В [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www/ URL: https://www.selltec.ru/catalogue/materialy/steklotekstolit/castb/steklotekstolit-kast-v_3290.html](http://www/URL:https://www.selltec.ru/catalogue/materialy/steklotekstolit/castb/steklotekstolit-kast-v_3290.html).
34. Кононенко М.Д. Пайка BGA компонентів [Текст] / М. Д. Кононенко // Automation and Development of Electronic Devices. – Х. ХНУРЕ – 2020. – № 2. – С. 32 – 35.
35. MatLab/Simulink Simulation and Model-Based Design [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www/ URL: https://www.mathworks.com/products/simulink.html](http://www/URL:https://www.mathworks.com/products/simulink.html).
36. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного управління» для напряму підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб. О. В. Токарева. - Харків, 2015. — 32 с.
37. Техника безопасности при пайке [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www/ URL: https://morflot.su/tehnika-bezopasnosti-pri-pajke-i-luzhenii/](http://www/URL:https://morflot.su/tehnika-bezopasnosti-pri-pajke-i-luzhenii/).
38. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування [Текст] – Введ від 28.08.2013. // ДП «Український науководослідний інститут спеціальних будівельних робіт» (УкрНДІспецбуд), 2013. – 232 с.