

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Моделювання параметрів експонування топології при автоматизованому
виробництві друкованих плат
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи АУТПм-22-1

Балабанов Ігор Володимирович
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Автоматизоване управління
технологічними процесами
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Андрусевич А.О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

(прізвище, ініціали)

Я, як студент ХНУРЕ Балабанов Ігор Володимирович, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надав і не одержав недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Дата

16.01.24

ПІБ

Балабанов І.В.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
Кафедра _____ КІТАР _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
Тип програм _____ освітньо-професійна _____
Освітня програма Автоматизоване управління технологічними процесами _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____ (підпис)

«16» січня 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Балабанову Ігорю Володимировичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання параметрів експонування топології при автоматизованому виробництві друкованих плат

Затверджена наказом по університету від 03.01.2023 р. № 1288 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 16.01.2024

3. Вихідні дані до роботи: _____

3.1 Методи виготовлення друкованих плат

3.2 Технологія LCD фотополімерного 3D-друку.

3.3 Програма Chitubox для підготовки моделей, IBM SPSS 26 для побудови регресійної моделі;

3.4 Проведення досліджень впливу температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів провідникового рисунку

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

4.1 Вступ;

4.2 Аналіз предметної області;

4.3 Опис макету для дослідження;

4.4 Проведення експериментальних досліджень;

4.5 Охорона праці;

4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал у вигляді презентації формату PowerPoint (*.ppt) 12– с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Розробка розділу «Аналіз предметної області»	ас. каф. КІТАР Нікітін Дмитро Олександрович		09.10.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	01.09.2023	виконано
2	Збір матеріалів для дослідження	25.09.2023	виконано
3	Розробка розділу «Аналіз предметної області»	09.10.2023	виконано
4	Розробка розділу «Опис макету для дослідження»	15.10.2023	виконано
5	Розробка розділу «Проведення експериментальних досліджень»	19.12.2023	виконано
6	Розробка розділу Охорона праці	30.12.2023	виконано
7	Оформлення кваліфікаційної роботи	06.01.2024	

Дата видачі завдання 01.09.2023

Студент _____
(підпис)

Балабанов І.В.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. Андрусевич А.О.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 80 с., 9 табл., 31 рис., 22 джерел.

ФОТОЛІТОГРАФІЯ, ДРУКОВАНА ПЛАТА, ФОТОПОЛІМЕРНИЙ ДРУК, LCD 3D-ДРУК, РЕГРЕСІНА МОДЕЛЬ.

Об'єкт дослідження – процеси адитивного виробництва об'ємних моделей.

Предмет дослідження – технологія фотополімерного 3D-друку на базі LCD технології.

Мета роботи – підвищення якості фотополімерних масок топології друкованих плат за допомогою використання адитивного 3D-друку за технологією LCD. Визначення впливу температури на відхилення геометричних розмірів топології друкованої плати.

Проведено аналіз існуючих процесів фотополімерного друку, розглянуті види технологій 3D-друку, а саме SLA, DLP та LCD. Для проведення досліджень розглянуто макет для експонування топології друкованих плат за технологією LCD.

В результаті дослідження таких чинників, як температура, час експонування та інтенсивність випромінювання, побудована регресійно-кореляційна модель, яка показує вплив параметрів друку на збереження геометричних розмірів моделі.

Отримані результати можуть бути використані при організації та налаштуванні автоматизованого виробництва друкованих плат.

ABSTRACT

The explanatory note contains: 80 p., 9 tabl., 31 fig., 22 sources.

PHOTOLITHOGRAPHY, PRINTED BOARD, PHOTOPOLYMER PRINTING, LCD 3D-PRINTING, REGRESSION MODEL.

The object of research is the processes of additive production of three-dimensional models.

The subject of research is photopolymer 3D printing technology.

The purpose of the work is improving the quality of photopolymer masks of printed circuit board topology using additive 3D printing using LCD technology. Determination of the effect of temperature on the deviation of the geometric dimensions of the printed circuit board topology.

The analysis of existing photopolymer printing processes was carried out, and the types of 3D printing technologies, namely SLA, DLP and LCD, were considered. To conduct research, a layout for displaying the topology of printed circuit boards using LCD technology was considered.

As a result of the study of such factors as temperature, exposure time and radiation intensity, a regression-correlation model was built, which shows the influence of printing parameters on the preservation of the geometric dimensions of the model.

The obtained results can be used in the organization and adjustment of the automated production of printed circuit boards.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	7
Вступ.....	8
1 Аналіз предметної області	10
1.1 Фотолітографія	10
1.2 Методи виготовлення друкованих плат	11
1.3 Опис процесу експонування.....	16
1.4 Фотополімерний друк.....	19
1.5 Використання адитивних технологій 3D-друку при експонуванні топології ДП	24
1.6 Висновки до першого розділу.....	25
2 Вибір електронних компонентів	27
2.1 Опис макету для проведення досліджень.....	27
2.2 Елементна база макету	28
2.3 Висновки до другого розділу	33
3 Проведення досліджень	34
3.1 Побудова плану експерименту	37
3.2 Визначення впливу часу та інтенсивності випромінювання на температуру фотополімерної смоли	41
3.3 Визначення впливу температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів топології.....	46
3.4 Висновки до третього розділу	52
4 Охорона праці	54
4.1 Безпека при роботі з хімічними матеріалами.....	54
4.2 Висновки до четвертого розділу.....	56
Висновки	57
Перелік джерел посилання	59
Додаток А Абробація наукових результатів дослідження.....	63
Додаток Б Результати дослідження.....	74
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	79

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ДДП – двошарова друкована плата;

ДП – друкована плата;

ОДП – одношарова друкована плата;

СПФ – сухі плівкові фоторезисти;

СТЗ – система технічного зору;

ТКОР – температурний коефіцієнт об'ємного розширення матеріалу;

ФР – фоторезист;

ФШ – фотошаблон;

DLP – Digital Led Projection;

FDM – Fused Deposition Modeling;

LCD – Liquid Crystal Display;

MJM – Multi Jet Modeling;

SLA – Stereo Lithography;

SLS – Selective Laser Sintering.

ВСТУП

Різноманіття радіоелектронної техніки та зростаючий масовий попит на неї висувають такі нові технічні вимоги, як мініатюризація апаратури, багатомодульність пристроїв. Перед виробниками постають складні завдання: задоволення вимог ринку, відповідність існуючим стандартам виробництва [1 – 3]. Сучасний розвиток технологій в області приладобудування насамперед спрямований на мініатюризацію пристроїв і інтеграцію в одному пристрої великої кількості модулів, що призводить до необхідності мініатюризації як виробів загалом, так і їхніх окремих компонентів, вузлів і друкованих модулів, що в свою чергу призводить до:

- зменшення масо-габаритних розмірів друкованих плат (ДП) (зменшення товщини, ширини провідників, зменшення відстані між ними);
- збільшення кількості провідників на ДП;
- збільшення кількості слоїв провідників в ДП;
- необхідність збільшення терміну служби ДП;
- забезпечення електричної надійності ДП;
- збереження механічної стійкості провідників та ДП.

Технологія фотолітографії для виробництва ДП найбільше відповідає поставленим вимогам [4, 5].

Таким чином, зв'язку з зростаючими вимогами до конструкції друкованих модулів все більш ускладнюються технології їх виготовлення, та класичні старі методи часто стають не придатні для виробництва ДП відповідно до сучасних вимог.

Один з перспективних напрямків вирішення зазначених проблем базується на застосуванні 3D-друку або «адитивного виробництва» (additive manufacturing) [6]. 3D-друк – це створення монолітних тривимірних об'єктів практично будь-якої геометричної форми на основі цифрової моделі шляхом послідовного нанесення шарів матеріалу, які повторюють контур моделі.

Об'єкт дослідження – процеси адитивного виробництва об'ємних моделей.

Предмет дослідження – технологія фотополімерного 3D-друку на базі LCD технології.

Мета дослідження – підвищення якості фотополімерних масок топології друкованих плат за допомогою використання адитивного 3D-друку за технологією LCD. Визначення впливу температури на відхилення геометричних розмірів топології друкованої плати.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз технологій адитивного фотополімерного 3D-друку;
- проаналізувати види друкованих плат та методи їх виготовлення;
- розглянути характеристики макету для дослідження;
- розглянути елементну базу макету, його компоновку, способ взаємодії з макетом;
- побудувати план експериментів;
- обрати параметри друку, які включити у модель для дослідження їх впливу;
- побудувати регресійно-кореляційну модель впливу параметрів друку на відхилення геометричних розмірів топології друкованої плати.

Пояснювальну записку виконано згідно з [7, 8].

Результати дослідження опубліковані у [9] (Додаток А).

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Фотолітографія

Фотолітографія (оптична літографія) – процес вибіркового травлення поверхневого шару із використанням захисної фотомаски. Основними складовими процесу фотолітографії, що визначають її рівень, є фоторезист, фотошаблон та конкретна схема реалізації технологічного процесу, пов'язана з технічними характеристиками устаткування, що використовується [10].

Фоторезист (ФР) – це світлочутливий матеріал, який залежно від опромінення змінює свої хімічні властивості. ФР можуть бути рідкі (на водних і органічних розчинниках) і сухі плівкові фоторезисти (СПФ), а також у водних розчинах та в органічних розчинниках.

Суть способу полягає у контактному копіюванні рисунку схеми з фотошаблону (ФШ) на заготовлю ДП, покриту світлоочисним шаром (фоторезистом).

Основні етапи фотохімічного способу:

- очищення і підготовка поверхні;
- на поверхню заготовки ДП наноситься фотополімерний матеріал, чутливий до УФ-випромінювання. За результатом впливу світла фоторезисти бувають негативні та позитивні. При використанні негативних фоторезистів експоновані області заготівлі ДП залишаються на платі, оскільки вони переходять у нерозчинний стан, а неекспоновані, що зберегли вихідну структуру, вимиваються при прояві в органічних розчинниках. У разі застосування позитивних фоторезистів експоновані ділянки вимиваються при прояві, оскільки у позитивних фоторезистах експонування має на меті створити умови для деструкції експонованих ділянок фоторезиста та переведення їх в розчинний стан у проявнику з лужними властивостями;

- після висихання фоторезисту встановлюється ФШ, реперні знаки (перехрестя) якого поєднуються під мікроскопом з центрами фіксуєчих (базових) отворів заготівлі ДП;
- проводиться експонування малюнка схеми через ФШ (опроміненням ультрафіолетовим світлом), внаслідок якого утворюється приховане зображення;
- прояв зображення та «задублювання» малюнка, тобто. одержання захисного рельєфу (захисної фотомаски).

На рисунку 1.1 наведена спрощена схема процесу фотолітографії [11]:

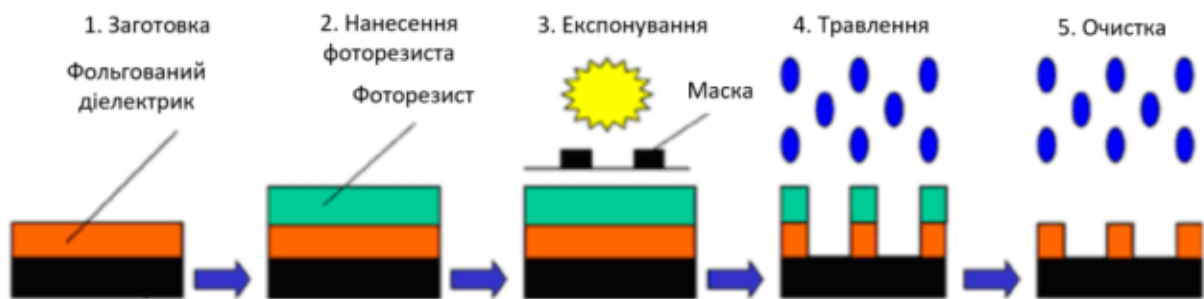
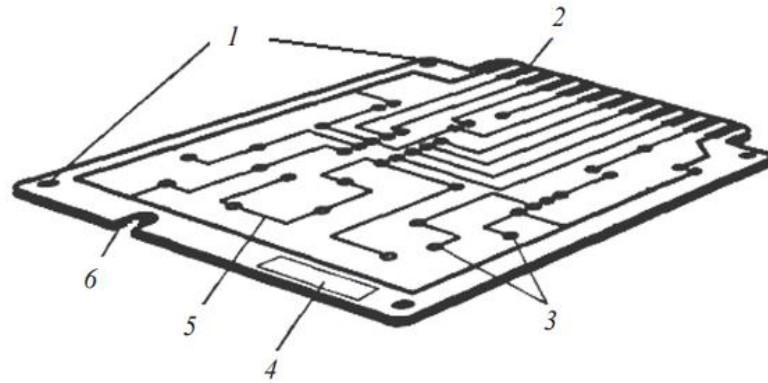


Рисунок 1.1 – Спрощена схема фотолітографії для друкованих плат

Роздільна здатність процесу фотодруку та точність розмірів елементів друкованого рисунку залежать від типу та товщини шару фоторезиста. Зі збільшенням товщини шару фоторезиста роздільна здатність падає.

1.2 Методи виготовлення друкованих плат

Друкована плата – виріб, що складається з плоскої ізоляційної основи з отворами, пазами, вирізами і системою струмопровідних смужок металу (провідників), які використовують для встановлення та комутації електрорадіовиробу та функціональних вузлів відповідно до електричної принципіальної схеми, рисунок 1.2.



1 – отвори кріплення; 2 – кінцеві друковані контакти; 3 – монтажний отвір;
4 – місце маркування; 5 – друкований провідник; 6 – паз орієнтації

Рисунок 1.2 – Друкована плата

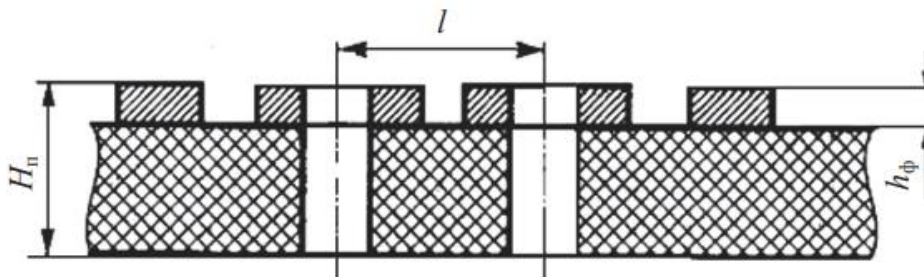
Рисунок друкованої плати – конфігурація провідникового та (або) діелектричного матеріалу на друкованій платі.

Провідний рисунок – конфігурація провідного матеріалу. Провідний рисунок ДП повинен бути чітким, з рівними краями, без здуття, підтравлювання, розривів, відшарувань, слідів інструменту та залишків технологічних матеріалів.

Друкований провідник (доріжка) – одна провідна смужка у провідному малюнку.

Друковані плати бувають одношарові, двошарові, багатошарові [12].

Одношарова ДП – це плата, на одному боці якої виконані елементи провідного малюнку, рисунок 1.3. Такі ДП прості за конструкцією та економічні у виготовленні. Їх застосовують для монтажу побутової радіоапаратури, блоків живлення та пристроїв техніки зв'язку.

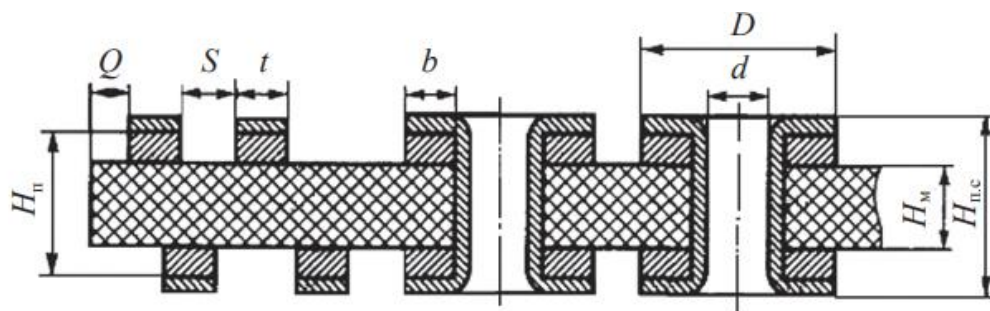


H_n – товщина ДП; h_ϕ – товщина фольги; l – відстань між центрами елементів
конструкції ДП

Рисунок 1.3 – Одношарова друкована плата

Двошарова ДП – це плата, на обох боках якої виконані елементи провідного малюнка і всі необхідні з'єднання відповідно до електричної принципової схеми плати, рисунок 1.4.

Багатошарова ДП – це плата, яка складається з шарів ізоляційного матеріалу, що чергуються з провідними рисунками на двох або більше шарах, між якими виконані необхідні сполюки, рисунок. 1.5.



Q – відстань від краю ДП, вирізу до елементів провідного малюнка; S – відстань між провідниками; t – ширина провідника; b – відстань від краю отвору до краю контактної площадки; D – діаметр контактної площадки; d – діаметр отвору; $H_{n.c.}$ – сумарна товщина ДП з хімічним гальванічним покриттям.

Рисунок 1.4 – Двошарова друкована плата

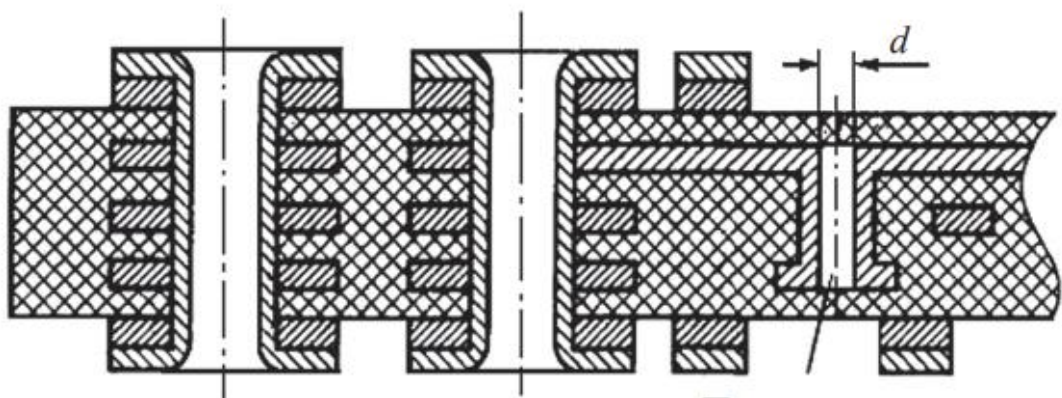


Рисунок 1.5 – Багатошарова друкована плата

Електричний зв'язок між провідними шарами може бути виконаний спеціальними об'ємними деталями, друкованими елементами або хіміко-гальванічною металізацією отворів. Багатошарові ДП характеризуються

підвищеною надійністю та щільністю монтажу, стійкістю до кліматичних та механічних впливів, зменшеними розмірами та меншою кількістю контактів. Але ДП цього типу мають велику трудомісткість виготовлення, складність отримати велику точність рисунку та суміщення шарів, високу вартість, складність технологічного устаткування та контролю на всіх операціях технологічного процесу.

Гнучка друкована плата, гнучкий друкований кабель, гнучко-жорсткі плати – якісно нові несучі конструкції та системи міжз'єднань, які застосовуються замість жорстких ДП, плоских стрічкових проводів, джгутів та об'ємних провідників.

Гнучка ДП має гнучку основу або гнучкий базовий матеріал, вона є аналогом жорсткої ДП, але може вигинатися та набувати різної форми. Багатошарові гнучкі ДП не є аналогами жорстких багатошарових ДП, оскільки кожен шар може бути подовжено у будь-який бік і використовуватись для з'єднання з іншими модулями електроапаратури.

Найбільш загальними показниками рівня друкованих плат є ширина провідників та діаметр міжшарових переходів. Тенденція розвитку друкованих плат характеризується зменшенням ширини провідників та збільшенням кількості міжшарових переходів за рахунок зменшення їх розмірів та використання поверхневих контактних площадок для приєднання виходів компонентів.

Використовують два види технологій отримання провідного рисунку шарів друкованих плат: на основі субтрактивних методів і на основі адитивного формування.

За субтрактивною технологією рисунок провідників отримується травленням мідної фольги по захисному зображенню у фоторезисті або металорезисті.

За адитивною технологією провідники та ізоляція між ними (діелектрик) утворюються вибірково гальванічним осадженням провідників і пресуванням ізоляції тільки в необхідних місцях. Принциповою відмінністю адитивного

методу від субтрактивного є те, що метал провідників наплавляється, а не травиться.

Застосовуються три різновиди субтрактивної технології.

Перший варіант показаний на рисунку 1.6 – негативний процес із використанням сухого плівкового фоторезиста (СПФ). Процес досить простий, застосовується при виготовленні одношарових та двошарових ДП. Металізація внутрішніх стінок отворів не виконується. Заготівля – фольгований діелектрик.

Методами фотолітографії за допомогою сухого плівкового фоторезиста на поверхні фольги формується захисна маска, яка є зображенням (рисунком) провідників. Потім відкриті ділянки мідної фольги піддаються травленню, після чого фоторезист видаляється.

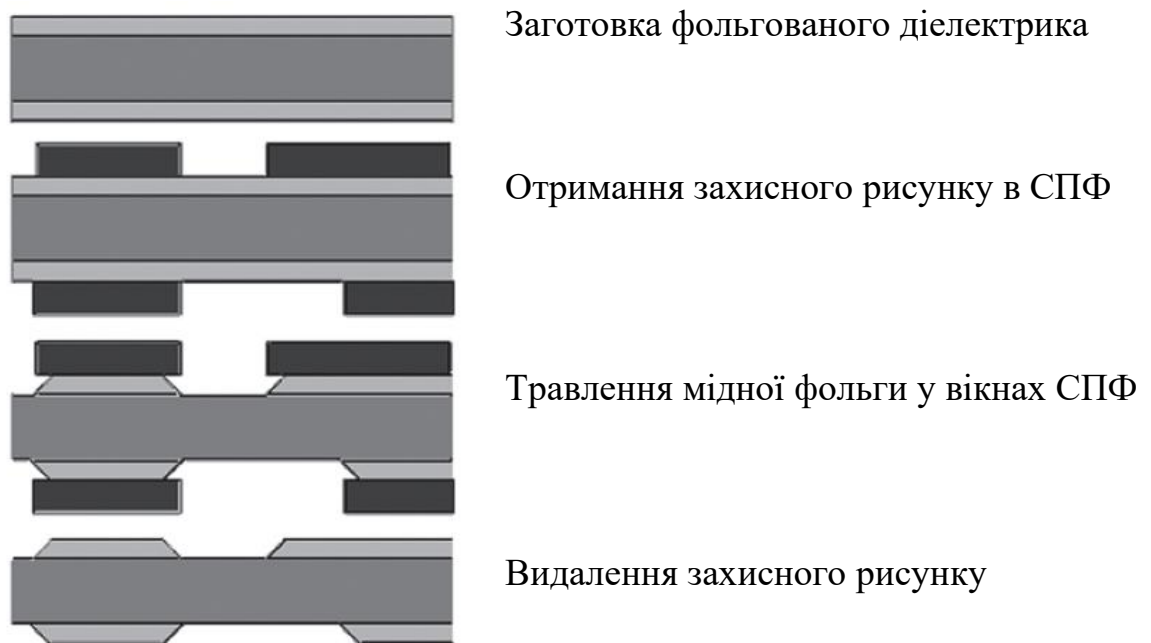


Рисунок 1.6 – Негативний процес з використанням сухого плівкового фоторезисту

Другий варіант – позитивний процес. Створюється провідний рисунок двосторонніх шарів з міжшаровими металізованими переходами (отворами).

Сухий плівковий фоторезист нашаровується на заготовки фольгованого діелектрика, що пройшли операції свердління отворів та попередньої (5-7 мкм) металізації міддю стінок отворів та всієї поверхні фольги. У процесі фото

літографії СПФ захисний рельєф отримують на місцях поверхні металізованої фольги, що підлягає подальшому видалення травленням. На ділянки, не захищені СПФ, послідовно осаджуються мідь і металорезист (сплав олово-свинець), навіть на поверхню стін отворів. Після видалення маски СПФ незахищені (тонші) шари міді витравлюються. Процес складніший, проте з його допомогою вдається отримати металізовані стінки отворів.

Третій варіант – так званий тентінг-процес. Як і в позитивному процесі, береться заготівля у вигляді фольгованого діелектрика, формуються отвори, проводиться попередня металізація всієї плати, включаючи внутрішні стінки отворів. Потім наноситься СПФ, який формує маску під час фотолітографії у вигляді рисунку друкованих провідників і утворює завіски – тенти над металізованими отворами, захищаючи їх під час наступної операції травлення вільних ділянок мідної фольги.

Виготовлення шарів за субтрактивною технологією із застосуванням діелектриків з тонкою мідною фольгою товщиною 5–9 мкм забезпечує отримання провідного рисунку з мінімальною шириною провідників і проміжків між ними близько 50 мкм при товщині провідників 5-9 мкм та 100-125 мкм при товщині провідників 40-50 мкм.

Процес виготовлення плат за технологією фотолітографії трудомісткий і на створення трафаретів вимагає додаткових витрат матеріалів та обладнання, використання яких в свою чергу не дозволяє швидко перелаштовувати виробництво на створення нових виробів. При сучасних темпах автоматизованого виробництва відсутність подібної гнучкості є істотним недоліком [11].

1.3 Опис процесу експонування

Експонування – це процес опромінення світлочутливого матеріалу світлом. Як джерело світла застосовують короткохвильові випромінювачі з великим вмістом ультрафіолетових променів. Від часу експонування

(засвічування) фоторезиста залежить точність відтворення малюнка та стійкість захисного шару до дії електролітів.

Етап експонування є одним з ключових, бо саме на ньому формується топологія майбутнього виробу.

Експонування може проводитися як із використанням фотошаблону, так і без нього (безмасочна літографія). В останньому випадку малюнок на фоторезисті формується безпосередньо переміщеннями лазерної плями, або електронним променем чи їх групою, сфокусованим на поверхні фоторезиста. При застосуванні фотошаблонів частіше використовуються проєкційні методи експонування, коли малюнок з фотошаблону переноситься на фоторезист з використанням системи оптичних лінз [11]. Перевагами цього методу є висока продуктивність і відносна простота методу. Але до недоліків даного методу можна віднести паразитні засвічення провідників, які пливають на електричну надійність ДП. Іншим методом експонування, є лазерне експонування топологічних зображень ДП [4], рисунок 1.7:

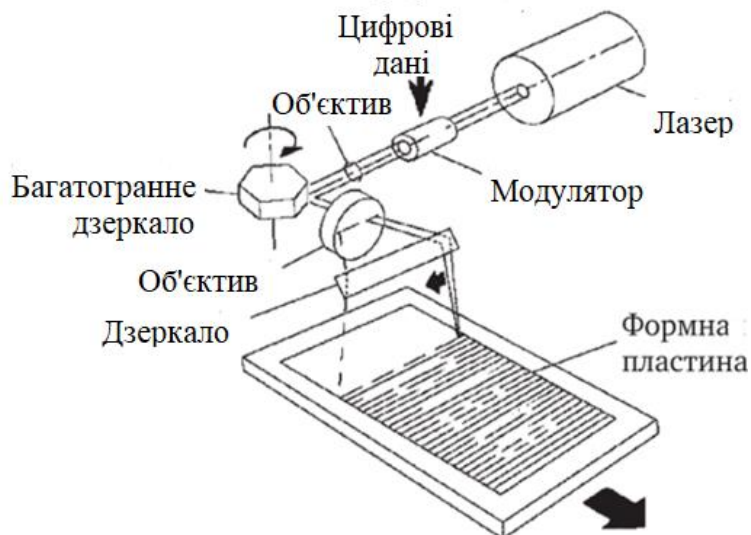


Рисунок 1.7 – Лазерне експонування топологічних зображень

Лазерне експонування засновано на тому, що полімеризація фоторезистора здійснюється за рахунок точкового сфокусованого лазерного випромінювання, що відрізняє даний спосіб експонування від технології використання фото-масок

та ультрафіолетових ламп. Невелика частка падаючого випромінювання поглинається фото-маскою і призводить до полімеризації засвідчуваних ділянок. Метод дозволяє зменшити паразитну засвітку провідників на ДП, а також дозволяє досягти меншої відстані між провідниками. Іншими перевагами лазерного експонування зображення є:

- висока точність та якість виробу за рахунок використання спеціалізованих комп'ютерних програм для обробки креслень і розводки провідникових доріжок;
- висока швидкість обробки;
- збільшення роздільної здатності, що дозволить зменшити розміри провідників ДП.

Завдяки всім цим перевагам лазерний метод експонування є зараз провідним і доступним. Сучасне обладнання має широкий діапазон технологічних параметрів, які впливають на кількісні та якісні характеристики технології. В результаті оптимізації технологічних параметрів експонування можливо забезпечити необхідні параметри виробу, такі як:

- збереження геометричних розмірів заданої топології ДП;
- точність позиціонування провідників;
- забезпечення електричної надійності ДП;
- збереження механічної стійкості провідників;
- уникнення дефектів в топології ДП.

Таким чином, процес фотолітографії складається з послідовних етапів: нанесення фоторезиста на виріб і подальше експонування фотошаблону на оброблювану поверхню з наступним травленням. Для кожного етапу необхідні вузькоспеціалізоване обладнання та витратні матеріали. Дорогі, складні в обслуговуванні, габаритні верстати (наприклад установки для прямого експонування) неможливо використовувати в невеликих підприємствах. При виробництві великих партій кожен етап займає значну кількість часу, для прикладу, при нанесенні фоторезисту аерозолем потрібен час для просушки виробів. Також, в результаті помилки оператора або технічного збою

обладнання, на кожному етапі можуть виникнути дефекти на виробі. Для мінімізації цих негативних факторів необхідний більш високий рівень автоматизації, що забезпечує контроль і синхронну роботу всього основного і допоміжного обладнання. До того ж, на стадії травлення, можливі геометричні відхилення отриманого зображення від вихідної топології ДП, наприклад підтравлювання провідникових доріжок [11].

1.4 Фотополімерний друк

Фотополімеризація – це метод, в якому використовується світло (видиме або ультрафіолетове) для створення хімічної реакції, в результаті якої рідкий матеріал – полімер, стає твердішим у результаті процесу затвердіння [13].

Процес 3D друку вперше був відтворений у 1983 році під назвою «стереолітографія» і запатентований як «спосіб і пристрій для створення твердих об'єктів шляхом послідовного нанесення тонких шарів матеріалу один поверх іншого, які тверднуть під дією ультрафіолетового опромінення». Спочатку це був друк рідиною, яка твердне під дією світла, а згодом визначення було поширене на будь-які матеріали, здатні змінювати свій фізичний стан [5]. Сьогодні 3D друк – це технологія створення об'ємного фізичного об'єкта за допомогою цифрової 3D моделі, отриманої як результат сканування або роботи в 3D програмах.

В сучасних 3D принтерах застосовується дві основні технології друку: струменева і лазерна. Ці технології також підрозділяються на окремі підвиди, які можуть відрізнитися за витратними матеріалами для друку. Як витратні матеріали може використовуватися фотополімерна смола, порошок, силікон, різні метали, віск, фотополімери, а також різні види пластику. Принцип роботи 3D принтера залежить від його типу і від застосовуваних витратних матеріалів. Крім цього існують такі 3D принтери, які здатні друкувати одночасно двома і більше різними матеріалами або виконувати багатоколірний друк.

Основними технологіями у 3D друці можна вважати:

- пошарова укладка полімеру (Fused Deposition Modeling – FDM);
- фотополімерний друк (Stereo Lithography – SLA, Digital Led Projection – DLP, Liquid Crystal Display – LCD);
- селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering – SLS);
- технологія наплавлення (Multi Jet Modeling – MJM).

3D друк смолою, або фотополімерний друк, має три основні види технологій: SLA, DLP та LCD. Усі вони припускають використання світлочутливої смоли, яка твердне під дією джерела світла шар за шаром і, зрештою, твердне уся деталь. Смола знаходиться в резервуарі та твердне на будівельній платформі, яка повільно піднімається з резервуару у міру формування кожного шару деталі. Основна відмінність між трьома технологіями, що розглядаються, полягає у джерелі світла, рисунок 1.8.

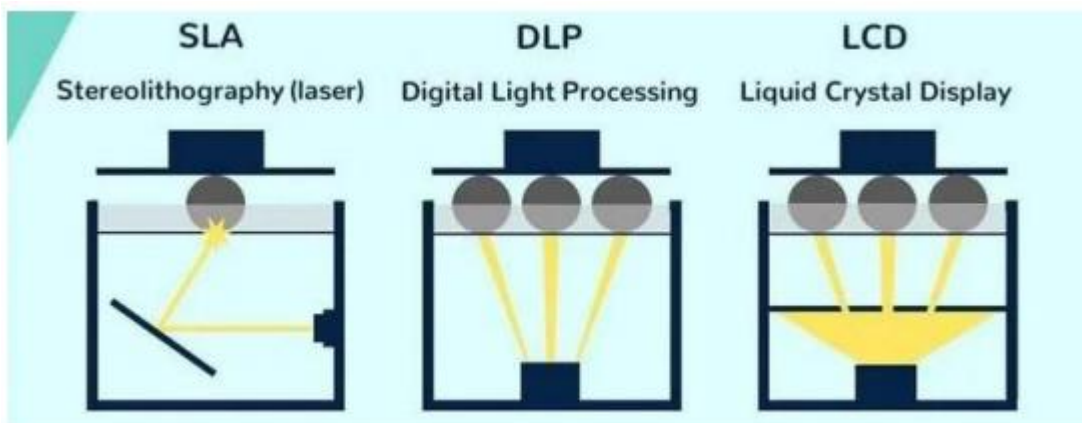


Рисунок 1.8 – Фотополімерні технології 3D друку

1.4.1.SLA-технологія

SLA (Selective Laser Sintering) – перша технологія 3D-друку. У принтері SLA, рисунок 1.9 [5], використовуються дзеркала, відомі як гальванометри або гальвометри, одне розміщене на осі X, а інше – на осі Y. Ці гальво швидко направляють лазерний промінь через чан зі смолою. Спосіб полягає в послідовній полімеризації тонких шарів рідкого fotocутливого полімеру променем ультрафіолетового лазера малої потужності. У робочій ємності 3D

принтера розташована платформа, занурена в рідку смолу. Спочатку платформа знаходиться біля поверхні полімеру, покрита тонким шаром від 20 мікронів до 150 мікрон, на якому лазер починає формувати шар деталі [9]. Модель нарізується на тонкі шари, рівні роздільній здатності принтера по вертикальній осі. Створивши один шар, принтер занурює платформу на товщину нового шару моделі (від 10 мкм до 150 мкм) і створює наступний шар. Під впливом лазера (його потужність може бути відносно невеликою, що робить принтер дешевше апаратів, які працюють з порошковими матеріалами SLS, SLM тощо) полімер твердне, утворюючи стінки майбутнього виробу. Таким чином, шар за шаром, створюється модель цілком.

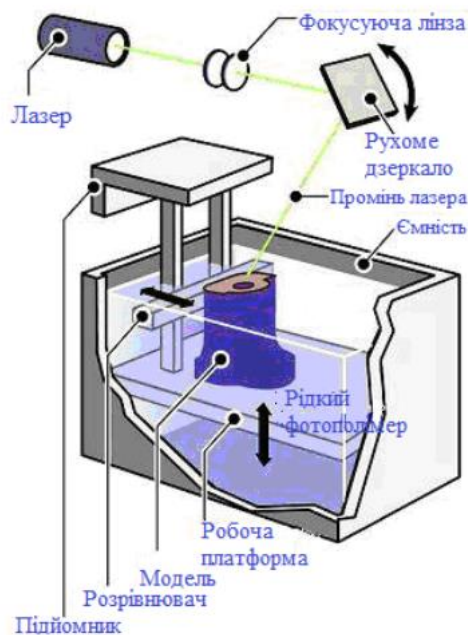


Рисунок 1.9 – Схема 3D принтера, що працює на основі технології SLA

Перевага такої технології:

- можливість побудови моделей великих розмірів;
- велика точність;
- можливість побудови моделей будь-якої форми та конструкції;
- низький процент втрати зайвого матеріалу;
- низький шум роботи.

Недоліки:

- використання фотополімеру, що є дорожче ніж інші матеріали;
- висока вартість самого принтеру;
- необхідність забезпечення високого класу точності при побудові принтера, що забезпечить правильний кут виставлення дзеркала;
- необхідність точної механіки, що забезпечить знаходження ванни на рівні одного шару від поверхні до платформи;
- необхідність частого обслуговування принтера.

1.4.2 DLP-технологія (Digital Light Processing)

Принцип роботи 3D принтерів, що використовують технологію 3D друку DLP схожий на роботу проектора [11], рисунок 1.10. Полімер переходить в тверду форму під дією світла (видимого спектру), при чому засвічується відразу весь шар. Потік світла модулюється системою MEMS – мікромеханічними дзеркалами, кожне з яких керується окремо. Залежно від положення дзеркала, світло або проходить в дану точку шару, або ні. Таким чином, машина має фіксоване логічне розширення – кількість точок по координатам XY. Їх фізичний розмір залежить від того, на якій відстані від джерела випромінювання, в системі мікро дзеркал, перебуває модель. Розмір робочої зони залежить від проектора, від його мінімальної проекційної відстані, на якій зображення має найменший розмір пікселя. Точність принтера залежить від роздільної здатності та розміру робочої зони. Може будуватися з використанням дзеркала, що буде відбивати зображення на платформу з полімером.

Недоліком даної технології є залежність від проектора, що встановлює робочу зону та точність по осі XY. Такі проектори мають високу ціну, що також є недоліком. Використання можливо лише з персонального комп'ютера або мікрокомп'ютера, що буде управляти проектором та платою управління. Може мати великі розміри при маленьких розмірах робочої зони, задля забезпечення необхідної відстані від лінз проектора до ванни.

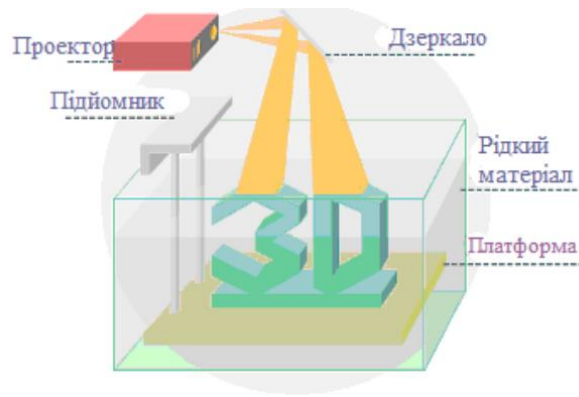


Рисунок 1.10 – Схема 3D принтера, що працює на основі технології DLP

Перевагами є невелика, порівняно з SLA технологією, вартість. Потребує меншої точності виготовлення компонентів. Може мати велику швидкість друку за рахунок великої потужності лампи проєктора.

1.4.3 LCD-технологія

LCD технологія (Liquid Crystal Display) – технологія подібна до технології DLP, але в своєму складі має LCD екран [11], рисунок 1.11.

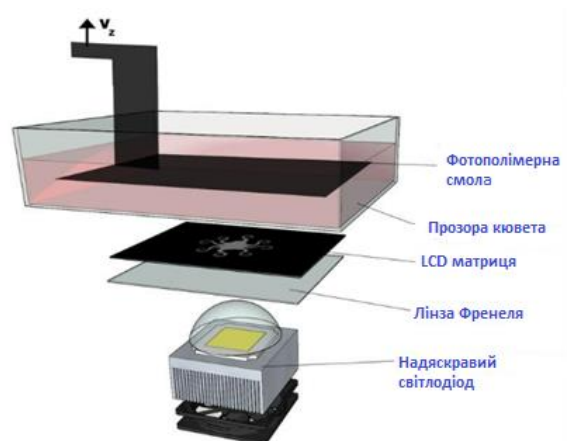


Рисунок 1.11 – Схема 3D принтера, що працює на основі технології LCD

Моделі будуються лише знизу-вгору, екран знаходиться безпосередньо під ванною з фотополімером. Екран відображує весь шар моделі, відкриваючи світлі області-пікселі, через які проходить ультрафіолетове випромінювання.

Фотополімер засвічується світлодіодною матрицею, зображення формується за рахунок LCD-дисплея, який покадрово виводить переріз формованої деталі. Якщо відмінності класичної SLA технології від DLP та LCD очевидні, то DLP і LCD-технології засвічування часто плутають, що невірно, тому що кожна з цих технологій має свої особливості, які впливають на можливості принтера та якість друку. Недоліком даної технології є залежність робочої області від розміру екрана, точність залежить від екрана та його розміру, на сьогодні більше 10-дюймових екранів на ринку не має, також при такому екрані навіть з розширенням 8K менше ніж 50 мікрон розмір пікселя отримати неможливо. Також відносним недоліком є знаходження екрана безпосередньо під ванною. Ванна складається з алюмінієвого корпусу та плівки товщиною в 50-150 мкм, що при невеликих механічних пошкодженнях може пропускати фотополімерну смолу, яка буде потрапляти на екран та електроніку і призводити до можливого загоряння чи пошкодження принтера. Перевагами даної технології є невелика вартість, простота обслуговування та широкі можливості модернізації. Порівняно з технологією DLP, перевагою є відсутність спотворення зображення на робочій області. В результаті порівняння можливо зробити висновок, що ці три різновиди технології на сьогодні мають велику область використання, кожна з яких займає свою нішу в побуті та виробництві. Але технологія LCD на сьогодні має найбільший розвиток, завдяки чому має великий науковий інтерес в дослідженні та вдосконаленні технології та її використання.

1.5 Використання адитивних технологій 3D-друку при експонуванні топології ДП

Використання 3D-друку дозволяє створювати маскуючий шар на фольгованому діелектрику для подальшого травлення. Маскуючим матеріалом є фотополімерні смоли, які залишаються хімічно інертними відносно більшості травників. Таким чином, за допомогою технології фотополімерного 3D-друку можна виготовляти готові маски з потрібною товщиною і конфігурацією.

Отже, при використанні технологій фотополімерного 3D-друку можливо одночасно виконувати етап нанесення маски та експонування, рисунок 1.12.

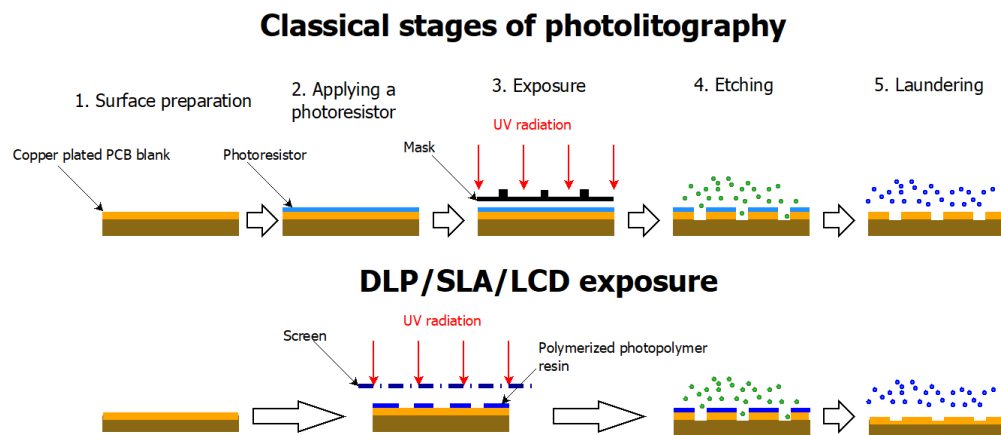


Рисунок 1.12 – Етапи 3D експонування масок

Такий підхід можна реалізувати за допомогою технологій SLA або LCD друку та має свої переваги [4, 11, 14, 15]:

- установка безпосередньо висвітлює задану топологію на заготовку, без попереднього нанесення фоторезистивних плівок або аерозолів;
- немає потреби в двох окремих установках для нанесення фоторезиста і експонування – обидві операції виконуються одночасно на одній установці, що сприяє ефективному використанню виробничих площ;
- оскільки час експозиції фотополімера в середньому 6-14 секунд, що менше, ніж час експозиції фоторезистивних плівок, це призводить до збільшення продуктивності.

1.6 Висновки до першого розділу

В даному розділі проаналізовано такий спосіб нанесення рисунку на ДП як фотолітографія, види ДП та способи їх виготовлення. Розглянуто методи експонування, яке є ключовим у виготовленні ДП і визначає якість топології. Лазерний метод експонування є зараз провідним і доступним завдяки своїм перевагам по швидкості, точності та роздільній здатності.

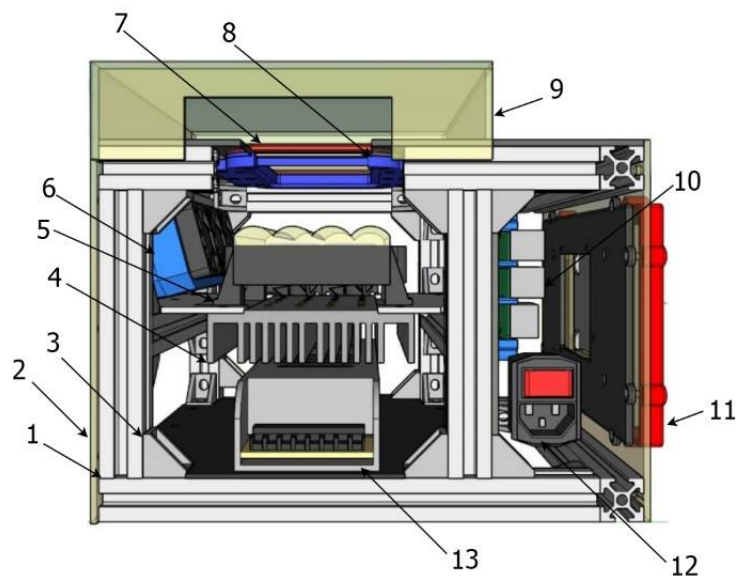
Розглянуто технологій 3D друку – SLA, DLP та LCD, їх переваги та недоліки.

За результатами аналізу можна зробити висновок, що перспективною є технологія фотополімерного 3D-друку, у якій можливо одночасно виконувати етап нанесення маски та експонування, і реалізувати це можна за допомогою технологій SLA або LCD.

2 ВИБІР ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ

2.1 Опис макету для проведення досліджень

Для проведення досліджень використовується макет для експонування топології ОДП та ДДП за технологією LCD фотополімерного 3D-друку. Виходячи з особливостей самої технології, компоновка має вид, як наведено на рисунку 2.1.



1 – алюмінієвий профіль; 2 – композитні пластини; 3 – кутки для профілю; 4 – радіатор лампи; 5 – УФ-лампа; 6 – охолодження екрана; 7 – плівка; 8 – LCD-екран; 9 – захисний ковпак; 10 – плата керування; 11 – сенсорний екран; 12 – кнопка живлення; 13 – блок живлення.

Рисунок 2.1 – Конструктивна схема макету для досліджень

Каркас макету складеться зі станичного алюмінієвого профілю 20×20 (1), з'єднаних між собою кутками (3). Сам корпус макета можна поділити на дві секції: відділення для розміщення електроніки для експонування; відділення для розміщення електроніки для керування макетом. Сам макет облицьовано ззовні пластинами (2).

Всередині відділення для експонування знаходиться основний елемент – діодна лампа (5), яка за допомогою перехідних пластин кріпиться до каркасу.

Для відведення тепла від лампи, під нею розміщено радіатор (4).

Нагорі на певній відстані від лампи знаходиться LCD-екран (8), до якого щільно зверху розташовується захисна плівка (7). Для охолодження екрану використовується повітряне охолодження (6), щоб зменшити перегрів та підвищити час експлуатації екрану.

Нагорі рами в робочій області макету використовується захисний ковпак (9), який виконує роль захисту плівки від пилу та сміття, а також захист очей при роботі макету від УФ-випромінювання лампи.

Для керування макетом та передачі експонованого зображення використовується плата керування (10). Взаємодія з платою керування відбувається через сенсорний екран (11).

За живлення макету відповідає блок живлення (13) та кнопка живлення (12).

2.2 Елементна база макету

Електронна складова макету для дослідження складається з наступних елементів:

- УФ-лампа;
- LCD-екран;
- плата керування;
- сенсорний екран;
- блок живлення.

Необхідно обрати вказані пристрої з підходящими технічними характеристиками [16]. Для управління пристроєм використовується одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 2 Model B v1.1 [17], рисунок 2.2.

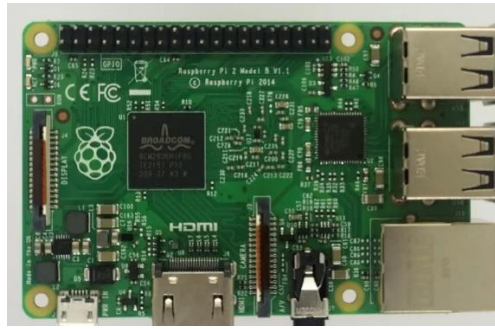


Рисунок 2.2 – Плата керування Raspberry Pi 2 Model B v1.1

Характеристик плати керування наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики Raspberry Pi 2 Model B v1.1

№	Параметр	Значення
1	РАМ	1 Гбайт
2	Процесор	BCM2836
3	Живлення	5В 2А
4	Кількість ядер процесора	4
5	GPIO контактів	40 pins
6	Частота процесора	900 МГц
7	Інтерфейси	3.5 Jack, HDMI, RJ45, USB
8	Мережеві можливості	Ethernet 10/100/1000
9	USB порти	4
10	Сховище eMMC	microSD

LCD екран також від виробника фірми Anysubic [18], має роздільну здатність дисплея, яка керується за технологією MSLA (Masked Stereolithography) Матриця підключається до плати керування за допомогою двох шлейфів та плати перехідника, рисунок 2.3.

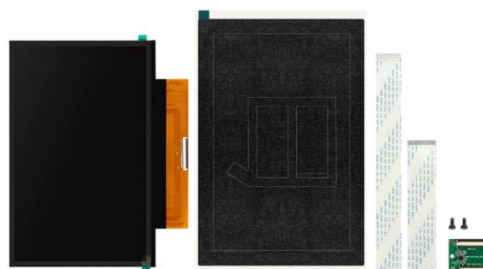
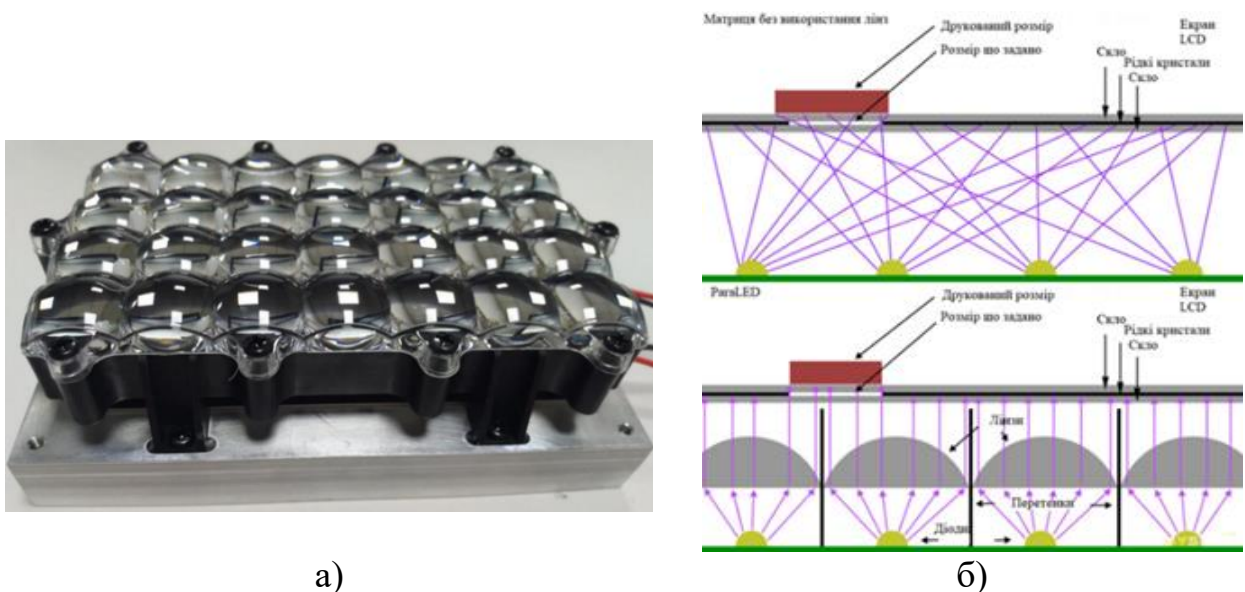


Рисунок 2.3 – LCD матриця

В якості джерела УФ-випромінювання в даній моделі використовується світлодіодна матриця з використанням кварцових лінз ParaLED [19], яка має кут розсіювання випромінювання 15° . Для використання такої матриці потрібно 50 В напруги та 1.5 А струму. Система ParaLED більш поширена за рахунок надійності в порівнянні з системами засвітлення зі світлодіодною матрицею та фокусатором. В результаті друку багатьох моделей було визначено, що розглянута система дає менше паразитного засвітлення, рисунок 2.4.



а) – світлодіодна матриця ParaLED; б) – порівняння системи ParaLED та звичайні світлодіоди з фокусатором.

Рисунок 2.4 – Світлодіодна матриця ParaLED

Взаємодія з макетом виконуються через сенсорний дисплей MKS TFT24 [20], рисунок 2.5. В таблиці 2.2 наведені характеристика сенсорного дисплея.

Таблиця 2.2 – Характеристики сенсорного дисплею MKS TFT24

№	Параметр	Значення
1	Розмір дисплея, мм	87×50
2	Colorful сенсорний екран, дюйми	2,4
3	Формат файлу	Gcode
4	Мікропроцесор	32 біт STM32
5	Масштабований модуль	WiFi / автоматичне вимкнення / визначення рівня сигналу / визначення потужності / зовнішній зчитувач
6	Підтримка картки	SD



Рисунок 2.5 – Сенсорний дисплей MKS TFT24

Для живлення принтеру використовуються зовнішній блок живлення 12В на 360 Вт. В таблиці 3.3 наведені характеристики блоку живлення.

Таблиця 2.3 – Характеристики блоку живлення

№	Параметр	Значення
1	Вхідна напруга, В	220 AC
2	Вихідна напруга, В	12 DC
3	Вихідна сила струму, А	6
4	Потужність, Вт	360
5	Розміри, мм	115×60×35
6	Вага, кг	0,4

На рисунку 2.6 зображено загальний вид макету для досліджень. В таблиці 2.4 наведені основні характеристики макету.

Таблиця 2.4 – Характеристики макету для досліджень

№	Характеристики	Значення
1	2	3
1	Технологія друку	LCD
2	Область друку, мм	132×80×65
3	LCD-дисплей роздільна здатність, піксел	3840×2400 (4K)
4	Товщина шарів, якими друкує принтер, мм	0,01 – 0,15
5	Максимальна швидкість друку, мм/годину	50
6	Довжина хвилі, нм	405
7	Витратні матеріали (смоли якими можливо друкувати)	Фотополімерна смола Anycubic, Wanhao 405nm UV resin, Esun, та фотополімер з довжиною хвилі 405 nm: серія FunToDo, B9R-4-Yellow та ін.

Продовження таблиці 2.4

1	2	3
8	Операційні системи	Windows XP, Windows Vista, Windows 7, Windows 8, Windows 10, Linux, MacOS
9	Дисплей	Сенсорний
10	Інтерфейс підключення	USB
11	Вага, кг	6
12	Загальні розміри принтера, мм	270×192×365

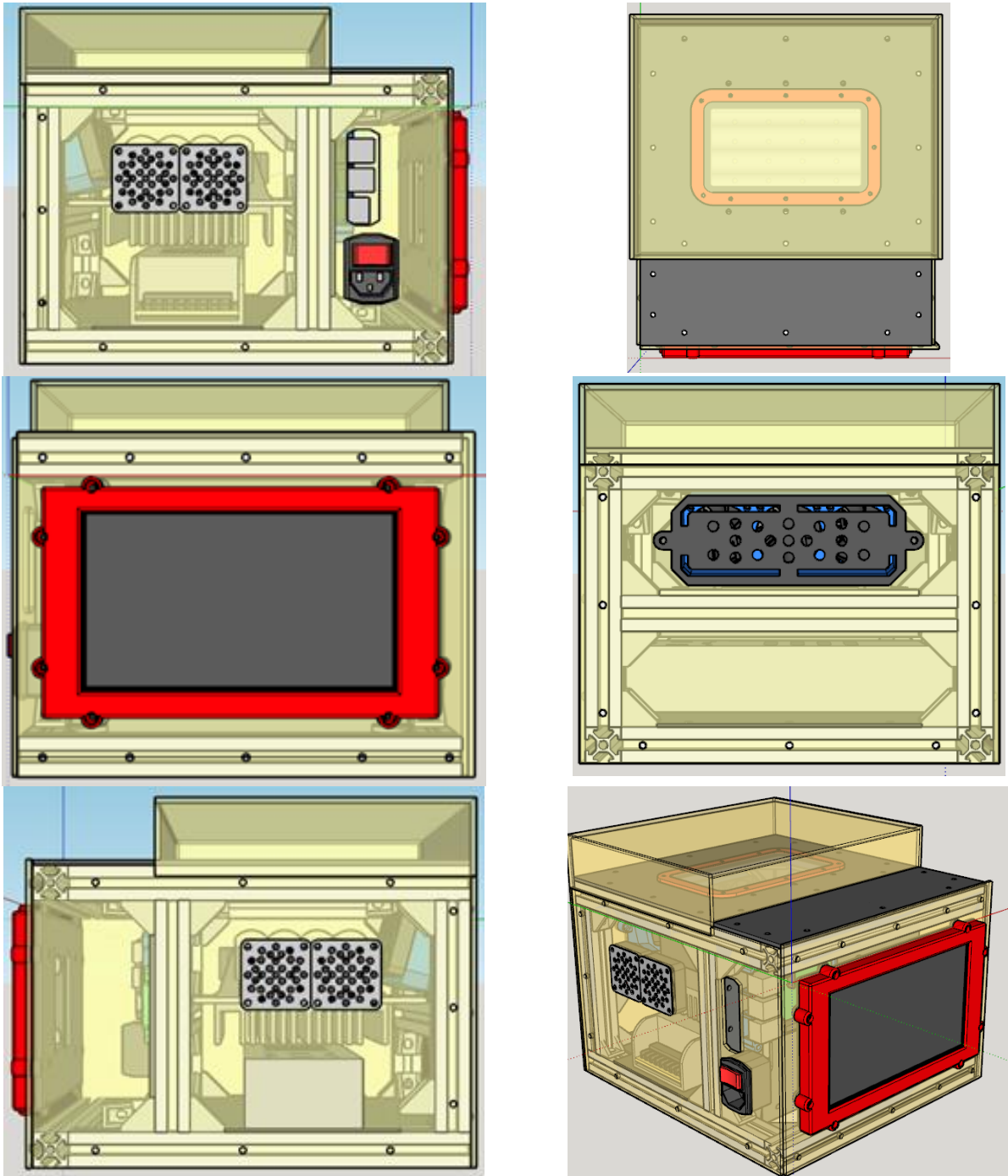


Рисунок 2.6 – 3D модель макету

2.3 Висновки до другого розділу

В даному розділі розглянуто макет для проведення досліджень, компоновка складових, елементна база та його характеристики.

Особлива увага була приділена електронній складовій, бо роздільна здатність LCD матриці, кількість пікселів та тип джерела УФ-випромінювання можуть безпосередньо впливати на відхилення геометричних розмірів топології при друці.

За результатами аналізу як джерело випромінювання обрана світлодіодна матриця з використанням кварцових лінз ParaLED, яка має кут розсіювання випромінювання 15° і дає менше паразитного засвітлення; для управління пристроєм використовується одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 2 Model B v1.1; LCD екран фірми Anysubic; для взаємодії з макетом виконується сенсорний дисплей MKS TFT24; для живлення принтеру використовуються зовнішній блок живлення 12В на 360 Вт.

3 ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

За темою дослідження впливу технологічних параметрів експонування топології ДП за допомогою фотополімерного 3D друку вже проводилися дослідження [21, 22, 24]. В цих дослідженнях до моделі залежності чинників, які впливають на відхилення розмірів провідникової структури, були включені наступні параметри [15, 25]:

- час засвічення смоли (в межах від 7 с до 20 с);
- інтенсивність випромінювання максимальна (при значеннях 2800 Лм та 1600 Лм);
- довжина хвилі випромінювання (при 435 нм);
- товщина базового шару (при значеннях 20 мкм та 50 мкм).

За результатами цих досліджень була побудована-лінійна регресійно-кореляційна модель впливу параметрів експонування фотополімерної маски на відхилення геометричних розмірів топології. Рівняння лінійної регресії наведено у формулі 3.1.

$$Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3=0,002+0,904x_1+0,134x_2+0,3x_3 \quad (3.1)$$

де Y – фактор відхилення геометричних розмірів топології ДП;
 b_0, b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти лінійної регресії впливу параметрів на фактор;
 x_1, x_2, x_3 – параметри впливу на фактор (а саме: x_1 – коефіцієнт впливу часу експонування; x_2 – коефіцієнт вплив висоти шару маски; x_3 – коефіцієнт впливу інтенсивності випромінювання).

Дана модель дозволяє зрозуміти, які параметри більше впливають на фотополімерну маску, та дозволяє спрогнозувати відхилення початково заданих розмірів топології ДП при експонуванні за LCD технологією фотополімерного 3D друку.

Метою досліджень цієї кваліфікаційної роботи буде доповнення даної моделі ще одним параметром, який до цього не розглядався, а саме впливом

температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів провідникового рисунку.

Незалежно від обраної технології фотополімерного 3D друку можливо виділити основні чинники, які впливають на відхилення геометричних розмірів моделі. Для зручності їх можливо розділити на дві групи:

- а) параметри налаштування експонування шарів моделі;
- б) фізико-хімічні властивості фотополімерної смоли.

До параметрів налаштування належать вже ті значення, які були розглянуті. Фізико-хімічні властивості фотополімерної смоли, обумовлені її хімічним складом, котрі впливають на характеристики моделі та збереження геометричних розмірів в процесі друку. До них відносять:

- коефіцієнт усадки смоли, %;
- довжина хвилі поляризації, нм;
- коефіцієнт теплопровідності, Вт/м².

Якщо більш детально переглянути принцип роботи фотополімерних технологій, то можливо побачити певну закономірність. У всіх цих трьох технологіях використовується випромінювання світла, енергія якого іде не тільки на полімеризацію потрібних ділянок фотополімеру, а і на нагрів самої фотополімерної смоли, а саме на температурний коефіцієнт об'ємного розширення матеріалу (ТКОР).

ТКОР матеріалу (α) визначає, як змінюється його об'єм при зміні температури. Він вимірюється в одиницях 1/°C (або 1/K) і показує, на скільки одиниць зміниться об'єм матеріалу при зміні температури на 1 градус Цельсія (або 1 кельвін).

Математично температурний коефіцієнт об'ємного розширення виражається наступною формулою 3.2.

$$\alpha = (\Delta v/v_0)/\Delta T, \quad (3.2)$$

де α – температурний коефіцієнт об'ємного розширення;
 ΔV – зміна об'єму матеріалу;

V_0 - початковий об'єм матеріалу;

ΔT – зміна температури.

Температурний коефіцієнт об'ємного розширення може бути різним для різних матеріалів. Вплив ТКОР в процесі побудови шару моделі є дуже суттєвим, бо при перегріві смоли збільшується коефіцієнт розширення матеріалу. Це відображається на геометричній відхилення шарів моделі, так же сильно як і перезасвітлення шарів, рисунок 3.1.

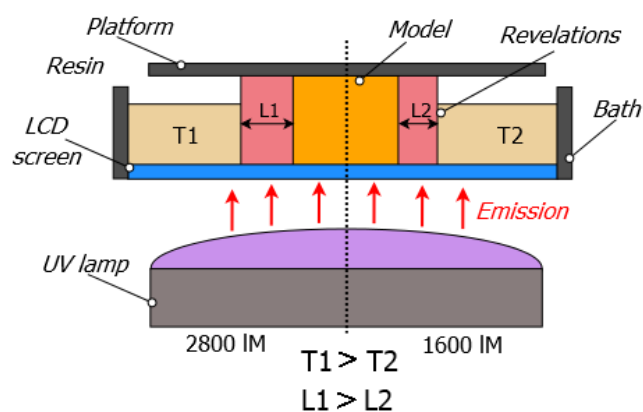


Рисунок 3.1 – Принцип впливу ТКОР в процесі експонування моделі

Таким чином можливо розглянути, що всі ці параметри певною мірою прямо впливають на температуру нагріву смоли в процесі друку, а тим самим на ТКОР.

Процес нагріву фотополімерної смоли та виникнення ТКОР з фізичної точки зору можливо розглянути як задачу з тепло-обміном тришарової стінки.

Враховуючи особливості фотополімерного 3D-друку за технологією LCD, розглянемо тришарову стінку, рисунок 3.2, що складається з трьох щільно прилеглих один до одного шарів із товщинами: d_1 (товщина LCD екрану); d_2 (товщина плівки); d_3 (товщина рідкої фотополімерної смоли).

Кожен шар характеризується своєю постійною теплопровідністю λ_1 , λ_2 і λ_3 відповідно.

Відомі також температури зовнішніх поверхонь t_1 і t_4 . Тепловий контакт між шарами – ідеальний, без зазорів і відповідно без повітряних прошарків, температури в місцях контакту шарів позначаємо t_2 і t_3 .

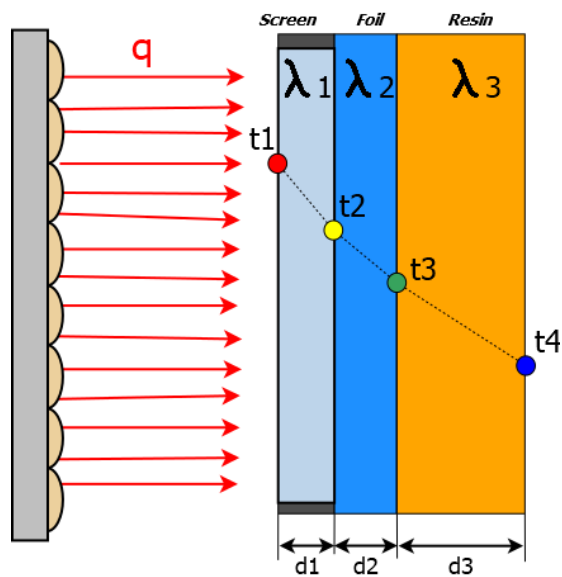


Рисунок 3.2 – Тепло-обмін в процесі фотополімерного LCD 3D-друку

Таким чином дослідження температурних впливів в процесі фотополімерного 3D-друку є актуальною задачею.

3.1 Побудова плану експерименту

Для проведення досліджень впливу ТКОР на відхилення геометричних розмірів провідникової структури ДП доцільно буде розбити дослідження на два етапи:

- провести дослідження впливу часу експонування та інтенсивності випромінювання УФ на нагрів фотополімерної смоли;
- провести дослідження впливу температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів топології ДП.

Перший етап досліджень дозволить нам зрозуміти, як сильно буде змінюватися температура фотополімеру при зміні часу експонування та інтенсивності. Цей етап досліджень буде проходити у декілька кроків.

Перший крок – підготовка 3D моделі тестового зразка.

Для простоти вимірювань відхилень розмірів, використаємо модель калібрувального куба для налаштування 3D принтера. Налаштування друку

будемо робити в програмі Chitubox. Розмірами тестового зразка $10 \times 10 \times 10$ мм, рисунок 3.3.

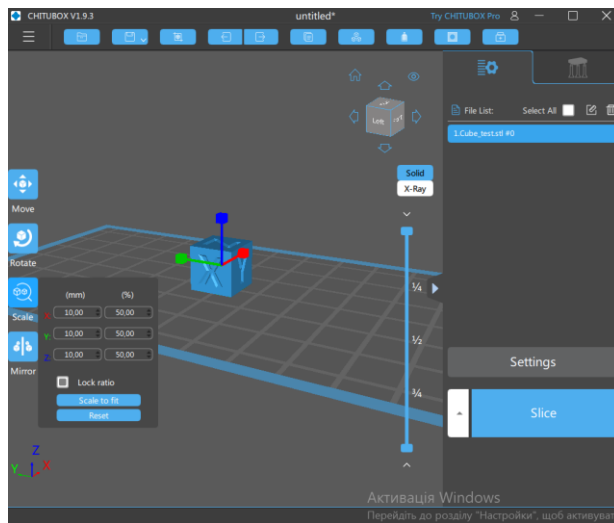


Рисунок 3.3 – Модель в програмі Chitubox

Другий крок – налаштування параметрів друку в програмі Chitubox.

Для дослідження буде використовуватися та ж сама фотополімерна смола, як і в попередніх дослідженнях Plexiwire Resin Basic. Це дозволить зберегти чистоту експериментів та використання попередньої регресійно-кореляційної моделі. Характеристики фотополімерної смоли наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики фотополімерної смоли Plexiwire Resin Basic

Min. Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	Max. Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	Min. Коефіцієнт усадки, %	Max. Коефіцієнт усадки, %	Час засвітлення шару, с	Час засвітлення базових шарів, с	Товщина шару, мкм	Інтенсивність випромінювання, Лм
405	450	3,04	3,82	7	20	35	1800

З урахуванням базових характеристик фотополімерної смоли, створюємо серію G-кодів для кожного вимірювання. В них ми будемо змінювати такі параметри експонування, як:

- час засвічення смоли (в межах від 7 с до 20 с);
- інтенсивність випромінювання максимальна (при значеннях 2800 Лм та 1600 Лм).

Таким чином, ми отримуємо 28 тестових зразків з різними параметрами часу експонування та інтенсивності випромінювання. Довжину хвилі та висоту шару беремо як константу:

- довжина хвилі випромінювання 435 нм (ця довжина хвилі генерується УФ-лампою, яка використовується на макеті);
- товщина базового шару 35 мкм (висота шару друку не сильно впливає на нагрів рідкого фотополімера, тому для зменшення кількості проведення тестів беремо одне значення, рекомендоване для даної фотополімерної смоли).

На рисунку 3.4 наведене вікно налаштування параметрів моделі в Chitubox [26].

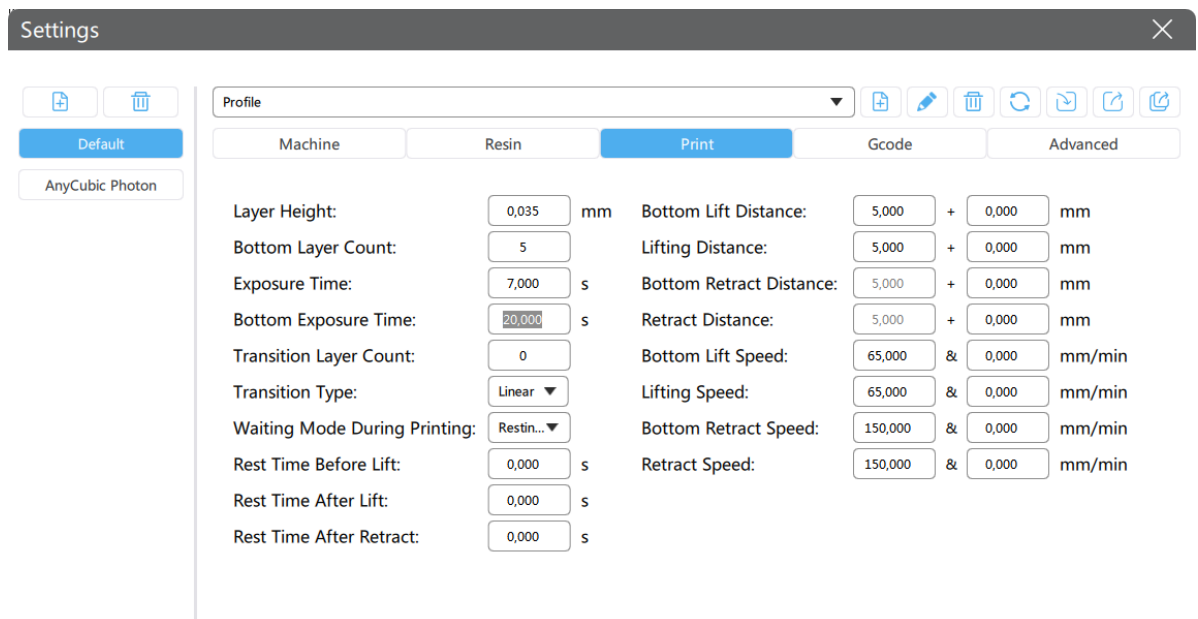


Рисунок 3.4 – Налаштування параметрів друку моделі в Chitubox

Третій крок – друк тестових зразків та вимірювання результатів.

Перед початком друку зразка буде проводитися вимірювання температури фотополімера до друку і після друку. Початкову температуру будемо брати 20°C – 24°C (кімнатна температура приміщення), після чого

будемо дивитися, як сильно буде змінюватися температура фотополімера за час друку моделі при зміні часу експонування на шар та інтенсивності випромінювання. Вимірювання температури виконуємо за допомогою електронного градусника, вимірювання відхилень розмірів по X та Y координатах робимо за допомогою мікрометра.

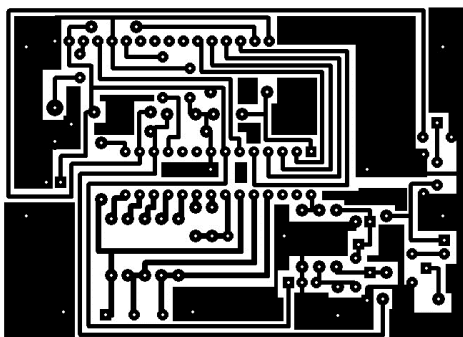
Значення часу експонування та інтенсивності, де відхилення розмірів зразків, будуть більше $\pm 0,02$ мм. Це обумовлено тим що, такі значення відхилення розмірів моделі, будемо важити критичними.

Додатково це дозволить зменшити діапазон часу експонування для другому етапі досліджень та зменшити кількість експериментів без втрати достовірності регресійно-кореляційної моделі.

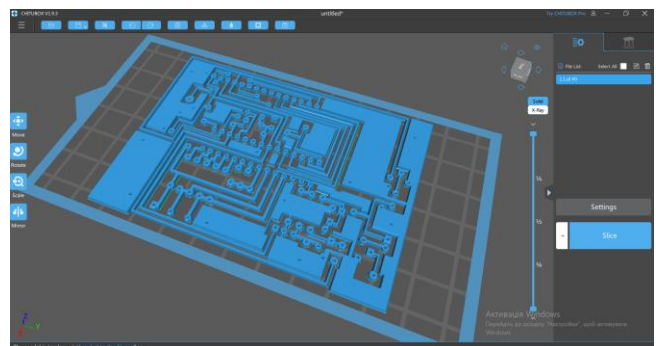
Другий етап досліджень дозволить нам зрозуміти, як сильно впливає температура фотополімеру на відхилення геометричних розмірів топології ДП. На цьому етапі досліджень виконуємо наступні кроки.

Перший крок – перетворення двовимірної топології у 3D модель.

Для проведення досліджень буде створений трафарет топології ДП розмірами 80×72 мм, в форматі векторного зображення (svg*), потім перетворений через конвертор в формат для 3D друку (stl*). Такий підхід до обробки і конвертації 2D зображення в 3D об'єкт необхідний для роботи з маскою в програмі Chitubox, рисунок 3.5.



а)



б)

а) – 2D топологія ДП; б) – 3D модель фотополімерної маски

Рисунок 3.5 – Конвертація 2D зображення в 3D модель

В цій програмі також створюємо G-коди для кожного зразка при різних значеннях часу експонування та інтенсивності УФ випромінювання. Висоту шару та довжина хвилі залишаємо туж саму, як і на першому етапі.

Другий крок – друк фотополімерної маски.

В якості заготівки, на яку буде експонуватися зображення топології ДП, обираємо фольгований склотекстоліт (марки СФ ДСТУ 10316-78). Заготівку перед друком миємо та знежирюємо у спирті.

Також перед друком нагріваємо фотополімерну смолу за допомогою сушильної шафи. Діапазон температури обираємо згідно рекомендаціям виробника фотополімерної смоли від 10°C до 45°C. Для кожного зразка будемо змінювати початкову температуру смоли на 5°C. Таким чином для одного значення часу експонування та інтенсивності випромінювання, отримуємо 10 значень температури.

Після чого за допомогою мікрометра вимірюємо відхилення розмірів топології ДП по ХУ координатам. На базі отриманих значень будуємо нову регресійно-кореляційну модель.

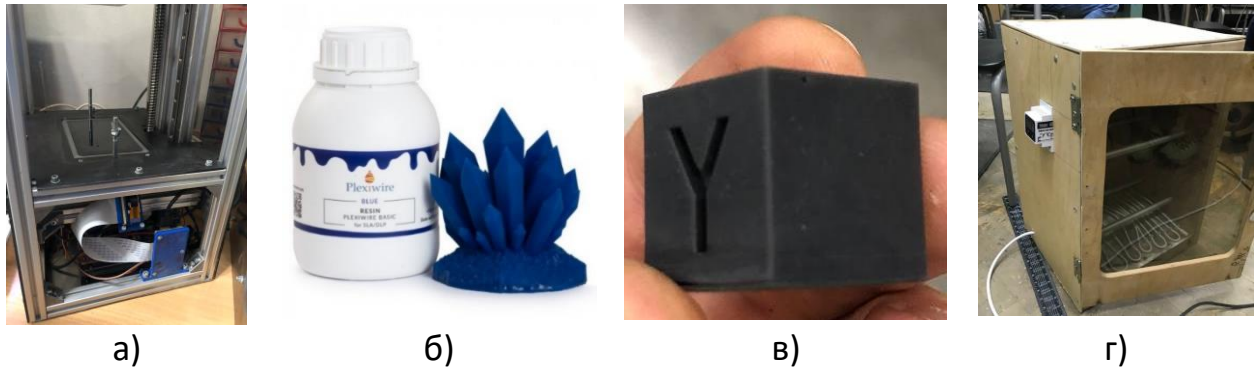
3.2 Визначення впливу часу та інтенсивності випромінювання на температуру фотополімерної смоли

Виходячи з плану проведення першого етапу досліджень, було створено 28 файлів G-коду для тестових зразків калібрувального куба, рисунок 3.6. В кожному файлі змінювалися значення параметрів:

- час засвічення смоли: в межах від 7 с до 20 с, з кроком 1 с для кожного випробування;
- висота шару 35 мкм;
- інтенсивність випромінювання максимальна: при значеннях 2800 Лм та 1600 Лм.

Початкова температура фотополімерної смоли до друку в середньому приблизно від 20°C до 22°C. На рисунку 3.6 наведений макет для досліджень

та фотополімерна смола Plexiwire Resin Basic, та надрукований тестовий зразок.



а) – макет для досліджень; б) – фотополімерна смола Plexiwire Resin Basic; в) – тестовий зразок; г) – нагрівальна шафа для фотополімерної смоли.

Рисунок 3.6 – Інвентар для проведення досліджень

Результати вимірювань першого етапу досліджень наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати вимірювання температури

№	Час засвічення, с	Інтенсивність випромінювання, Лм	Час друку моделі	Початкова Температура смоли, °С	Температура нагріву смоли, °С	Відхилення, розмірів, мм
1	2	3	4	5	6	7
1	7	1600	1г. 4хв. 53с	20,3	25,2	0,00862
2	8		1г. 9хв. 39с	20,6	24,7	0,01104
3	9		1г. 14хв. 25с	20,5	25,5	0,01338
4	10		1г. 19хв. 11с	21,1	25,8	0,01463
5	11		1г. 23хв. 57с	20,4	25,6	0,01673
6	12		1г. 28хв. 43с	20,9	26,1	0,01722
7	13		1г. 33хв. 29с	21,0	25,9	0,01785
8	14		1г. 38хв. 15с	21,5	26,4	0,01831
9	15		1г. 43хв. 1с	20,9	26,7	0,01843
10	16		1г. 47хв. 47с	21,3	26,7	0,01913
11	17		1г. 52хв. 33с	20,6	27,0	0,01954
12	18		1г. 57хв. 19с	20,8	27,2	0,01985
13	19		2г. 2хв. 5с	20,1	27,3	0,0185
14	20		2г. 6хв. 51с	21,2	27,1	0,02189
15	7	2800	1г. 4хв. 53с	19,8	25,8	0,00872
16	8		1г. 9хв. 39с	20,5	26,2	0,01026
17	9		1г. 14хв. 25с	21,3	26,5	0,01368
18	10		1г. 19хв. 11с	20,5	26,4	0,01452
19	11		1г. 23хв. 57с	20,4	27,2	0,01685
20	12		1г. 28хв. 43с	21,4	27,6	0,01683
21	13		1г. 33хв. 29с	20,7	27,7	0,01728

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6	7
22	14		1г. 38хв. 15с	21,8	27,5	0,01775
23	15		1г. 43хв. 1с	20,7	28,2	0,01842
24	16		1г. 47хв. 47с	22,2	28,3	0,019
25	17		1г. 52хв. 33с	21,4	28,6	0,01952
26	18		1г. 57хв. 19с	21,0	28,9	0,02044
27	19		2г. 2хв. 5с	20,0	29,2	0,02208
28	20		2г. 6хв. 51с	20,7	29,4	0,02528

За результатами досліджень можливо заробити наступні висновки:

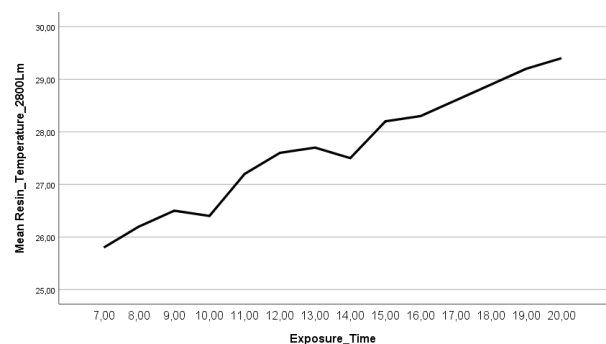
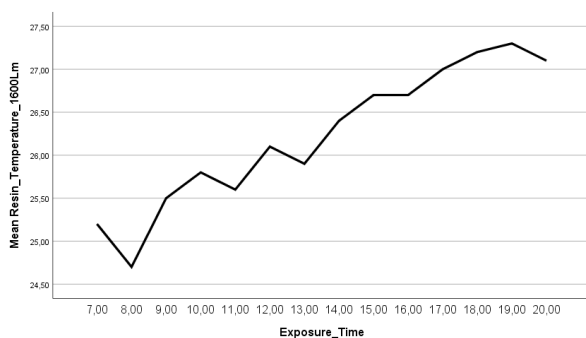
а) при збільшенні часу експонування шару збільшується температура фотополімерної смоли, через що і збільшується значення відхилень розмірів моделі. Це може бути пов'язано з тим, що при збільшенні часу експонування збільшується час друку моделі, і збільшується час впливу УФ-випромінювання на фотополімерну смолу та її нагрів та значення ТКОР.

На рисунку 3.7 наведені графіки залежності:

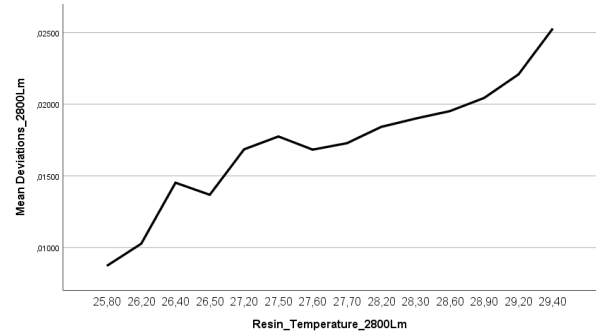
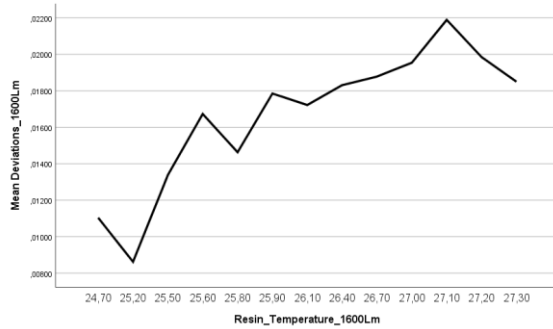
– температури фотополімерної смоли від часу експонування (рисунок 3.7а);

– відхилення геометричних розмірів моделі від температури фотополімерної смоли (рисунок 3.7б);

б) температура нагріву фотополімерної смоли, більшою мірою залежить не тільки від часу друку, а від інтенсивності УФ-випромінювання. Це можливо подивитися через різницю між початкову температурою фотополімерної смоли та температурою після друку. При зміні інтенсивності випромінювання нагрів фотополімера більший, таблиця 3.3.



а)



б)

а) – графік залежності температури фотополімерної смоли від час експонування; б) – графік залежності відхилення геометричних розмірів моделі від температури фотополімерної смоли.

Рисунок 3.7 – Графіки залежності температури фотополімерної смоли

Таблиця 3.3 – Зміни температури фотополімерної смоли

№	Інтенсивність випромінювання, Лм	Початкова Температура смоли, °С	Температура нагріву смоли, °С	Зростання температури, °С	Середнє зростання температури, °С
1	1600	20,3	25,2	4,9	5,4
2		20,6	24,7	4,1	
3		20,5	25,5	5	
4		21,1	25,8	4,7	
5		20,4	25,6	5,2	
6		20,9	26,1	5,2	
7		21,0	25,9	4,9	
8		21,5	26,4	4,9	
9		20,9	26,7	5,8	
10		21,3	26,7	5,4	
11		20,6	27,0	6,4	
12		20,8	27,2	6,4	
13		20,1	27,3	7,2	
14		21,2	27,1	5,9	
15	2800	19,8	25,8	6	6,8
16		20,5	26,2	5,7	
17		21,3	26,5	5,2	
18		20,5	26,4	5,9	
19		20,4	27,2	6,8	
20		21,4	27,6	6,2	
21		20,7	27,7	7	
22		21,8	27,5	5,7	
23		20,7	28,2	7,5	
24		22,2	28,3	6,1	
25		21,4	28,6	7,2	
26		21,0	28,9	7,9	
27		20,0	29,2	9,2	
28		20,7	29,4	8,7	

На рисунку 3.8 наведені зміни температури фотополімерної смоли в залежності від інтенсивності випромінювання УФ-лампи.

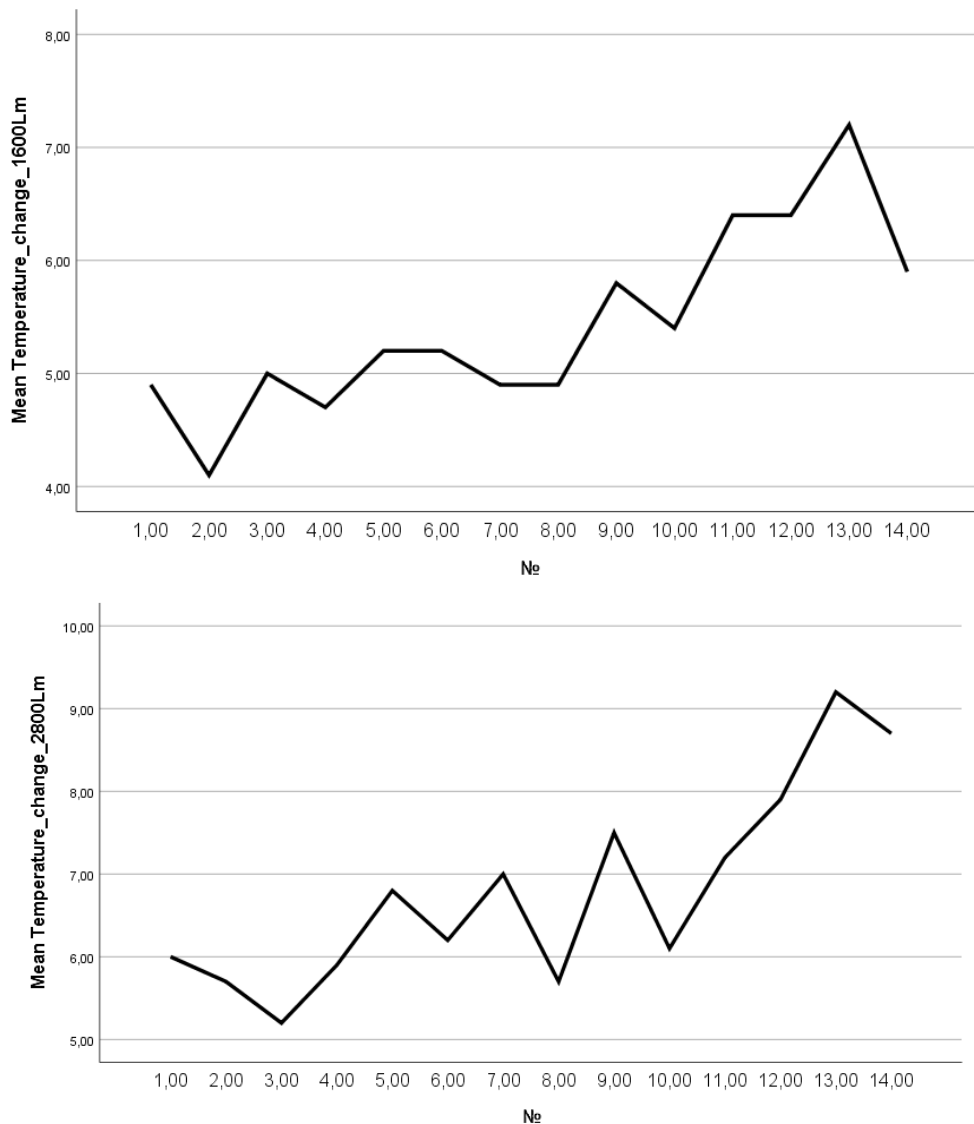


Рисунок 3.8 – Графік залежності температури нагріву фотополімерної смоли від інтенсивності

в) судячи зі значень відхилень геометричних розмірів топології, можливо зробити висновок, що значення часу експонування в межах від 17 секунд до 20 секунд є надмірним, бо вони перевищують допустимі відхилення $\pm 0,02$ мм (таблиця 3.2). Дуже суттєво це відчувається при інтенсивності випромінювання 2800Лм.

Тому для проведення наступного етапу досліджень краще буде обирати

діапазон часу експонування від 7 секунд до 16 секунд.

3.3 Визначення впливу температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів топології

Виходячи з попереднього етапу досліджень, для визначення впливу температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів топології був обраний наступний діапазон значень параметрів:

- час засвічення смоли: в межах від 7 с до 16 с, з кроком 1 с для кожного випробування;
- висота шару 35 мкм;
- інтенсивність випромінювання максимальна 1600 Лм;
- температура фотополімерної смоли перед початком друку від 10°C до 45°C, з кроком 5°C для кожного випробування.

Максимальна інтенсивність випромінювання 1600 Лм була обрана, щоб зменшити вірогідність перегріву фотополімерної смоли, бо при даній інтенсивності середнє зростання температури 5,4°C. Діапазон нагріву температури фотополімерної смоли від 10°C до 45°C був обраний, щоб зменшити імовірність перегріву самої смоли та деформації плівки дна ванної.

Таким чином, необхідно провести серію експериментів на 80 зразках. В якості тестової топології ДП буде використовуватися модель, яка зображена на рисунку 3.5б.

Перенагрів фотополімерної смоли на необхідну температуру буде відбуватися за допомогою сушильної шафи, рисунок 3.6г.

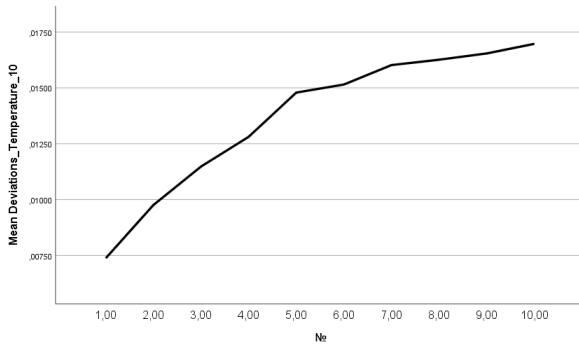
За допомогою другого етапу експерименту можливо буде з'ясувати, чи суттєво впливатиме температура фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів топології, чи все-таки на відхилення впливає час експонування та інтенсивність випромінювання.

В таблиці 3.4 наведені результати вимірювань відхилень геометричних розмірів топології ДП при різних значеннях температури фотополімерної смоли.

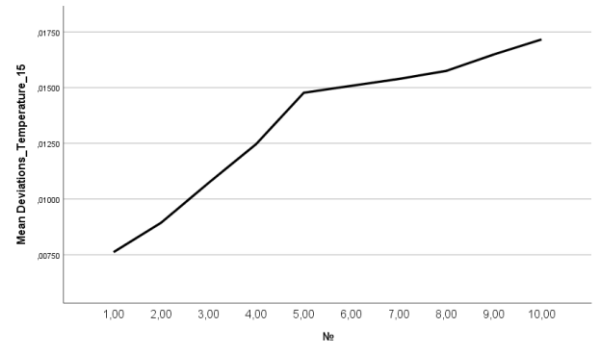
Таблиця 3.4 – Відхилення розмірів при різних значеннях температури

№	Час засвічення, с	Температура нагріву смоли, °С	Відхилення, розмір, мм	№	Час засвічення, с	Температура нагріву смоли, °С	Відхилення, розмір, мм
1	7	10	0,00738	41	7	30	0,00998
2	8		0,00976	42	8		0,01233
3	9		0,01148	43	9		0,01428
4	10		0,01281	44	10		0,01517
5	11		0,01479	45	11		0,01683
6	12		0,01515	46	12		0,017
7	13		0,01602	47	13		0,01797
8	14		0,01626	48	14		0,01834
9	15		0,01654	49	15		0,01937
10	16		0,01697	50	16		0,01968
11	7	15	0,00762	51	7	35	0,01072
12	8		0,00894	52	8		0,01198
13	9		0,01073	53	9		0,01334
14	10		0,01247	54	10		0,01507
15	11		0,01477	55	11		0,01548
16	12		0,01508	56	12		0,01613
17	13		0,01539	57	13		0,01711
18	14		0,01575	58	14		0,01744
19	15		0,01649	59	15		0,018
20	16		0,01716	60	16		0,01876
21	7	20	0,00901	61	7	40	0,01041
22	8		0,01099	62	8		0,01274
23	9		0,01238	63	9		0,01466
24	10		0,01562	64	10		0,01593
25	11		0,01594	65	11		0,01877
26	12		0,01679	66	12		0,01901
27	13		0,01712	67	13		0,01987
28	14		0,01754	68	14		0,0211
29	15		0,018	69	15		0,02129
30	16		0,01852	70	16		0,02193
31	7	25	0,01026	71	7	45	0,01121
32	8		0,01257	72	8		0,0136
33	9		0,01489	73	9		0,01492
34	10		0,01601	74	10		0,01677
35	11		0,01617	75	11		0,01914
36	12		0,01756	76	12		0,01928
37	13		0,01811	77	13		0,01969
38	14		0,01972	78	14		0,02091
39	15		0,02053	79	15		0,02185
40	16		0,0212	80	16		0,02272

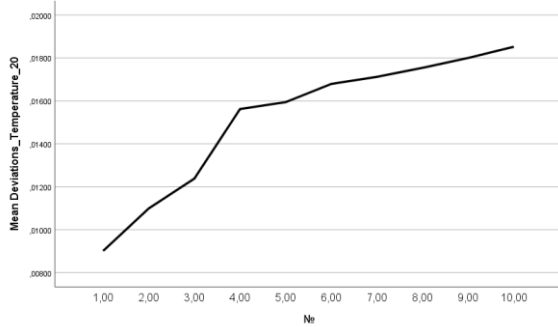
Виходячи з отриманих результатів, можливо зробити висновок, що при збільшені температури фотополімерної смоли збільшується значення відхилень геометричних розмірів моделі, рисунок 3.9 [25, 27].



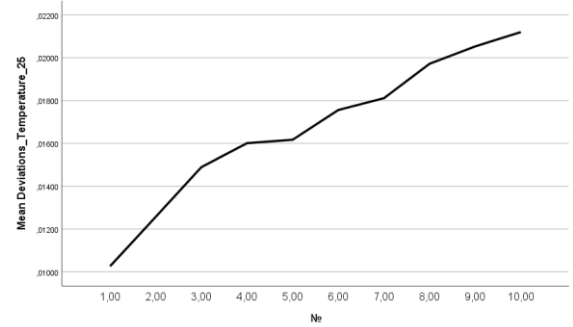
а)



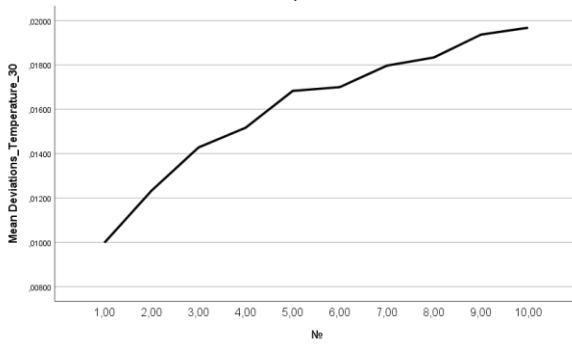
б)



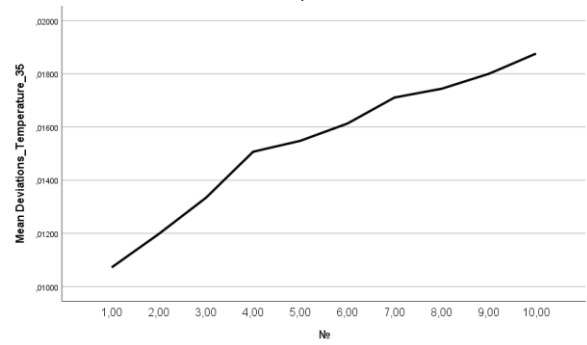
в)



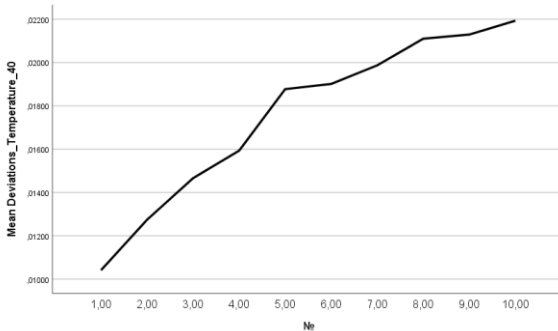
г)



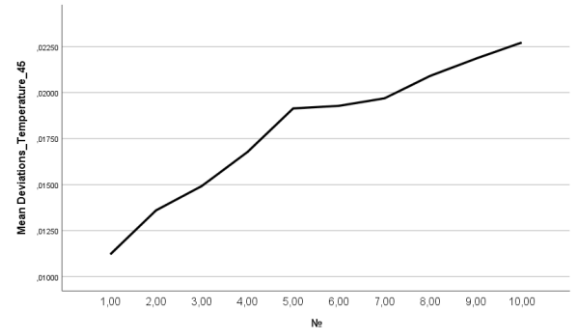
д)



е)



ж)



з)

- а) – відхилення розмірів при 10°C; б) – відхилення розмірів при 15°C;
 в) – відхилення розмірів при 20°C; г) – відхилення розмірів при 25°C;
 д) – відхилення розмірів при 30°C; е) – відхилення розмірів при 35°C;
 ж) – відхилення розмірів при 40°C; з) – відхилення розмірів при 45°C.

Рисунок 3.9 – Графіки залежності впливу температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів топології ДП

Слід зазначити, що при температурах в діапазоні від 10°C до 20°C середнє відхилення розмірів менше, ніж в попередніх дослідях, при тих же значеннях часу експонування, таблиця 3.5.

Таблиця 3.5 – Різниця відхилень розмірів залежно від температури

№	Час експонування, с	Відхилення при температурі 10°C	Відхилення при температурі 15°C	Відхилення при температурі 20°C	Відхилення на першому етапі досліджень, мм	Середнє значення відхилень при температурах від 10°C до 20°C	Різниця у вимірюваннях відхилень, мм
1	7	0,00738	0,00762	0,00901	0,00862	0,00800	0,000617
2	8	0,00976	0,00894	0,01099	0,01104	0,00989	0,001143
3	9	0,01148	0,01073	0,01238	0,01338	0,01153	0,00185
4	10	0,01281	0,01247	0,01562	0,01463	0,013633	0,000997
5	11	0,01479	0,01477	0,01594	0,01673	0,015166	0,001563
6	12	0,01515	0,01508	0,01679	0,01722	0,015673	0,001547
7	13	0,01602	0,01539	0,01712	0,01785	0,01617	0,001673
8	14	0,01626	0,01575	0,01754	0,01831	0,01651	0,001793
9	15	0,01654	0,01649	0,018	0,01843	0,01701	0,00142
10	16	0,01697	0,01716	0,01852	0,01913	0,01755	0,00158

На базі отриманих результатів можливо побудувати регресійно кореляційну модель впливу температури фотополімерної смоли на відхилення розмірів топології ДП. Для цього вводимо отримані дані в програму IBM SPSS Statistics [28] для проведення базового лінійного регресійного аналізу параметрів експонування 3D моделі.

Використовуючи розрахунки зведення для моделі Model Summary, отримуємо значення коефіцієнта детермінації R, рисунок 3.10.

Model Summary									
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	Change Statistics			Sig. F Change
						F Change	df1	df2	
1	,945 ^a	,892	,889	,00119106	,892	318,507	2	77	,000

a. Predictors: (Constant), Exposure_Time, Temperature

Рисунок 3.10 – Зведення для моделі (Model Summary)

Показник R представляє собою ступінь кореляції між отриманими

значеннями залежної змінної та передбаченим значенням, що характеризує відповідність розрахованих моделлю значень лінії регресії та експериментальних результатів. Коефіцієнт множинної детермінації R^2 вказує, наприклад, на те, що включені в систему параметри впливають на результат на рівень 94,5%.

Скоригований коефіцієнт R^2 становить 89,2%, а стандартна помилка оцінки дорівнює 0,00119106; важливо, щоб цей показник був більший за 0,5. Розглядаючи результати по всіх осях, виявлено, що значення R^2 перевищує 0,5.

За допомогою таблиці ANOVA перевіряється гіпотеза про рівність $R^2 = 0$. Якщо рівень значимості Sig менший за 0,05, це підтверджує вірність попередніх результатів, як показано на рисунку 3.11.

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	,001	2	,000	318,507	,000 ^b
	Residual	,000	77	,000		
	Total	,001	79			

a. Dependent Variable: Deviations
b. Predictors: (Constant), Exposure_Time, Temperature

Рисунок 3.11 – Результати розрахунків значимості ANOVA

У всіх випадках значимість Sig.<0,05, що свідчить про вірність попередніх результатів.

Для визначення ваги кожної змінної скористаємося стандартизованим Beta-коефіцієнтом Standardized Coefficients Beta, який показує, на скільки змінюється значення параметра від збільшення на одиницю одного з факторів, рисунок 3.12.

		Coefficients ^a							
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	,000	,001		,285	,777			
	Temperature	,000	,000	,389	10,392	,000	,389	,764	,389
	Exposure_Time	,001	,000	,861	23,000	,000	,861	,934	,861

a. Dependent Variable: Deviations

Рисунок 3.12 – Значення Standardized Coefficients Beta

Значення Beta-коефіцієнтів можливо використовувати як коефіцієнти кореляції. Якщо переглянути попередні розрахунки, вся модель має лінійну залежність, тоді дані коефіцієнти можна підставити в рівняння лінійної регресії, формула 3.3.

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (3.3)$$

де Y – фактор відхилення геометричних розмірів топології ДП;

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ – коефіцієнти лінійної регресії впливу параметрів на фактор;

x_1, x_2, \dots, x_n – параметри впливу на фактор.

Для більшої зручності побудуємо три рівня регресії. Два для кожної марки фотополімерної смоли та одне загальне рівняння. Значення коефіцієнтів відхилень по осях будемо брате середні. На рисунку 3.13 наведені результати кореляції Пірсона.

Таким чином отримуємо, що рівняння регресії для фотополімерної смоли з урахуванням температури буде мати наступний вигляд, формула 3.4:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 = 0,0011 + (0,389 \times x_1) + (0,861 \times x_2), \quad (3.4)$$

		Deviations	Temperature	Exposure_Time
Pearson Correlation	Deviations	1,000	,389	,861
	Temperature	,389	1,000	,000
	Exposure_Time	,861	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Deviations	.	,000	,000
	Temperature	,000	.	,500
	Exposure_Time	,000	,500	.
N	Deviations	80	80	80
	Temperature	80	80	80
	Exposure_Time	80	80	80

Рисунок 3.13 – Кореляція Пірсона

Якщо доповнити рівняння 3.1, та включити до попередньої моделі вплив температури, то воно буде мати наступний вигляд, формула 3.5 [27]:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 = 0,002 + 0,904x_1 + 0,134x_2 + 0,3x_3 + 0,389x_4 \quad (3.5)$$

3.4 Висновки до третього розділу

В даному розділі були проведені експериментальні дослідження впливу температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів провідникового рисунку.

Розроблено план проведення досліджень, який складається з двох етапів. На першому етапі досліджувався вплив часу експонування та інтенсивності випромінювання УФ на нагрів фотополімерної смоли. На другому етапі досліджувався вплив температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів топології ДП.

Змінюючи час засвічення смоли та інтенсивність випромінювання отримали 28 тестових зразків, при цьому товщину базового шару у 35 мкм не змінювали, оскільки це не сильно впливає на нагрів рідкого фотополімера. За отриманими таблицями значень побудували графіки залежностей:

- температури нагріву фотополімера та геометричних розмірів від часу засвічення та температури;
- температури нагріву фотополімера від інтенсивності випромінювання;
- відхилення геометричних розмірів від температури фотополімера при певних значення часу засвічення.

За табличними даними експериментів побудовано лінійну регресійно-кореляційну модель.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Безпека при роботі з хімічними матеріалами

Виготовлення друкованих плат із застосуванням є одним з найнебезпечніших процесів з точки зору охорони праці та екології, з поміж більшості технологічних процесів електронної. Виготовлення ДП включає наступні етапи:

- попереднє експонування УФ – випромінюванням (діапазон А) фотополімерної пластини;
- основне експонування тим же УФ – випромінюванням через негатив;
- вимивання неполімеризованих ділянок, як правило, за допомогою сольвентних розчинів на основі спиртів і вуглеводнів;
- сушка гарячим повітрям;
- кінцева обробка для усунення липкості і додаткового засвічення УФ – випромінюванням для повної полімеризації друкарських елементів.

В процесі виготовлення ДП на працюючого діють наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

- фізичні (несприятливі мікрокліматичні умови, УФ-випромінювання, рухомі механізми та машини, враження електричним струмом);
- хімічні (складові фотополімерних композицій, озон).

Для забезпечення захисту працюючого від небезпечної та шкідливої дії наведених вище виробничих факторів технологічне обладнання повинно відповідати основним вимогам безпеки щодо обладнання, яке використовується при виготовленні ДП:

- конструкція всіх секцій повинна виключати можливість попадання робочих розчинів у зону механізмів приводу, на зовнішню поверхню секцій і в приміщення;
- секції з використанням розчинів, що виділяють шкідливі речовини, повинні мати блокування;

- секція сушіння повинна мати блокування, що відключає лампи УФ-випромінювання при відкритій кришці;
- в секціях з використанням розчинів, що виділяють шкідливі речовини, повинен бути передбачене місцеве відсмоктування (при необхідності з примусовою вентиляцією) і пристрої для приєднання до витяжної вентиляційної системи
- частини обладнання, які постійно перебувають у полі зору працюючого персоналу, не повинні мати блискучої поверхні.

Окрім вище перелічених вимог, для забезпечення оптимальних мікрокліматичних умов особливо у випадках, коли має місце опромінення працюючого тепловим потоком інтенсивністю 350 Вт/м² і більше, встановлюють повітряну завісу робочих місць, або використовують загальну систему штучної вентиляції (припливної та витяжної), для зниження концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони до гранично допустимих концентрацій (ГДК), якщо місцева витяжна вентиляція не забезпечує задану чистоту повітря [29].

Однак найбільш явною і прямою загрозою здоров'ю обслуговуючого персоналу, а також екологічному стану довкілля, з боку традиційного процесу виготовлення ДП є використання фотоматеріалів і розчинників.

Альтернативним більш ефективним рішенням є використання фотополімерів, які вимиваються водопроводною водою. Пряме лазерне гравіювання друкованих плат повністю усуває необхідність використання розчинників.

Рідкі фотополімерні композиції – це наступний крок. Рідке зв'язне дозволяє легко вимити і знову використати полімер з незасвічених ділянок. До того ж відходи рідких фотополімерів не класифікуються як небезпечні та токсичні. Тим не менш, необхідна обережність у поводженні з ними, щоб домогтися відповідності нормативним документам.

4.2 Висновки до четвертого розділу

У розділі розглянуто небезпечні та шкідливі фактори при виробництві ДП, а також особливості застосування хімічних речовин на різних етапах їх виготовлення при різних технологіях. Наведені правила організації виробничого процесу, які забезпечують захист працівників від шкоди. Як один із способів зменшення шкідливого впливу хімічних речовин на працівників зазначено використання сучасних технологій з використанням фотополімерів, в яких не потребуються агресивні рідини та речовини.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі проведені дослідження впливу параметрів експонування на топологію ДП. Для досягнення мети дослідження розглянуто методи експонування, яке є ключовим у виготовленні ДП і визначає якість топології. Лазерний метод експонування є зараз провідним і доступним завдяки своїм перевагам по швидкості, точності та роздільній здатності. Розглянуто технологій 3D друку - SLA, DLP та LCD, їх переваги та недоліки.

Попередні дослідження фотополімерного 3D друку були направлені на вивчення таких параметрів:

- час засвічення смоли (в межах від 7 с до 20 с);
- інтенсивність випромінювання максимальна (при значеннях 2800 Лм та 1600 Лм);
- довжина хвилі випромінювання (при 435 нм);
- товщина базового шару (при значеннях 20 мкм та 50 мкм).

В цій роботі досліджено вплив температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів провідникового рисунку. Зазначені вище фактори є чинниками зміни температури фотополімерної смоли, а також її фізико-хімічні властивості. Один з показників фізико-хімічних властивостей - температурний коефіцієнт об'ємного розширення матеріалу (ТКОР). Для проведення досліджень впливу ТКОР на відхилення геометричних розмірів провідникової структури ДП розбити дослідження були розбиті на два етапи:

- дослідження впливу часу експонування та інтенсивності випромінювання УФ на нагрів фотополімерної смоли;
- дослідження впливу температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів топології ДП.

Експериментальні дані представлені у вигляді графічних та табличних залежностей:

- температури нагріву фотополімера та геометричних розмірів від часу засвічення та температури;
- температури нагріву фотополімера від інтенсивності випромінювання;
- відхилення геометричних розмірів від температури фотополімера при певних значення часу засвічення.

За табличними даними експериментів побудовано лінійну регресійно-кореляційну модель. Отримані результати досліджень показали, що чим вище температура фотополімерної смоли, тим більше відхилення геометричних розмірів провідникового рисунку, причому факторами впливу є як інтенсивність, так і час засвічування фотополімерної смоли.

Розроблена регресійно-кореляційна модель може бути використана для визначення допустимих робочих параметрів експонування, при яких геометричні розміри провідникового рисунку відповідають допустимим, та для прогнозування змін геометричних розмірів при зростанні температури фотополімерної смоли.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Технічні засоби автоматизації: підручник / І.Ш. Невлюдов, та ін. Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. 366 с.
2. Невлюдов І.Ш., Чала О.О., Олександров Ю.М. Трансфер технологій у сучасній науці, освіті та виробництві в умовах четвертої промислової революції «Індустрія 4.0». Сучасний рух науки. VIII міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., (Дніпро, 3-4 жовтня 2019 р.). Дніпро, 2019. Т.2. С. 604-608
3. Nevliudov I., Borshchov V., Tymchuk I., Protsenko M., Demska N. Novitni konstruktyvno-tekhnologichni rishennia nadlehkykh detektornykh moduliv dlia fizychnykh eksperymentiv. Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2018. No. 5 (3). S. 67-78
4. Невлюдов І., Близнюк Д., Гурін Д., Нікітін Д., Разумов-Фризюк Є., Стрілець Р. Виготовлення друкованих плат за допомогою технологій 3d друку. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кораблебудування. 2020. №4. С. 79-86.
5. Невлюдов І., Разумов-Фризюк Є., Нікітін Д.. Аналіз технології лазерного експонування друкованих плат. Технологія приладобудування. 2020. №1. С.56-59.
6. Манжілевський О.Д., Іскович-Лотоцький Р.Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування: навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2021. 105 с.
7. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. Київ. Держстандарт України, 2017. 29 с.
8. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами»,

«Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2021. 55 с.

9. І.В. Балабанов. Визначення залежності часу та інтенсивності випромінювання на температуру фотополімерної смоли. Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки. Харків : ХНУРЕ. 2023. Вип. 2. с.79-82.

10. Діденко Ю.В., Татарчук Д.Д. Основи технології виготовлення елементів мікро- та наносистемної техніки: навч. посіб. / Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. 113 с.

11. Невлюдов І.Ш., Разумов-Фризюк Є.А., Нікітін Д.О., Близнюк Д.С., Стрілець Р.Е. Створення топології друкованих плат за допомогою фотополімерних адитивних технологій 3D друку. Проблеми тертя та зношування. 2021. 1 (90) С.42-54.

12. Технологія нанесення неметалевих покриттів та виробництво плат друкованого монтажу [Електронний ресурс] : підручник / Л.А. Яцюк та ін. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. 330 с.

13. Технології фотополімерного 3D-друку: опис, переваги та недоліки // Сайт компанії MonoFilament URL: <https://monofilament.com.ua/ua/blog-novini-3d-druku-ta-additivnih-tehnologij/sla-dlp-lcd-tehnologiji-fotopolimernogo-3d-druku-opis-perevagi-ta-nedoliki> (дата звернення: 15.11.2023).

14. Nevliudov I., Bliznyuk D., Nikitin D., Razumov-Frizzlyuk E., Strelets R. Cost Estimation of Photopolymer Resin for 3D Exposure of Circuit Board. Technology Audit and Production Reserves. 2022. № 2/2(64). P.43-49. DOI: 10.15587/2706-5448.2022.256538.

15. Nevliudov I., Bliznyuk D., Gurin D., Nikitin D., Razumov-Frizyuk E., Strelets R. Technology of laser exposure of topology of printed boards. International independent scientific journal. 2021. №27. Vol. 1. P. 27.

16. Мосьпан Д.В., Невлюдов І.Ш., Невлюдова В.В., Демська Н.П. Модель параметричного синтезу для вибору елементної бази при проектуванні систем управління технологічними процесами формоутворення. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Випуск 4/2019 (48). С. 35-44.

17. Мікрокомп'ютер Raspberry Pi 2 Model B v1.1 // Сайт компанії Евоком.юа URL: <https://evo.net.ua/raspberry-pi-2-model-b-v1.2/>_(дата звернення 10.12.23)

18. LCD матриця для 3D принтера Anycubic // Сайт компанії Anycubic URL: <https://ua.anycubic.biz/lcd-screens> (дата звернення 10.12.23)

19. Світлодіодна матриця ParaLED // Сайт компанії Pro3D URL: <https://pro3d.com.ua/p1006075888-svitlodiodna-matritsya-dlya.html> (дата звернення 10.12.23)

20. Сенсорний дисплей MKS TFT24/TFT35 // Сайт компанії 3Dprinter URL: <https://www.3dprinter.ua/shop/sensornyj-dysplej-mks-tft24-tft35/> (дата звернення 10.12.23)

21. Nevliudov I. Sh., Borshchov V.M., Palagin V.A., Razumov-Fryziuk I.A. Mathematical model of bending two-layer film aluminium-polyimide structure due to temperature changes. Functional Materials. 2019. P. 26. №2. P 342-346

22. Nevlyudov I., Razumov-Fryziuk I., Nikitin D., Blyzniuk D., Strelets R. Technology for creating the topology of printed circuit boards using polymer 3D masks. Сучасний стан наукових досліджень і технологій у промисловості. 2021. № 1 (15). С. 120-131. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.120>

23. Невлюдов І.Ш., Палагін В.А., Демська Н.П., Разумов-Фризюк Є.А. Моделювання вигину двошарової структури при термовпливах. Математичне моделювання процесів в економіці та управлінні проектами і програмами (ММП-2019). Міжнар наук.-практ. конф., (с. Коблево, 09-13 вересня 2019 р.). Харків, ХНУРЕ, 2019. С. 55 -58

24. Нікітін Д. О. Вплив фотополімерних смол на збереження геометричних розмірів 3D-моделей. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: тезидоп. Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Черкаси, 13-19 березня 2023 р.). Черкаси, 2023. С. 43.

25. Nevlyudov I., Razumov-Frizyuk E., Nikitin D., Badaniuk I., Strelets R. Practical results of the study of photopolymer exposure of printed circuit board topology. Information systems in project and program management. Collective monograph edited by I. Linde European University Press. Riga: ISMA, 2023. 317 p.

26. Chitubox // Сайт компанії URL: <https://www.chitubox.com/en/index> (дата звернення 10.12.23)

27. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Разумов-Фризюк Е.А. Regression analysis of the influence of technological parameters of 3D printing on product quality. «Theoretical and scientific bases of development of scientific thought»: тези доп. V Міжнар. наук. конф. з нових тенденцій у науці та освіті (Рим, Італія, 16 – 19 лют. 2021 р.), С. 60 66.

28. IBM SPSS Statistics // Сайт IBM URL: <https://www.ibm.com/spss> (дата звернення 10.12.23)

29. Гогіташвілі Г.Г., Лапін В.М. Основи охорони праці: навч. посіб. / Львів: Новий світ-2000, 2008. 232 с.