



КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ФОТОПОЛІМЕРНОГО 3D- ДРУКУ

НЕВЛЮДОВ І.Ш.
РАЗУМОВ-ФРИЗЮК Є. А.
НІКІТІН Д. О.
СТРІЛЕЦЬ Р. Є.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Невлюдов І.Ш., Разумов-Фризюк Є. А., Нікітін Д. О., Стрілець Р. Є.

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ
ФОТОПОЛІМЕРНОГО 3D-ДРУКУ
[Монографія]

Харків
2025

УДК 621.793

Рекомендовано до друку Науково-технічною радою Харківського національного університету радіоелектроніки (протокол № 4 від 22. 05. 2025 року)

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор, В.о. директор Державного підприємства «Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування»

Замірець Миколай Васильович

кандидат технічних наук, доцент, директор Державного підприємства «Південний державний проектно-конструкторський інститут авіаційної промисловості»

Артюх Рома Володимирович

доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР), ХНУРЕ

Євсєєв Владислав В'ячеславович

Контроль якості фотополімерного 3D-друку: монографія / І.Ш. Невлюдов, Є.А. Разумов-Фризюк, Д.О. Нікітін, Р.Є. Стрілець. – Харків: ХНУРЕ, 2025. – 208 с.

У монографії викладено результати дослідження та розробки методів підвищення якості друкованих фотополімерних моделей для електронної апаратури, зокрема за рахунок технологічного забезпечення їх виробництва, а також розробки й удосконалення методів контролю та прогнозування впливу параметрів експонування шарів моделі на етапі, виготовлення.

Наведено фізико-технологічну модель впливу параметрів друку на якість фотополімерних деталей, а також модель впливу параметрів друку на нагрів фотополімерної смоли під час експонування шарів та появи відхилень розмірів та поверхневих дефектів моделі. Викладено сформовані на основі досліджень рекомендації з технологічного забезпечення якості друку фотополімерних виробів.

Представлено нові конструктивно-технічні рішення для контролю температури фотополімерної смоли. Викладено результати експериментальних досліджень із визначення впливу параметрів друку на якість виготовлення фотополімерних деталей.

Представлено новий метод контактування друкованих фотополімерних виробів на основі систем технічного зору.

Монографія може бути корисною для фахівців промисловості, наукових співробітників, а також аспірантів, магістрантів та здобувачів вищої освіти, які навчаються за спеціальностями, пов'язаними з розробкою, систем з числовим програмним керуванням та матеріалознавством.

ISBN: 978-617-8332-79-2

DOI: 10.30837/978-617-8332-79-2

© Невлюдов І.Ш.,
Разумов-Фризюк Є.А.,
Нікітін Д.О.,
Стрілець Р.Є., 2025

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	6
Вступ.....	8
1 Аналіз фотополімерних технологій адитивного 3D-друку.....	12
1.1 Види технологій 3D-друку.....	12
1.2 Типи матеріалів для 3D-друку.....	19
1.3 Історія технологій фотополімерного 3D-прототипування.....	22
1.4 Сучасне використання технологій фотополімерного 3D-друку.....	24
1.5 Технології фотополімерного 3D-друку.....	26
1.5.1 Технологія SLA.....	33
1.5.2 Технологія DLP.....	36
1.5.3 Технологія LCD.....	41
1.6 Аналіз фотополімерних смол.....	47
1.7 Етапи підготовки моделі до 3D-друку.....	48
1.7.1 Підготовка моделі в програмному забезпеченні Chitubox.....	51
1.7.2 Інструменти для роботи з моделлю.....	53
1.7.3 Налаштування підтримок моделі.....	58
1.7.4 Налаштування друку моделі.....	62
1.8 Постобробка деталей, виготовлених за допомогою фотополімерного друку.....	69
1.9 Дефекти фотополімерного 3D-друку.....	73
1.10 Аналіз якісних показників фотополімерного 3D-друку.....	75
1.11 Аналіз технологічних параметрів фотополімерного друку та їх вплив на якісні показники.....	84
2 Вплив параметрів друку на дефекти та відхилення розмірів моделі.....	84
2.1 Факторний аналіз фотополімерних смол.....	84
2.2 Дослідження впливу параметрів друку на відхилення геометричних розмірів та появу поверхневих дефектів моделі.....	89
2.3 Перевірка базових припущень множинної лінійної регресії.....	92

2.3.1 Відсутність похибок у вимірюваннях.....	93
2.3.2 Відсутність мультиколінеарності між незалежними змінними.....	94
2.3.3 Нормальний розподіл залишків.....	97
2.3.4 Гомоскедастичність дисперсії залишків.....	99
2.3.5 Лінійність зв'язку.....	102
2.4 Побудова моделі множинної регресії впливу параметрів експонування на геометричні розміри моделі.....	104
3 Процес нагрівання фотополімерної смоли під час експонування моделі.....	108
3.1 Фізичний явища, які викликають дефекти друку моделі.....	108
3.2 Фізичний опис технологічного процесу нагрівання фотополімерної смоли під час експонування моделі.....	112
3.3 Дослідження впливу температури фотополімерної смоли на геометричні відхилення розмірів моделі.....	115
3.4 Оцінка витрат фотополімерної смоли під час 3D-експонування друкованих плат.....	123
4 Розробка моделі контролю нагріву фотополімерної смоли під час друку.....	127
4.1 Аналіз моделі керування технологічним процесом виготовлення фотополімерної 3D-моделі.....	127
4.2 Розробка математичної моделі впливу температури в пакеті Matlab Simulink.....	129
5 Розробка програмного забезпечення для контролю розмірів фотополімерних моделей.....	144
5.1 Етапи підготовки реального зображення для розроблення ПЗ.....	144
5.2 Методи фільтрації зображень.....	146
5.2.1 Лінійна фільтрація.....	146
5.2.2 Згладжувальні фільтри.....	148
5.2.3 Бінаризація.....	150
5.2.4 Метод Otsu.....	153
5.2.5 Адаптивна бінаризація з визначенням «Block size».....	156

5.3 Методи вирівнювання зображення.....	162
5.3.1 Метод AKAZE.....	164
5.3.2 Метод BRISK.....	166
5.3.3 Метод ORB.....	173
5.4 Порівняння зображень за методом SAD.....	177
Висновки.....	180
Перелік посилань.....	183
Додаток А. Вимірювання впливу технологічних параметрів експонування на відхилення геометричних розмірів 3D-моделі.....	193
Додаток Б. Порівняння відхилень розмірів зразків при контролі температури.....	196
Додаток В. Підключення бібліотеки нормалізації зображення.....	199
Додаток Г. Підключення бібліотеки згладжування зображень.....	200
Додаток Д. Підключення бібліотеки бінарізації.....	201
Додаток Е. Підключення бібліотеки адаптивної бінарізації.....	203
Додаток Ж. Підключення бібліотеки вирівнювання зображення.....	205
Додаток З. Підключення бібліотеки «Sum of absolute differences».....	208

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСУ ТП – автоматична система управління технологічним процесом;

ПЗ – програмне забезпечення;

СТЗ – системи технічного зору;

ТКОР – температурний коефіцієнт об'ємного розширення матеріалу;

ТП – технологічний процес;

AGAST – (Adaptive and Generic Accelerated Segment Test) адаптивний оператор виявлення кутів;

AKAZE – (Accelerated-Keypoint Aligned Zone Extractor) прискорений пошук зон з вирівнюванням за ключовими точками;

BRIEF – (Binary Robust Independent Elementary Features) бінарні стійкі незалежні елементарні функції;

BRISK – (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints) бінарні стійкі інваріантні масштабовані ключові точки;

CAD – (Computer-Aided Design) система автоматизованого проектування;

CPPS – (Cyber-Physical Production Systems) кіберфізична виробнича система;

DMLS – (Direct Metal Laser Sintering) пряме лазерне спікання металу;

DLP – (Digital Light Processing) цифрова обробка світла;

EBM – (Electron Beam Melting) електронно-променева плавка;

FDM – (Fused Deposition Modeling) моделювання плавленого осадження;

FFF – (Fused Filament Fabrication) виробництво плавленої нитки;

FAST – (Features from Accelerated Segment Test) прискорений сегментарний тест;

FED – (Feature Enhanced Descriptor) дескриптор з розширеними можливостями;

KAZE – (Keypoint Aligned Zone Extractor) виділення вирівняних зон за ключовими точками;

LDM – (Liquid Deposition Modeling) моделювання рідинного осадження;

LCD – (Liquid Crystal Display) рідкокристалічний дисплей;

MJF – (Multi Jet Fusion) мультиструменевий синтез;

ORB – (Oriented FAST and Rotated BRIEF) орієнтований FAST і повернутий BRIEF;

PID – (Proportional Integral Differential Controller) пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор;

SLS – (Selective Laser Sintering) селективне лазерне спікання ;

SLM – (Selective Laser Melting) селективне лазерне плавлення;

SAD – (Sum of Absolute Differences) сума абсолютних різниць;

SIFT – (Scale-Invariant Feature Transform) масштабна-інваріантне перетворення ознак;

SLA – (Stereolithography) лазерна стереолітографія;

SURE – (Steerability Uniformity and Robustness Evaluation) оцінка рівномірності керованості та надійності.

ВСТУП

Бурхливий розвиток сучасних технологій, дозволив здійснити четверту промислову революцію (Industry 4.0) [1-3]. В основу Industry 4.0 покладені передові дослідження в галузях: штучного інтелекту, робототехніки, хмарних обчислень, адитивних технологій, тощо. Синтез застосування яких дозволив удосконалити виробничі технологічні процеси, шляхом розробки нового підходу у вигляді кіберфізичних виробничих систем (CPPS) [4-5]. Особливістю застосування CPPS є синтез фізичного та кібернетичного світу в єдиному інформаційному еко-просторі, який дозволяє створювати дуже гнучкі переналаштування виробничої лінії [6]. Однією з перспективних сфер застосування CPPS вважається їх впровадження у виробництво високотехнологічних виробів радіоелектронного призначення. Багато великих корпорацій, таких як Lenovo, Samsung, замовляють виробництво прототипів майбутніх корпусів або елементів виробів у фірм спеціалізованих на адитивному виробництві, через економічність виробництва, що дозволяє не створювати нові заводи та виробничі лінії, а використовувати існуючі потужності [7]. Вартість виробництва прототипів розраховується з безлічі факторів: використання і амортизація верстатів і установок, необхідна кількість витратних матеріалів та ресурсів, клас точності виготовлення, трудомісткість виробництва та багато іншого [8-10].

Різноманіття радіоелектронної техніки та всезростаючий масовий попит на неї висувають нові технічні вимоги до кіберфізичних виробничих систем, такі як: мініатюризація апаратури, багатомодульність пристроїв та швидкість виробництва. Виробникам стає важко вирішувати складні завдання, такі як задоволення вимог ринку та дотримання існуючих стандартів виробництва. При аналізі сучасних технологічних тенденцій в галузі приладобудування, акцентується увага на швидкому виготовленню та тестуванню елементів майбутніх виробів. Це призводить до потреби дешевого та швидкого

виготовлення деталей виробів. При цьому прототипи повинні мати велику точність виготовлення.

Одним з рішень подібних завдань є технології адитивного 3D-друку. Використання технологій 3D-друку для швидкого прототипування має величезне значення для сучасного виробництва та розробки нових продуктів. Завдяки цій технології можна оперативна створювати фізичні моделі виробів, оцінювати їхню форму, функціональність і конструктивні особливості ще до запуску серійного виробництва. Це дозволяє інженерам і дизайнерам швидко вносити зміни та покращення, що значно скорочує час розробки та витрати на виробництво.

Окрім цього, 3D-друк дає можливість створювати складні геометричні конструкції, які неможливо виготовити традиційними методами. Це особливо важливо для таких галузей, як аерокосмічна промисловість, медицина, автомобілебудування та ювелірна справа. Використання 3D-друку також зменшує кількість відходів матеріалу, що робить цей метод більш екологічним та економічним у порівнянні з традиційними способами виготовлення прототипів.

Технології 3D-друк існує багато, але одною з найперспективнішою вважається фотополімерна технологія. Фотополімерний друк відіграє ключову роль у сфері швидкого прототипування, забезпечуючи високу точність, деталізацію та швидкість виготовлення виробів. Завдяки використанню рідких фотополімерних смол, які затверджуються під впливом ультрафіолетового випромінювання, ця технологія дозволяє створювати складні моделі з мінімальними затратами часу та матеріалу. Особливо ефективним є фотополімерний друк у таких галузях, як машинобудування, медицина, ювелірна справа та дизайн, де критично важливими є точність і якість поверхні. Його застосування значно прискорює процес розробки нових продуктів, зменшуючи витрати на створення прототипів та підвищуючи їхню функціональність.

Однією з серйозних проблем під час виготовлення фотополімерних 3D-моделей є забезпечення високої якості деталізації та збереження геометричних розмірів моделі.

Проблемам підвищення точності друку та зменшенню поверхневих дефектів моделі присвячено безліч робіт таких вчених, як Hideo Kodama, Charles Gall, Jean-Claude André, Olivier de Witte та Alain le Maillot. Значний внесок у теорію та практику адитивного 3D-друку у вирішенні завдань щодо забезпечення якісних показників і надійності зроблено Carl Descartes та Hayden Taylor.

Однак, незважаючи на велику кількість досліджень, присвячених вирішенню проблем створення фотополімерних моделей, залишається протиріччя між впливом фізичних явища на фотополімерний матеріал під час виготовлення моделей і зменшенням загального часу виготовлення зразка.

Все це свідчить про те, що технологічне забезпечення якості фотополімерного друку у електронних виробках, а також удосконалення методів оцінки та прогнозування їх якісних характеристик на етапах проектування, виробництва і експлуатації є актуальним завданням.

Метою виконуваних авторами досліджень було підвищення якості виготовлення фотополімерних деталей у виробках електронної техніки шляхом розробки моделі впливу параметрів друку на відхилення розмірів та появу поверхневих дефектів виробів, а також технологічного забезпечення для візуального контролю виробництва.

Для досягнення цієї мети вирішувалися такі завдання:

- аналіз фотополімерних технологій, матеріалів та етапів для підготовки до друку моделі;
- розробка фізико-технологічної моделі для прогнозування якості виготовлення фотополімерної деталі;
- розробка моделі впливу температури фотополімерної смоли на появу відхилень геометричних розмірів та поверхневих дефектів деталі;

- розробка методу автоматизованого контролю температурою фотополімерної смоли під час експонування шарів моделі;
- розробка системи технічного зору та програмного забезпечення для контролю виробництва фотополімерного 3D-друку;
- верифікація й апробація розроблених моделей і методів забезпечення якості фотополімерних виробів та розробка практичних рекомендацій щодо технологічного забезпечення необхідного рівня якості.

1 АНАЛІЗ ФОТОПОЛІМЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ АДЕТИВНОГО 3D-ДРУКУ

1.1 Види технологій 3D-друку

3D-друк є актуальним у сучасних виробничих та науково-дослідних процесах, оскільки забезпечує можливість швидкого прототипування та тестування виробів ще на етапі розробки. Це дозволяє компаніям та інженерам оперативна створювати дослідні моделі, оцінювати їх функціональність, виявляти потенційні недоліки та вносити корективи до кінцевого продукту без великих фінансових і часових затрат.

Основні переваги 3D-друку в цьому контексті [11]:

- швидке створення прототипів, що дозволяє розробляти і тестувати ідеї в реальних умовах, знижуючи час на випуск продукту на ринок;
- гнучкість у модифікаціях, яка дає змогу швидко вносити зміни в конструкцію і перевіряти їх на практиці, що є складним і витратним процесом у традиційному виробництві;
- зменшення витрат на розробку за рахунок економії матеріалів і часу порівняно зі створенням моделей традиційними методами;
- оптимізація продукту, а саме завдяки швидкому доступу до дослідних виробів, компанії можуть покращувати конструкцію і досягати більш високої якості ще на етапі прототипування, що підвищує загальну якість і функціональність кінцевого продукту.

Таким чином, 3D-друк відкриває нові можливості для ефективного управління розробкою, скорочує цикл виробництва та забезпечує конкурентоспроможність у різних галузях, де важливо мати готовий продукт у найкоротші терміни.

Крім апаратного (hardware) аспекту, де основну роль відіграють принтери та механічні компоненти, в процесі друку задіяні різні аспекти. Можна також виділити наступні підходи за технологією роботи та застосуванням [12]:

– програмний (software) аспект охоплює програмне забезпечення для 3D-моделювання, підготовки моделей до друку (слайсери), а також програми для аналізу та оптимізації моделей. Важливі програми для діагностики дефектів, калібрування принтерів, контролю якості та моніторингу процесу друку. Наприклад, Autodesk Fusion 360, Cura, Simplify3D, PrusaSlicer та ін.;

– матеріальний зосереджується на розробці та вдосконаленні матеріалів для друку. Включає розробку нових видів філаментів, фотополімерів, порошків і паст, а також композитних і біологічних матеріалів, що відповідають різним вимогам до міцності, гнучкості, термостійкості та екологічності;

– процесний аспект охоплює методи і технології друку (як-от FDM, SLA, SLS тощо) та стандартизацію виробничих процесів. Він також включає розвиток нових підходів до створення багатокомпонентних або гібридних виробів, автоматизацію та інтеграцію 3D-друку в традиційні виробничі процеси;

– медичний та біологічний напрямок, спрямований на створення біологічних тканин, імплантів і протезів з використанням біосумісних або друкарських матеріалів;

– науково-дослідний аспект включає дослідження нових методів, матеріалів, програмного забезпечення та застосувань 3D-друку в різних галузях, веде до створення прототипів, тестування нових концепцій друку і вдосконалення наявних технологій;

– екологічний – зосереджений на розробці рішень для зменшення екологічного впливу 3D-друку, наприклад, використання біорозкладних матеріалів, технологій друку з переробленого пластику або розробка економічних принтерів, які споживають менше енергії.

Кожен з цих аспектів направлений на різні цілі і може комбінуватися для створення більш досконалих виробничих систем у сфері 3D-друку.

Технології друку можна розділити на кілька основних видів залежно від принципів роботи. Далі розглянемо найпоширеніші з них.

FDM (Fused Deposition Modeling) або FFF (Fused Filament Fabrication). Це найпоширеніша і найдоступніша технологія, за якої розплавлений пластиковий філамент подається через екструдер та шар за шаром наноситься для створення моделі, рис. 1.1. Використовує такі матеріали, як PLA, ABS, PETG та інші термопластики [13].

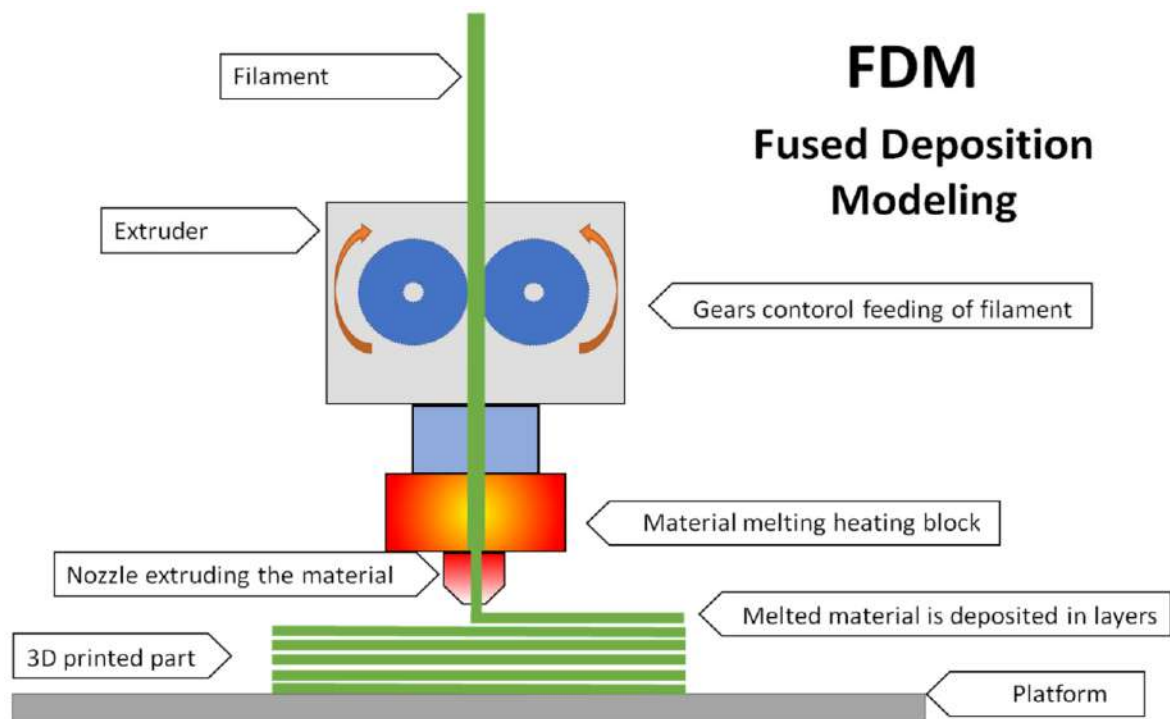


Рисунок 1.1 – Принцип роботи FDM/FFF 3D друку

FDM забезпечує достатню міцність і точність для створення функціональних деталей, що є важливим для наших досліджень впливу параметрів друку на механічні властивості частин для робото-технічних систем. Крім того, ця технологія дозволяє швидко і економічно виготовляти прототипи, що значно спрощує процес проведення експериментів.

SLS (Selective Laser Sintering). Ця технологія використовує лазер для спікання частинок порошкових матеріалів (зазвичай поліаміду або нейлону), шар за шаром створюючи об'єкт [14]. SLS підходить для міцних і функціональних прототипів і не потребує опор, оскільки невикористаний порошок служить підтримкою для деталей, рис 1.2.

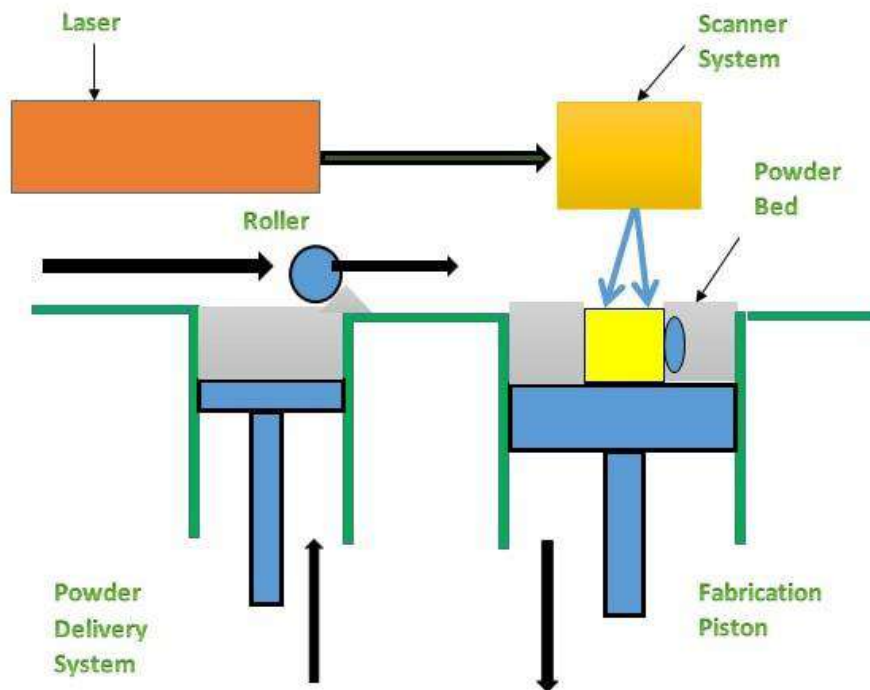


Рисунок 1.2 – Принцип роботи SLS 3D друку

Однією з ключових особливостей SLS є те, що щільність готової деталі залежить від пікової потужності лазера, а не від тривалості його роботи. Тому в SLS машинах зазвичай використовується імпульсний лазер. Машина також підігріває порошковий матеріал у ліжку до температури трохи нижче точки плавлення, що полегшує лазеру доведення температури вибраних ділянок до точки плавлення.

Однак, через характер процесу SLS, неможливо виготовити повністю закритий, порожнистий об'єкт, оскільки залишковий порошок всередині не можна буде видалити. Незважаючи на доступність домашніх принтерів після закінчення патентів, процес нагрівання залишається викликом, оскільки він вимагає потужності до 5 кВт і контролю температури з точністю до 2 °C на кожному етапі — попередньому нагріванні, плавленні та зберіганні до видалення.

MJF (Multi Jet Fusion). Розроблена компанією HP, ця технологія також використовує порошкові матеріали, але замість лазера для їх спікання застосовуються спеціальні агенти та джерела тепла, рис. 1.3.

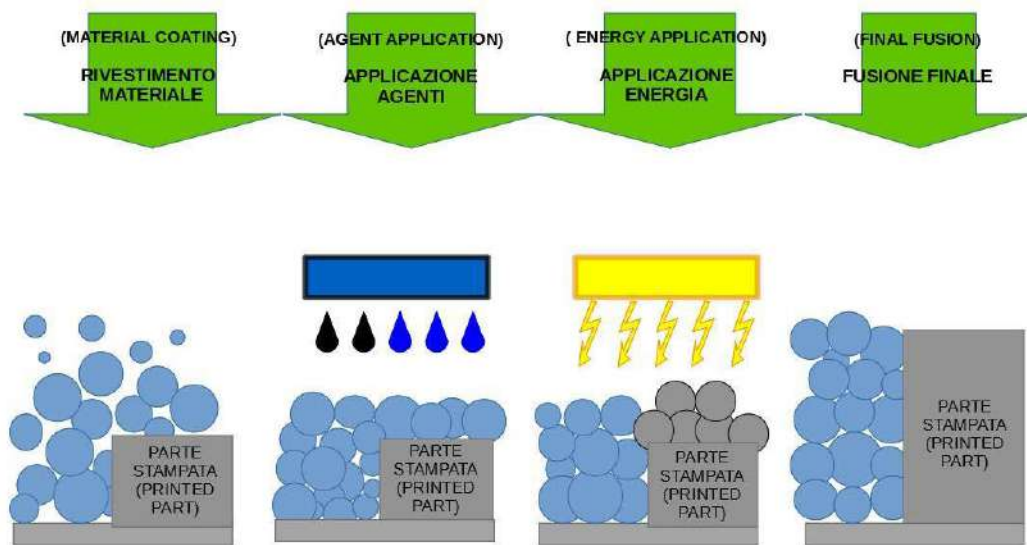


Рисунок 1.3 – Принцип роботи MJF 3D друку

Перевагами цього методу є швидкість - MJF значно перевершує багато інших 3D-друкованих технологій за швидкістю виготовлення деталей будь-якої складності. Це робить її відмінним варіантом як для швидкого прототипування, так і для масового виробництва. А також висока роздільна здатність - завдяки струменевій технології можна отримати деталі з гладкою поверхнею і чіткими елементами з роздільною здатністю до 1200 DPI і товщиною шару 80 мкм. Це дозволяє MJF використовувати для друку виробів з дрібними елементами, а також складних геометричних конструкцій без додаткових підтримок — таких як деталі в деталях, ланцюги або порожнисті форми. З недоліків можна виділити високу вартість обладнання [15].

PolyJet технологія, що працює за принципом струменевого друку, при якому рідкі фотополімери наносяться шар за шаром та відразу полімеризуються під дією УФ-ламп. PolyJet дозволяє використовувати кілька матеріалів одночасно, створюючи моделі з різними кольорами та властивостями, рис. 1.4.

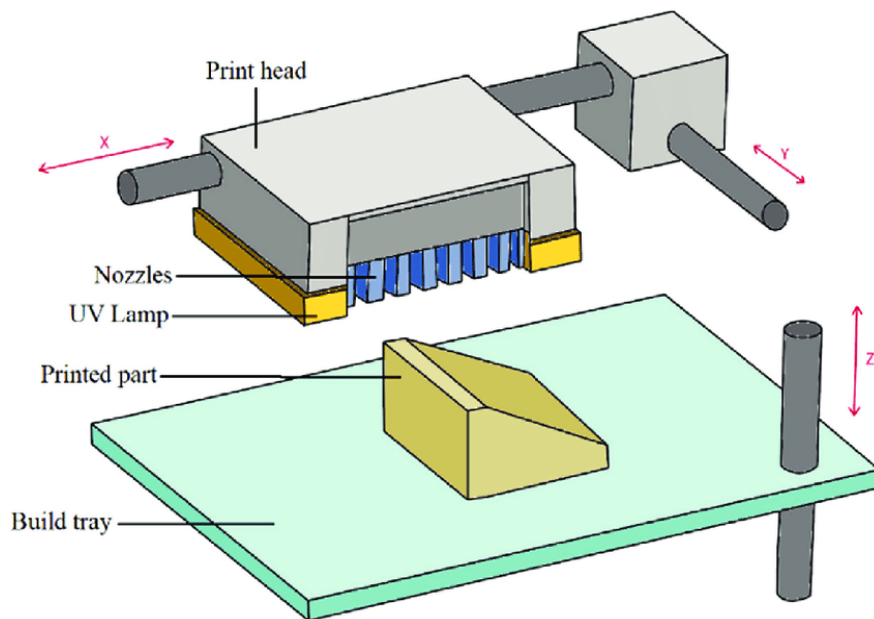


Рисунок 1.4 – Принцип роботи PolyJet 3D друку

DMLS (Direct Metal Laser Sintering) і SLM (Selective Laser Melting). Обидві технології використовують лазер для створення металевих деталей з порошку, але різниця полягає в тому, що SLM повністю плавить порошок, а DMLS спікає його [16]. Ці методи підходять для виробництва міцних металевих компонентів, які часто використовуються в авіаційній і медичній промисловостях, рис.1.5.

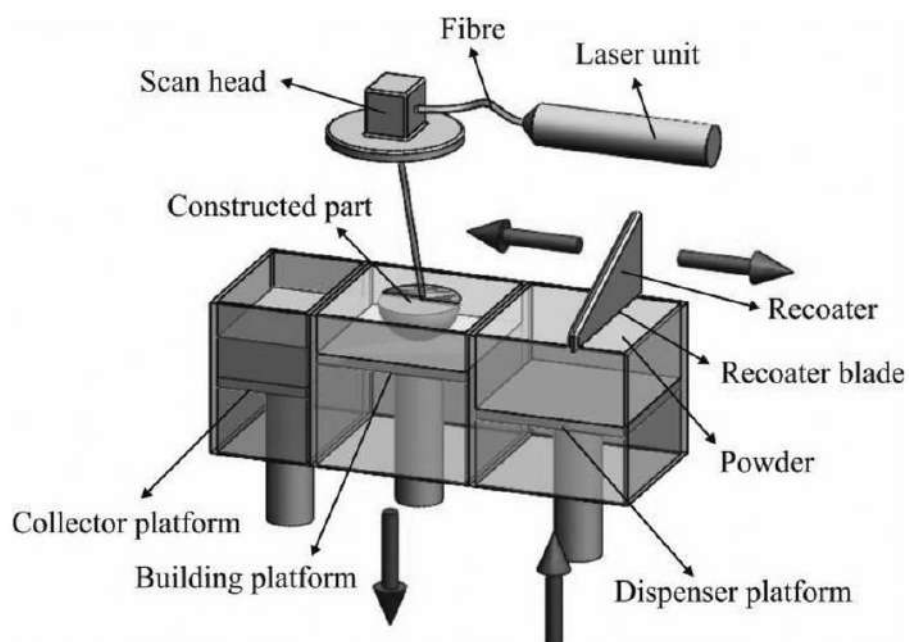


Рисунок 1.5 – Принцип роботи DMLS 3D друку

EBM (Electron Beam Melting) схожа на SLM, але замість лазера використовується електронний промінь для плавлення металевого порошку. Електронний промінь створює потік електронів, що керується магнітним полем, розплавляючи шар за шаром металевий порошок для створення об'єкта, який точно відповідає специфікаціям CAD-моделі [17]. Виробництво відбувається у вакуумній камері, щоб захистити матеріал від окислення, яке може погіршити властивості реактивних матеріалів, рис.1.6.

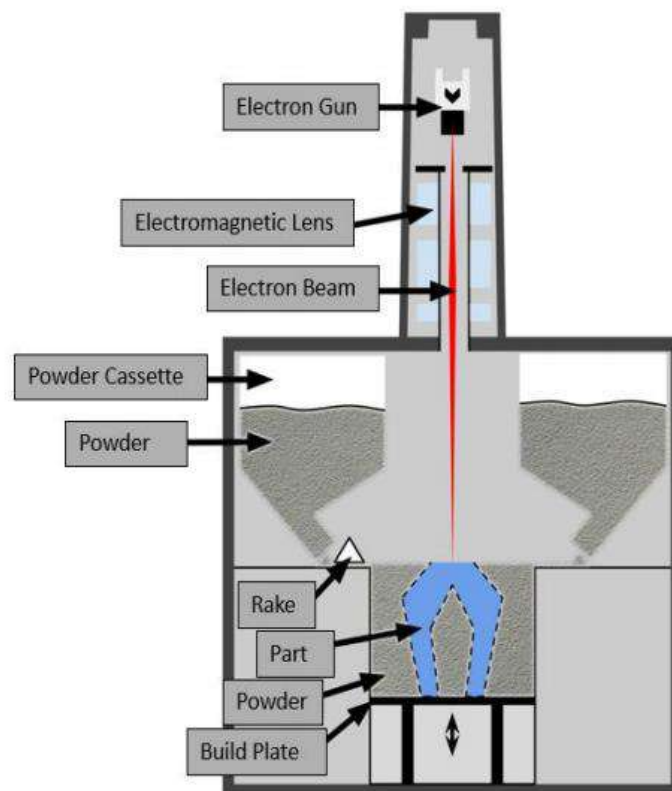


Рисунок 1.6 – Принцип роботи EBM 3D друку

LDM (Liquid Deposition Modeling) – це метод, за якого використовуються пастоподібні матеріали (наприклад, глина, кераміка або їстівні матеріали). Шар за шаром наноситься паста, яка затвердіває, формуючи кінцевий продукт [18]. Цей вид 3D-друку набув популярності в мистецтві та кулінарії, рис. 1.7.

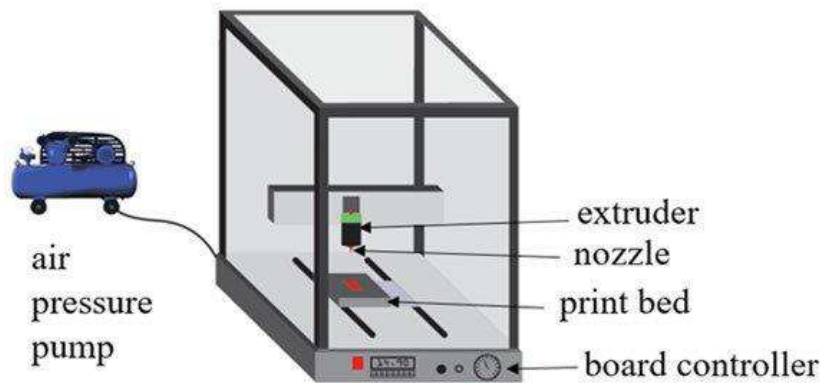


Рисунок 1.7 – Принцип роботи LDM 3D друку

Окрема слід виділити фотополімерні технології 3D-друку, а саме [19]:

- SLA (Stereolithography). У цій технології застосовуються фотополімерні смоли, які застигають під дією ультрафіолетового (УФ) лазера, дозволяє досягти дуже високої точності та деталізації, що підходить для виготовлення прототипів і деталей з гладкою поверхнею;

- DLP (Digital Light Processing). Схожа з SLA, але замість лазера використовується цифровий проектор, який одночасно застигає цілий шар. Це значно пришвидшує процес друку і зберігає високу точність;

- LCD (Liquid Crystal Display). Це технологія адитивного виробництва, що використовує рідкокристалічний екран (LCD) для відтворення об'єктів шляхом полімеризації фоточутливого матеріалу за допомогою ультрафіолетового світла.

Кожна з цих технологій має свої унікальні характеристики і використовується залежно від вимог до матеріалу, точності, швидкості та бюджету на виробництво.

1.2 Типи матеріалів для 3D-друку

Розглянемо особливості деяких матеріалів, які використовуються в 3D-друку. Матеріали для 3D-друку дуже різноманітні, і вибір залежить від мети,

типу принтера та властивостей необхідних для готового виробу. Розглянемо основні категорії матеріалів, що використовуються в 3D друці, табл. 1.1 [20].

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки основних типів матеріалів для 3D-друку.

	Матеріал	Використання	Переваги	Недоліки
1	Пластик	Найпоширеніший матеріал для 3D-друку завдяки доступності та різноманітності варіантів. Використовується в прототипуванні, виготовленні функціональних виробів, а також у хобі та домашніх проектах.	Легкий, недорогий і доступний матеріал. Простий у друку, підходить для створення як функціональних деталей, так і декоративних елементів. Різноманітність видів пластику (PLA, ABS, PETG) для різних застосувань.	Обмежена міцність і термостійкість у порівнянні з іншими матеріалами (наприклад, металом). Деякі види пластику мають високе виділення токсичних парів (ABS).
2	Фотополімер	Використовується там, де потрібна висока деталізація та гладка поверхня (стоматологія)	Висока точність і деталізація. Можливість створення складних структур з гладкою поверхнею.	Вимагає УФ-обробки для затвердіння, що може підвищувати час виробництва. Смоли можуть бути токсичними і дорогими.
3	Метал	Популярний у високотехнологічних галузях, таких як авіація, автомобілебудування та медицина, для виробництва функціональних і міцних деталей.	Висока міцність і стійкість до зношування, придатний для механічно навантажених деталей. Стійкий до температурних змін і агресивних середовищ. Підходить для виготовлення складних деталей, які неможливо виготовити традиційними методами.	Висока вартість обладнання та матеріалів. Друк металом потребує спеціальних умов і захисту, наприклад, контроль атмосфери. Складність у постобробці.
4	Кераміка	Використовується у виробництві виробів, які мають бути стійкими до високих температур або хімічного впливу, наприклад, у медицині, мистецтві та промисловості.	Стійка до високих температур і корозії. Висока міцність і твердість. Підходить для деталей, які повинні бути хімічно інертними (наприклад, у біомедичній інженерії).	Вимагає додаткового обпалювання для затвердіння. Керамічні вироби можуть бути крихкими. Друк керамікою зазвичай займає більше часу і є технологічно складнішим.

Продовження табл. 1.1. Переваги та недоліки основних типів матеріалів для 3D-друку.

5	Композити	Використовуються в інженерії та промисловості для створення міцних, легких і термостійких деталей.	Підвищена міцність завдяки армуванню (вуглеволокно, скловолокно). Стійкість до деформацій і підвищена довговічність. Підходить для створення функціональних деталей і прототипів, що витримують високі навантаження.	Дорожчі матеріали, ніж звичайний пластик. Друк композитами може вимагати спеціалізованого обладнання. Композитні вироби важко піддаються постобробці, що обмежує їх точність.
6	Біоматеріали	Використовуються в медицині для біо-друку живих тканин, створення імплантів, а також у біотехнологічних дослідженнях.	Можливість друку живих тканин і навіть органів. Підходить для створення біосумісних імплантів. Використовується в регенеративній медицині та наукових дослідженнях.	Дуже висока вартість і складність технології. Вимагає стерильних умов і контролю навколишнього середовища. Складний процес біо-друку, що потребує спеціальних знань і технологій.
7	Пісок та піщані суміші	Використовується для створення форм для лиття, архітектурних моделей і декоративних елементів.	Добре підходить для великих об'єктів, таких як ливарні форми. Можливість виготовлення складних геометрії для промислового застосування. Економічно ефективний при виготовленні ливарних форм.	Крихкість матеріалу обмежує його застосування. Складність у досягненні високої деталізації та гладкої поверхні. Обмежена міцність у порівнянні з металевими та пластиковими виробами.

Таким чином, ознайомившись з застосуванням різних матеріалів для друку, їх властивостей, переваг та недоліків, можна зробити висновок, що найкращим матеріалом для дослідження дефектів 3D-друку є пластики та фотополімерні смоли. Вони дозволяють швидко створювати прототипи й тестувати різні варіанти деталей. Також ці матеріали мають широкий спектр механічних властивостей, що дозволяє адаптувати їх до різних функціональних

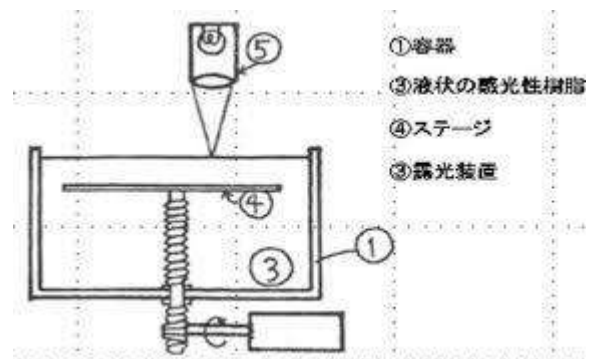
вимог і точно налаштовувати якість друку, забезпечуючи зручність у роботі та можливість оптимізації виробничого процесу.

1.3 Історія технологій фотополімерного 3D-прототипування

Історія 3D-друку почалася аж у 1981 році в Японії. Саме тоді винахідник Хідео Кодама (Hideo Kodama) запатентував свій «пристрій для швидкого прототипування». У ньому використовувався фотополімер, який, будучи від початку рідким, твердішав під впливом ультрафіолетового світла. Працював він подібно до сучасних принтерів: наносив полімер шар за шаром та давав йому затвердіти; кожен шар був поперечним перерізом майбутньої моделі. Саме цей винахід заклав підвалини стереолітографії, рис. 1.8.



а)



б)

а – Хідео Кодама; б – перша концепція «швидкого прототипування».

Рисунок 1.8 – Перша концепція фотополімерного 3D-друку

Проте патент Кодами так і не перетворився на широко вживану технологію. Через брак фінансування він не зміг завершити розробку у встановлений термін, і проект було згорнуто [21].

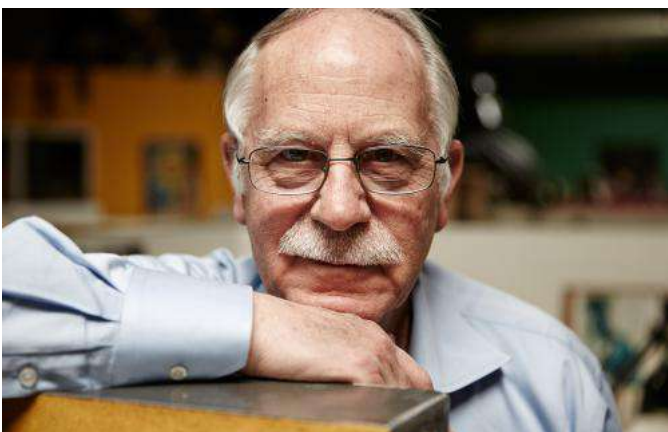
Утім, ідея «пристрою для швидкого прототипування» знайшла свій відгук у серцях трьох французьких винахідників: Жана-Клода Андре (Jean-Claude André), Олів'є де Вітте (Olivier de Witte) та Алена ле Меоте (Alain le Méhauté). Ле Меоте на той час працював у компанії Alcatel та займався розробкою

геометрично складних деталей. Колеги сварили його за те, що замість зосередженої роботи над кресленнями він думає про щось недоречне, та інженер і далі працював над полегшенням створення прототипів.

Він поділився цими думками із де Вітте, який працював у Alcatel за контрактом та мав справу із лазерами. Де Вітте знав про рідкі мономери, що затвердівають під дією лазера, тож разом двоє винахідників створили концепцію прототипувальної машини. Із нею вони звернулися до третього учасника, Андре, який працював у Французькому національному центрі наукових досліджень (French National Center for Scientific Research). Самого Андре ідея надзвичайно зацікавила, але його організацію — ні. Вона видалася CNRS надто несерйозною та непридатною для широкого вжитку.

У 1984 році троє винахідників запатентували свою технологію, але знову таки через нестачу фінансування — були вимушені згорнути свій проект. [22].

У тому самому 1984-му американець Чарльз Галл (Charles Hull) винайшов стереолітографію. Ця технологія дозволяла створювати об'ємний надрукований об'єкт на основі файлу, згенерованого комп'ютером. Саме перша стереолітографічна машина (Stereolithographic apparatus, SLA) може вважатися 3D-принтером у сучасному сенсі, рис. 1.9.



а)



б)

а – Чак Халл; б – перший SLA 3D принтер.

Рисунок 1.9 – Метод стереолітографії SLA

Чарльз запатентував свою технологію лише на кілька тижнів пізніше трьох французів, проте пощастило йому набагато більше. Патент винахідникові було видано лише у 1986 році, і тоді ж він заснував свою компанію із виготовлення складних моделей — DTM Inc. Пізніше її придбала інша компанія — 3D Systems Corporation. Саме її ім'я і стало загальною назвою для такого способу друку, на кшталт того, як ми звично називаємо копіювальні машини «ксероксами». Зараз 3D Systems Corporation посідає одне з чільних місць на світовому ринку 3D-принтерів, і навіть сам Галл визнає, що недооцінював спектр застосувань власного винаходу [23].

1.4 Сучасне використання технологій фотополімерного 3D-друку

Фотополімерні форми дозволяють відтворювати складні зображення з текстовими, штриховими та растровими елементами. Вони, у порівнянні з металевими формами, володіють більшою фарбовіддачею, що забезпечує отримання відбитків з підвищеною оптичною щільністю. Принцип отримання друкувальних елементів є ідентичним для всіх видів друку, крім трафаретного. При експонуванні через негатив під дією ультрафіолетових променів у шарі фотополімеру відбувається фотополімеризація й утворюються нерозчинні ділянки. Ці ділянки і є друкувальними елементами, на які пізніше наносять фарбу. У трафаретних друкарських формах нерозчинні ділянки є проміжними елементами, а ділянки, де фотополімери розчиняються, — друкувальними елементами.

Фотополімерні форми мають ряд переваг:

- процес виготовлення фотополімерних друкарських форм швидкий, доступний, дешевий;
- при їх використанні поліпшуються умови праці та не забруднюється довкілля;
- друкарські форми порівняно з іншими добре сприймають і віддають фарбу;

- використання фотополімерів значно скорочує витрати кольорових металів;
- форми стійкі до дії в'яжучих фарб і змивальних речовин;
- можуть відтворювати дрібні зображення на відбитку;
- мають високу стійкість деталей.

Завдяки цим перевагам, існує безліч сфер застосування фотополімерного 3D-друку. Це надзвичайно велика область, яка охоплює неймовірну кількість завдань, рис. 1.10. Сюди можливо віднести: ювелірна справа (виготовлення майстер-моделей); медицина (стоматологія, протези зубів пломб і.т.д.); аерокосмічна промисловість (виготовлення лапасте для дорнів); машинобудування (створення корпусів та елементів вузлів); прототипування (розробка тестових моделей); макетування (створення моделей для архітектурних макетів); дизайн; сувенірна продукція.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

а – ювелірна справа; б – стоматологія; в – аерокосмічна промисловість;
 г – машинобудування; д – прототипування; е – сувенірна продукція
 Рисунок 1.10. – Приклади використання фотополімерного 3D-друку

1.5 Технології фотополімерного 3D-друку

На даний час існує велика кількість адитивних технологій 3D-друку, таких як:

- екструзійна: FDM (Fused Deposition Modeling) та FFF (Fused Filament Fabrication);
- порошкова: DMLS (Direct Metal Laser Sintering), EBM (Electron Beam Melting), SLM (Selective Laser Melting), SHS (Selective Heat Sintering) та SLS (Selective Laser Sintering);
- струменева: 3DP (Three-Dimensional Printing);
- ламінування: LOM (Laminated Object Manufacturing).

Технології засвічування полімеру в фотополімерних принтерах є одними з найточніших та поширених. З них можна виділити три основних, рис. 1.11 [24].

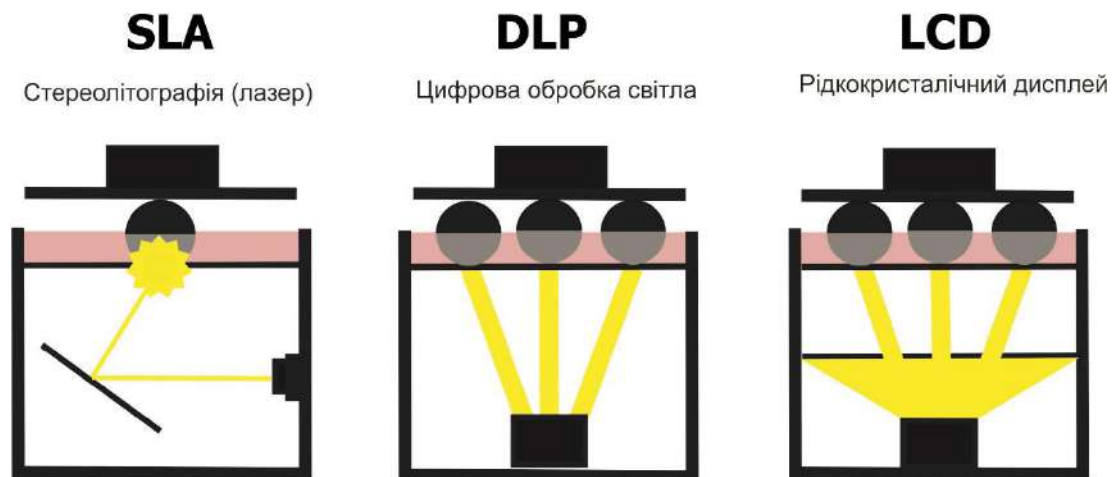


Рисунок 1.11 – Технології фотополімерного 3D-друку

1.5.1 Технологія SLA

Технологія SLA (Selective Laser Sintering), відома також як «стереолітографія», є методом адитивного виробництва або 3D-друку. Цей метод передбачає послідовну полімеризацію тонких шарів рідкого фоточутливого полімеру за допомогою проміння ультрафіолетового лазера

малої потужності. У робочій камері 3D-принтера розташована платформа, яка занурена в рідку смолу. Спочатку платформа знаходиться близько до поверхні полімеру і покрита тонким шаром від 20 мкм до 150 мкм, на якому лазер починає формувати шар деталі [25 – 27].

Модель розбивається на тонкі шари, які відповідають роздільній здатності принтера по вертикальній осі. Після створення кожного шару принтер опускає платформу на товщину нового шару моделі (від 10 мкм до 150 мкм) і продовжує процес, формуючи наступний шар. Під впливом лазера, потужність якого може бути відносно невеликою, що робить принтер більш доступним порівняно з апаратами, які використовують порошкові матеріали у технологіях SLS, SLM і інші, полімер затвердіває, формуючи стінки майбутнього виробу. Таким чином, шар за шаром, створюється повна модель. Якщо модель включає навісні елементи, для них додаються підтримки з того ж полімеру, які потім механічно видаляються [28 – 31].

Конструкції даних принтерів можуть бути різними. Першою основною конструкційною особливістю є метод побудови моделі, яка може бути як згори-вниз (рис. 1.12) так і знизу-вгору (рис. 1.14), таким чином модель, яка будується на принтері, що при побудові моделі підіймається вгору з розміщеною системою засвітлення в нижній частині принтера, встановлюється ванна меншого об'єму та має нижчу висоту стінки ніж у систем згори-вниз, таким чином проектування цих конструкцій має принципово різні умови та завдання. Розміщення системи засвітлення знизу принтера потребує ванни з прозорим до УФ випромінювання дном, яке повинне мати антиадгезійне покриття, що на великих розмірах друку є одним з найважливіших факторів, необхідних для нормальної роботи всієї конструкції. Розміщення лазерної системи вгорі, зменшує вірогідність поломки, яка може призвести до потрапляння фотополімеру на лазерну систему, що може вивести її з ладу і призвести до необхідності дороговартісного ремонту принтера в подальшому.

Принцип роботи даної технології з будуванням моделі згори-вниз можливо побачити на рис. 1.12.

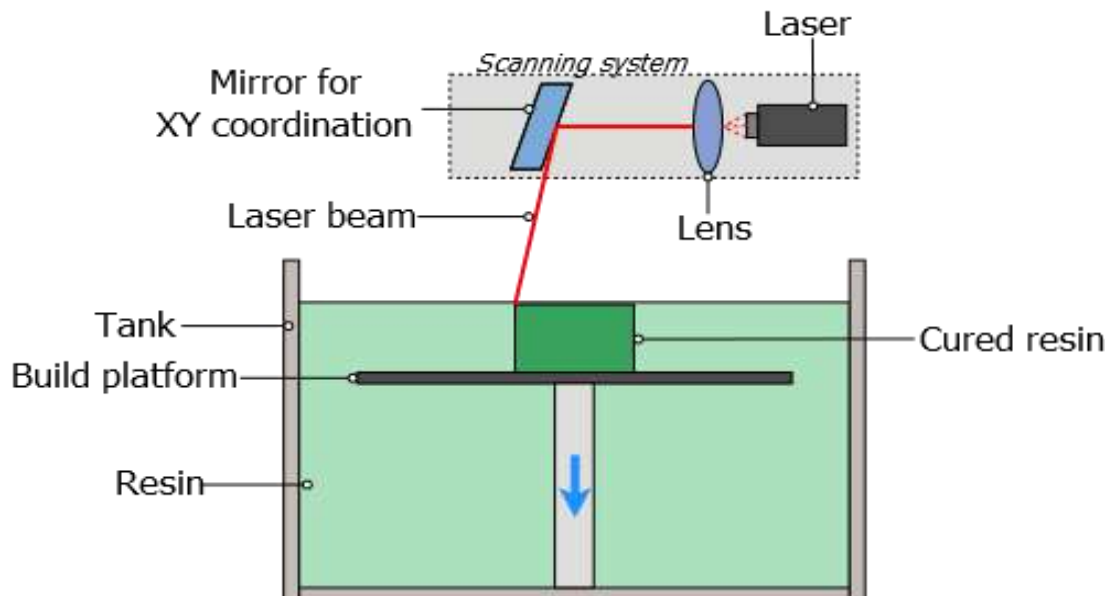


Рисунок 1.12 – Технологія SLA друку за підходом «згори-вниз»

Недоліком технології з будовою моделі «згори-вниз» є використання великої кількості фотополімеру для друку, що потрібно підтримувати на сталому рівні весь процес друку, так як нашарування відбувається в одній конкретній точці ванни, що знаходиться на поверхні фотополімеру. Для одного процесу друку на принтері моделі SLA 5000, компанії Stratasys необхідно залити не менше ста літрів фотополімеру та додатково підтримувати рівень фотополімера в процесі друку, рівного об'єму друкованої моделі, що є економічно не вигідно, рис.1.13.



Рисунок 1.13– Фотополімерний принтер SLA 5000

Таким чином, якщо не підтримувати рівень фотополімеру, модель буде поступово опускатися вниз і відсутність фотополімеру вище моделі призведе до відсутності нашарування і браку. Також є ще один фактор, який може призвести до великих економічних втрат, це забруднення фотополімеру у ванній, який необхідно постійно очищати від залишків полімеризованого пластика. Іншим недоліком є використання перемішувача, що ускладнює конструкцію, постійно потребує очищення від залишків фотополімера, що наліплюється на поверхню, яка може зачіпати модель та привести також до дефектів та браку.

Конструкція знизу-вгору будує модель безпосередньо на дні ванни, та потребує прозорого для ультрафіолету матеріалу, що також буде мати антиадгезійне покриття, що не дозволить фотополімеру приєднуватися до дна. Варіантами є використання спеціальних силіконів або плівок. Перевагами конструкції є зменшення розміру ванни по висоті, що зменшує необхідну кількість фотополімеру на один друк, полегшує обслуговування принтера та ванни, дає можливість зменшити загальні розміри установки, та полегшити її. Недоліком конструкції є складність побудови великих розмірів ванни, так як створюється велике навантаження на дно ванни через так званий ефект прилипання що може призвести до руйнування дна та протікання фотополімеру з попаданням на системи лазера. Також є залежність між площею друкованої поверхні до сили, що необхідно використати для відлипання від дна ванни.

Конструкція з побудовою знизу-вгору зображено на рис. 1.14.

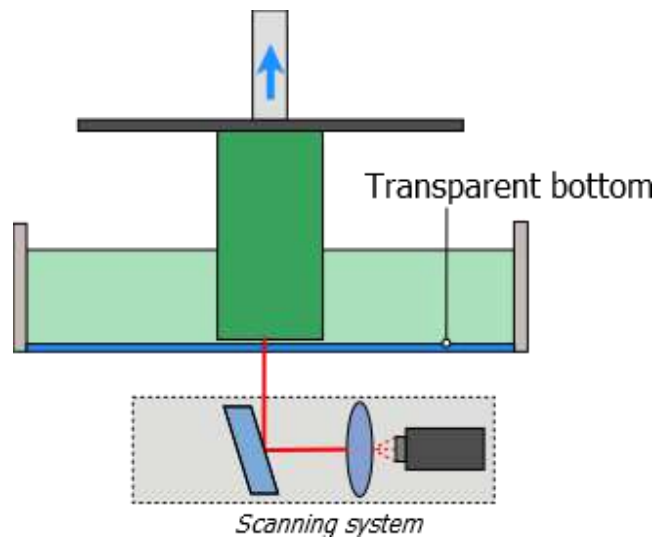


Рисунок 1.14 – Технологія SLA друку за підходом «знизу в гору»

Проектування та створення підтримок у моделі здійснюються за допомогою CAD-програм на етапі проектування.

Така технологія має перевагу перед іншими з точки зору можливості створення моделей великих розмірів, високої точності, спроможності виготовлення моделей будь-якої форми та конструкції, низького відсотку втрат зайвого матеріалу та малого рівня шуму під час роботи [32].

Перевагою в цілому технології SLA є можливість друкувати моделі з роздільною здатністю до 30 мкм і наявність великого розміру друкованої області, що порівняно з іншими технологіями 3D – друку є дуже гарним результатом. Швидкість друку є також значно більшою ніж у інших технологій, проходження лазерів через лінзи і сканатори значно швидші аніж механічні системи з використанням двигуна, каретки та ремня, що буде переміщуватися на платформі.

За рахунок менших розмірів шарів, отримувана деталь стає більш монолітною та міцною, рис. 1.15.

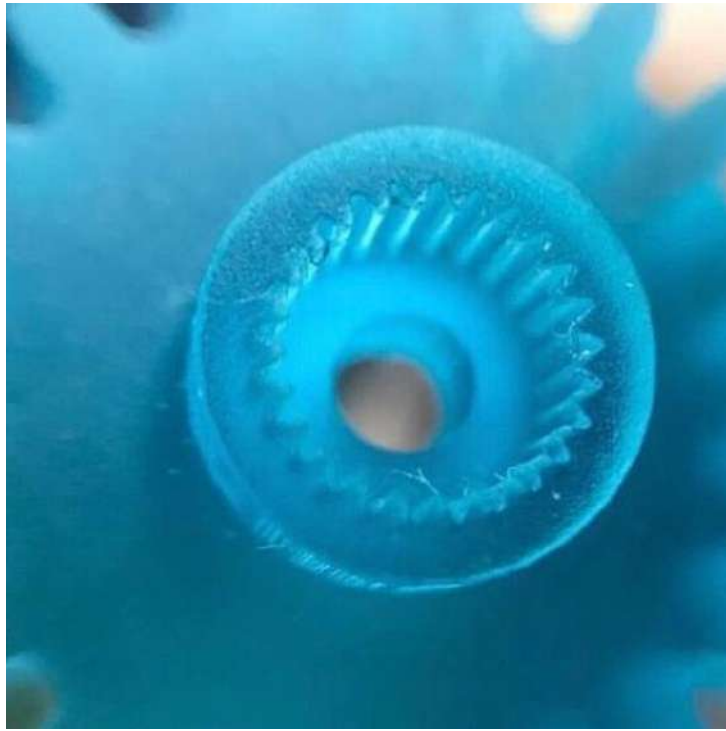


Рисунок 1.15 – Надрукована деталь

Недоліками використання цієї технології є використання дорогого фотополімеру, висока вартість самого принтера, потреба в забезпеченні високої точності при його конструкції, щоб забезпечити правильний кут виставлення дзеркал, а також необхідність точної механіки для розташування ванни на рівні одного шару від поверхні до платформи [33].

Після кожного друку на принтерах створюються відкладання фотополімеру на плівці та перемішувачі, що під дією сонячного світла полімеризується, тому створюється необхідність обслуговування після кожного друку.

На рис. 1.16 наведені приклади SLA верстатів для 3D-друку за принципом «згори в низ» та «знизу в гору».

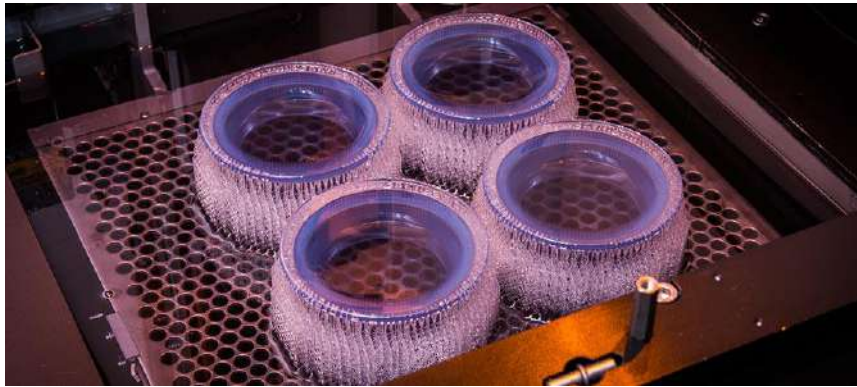


Рисунок 1.16 – SLA верстати

SLA технологія використовується в більшій мірі для прототипування деталей та в одиночному виробництві, що не потребують значних механічних властивостей. З розвитком технології, сфера використання стає більшою і використовується вже для дрібносерійного та середньосерійного виробництва за рахунок великої площі друкованої платформи і використання доливу фотополімера. Сферами виробництва, що потребують використання фотополімерного 3D принтера є автомобільна промисловість, медична та ювелірна промисловості, рис.1.17.



Рисунок 1.17 – Друковані моделі щелепи

Ювелірна промисловість використовує друковані деталі як майстер-моделі для виливання виробів з срібла, золота та ін. Можливість використання забезпечується спеціальними фотополімерними смолами, що при випіканні повністю згорають без виділення сажі, що дає збільшення якості поверхні ливарних виробів. Надруковані майстер-моделі зображені на рис. 1.18.

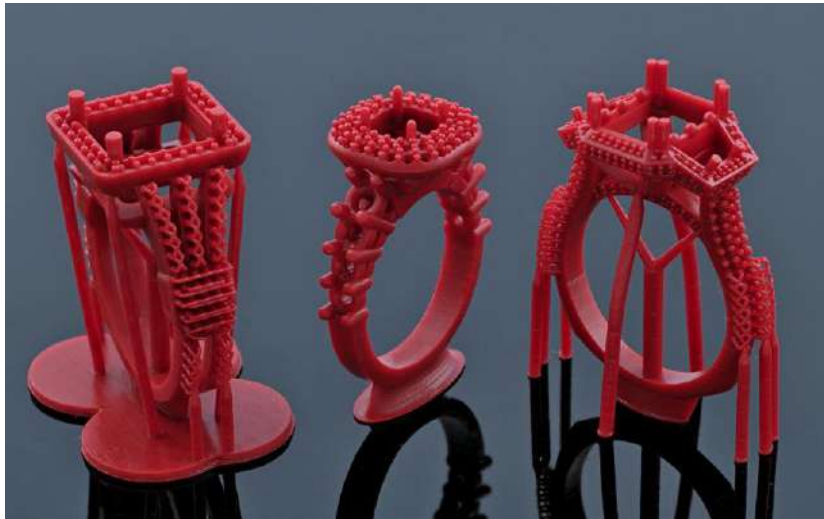


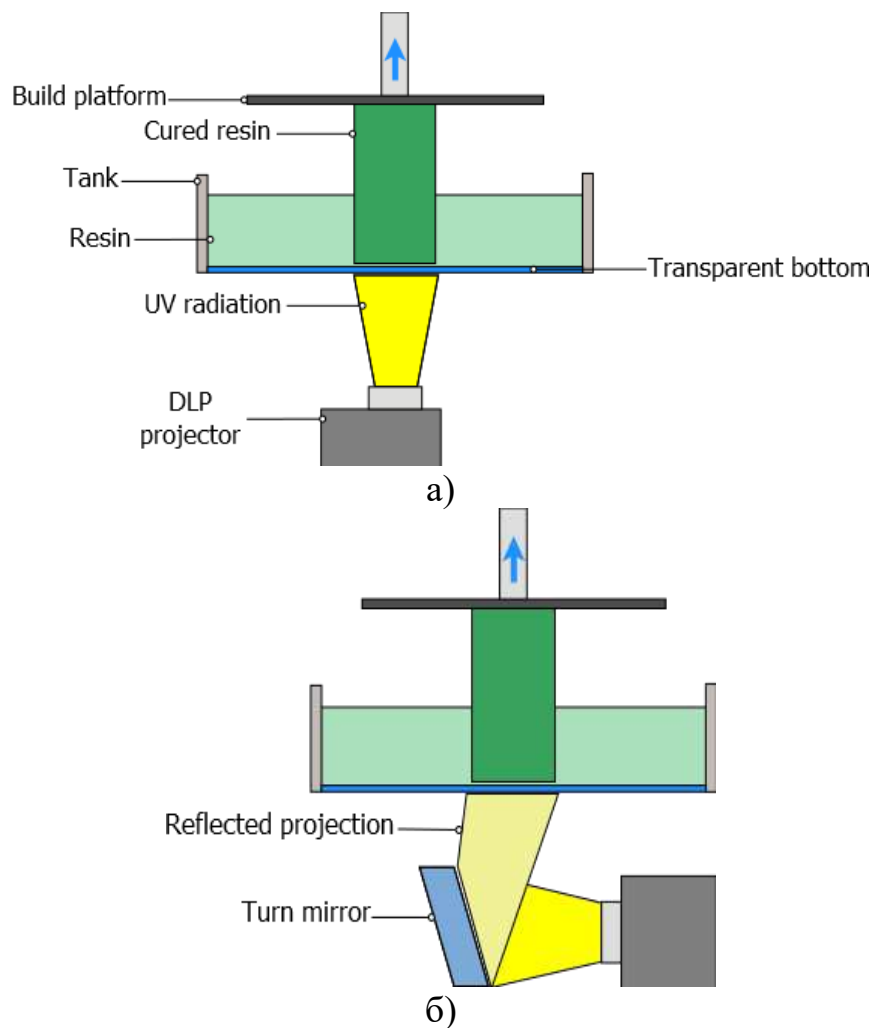
Рисунок 1.18 – Майстер-моделі надруковані на фотополімерному принтері

1.5.2 Технологія DLP

DLP-технологія (Digital Light Processing) це більш дешева альтернатива технології SLA, що використовує проектор з технологією DLP, він дає можливість значно знизити ціну принтера при незначному зменшенні роздільної здатності. Порівнюючи технології DLP та SLA, роздільна здатність DLP принтера залежить від роздільної здатності проектора та відстані на якому проектор знаходиться. При збільшенні відстані від ванни, збільшуються розміри друкованої області але і збільшуються розміри пікселя, що відображаються на якості поверхні. Таким чином можна отримати як точність, що буде відповідати SLA принтеру, але з розмірами друкованої області, що будуть набагато меншими ніж у SLA при значно нижчій ціні.

В разі необхідності друку моделі в області 500×500 мм, проектор можливо віддалити від ванни на відстань приблизно до 1м, в залежності від фокусної відстані самого проектора, в результаті чого роздільна здатність друку по осям ХУ буде становити 300-500 мкм, що відповідає мінімальному розміру пікселя проектора. Наведені дані залежать повністю від власних характеристик проектора, що можуть відрізнятися як в кращу так і в гіршу сторони.

DLP-технологія використовує принцип, аналогічний роботі проектора [34, 35] у 3D-принтерах, що використовують технологію DLP для 3D-друку. Під впливом світла видимого спектру полімер переходить у твердий стан, але в цьому випадку весь шар засвічується одночасно. Потік світла регулюється системою мікромеханічними дзеркалами, кожне з яких керується індивідуально. Залежно від положення дзеркала, світло може проходити через конкретну точку шару або ні. Таким чином, у принтера є фіксоване логічне розширення, яке визначається кількістю точок по координатах XY [35]. Фізичний розмір цих точок залежить від відстані, на якій модель знаходиться від джерела випромінювання в системі мікродзеркал, як показано на рис. 1.19.



а – технологія DLP друку з прямим експонуванням шару; б – технологія DLP друку з експонуванням шару за допомогою дзеркал.

Рисунок 1.19 – Схема роботи DLP принтера

Розмір робочої зони принтера визначається параметрами проектора, зокрема його мінімальною проекційною відстанню, за якої зображення має найменший розмір пікселя. Точність принтера залежить від роздільної здатності та розміру робочої зони. Для його побудови може використовуватися дзеркало, яке відбиватиме зображення на платформу з полімером [36].

Недоліками цієї технології є залежність від проектора, який визначає розмір робочої зони та точність по осях X і Y . Проектори такого типу є дорогими, що також є недоліком. Використання цієї технології обмежено лише персональним комп'ютером або мікрокомп'ютером, які керують проектором та платою управління. Технологія може вимагати значних розмірів при обмеженій робочій зоні через необхідність великої відстані від лінзи проектора до ванни.

Перевагами є невелика вартість порівняно з SLA-технологією, менші вимоги до точності виготовлення компонентів та можливість високої швидкості друку за рахунок потужного лампового проектора.

На рис. 1.20 наведено приклад DLP верстата для 3D-друку.

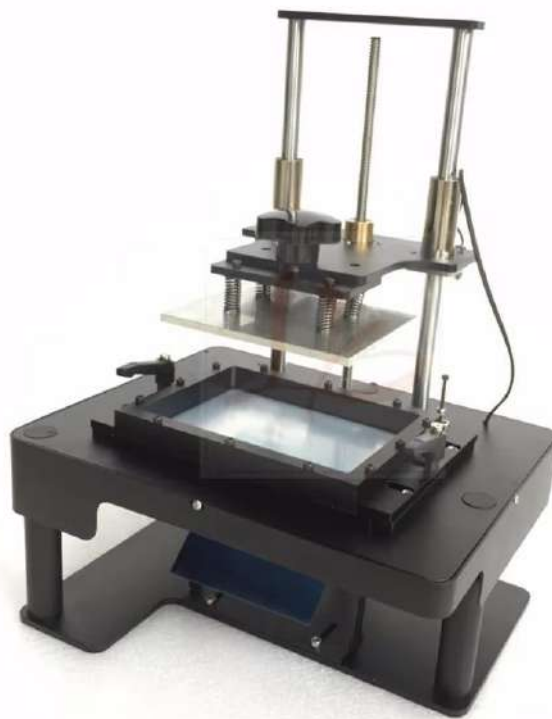


Рисунок 1.20 – DLP верстат

1.5.3 Технологія LCD

LCD технологія подібна до DLP, але включає LCD-екран, який відображає шар моделі, та світлодіод, що освітлює фотополімер. Процес побудови моделей відбувається лише знизу вгору, де екран розташований безпосередньо під ванною з фотополімером. Екран відображає весь шар моделі, відкриваючи світлі області – пікселі, через які проходить ультрафіолетове випромінювання, і освітлює фотополімер.

Використовується принтер із засвіченням фотополімера світлодіодною УФ-матрицею з використанням як маски LCD-дисплея, рис. 1.21.

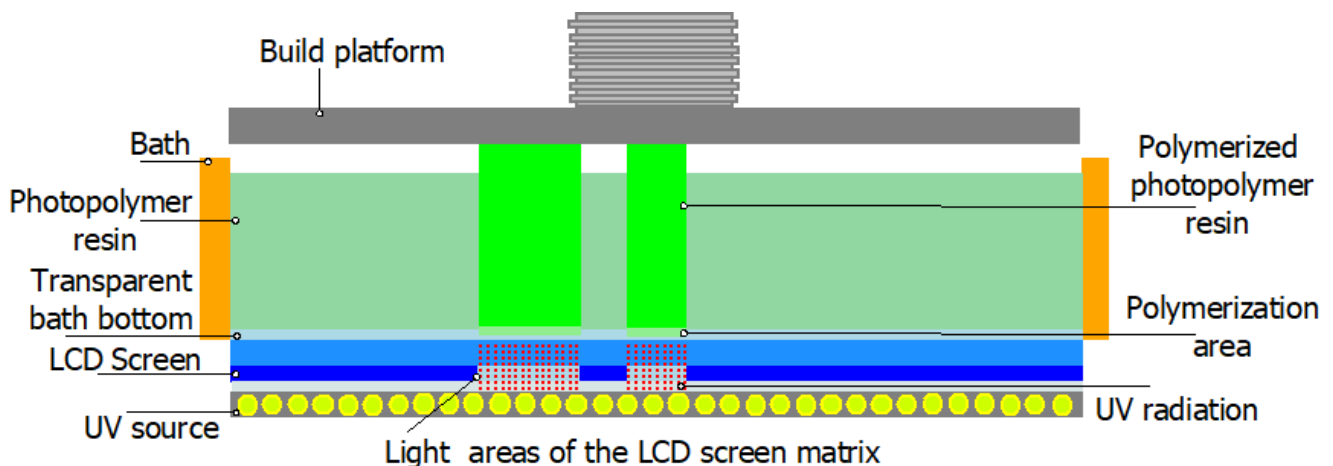


Рисунок 1.21 – Схема роботи LCD-принтера

Фотополімер активується світлодіодною матрицею, а зображення формується за допомогою LCD-дисплея, який поетапно виводить переріз створеної деталі. Відмінності між класичною SLA-технологією та DLP і LCD-технологіями засвічування є очевидними. Проте DLP і LCD-технології засвічування часто сплутуються, що є неправильним, оскільки кожна з цих технологій має свої властивості, що впливають на можливості принтера та якість друку [35].

Технологія стала можливою тоді, коли створили перші LCD екрани, що були розроблені з використанням багатошаровості, де присутні поляризатори, підсвітка, шар рідких кристалів, і якщо прибрати зі складу екрана шари, що

безпосередньо не впливають на зображення, тоді можливо отримати екран, що буде зображувати шари поперечного перерізу, де білі пікселі будуть прозорими до УФ випромінювання а чорні ні. Таким чином підставляючи під екран джерело ультрафіолетового випромінювання, можливо регулювати подавання УФ світла на друковану область.

Будова моделі безпосередньо залежить від екрану LCD, від його розмірів та роздільної здатності. Для LCD екранів з розмірами 120×60 та з роздільною здатністю 720×1280 , роздільна здатність друку буде становити 100 мкм по осям ХУ. А якщо взяти екран 8К з тими ж самими розмірами 120×60 , тоді буде отримана роздільна здатність, піксель якої буде становити 20 мкм, що буде кращою порівняно з SLA технологією, рис. 1.22.



Рисунок 1.22 – Порівняння надрукованих деталей з використанням екранів з розміром пікселя 100 мкм і 45 мкм

Недоліками цієї технології є залежність розміру робочої області від екрана, точність, що залежить від розміру екрана, і відсутність на ринку екранів розміром понад 10 дюймів. Навіть за умови використання екрану з

розширенням 8K отримати розмір пікселя менше 50 мкм є неможливим. Також є недоліком розташування екрана безпосередньо під ванною. Структура ванни, яка складається з алюмінієвого корпусу та плівки товщиною від 50 мкм до 150 мкм, може пропускати фотополімерну смолу при механічних пошкодженнях, що може призвести до проблем з принтером, таких як загоряння або пошкодження електроніки.

Перевагами цієї технології є невелика вартість, простота обслуговування та широкі можливості модернізації. В порівнянні з технологією DLP, відсутність спотворення зображення на робочій області є ще однією перевагою.

На рис. 1.23 наведено приклад LCD-екрану для фотополімерного 3D-друку.

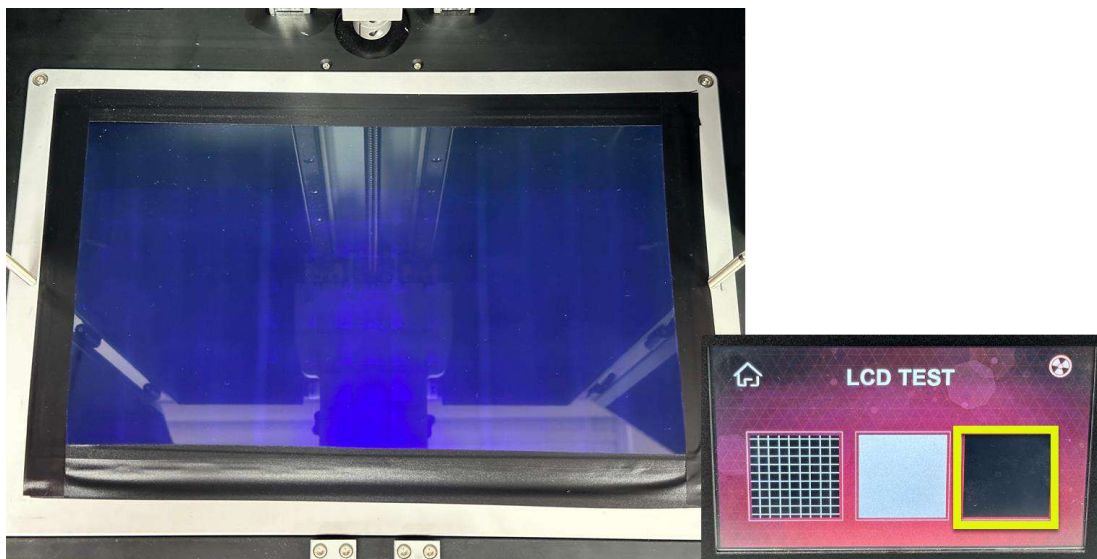


Рисунок 1.23 – LCD-екран для фотополімерного 3D-друку

Узагальнюючи, можна зробити висновок, що ці три різновиди технологій мають широкі можливості використання в побуті та на виробництві, і кожна з них займає своє місце на ринку. На сьогодні технологія LCD є найбільш розвинутою, що сприяє великому інтересу в наукових дослідженнях і вдосконаленні цієї технології та її застосуванні [36, 37]. В табл. 1.2, наведені недоліки та переваги кожної технології фотополімерного 3D-друку.

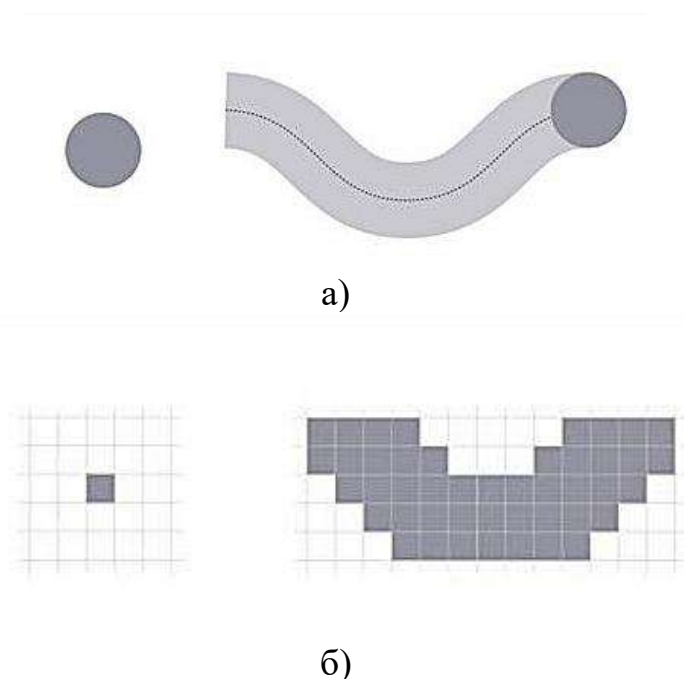
Таблиця 1.2 – Порівняння SLA, DLP та LCD технологій

Технологія	Особливості
1. Розмір області друку по XY	
SLA	Не обмежений, чим вище область друку, тим нижче швидкість (променю треба встигнути «оббігти» велику площу.
DLP	Не обмежений, чим вище область друку, тим нижче швидкість друку і нижче роздільна здатність принтера.
LCD	Область друку жорстко прив'язана до розміру LCD-дисплея.
2. Швидкість друку	
SLA	Самий «повільний» з трьох технологій. Пов'язано це з послідовною засвіченням і низькою потужністю лазера.
DLP	Самий «швидкий», обумовлено високою потужністю проектора.
LCD	«Середній» по швидкості друку. Швидкість друку пов'язана з потужністю УФ-матриць. Потужність матриці збільшувати нескінченно не можна, тому що потужні матриці вимагають потужного охолодження, і починають «пробивати» «трафарет» з LCD-дисплея.
3. Паразитна засвічення по осі Z	
SLA	Мінімальна.
DLP	Максимальна. Висока засвічення пов'язана як з великою потужністю ламп проектора, так і з більшою часткою довгохвильового актинічного випромінювання в спектрі.
LCD	Середня.
4. Паразитна засвічення по XY	
SLA	Мінімальна.
DLP	При правильній наведенні на різкість - мінімальна, але вище, ніж у SLA.
LCD	Максимальна. Сильна паразитне засвічення пов'язана із засвіченням сусідніх пікселів за рахунок недосконалості фокусує системи УФ-матриці (точніше - з її повною відсутністю - світло на маску потрапляє під різними кутами). У майбутньому цей недолік, ймовірно, буде виправлений.
5. Фактори, що впливають на роздільну здатність (крім властивостей полімеру і товщини шару)	
SLA	1) Діаметр плями лазера і точність позиціонування плями. Типові значення від 100 мкм до 200 мкм (для плями лазера), від 40 мкм до 20 мкм (точність позиціонування). 2) 3D принтерах з технологією SLA можна друкувати, наприклад, об'єкти з дуже тонкими - вертикальними стінками товщиною всього 100 мікрон, горизонтальний шар - близько від 30 мкм до 50 мкм.

Продовження табл.1.2. Порівняння SLA, DLP та LCD технологій

5. Фактори, що впливають на роздільну здатність (крім властивостей полімеру і товщини шару)	
DLP / LCD	1) Розмір пікселя і точність наведення на різкість. Типове дозвіл 1920×1080, відповідно розмір пікселя залежить від області друку по ХУ. 2) Менше дозвіл в порівнянні з SLA принтерами, оскільки зображення в них формується через піксельну матрицю (від 33 мкм до 47 мкм), не дозволяє досягти більш плавних контурів деталі в порівнянні з SLA технології, рисунок 1.6.
6. Ціна	
SLA	Ціни на бюджетні моделі ціна в межах 2500 – 5300 доларів, «професійні» – від 5300 доларів і вище.
DLP	Ціни на серійно-випускаються – 4000 доларів і вище.
LCD	Ціна 400 – 700 доларів.

Також слід зазначити як окремий показник роздільну здатність SLA та DLP та LCD друку. Вона полягає в методі формування шару. Якщо в SLA технології контури моделі формуються за допомогою лазера і мають більшу гладкість, то в DLP та LCD технології контури шару моделі мають пену дискретність, через формкування шару за допомогою пікселів, рис. 1.24.



а – контур шару в SLA технології; б – контур шару в DLP та LCD технологіях.

Рисунок 1.24 – Роздільна здатність SLA, DLP та LCD

1.6 Аналіз фотополімерних смол

Основні матеріали для друку в фотополімерних технологіях – фотополімерні смоли. Фотополімери – це високомолекулярні органічні речовини, молекули яких під дією світла при наявності ініціаторів «полімеризує» між собою і втрачають здатність розчинятися. Цей процес називається фотополімеризацією, рис. 1.25.

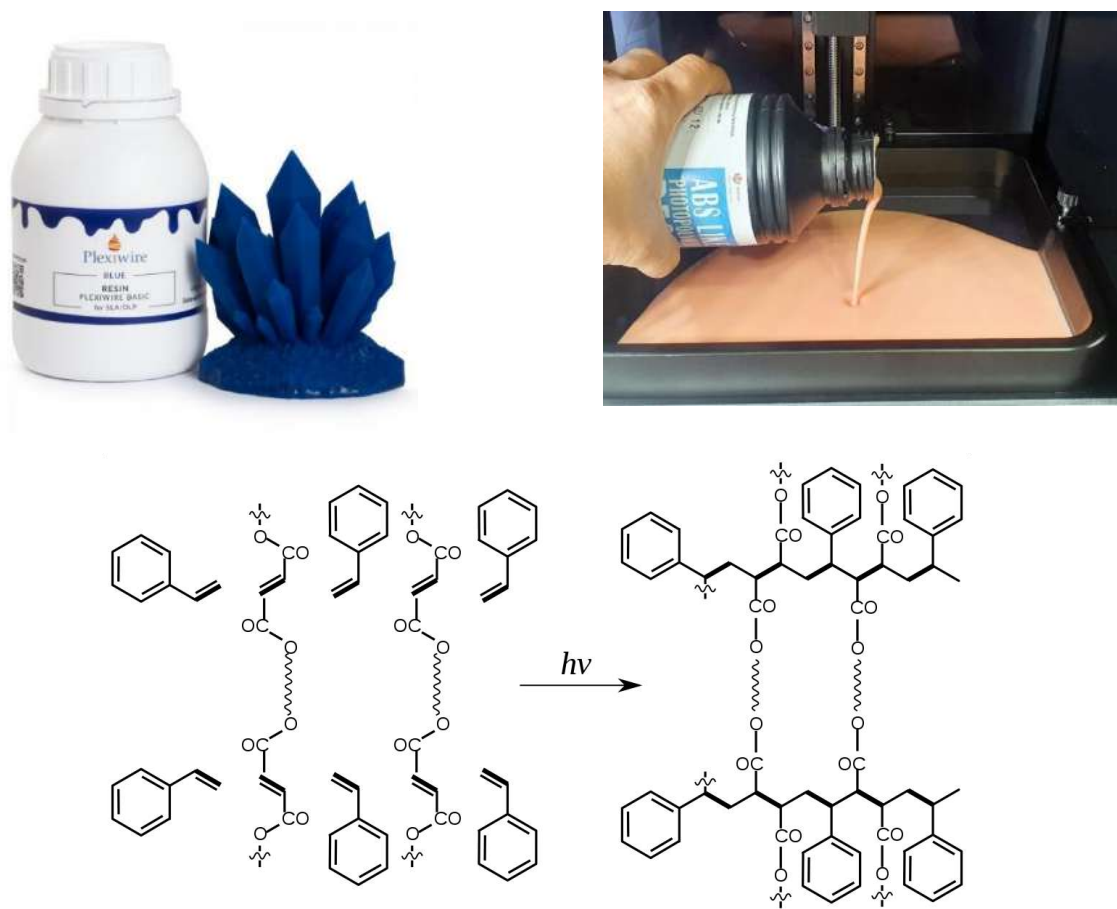


Рисунок 1.25 – Фотополімерні смоли

На сьогодні, через високу популярності та перспективи розвитку технологій фотополімерного друку створюються все нові і більш вдосконалені фотополімери, що мають великий набір фізичних та хімічних властивостей, дозволяючи застосовувати такий 3D-друк для різного призначення. На сьогодні є фотополімери, що мають властивості, подібні до резини або мають

властивості стійкості до навантажень як і інженерні пластики в інших технологіях.

Існує безліч виробників і марок фотополімерних смол [38]. Їх ціни обумовлені точністю друку і мінімально допустимою висотою шару, додатковими характеристиками. Також їх можливо умовно поділити на такі види, як: стандартні смоли для порипування; смоли для виплавлених моделей; біо-сумісні смоли; темо-стійкі смоли; хімічно стійкі смоли; механічно стійкі смоли.

Така класифікація фотополімерів є умовною та більшою частиною залежить від основних заявлених характеристик. Одна смола може відноситись і до кількох груп, тобто може бути еластичною та одночасно вироблятися з екологічних матеріалів. Загалом кожна компанія, що виробляє пластик може мати власну класифікацію.

Стандартні фотополімери при полімеризації мають високу жорсткість, гарну деталізацію та низьку ціну порівняно з іншими матеріалами. Стандартні фотополімери мають такі властивості:

- твердість може становити в середньому 80D одиниць по Шору;
- міцність на розрив становить від 40МПа до 80МПа.

Використовується для загального прототипування та проектування конструкторських розробок. Може бути прозорою або мати різні кольори, має слабкий запах та токсичність. Мінімальний шар моделі, який можна встановлювати для цих фотополімерів у слайсері становить від 30 мкм. Поверхня дозволяє нанесення захисного шару лакофарбового покриття.

Недоліком таких фотополімерів є висока крихкість та деформація під дією високих температур. Фотополімери однієї фірми з різними кольорами можуть мати різні фізичні властивості після друку.

Прозорі фотополімери після друку мають високий коефіцієнт прозорості та не потребують додаткового полірування. Фізичні властивості відповідають стандартним фотополімерам, однак процес друку ускладнюється формуванням бульбашок в структурі моделі. Недоліками таких фотополімерів є зміна кольору

під дією тривалого УФ випромінювання, гігроскопічність, та недостатня прозорість.

Гнучкі фотополімери мають характеристики подібно до резини, вони мають високу стійкість до ударів та велику ударну в'язкість. Дані фотополімери мають низьку усадку. Подовження такого фотополімера може бути до 300% а міцність на розрив становить до 20кН/м. Прикладом використання такого пластика є друк підошви для взуття, штампи, та ін.. Однак недоліками такого пластику є погіршення характеристик під дією УФ випромінювання.

В ювенільній справі найчастіше використовуються смоли для виплавлених моделей, наприклад FunToDo CB або Maker Juice Waxcast [39, 40]. Технічні характеристики смол для випалювання наведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Характеристики фотополімерних смол для лиття

Фотополімерна смола FunToDo CB		
№	Параметр	Значення
1	Твердість по Шору	73
2	Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	225 – 415
3	Товщина шару, мкм	50
4	Час засвітлено шару, с	5
5	В'язкість, МПа	1000
6	Усадка готового виробу, %	0,5
Фотополімерна смола Maker Juice Waxcast		
№	Параметр	Значення
1	Твердість по Шору	70
2	Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	405
3	Товщина шару, мкм	25 – 50
4	Час засвітлено шару, с	10
5	В'язкість, МПа	1000
6	Усадка готового виробу, %	0,6

Майстер-моделі з цих смол використовують для отримання литих металевих виробів. Перевагами таких смол є те, що в процесі вижигання майстер-моделі та заливки метала у фору, майже нема шлаку та полімеризована

смола легко виплавляється і дозволяє металі заповнювати форму виробу, рис. 1.26.



а)



б)

а – результати лиття фотополімерної смоли FunToDo CB; б – результати лиття фотополімерної смоли Maker Juice Waxcast.

Рисунок 1.26 – Приклади використання фотополімерних смол для лиття

Anycubic Dental (Skin) Non-Castable (не випалювана) – фотополімерна смола, призначена спеціально для застосування в стоматологічних клініках, рис. 1.27.

Основна відмінність цього фотополімеру від інших у тому, що він має найкращі показники чутливості та в'язкості, а також здатний швидко твердіти, не втрачаючи при цьому своєї стабільності через мінімальну усадку. Надруковані моделі відрізняються підвищеною міцністю та високою деталізацією, що дуже важливо у стоматологічному протезуванні [41].



Рисунок 1.27 – Фотополімерна смола Anycubic Dental (Skin) Non-Castable

Технічні характеристики смоли наведені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Характеристики фотополімерної смоли Anycubic Dental (Skin) Non-Castable

№	Параметр	Значення
1	Твердість по Шору	80
2	Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	405
3	Товщина шару, мкм	50
4	Час засвітлено шару, с.	4
5	В'язкість, mPas	100 – 150
6	Усадка готового виробу, %	1,8 – 2,12
7	Гранична міцність, МПа.	42 – 62
8	Інтенсивність випромінювання, Лм	1600

Фотополімерна смола Anycubic plant-based ECO resin є екологічним біорозкладним фотополімером з низькою усадкою, рис. 1.28.



Рисунок 1.28 – Фотополімерна смола Anycubic plant-based ECO resin

Цей фотополімер призначений для роботи з DLP LCD 3D принтерами, які полімеризують моделі довжиною хвилі 395-405 нм: Anycubic лінійка Photon та Mono, Wanhao (D7, D7 Plus, D8, GR1) та іншими, що друкують за технологією стереолітіографії (DLP) [42].

Смола має відмінну комбінацію твердості та міцності, низьку усадку, має високу швидкість полімеризації. Завдяки своїй плинності чудово відтворює дрібно деталізовані елементи об'єктів, забезпечує високоточне прототипування.

Особливості екологічної фотополімерної смоли Anycubic 405nm UV resin, ECO:

- біорозкладний фотополімер виготовлений із соєвої олії, без летких органічних сполук та без шкідливих хімічних речовин;
- підходить для більшості DLP LCD 3D-принтерів. Чутливий до ультрафіолетового випромінювання 355-405 нм;
- низька в'язкість смоли полегшує очищення принтера та моделі;
- смола стабільна у різних кліматичних умовах.

При роботі з будь-яким полімером для 3D-друку рекомендуємо дотримуватися запобіжних заходів: використовувати захисну маску і рукавички і уникати попадання смоли на шкіру і слизову. Технічні характеристики смоли наведені в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Характеристики фотополімерної смоли Anycubic plant-based ECO resin

№	Параметр	Значення
1	Діапазон довжини хвилі для полімеризації, нм	355 – 410
2	Коефіцієнт усадки, %	3,74 – 4,24
3	Подовження на розриві, %	11 – 20
4	Міцність на розтяг, МПа	59 – 70
5	Твердість повністю затверділого полімеру Шору	84 за шкалою D
6	В'язкість (25°C), mPas	300
7	Щільність, г/см ³	1,05 – 1,25
8	Товщина шару друку, мкм	від 35
9	Рекомендований час запікання шарів, с	6 – 10
10	Інтенсивність випромінювання, Лм	1600

1.7 Етапи підготовки моделі до 3D-друку

Процес виготовлення фотополімерної моделі можливо розділити на такі етапи, рис. 1.29 [28]:

- створення 3D моделі в CAD системі (Fusion 360, Blender, AutoCAD, SketchUp, Tinkercad та інші);
- переведення моделі в формат для стереолітографії (stl*., obj*., 3mf*., amf*., та інші);
- обробка моделі в програмі для нарізання шарів та задавання параметрів друку моделі (подібними програми називаються «слайсерами», для фотополімерного 3D-друку зазвичай використовуються програми NanoDLP або Chitubox). Основна задача подібних програм, описати послідовність команд та параметри друку у вигляді «G-code» для 3D принтера, щоб виготовити необхідну модель;
- підготовка принтеру та друк моделі.

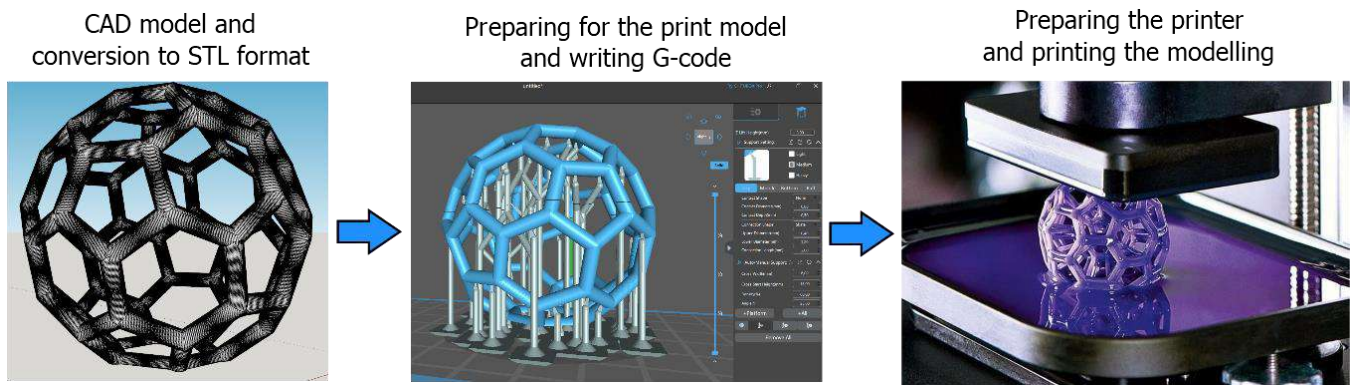


Рисунок 1.29 – Етапи підготовки моделі до фотополімерного друку

Розглянемо більш детально етап слайсу моделі в програмному забезпеченні Chitubox.

1.7.1 Підготовка моделі в програмному забезпеченні Chitubox

Chitubox – це популярне програмне забезпечення для нарізки, спеціально розроблене для 3D-друку смолою. Зазвичай використовується з SLA (стереолітографія), LCD та DLP принтерами. Програма обробляє 3D-моделі, розрізає їх на шари та генерує інструкції (G-код або власні формати файлів) для смоляних 3D-принтерів, яких вони мають дотримуватися під час процесу друку. Ось деякі з його ключових особливостей:

- нарізка: Перетворює 3D-моделі на шари, які принтер може використовувати для пошарового створення об'єкта.
- створення опор: Автоматично або вручну додає опорні конструкції до виступів для стабільності під час друку.
- видалення порожнин і зливів: Зменшує використання матеріалу за рахунок видовбування моделей і додавання дренажних отворів для запобігання застряганню смоли.
- інструменти для ремонту моделей: Виявляє та виправляє такі проблеми, як нерівні краї або отвори в моделях.
- сумісність з різними принтерами: Підтримує різні бренди 3D-принтерів, зокрема Elegoo, Anycubic і Creality.
- параметри налаштування: Дозволяє користувачам точно налаштовувати параметри друку, зокрема час експозиції, швидкість підйому та висоту шару.

Підтримувані формати файлів:

- вхідний формат файлу: (stl*., obj*., 3mf*., amf*., та інші);
- вихідний формат файлу: .cbddlp, .photon, .ctb або інші власні формати залежно від принтера.

Розглянемо більш детально інтерфейс та інструменти в програмі Chitubox, рис. 1.30.

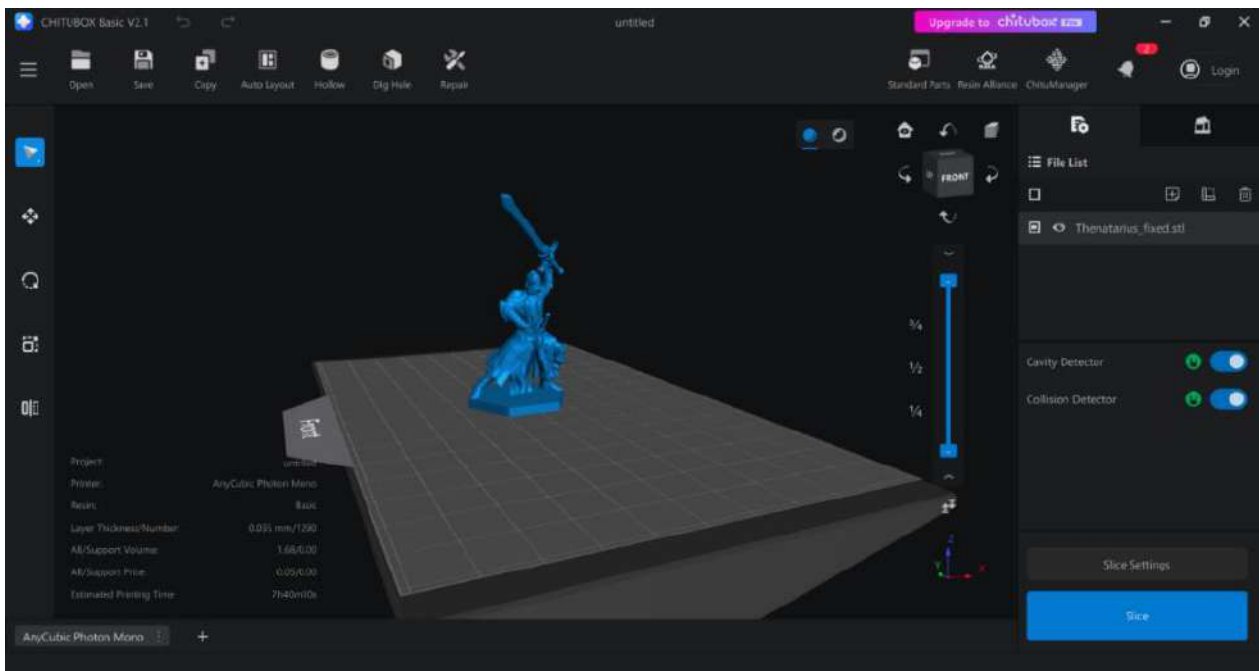


Рисунок 1.30 – Робочий екран Chitubox

Першим кроком необхідно створити робочий профілі програми під 3D-принтер, на якому будуть друкуватися моделі. В Chitubox є вже які і готові профілі під конкретні моделі фотополімерних 3D-принтерів так і під саморобний варіант «Custom Printer», рис. 1.31.

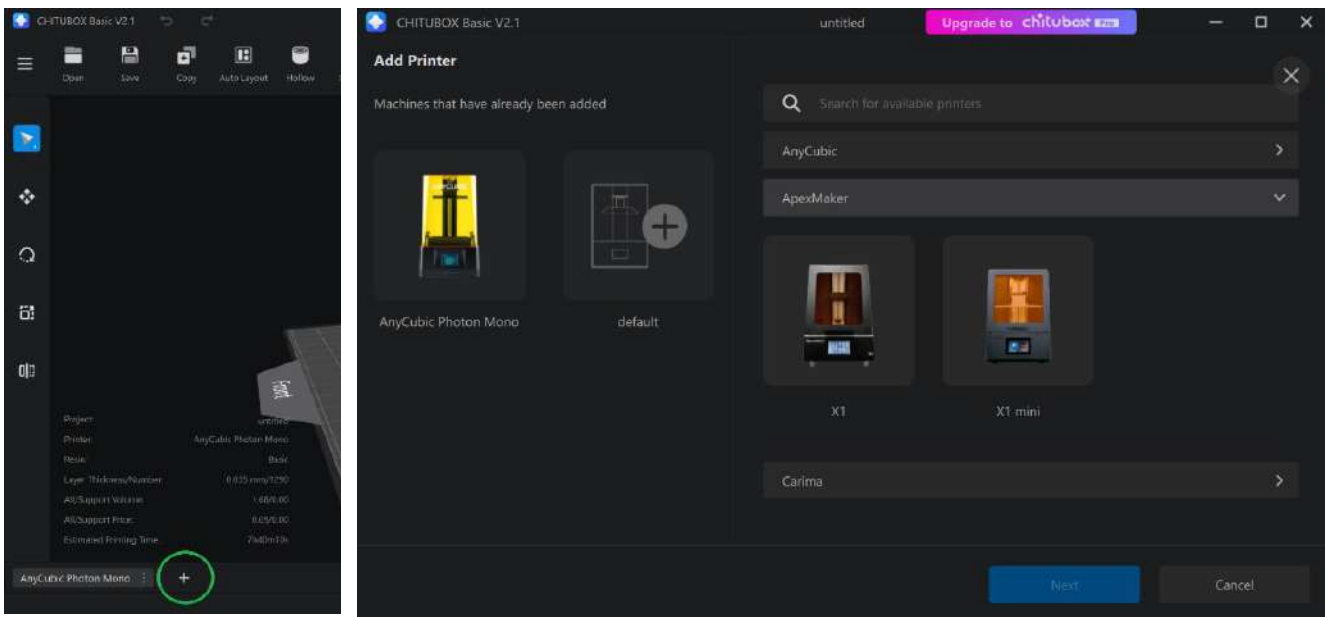


Рисунок 1.31 – Вибір 3D-принтера у Chitubox

Якщо обрати «Custom Printer», то необхідно вказати параметри саморобного верстата, у розділі (Machine), а саме, рис. 1.32:

- технологія з якою працює верстат «Mirror», тут можливо вказати такі варіанти як: Normal, LCD mirror та DLP normal;
- роздільна здатність LCD екрану «Resolution»;
- розміри побудови моделі «Size»;
- область побудови зміщення «Build Area Offset», якщо є обмеження в конструкції верстата.

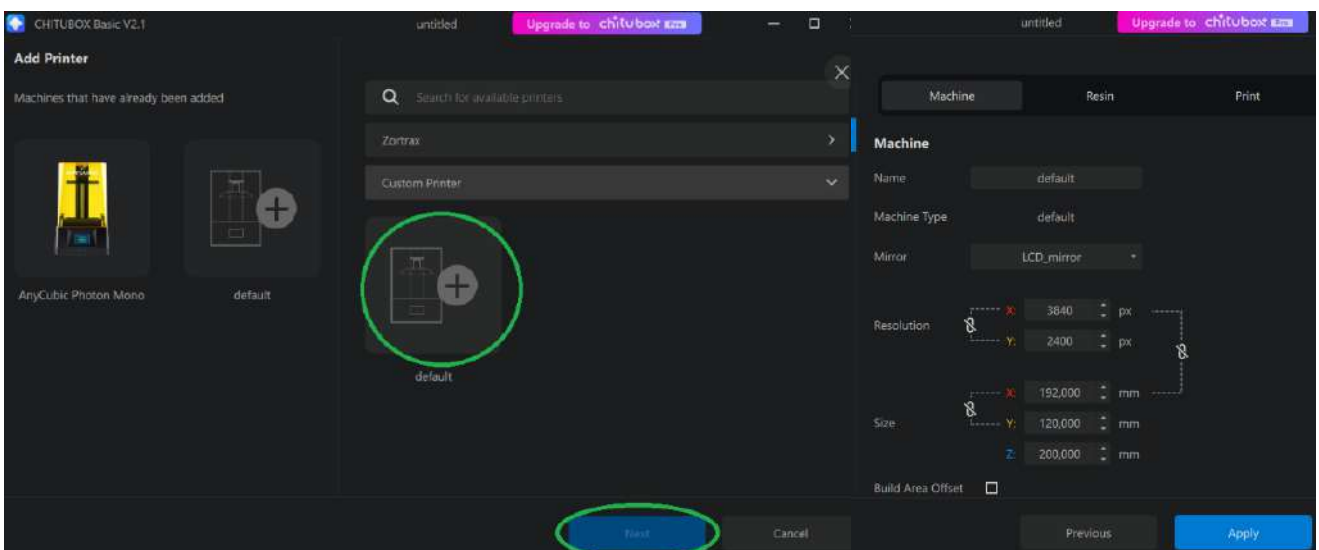


Рисунок 1.32 – Налаштування «Custom Printer»

Якщо використовується стандартний 3D-принтер, але певними удосконаленнями, їх також можливо вказати профілі верстата.

1.7.2 Інструменти для роботи з моделлю

На другому етапі, вже можна працювати з моделлю. Chitubox підтримує формат файлу: STL, OBJ, 3MF. Для того щоб перенести модель у програму, є два способи: перенести модель у робоче поле програми за допомогою курсора або через вкладку «Open», яка заходиться ц верхньому лівому кутку програми.

Наступні інструменти, які знадобляться коли, з'явиться модель на робочому полі програми, це інструменти розміщення, обертання, масштабування та віддзеркалення моделі, рис. 1.33.

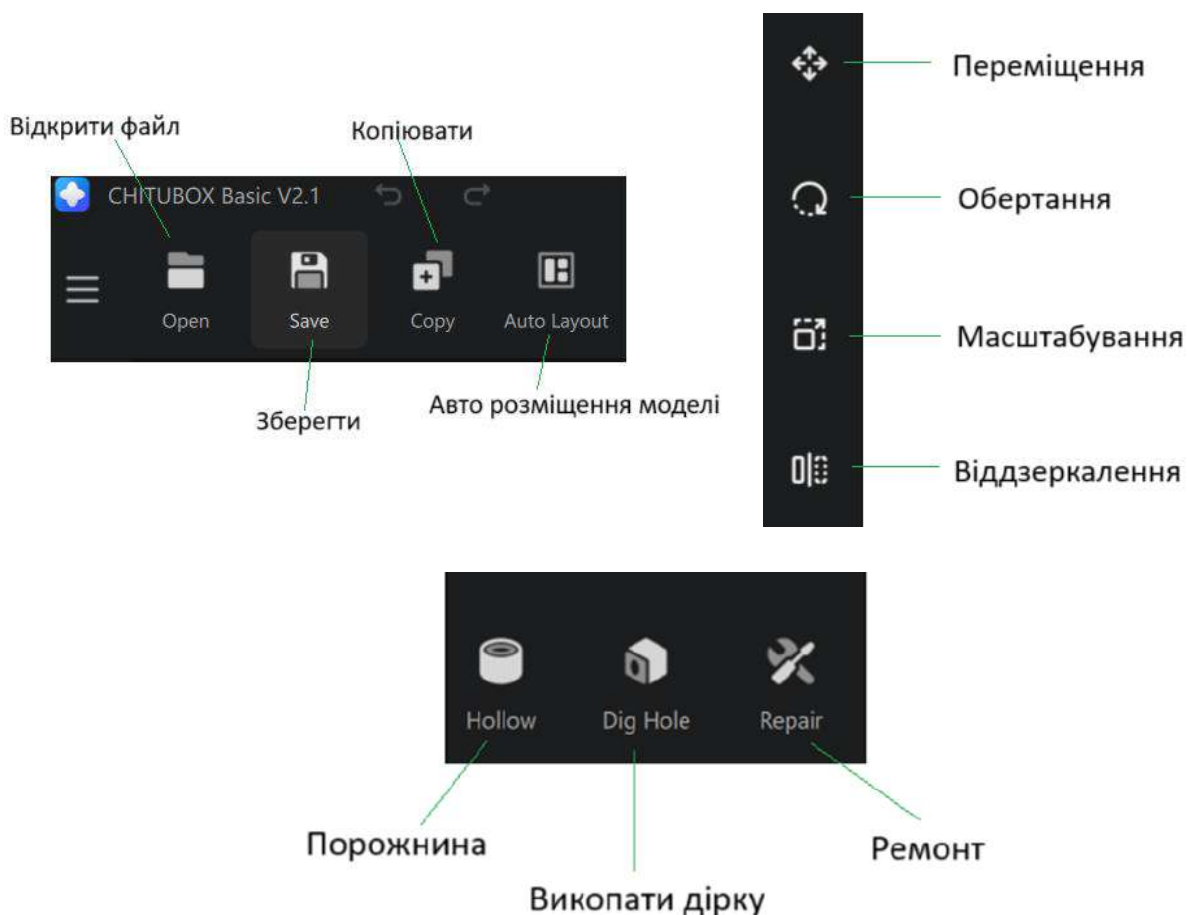


Рисунок 1.33 – Інструменти роботи з файлом та моделлю у Chitubox

Всі ці інструменти здатні працювати з моделлю по трьом координатам XYZ. Також є інструменти які дозволяють робити модель пустотілою, робити

отвори в моделі для зливання фотополімерної смоли з середні моделі та виправляти дефектні полігони у STL файлі.

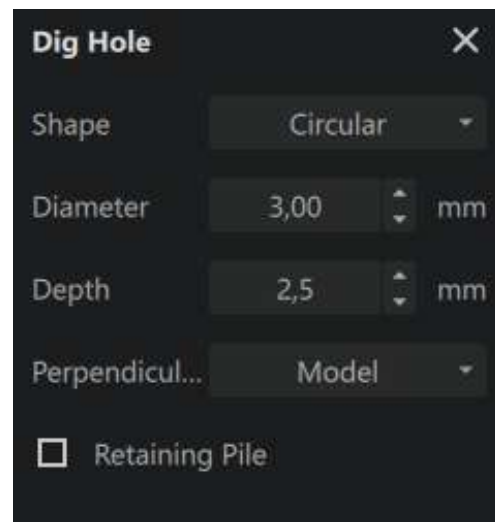
В кожному цих інструментів можливо зробити додаткові налаштування. Наприклад в налаштуваннях інструменту «Hollow», можна вказати порожнистий режим «Hollow Mode», де можна обрати тип порожнини «шкірка» (Peel) або «виїмка» (Hollow Out). Також можна обрати товщину стінок «Wall Thickness», точність «Precision», структуру заповнення «Infill Structure» та щільність заповнення «Infill Density», рис. 1.34 а.

В налаштуваннях отвору для зливання фотополімеру з моделі «Dig Hole», є наступні параметри, як, рис. 1.34 б:

- форма отвору «Shape»;
- діаметр отвору «Diameter»;
- глибина отвору «Depth»;
- перпендикулярність отвору відносно моделі або екрану «Perpendicular to»;
- утримуюча опора «Retaining Pile».



а)



б)

а – параметри інструменту «Hollow»; б – параметри інструменту «Dig Hole».

Рисунок 1.34 – Налаштування параметрів інструментів

1.7.3 Налаштування підтримок моделі

У фотополімерному 3D-друці підтримки необхідні для успішного друку деталей, особливо якщо вони мають навісні частини або складні геометричні елементи. Основні функції підтримок:

- утримання нависних частин під час друку;
- запобігання деформаціям моделі;
- забезпечення стабільності та адгезії до платформи.

Для встановлення підтримок моделі у Chitubox, є спеціальні редактор, який знаходиться в головному вікні програми, рис. 1.35.

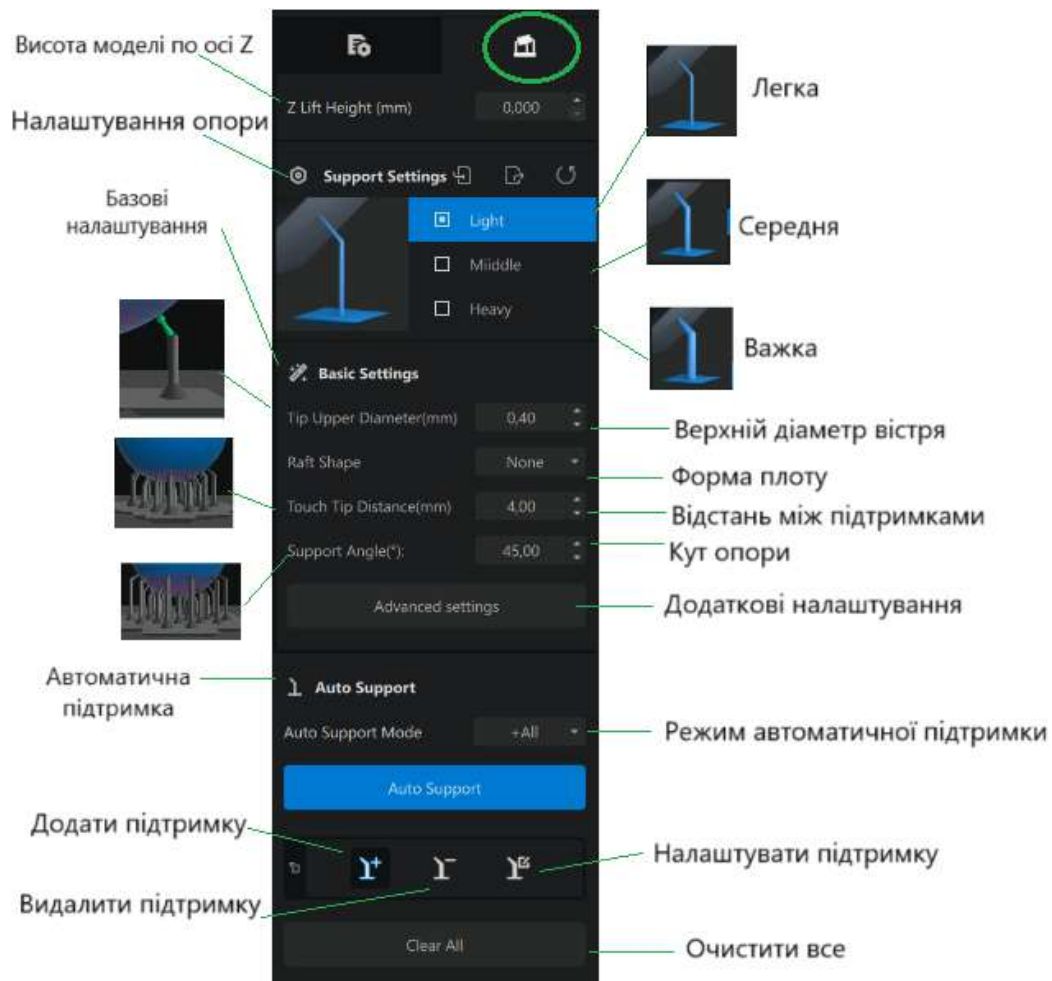


Рисунок 1.35 – Налаштування підтримок у Chitubox

В налаштуванні «Z Lift Height», можна вказати відстань побудови моделі від платформи. Подібне налаштування використовується від конструкції

моделі, чи є в моделі достатньо широка основа, щоб забезпечити контакт з платформою, або немає та модель має нерівню поверхню.

В кладці «Support Settings», можна обрати тип підтримки, а саме:

- легка «Light»;
- середня «Middle»;
- важка «Heavy».

Для друку складних моделей за часту можуть використовуватися два або три типу підтримок.

Вибір типу підтримки, напряду залежить від ваги та розмірів навісних елементів моделі. Для того щоб вказати розміри та діаметри для типу підтримки використовуються додаткові налаштування «Advanced settings».

В кладці базові налаштування «Basic Settings», за допомогою налаштувань «Tip Upper Diameter», можливо вказати діаметр вістря підтримки моделі, рис. 1.36. Це дозволяє спростити процес пост-обробки моделі та видалення підтримки після друку.

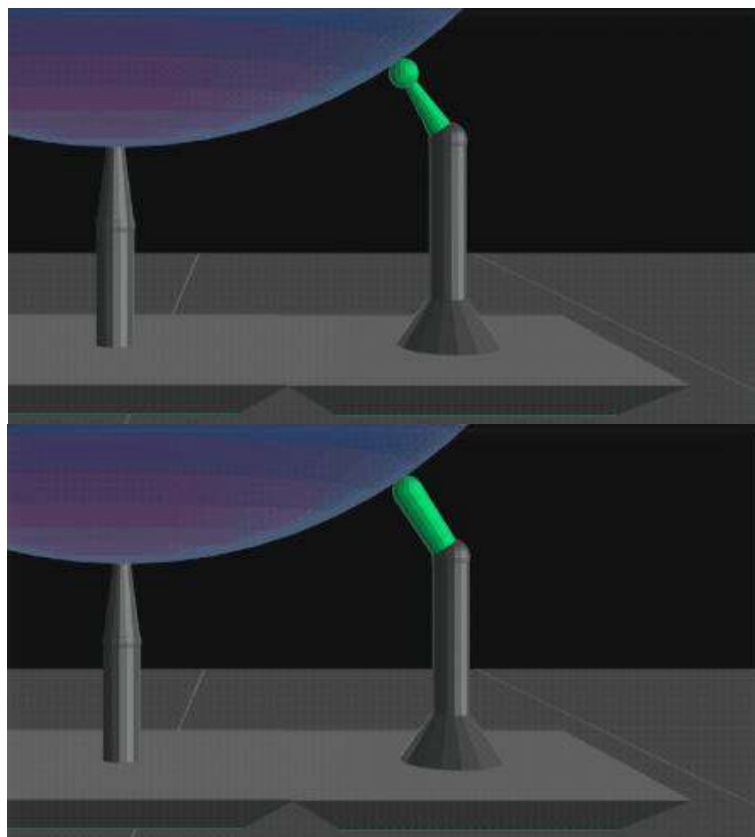
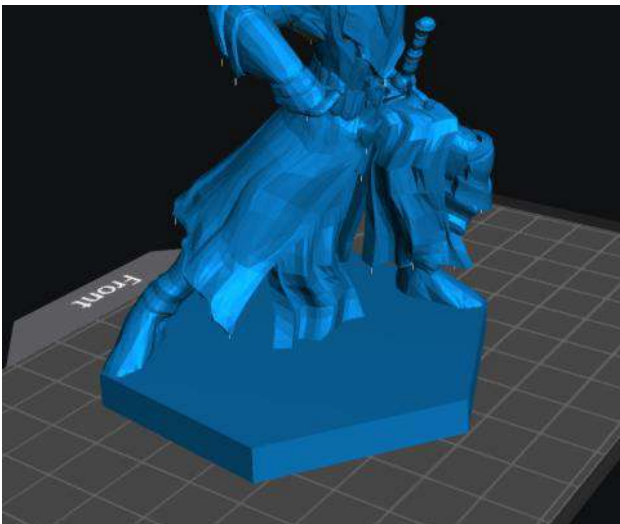


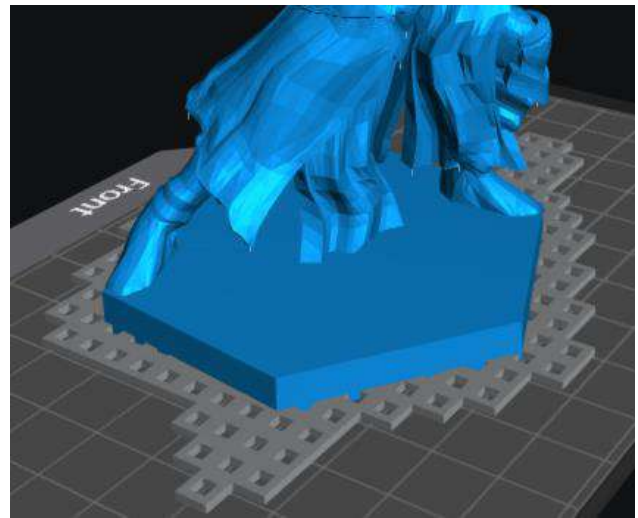
Рисунок 1.36 – Параметр «Tip Upper Diameter»

За допомогою параметру «Raft shape», можливо вказувати форму плоту, ти саме підвищити адгезію моделі та підтримки до платформи. В цілому є три типи плоту, рис. 1.37:

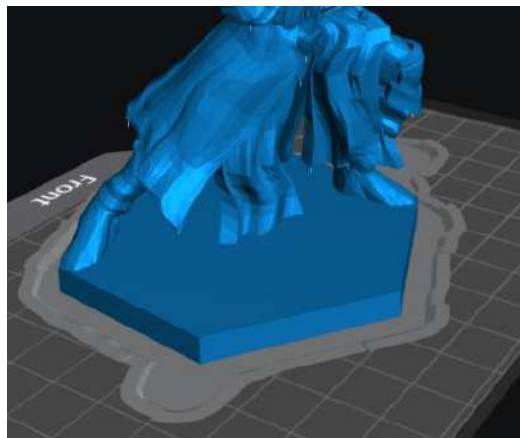
- немає «None»;
- скат «Skate»;
- поперечна сітка «Cross grid».



а)



б)



в)

а – тип прилипання до платформи «None»; б – тип прилипання до платформи «Skate»; в – тип прилипання до платформи «Cross grid».

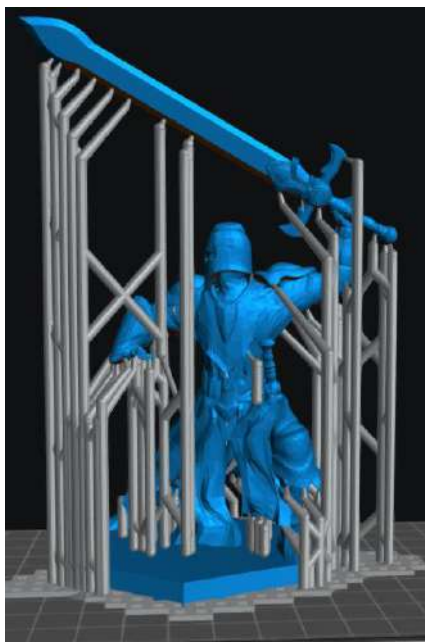
Рисунок 1.37 – Типи «Raft shape»

Окрім того, в базових налаштуваннях підтримок, можливо вказувати відстань між підтримками (щільність підтримок) «Touch Tip Distance» та кут

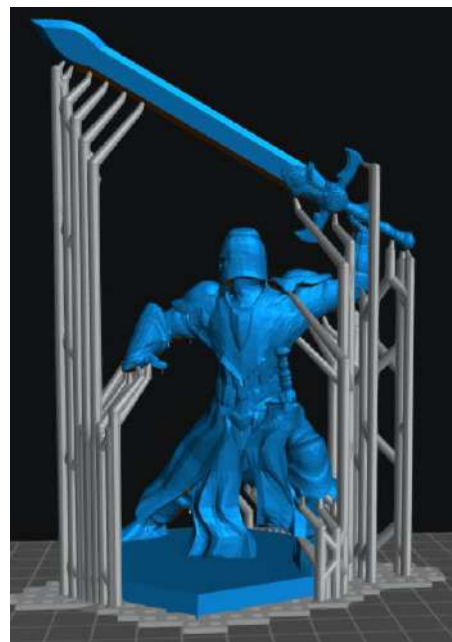
від якого будуть будуватися підтримки «Support Angle». Ці параметри також індивідуальні, залежності від моделі.

Можна обрати тип побудови підтримки в параметрі режимі автоматичних підтримок «Auto Support Mode». Для цього параметра є тільки два шаблони, рис. 1.38:

- побудова підтримок скрізь «All»;
- побудова підтримок тільки від платформи «Platform».



а)



б)

а – побудова підтримок скрізь «All»; б – побудова підтримок від платформи «Platform».

Рисунок 1.38 – Види «Auto Support Mode»

В Chitubox, також є можливість самостійного додавання, видалення та налаштування окремих підтримок. Додаткових налаштувань підтримок, рис. 1.39, можна окремо налаштовувати кожний елемент підтримки, такі як:

- верхня частина «Top»;
- нижня частина «Bottom»;
- середня частина «Middle»;
- плот (основа) «Raft».

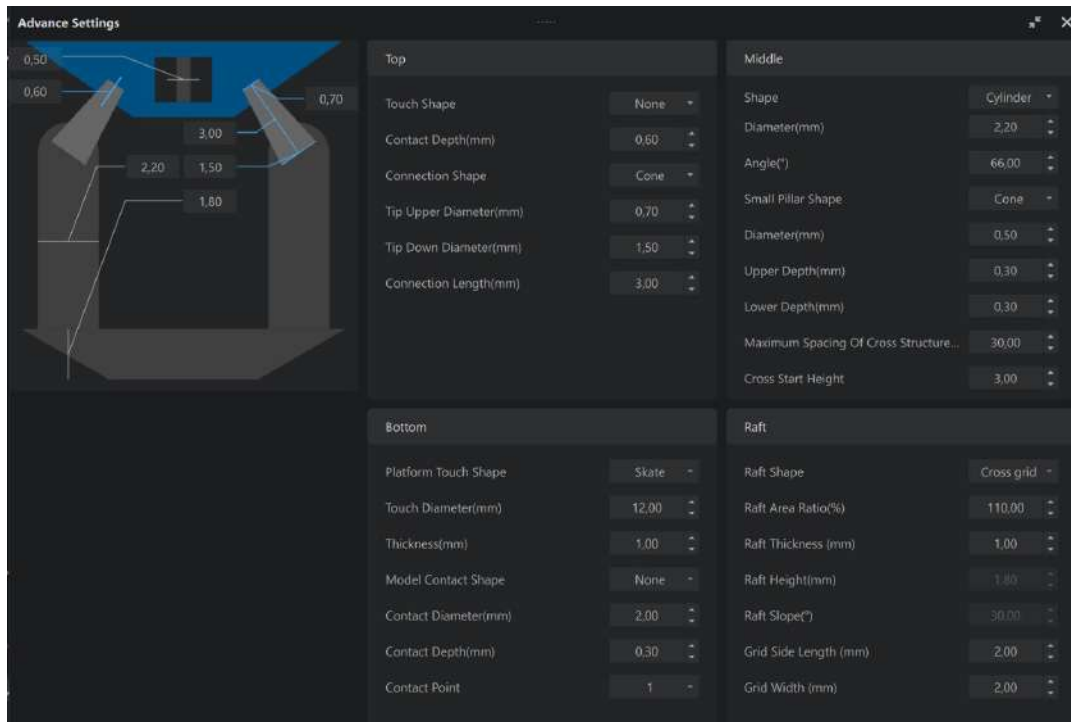


Рисунок 1.39 – Налаштування «Advanced settings»

На рис. 1.40, наведена модель вже з налаштованими підтримками.

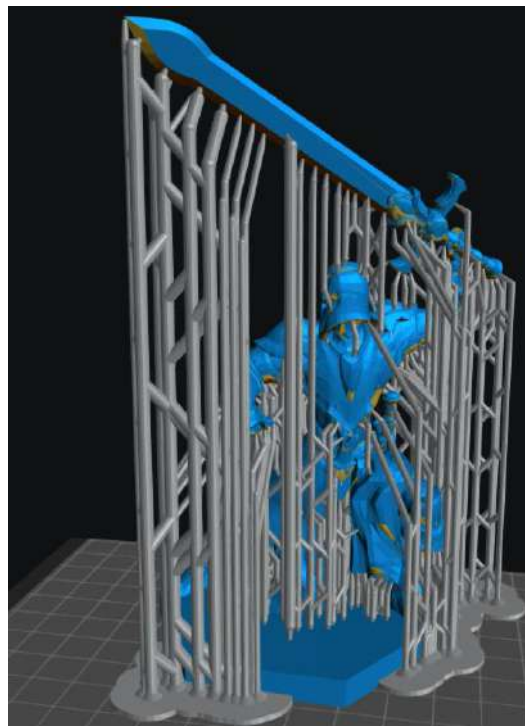
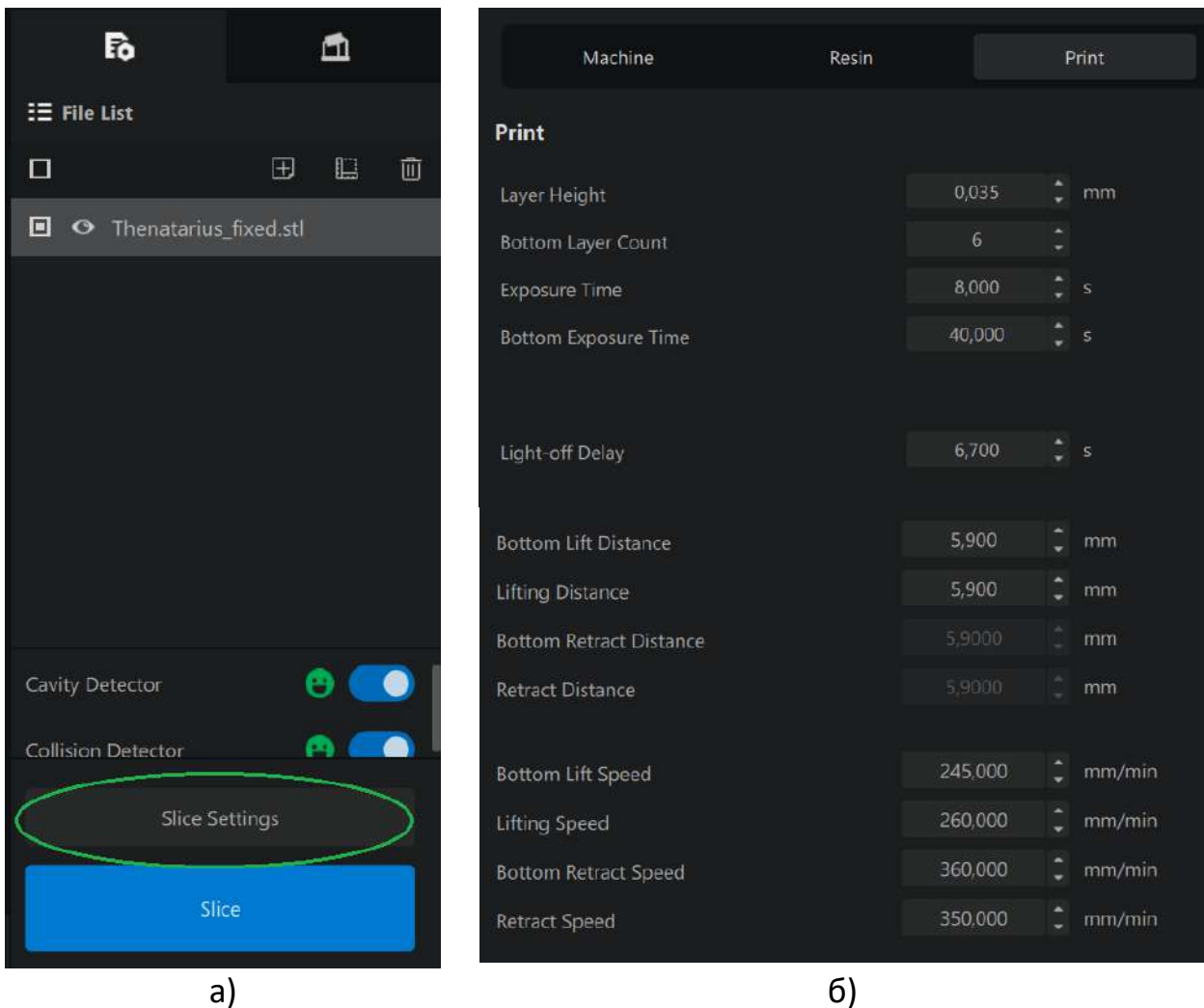


Рисунок 1.40 – Модель з налаштованими підтримками

1.7.4 Налаштування друку моделі

Наступним етапом є вказання параметрів експонування моделі, рис. 1.41.



а)

б)

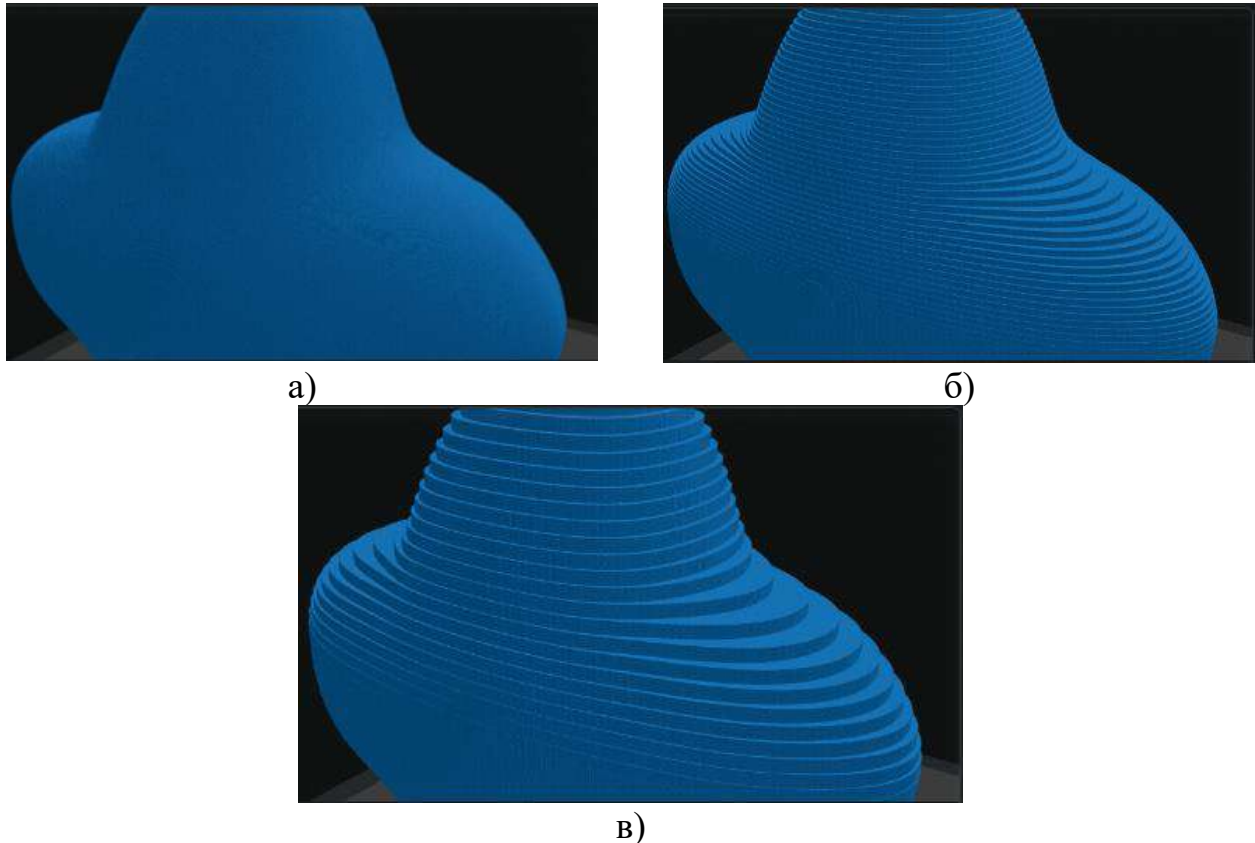
а – «Slice Settings»; б – налаштування параметрів експонування моделі.

Рисунок 1.41 – Налаштування друку моделі

До основних параметрів друку моделі, можливо віднести:

- висота шарів «Layer Height»;
- кількість базових шарів моделі «Bottom Layer Count»;
- час експонування основних шарів «Exposure Time»;
- час експонування базових шарів «Bottom Exposure Time»;
- інтервал часу між вимиканням та вмиканням лампи експонування (охолодження лампи) «Light-off Delay».

Від висоти шару «Layer Height», буде залежати деталізація моделі, чим менша висота шару ти більша деталізація моделі, але при цьому більший час друку через більшу кількість шарів, рис. 1.42.



а – висота шару 10 мкм; б – висота шару 35 мкм; в – висота шару 50 мкм.

Рисунок 1.42 – Модель з різною висотою шару

Кількість базових шарів моделі «Bottom Layer Count» та час експонування базових шарів «Bottom Exposure Time», впливають на прилипання моделі до платформи. Оскільки фотополімерні 3D принтери в більшості випадках працюють за принципом побудови моделі «знизу в гору», то під час друку моделі, є імовірність того що модель може відпасти від платформи. Щоб цього уникнути треба забезпечити гарну адгезію між першими шарами моделі та платформою і наступними шарами. Тому перші 6-10 шарів моделі друкуються з довшим часом експонування від 15 с до 40 с, щоб забезпечити більшу полімеризацію фотополімеру.

Час експонування основних шарів «Exposure Time», набагато менший за час експонування базових шарів, і більш сильний впливає на загальний час друку моделі. Налаштування інтервал часу між вимиканням та вмиканням лампи експонування «Light-off Delay», використовується для охолодження УФ-лампи принтеру, та збільшення ресурсу її роботи.

Всі ці налаштування часу експонування кількості шарів бази, напряду залежать від характеристик фотополімерної смоли та ваги моделі.

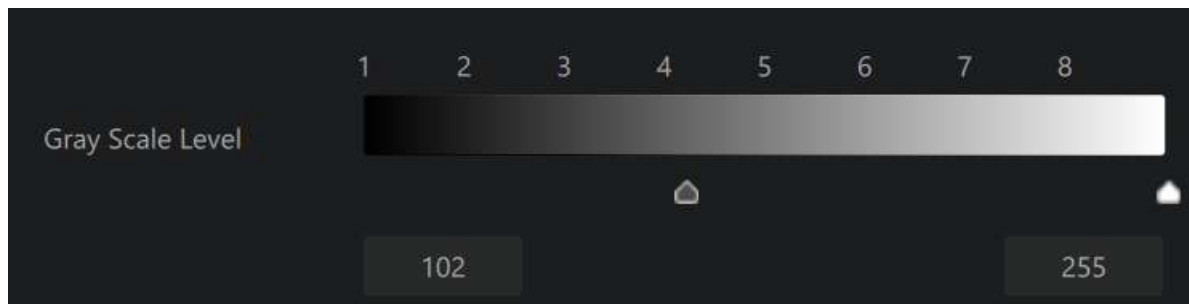
Окрім базових налаштувань друку, є налаштування відриву моделі під дна ванни та руху платформи, а саме:

- відстань підйому платформи дна ванни «Bottom Lift Distance»;
- відстань підйому платформи між експонуванням шарів моделі «Lifting Distance»;
- швидкість підйому платформи від дна ванни «Bottom lift Speed»;
- швидкість підйому платформи між експонуванням шарів моделі «Lifting Speed»;
- швидкість занурення платформи на дно ванни «Bottom Retract Speed»;
- швидкість переміщення платформи на поверхні фотополімеру «Retract Speed».

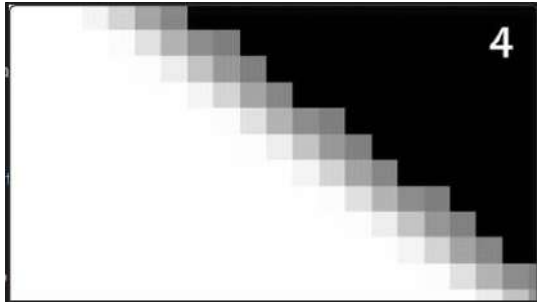
Також є окремі налаштування ступінчатості моделі в кладці «Advance». За допомогою параметру Згладжування «Anti-aliasing», можливо згладжувати контури моделі, тим саме зменшуючи зернистість поверхні. Принцип роботи цього інструменту полягає в тому що, деякі пікселі екрану по краю контуру моделі, стають напів прозорими і через них проходить випромінювання УФ-лампи частково з меншою потужністю. Фотополімер в подібних ділянках також частково затвердіває та згладжують контур моделі.

Згладжування «Anti-aliasing», має три режими налаштувань:

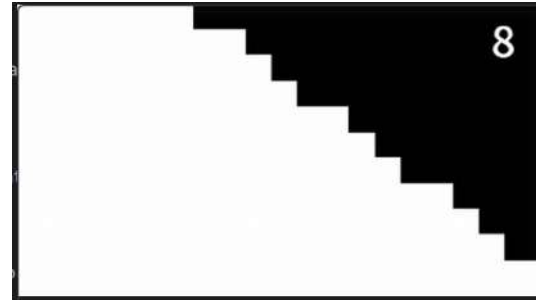
- немає згладжування моделі «None»;
- рівень відтінків сірого «Gray Scale Level», рис. 1.43 а;
- рівень згладжування «Anti-aliasing Level», рис. 1.43 б.



а)



б)



а – налаштування «Gray Scale Level»; б – налаштування «Anti-aliasing Level».

Рисунок 1.43 – Інструменти згладжування «Anti-aliasing»

Після всіх налаштувань друку генерується G-код для друку моделі рис. 1.44.

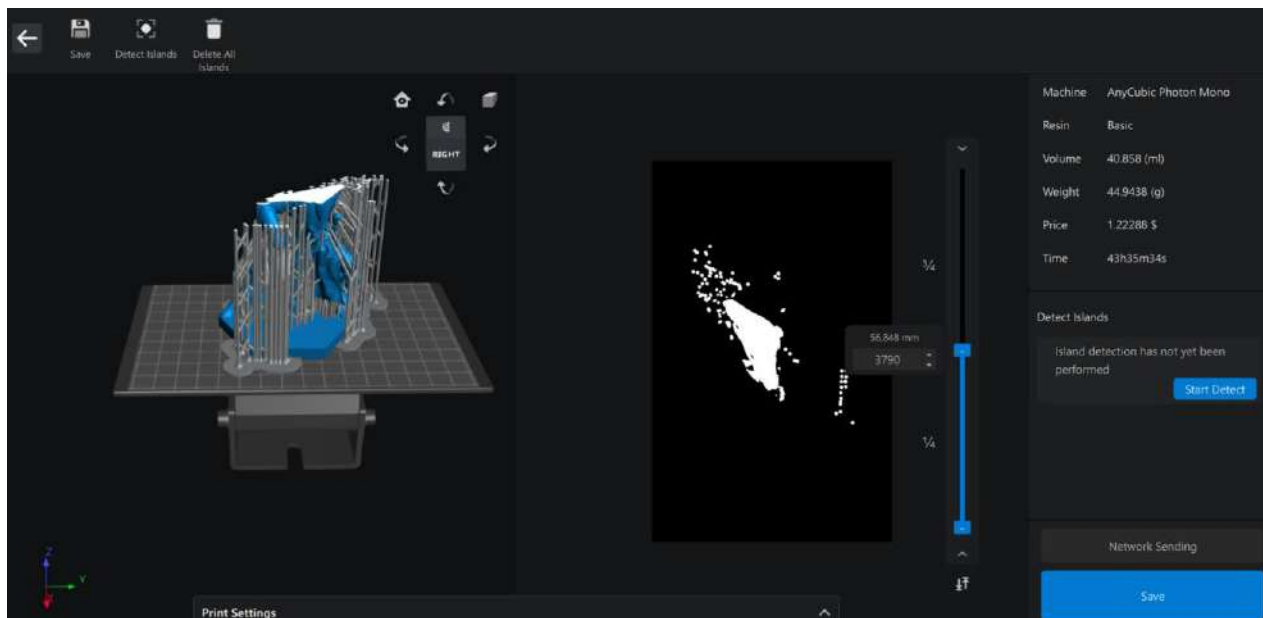


Рисунок 1.44 – Готова модель для друку

1.8 Постобробка деталей, виготовлених за допомогою фотополімерного друку

Процес друку моделі не є кінцевим технологічним етапом отримання деталі. Зняті з друку деталі потребують постобробки, через те, що деталь, яка надрукувалася має неповну полімеризацію, яка лише створює форму деталі і надає їй базової міцності. Також неповна полімеризація забезпечує відділення технологічних підтримок які роблять можливим друк складних деталей, та які при відділенні створюють дефекти на поверхні деталі. Таким чином деталь після друку необхідно відділити від підтримок, очистити від залишків фотополімера та закінчити повну полімеризацію моделі. Таким чином у постобробці є декілька етапів, які необхідно виконати для отримання моделі з кінцевими показниками.

Первинним етапом постобробки надрукованої з фотополімеру деталі, як було сказано вище, є очищення залишків недополімеризованої смоли з поверхні виробу. Так як в складках і порожнинах залишається багато смоли, яка може не витікати, після впливу УФ випромінювання без очистки, неочищена модель буде мати невідповідні вихідні розміри і змінену геометрію, будуть виникати артефакти та потоки фотополімеру, що також змінять шорсткість деталі. Залишки фотополімеру можуть перекривати отвори, що призводить до дефектів та браку.

Особливістю даної операції є те, що фотополімери мають або гігроскопічні властивості, тобто можуть поглинати вологу, або мати гідрофобні властивості, тобто відштовхувати вологу. Ці властивості ускладнюють процес очистки моделі та потребують використання спиртових розчинів або розчинників, що можуть очистити поверхню від фотополімеру.

Ручне очищення є часовитратним процесом, тому для швидкого та якісного очищення поверхні використовують ультразвукові ванни зі спиртовими розчинами.

Ультразвукові ванни забезпечують не тільки велику швидкість очистки від залишків фотополімеру а й збереження витратних матеріалів, таких як спирти або розчинники.

УЗ ванни мають власну технологію очистки, дотримання якої забезпечить якісне очищення моделі без створення дефектів.

Очищення моделі регулюється технологічними параметрами УЗ ванни, такими параметрами є:

- частота ультразвуку, яка може бути в межах від 20 КГц до 1 ГГц;
- вид розчинника, що використовується для очищення;
- температура розчину, яка може бути від 20°C до 80°C;
- час очищення;
- дегазація розчину.

Використання невідповідних технологічних параметрів здатне призвести до утворення на поверхні моделі каверн, дрібні елементи моделі можуть бути знищеними а вихідні розміри можуть бути зміненими.

Для очищення від фотополімеру встановлюються наступні технологічні параметри:

- частота становить 35-40КГц;
- в якості розчинників використовуються мийні засоби та спирти;
- використання підігріву розчину не обов'язково;
- час очищення становить до 2-х годин;
- операція дегазації розчину не є необхідною.

Для очищення фотополімеру на моделі, можливе повторне використання розчинів. Ультразвукова ванна зображена на рис. 1.45.



Рисунок 1.45 – Ультразвуковий очищувач

Наступним етапом постобробки деталі є видаленні підтримок, які є необхідною умовою для друку моделей складної форми.

Підтримки використовуються тоді, коли елементи моделі мають великі кути нахилу відносно платформи, більше 70 градусів. Використання підтримок дозволяють зберігати точні розміри та форму моделі.

В фотополімерному друці підтримки слугують ще для однієї цілі, зменшити площу контакту шару моделі з фторопластовою плівкою дна ванни. Це дає можливість подовжити термін служби користування плівки та зменшити навантаження на модель та на ось Z при відриві деталі.

Основним типом підтримок для фотополімерного друку є так звані деревоподібні підтримки або їх ще називають точковими. Вони дають можливість підтримувати тільки ті елементи, що знаходяться в повітрі. Точкові підтримки зображені на рис. 1.46.

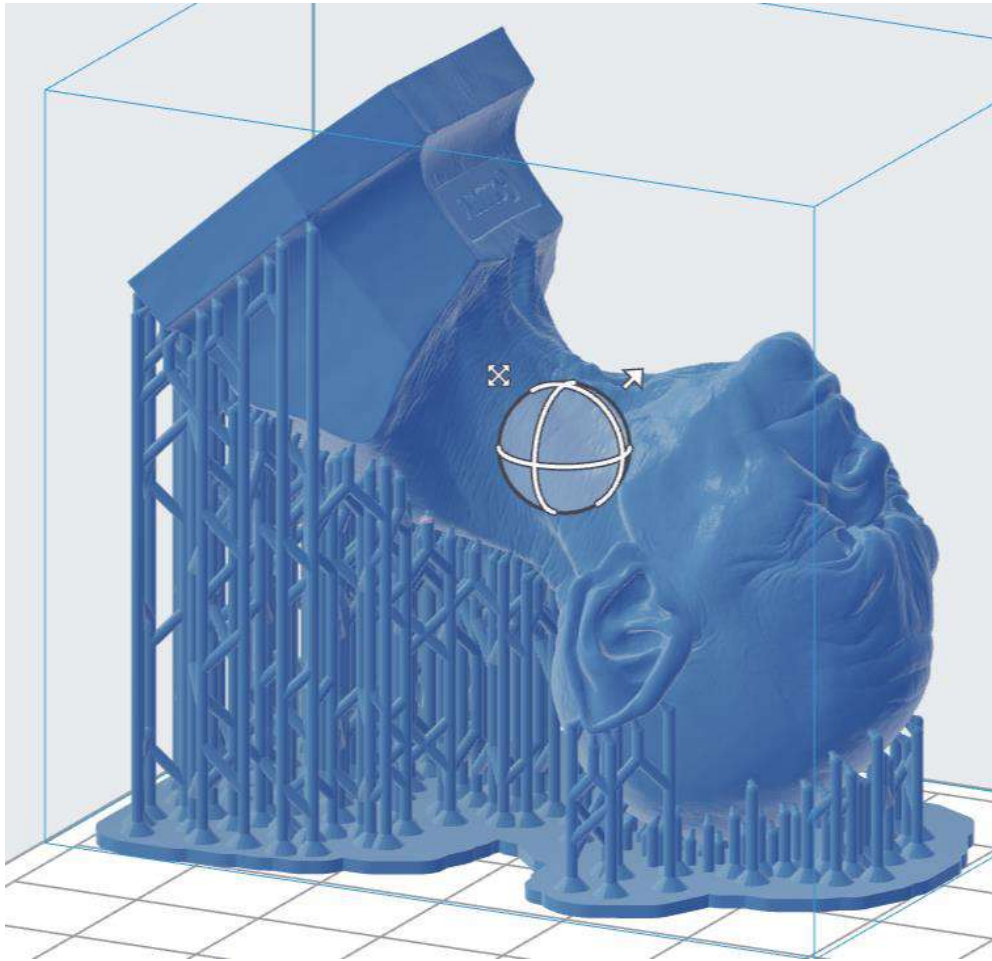


Рисунок 1.46 – Точкові підтримки друкованої моделі

При видаленні таких підтримок залишаються сліди, які необхідно зашліфувати для зберігання гладкості та геометрії поверхні. В залежності від налаштування параметрів підтримок в слайсерах, залишкові сліди можуть мати різні форми, які можуть видалятися зі збереженням розмірів та форми або мати сліди, видалення яких приведе до змін розмірів.

Форма контактів від яких залежать сліди на моделі є декількох видів, в популярному слайсері для фотополімерного друку Lychee Slicer є наступні форми контакту: конус, хрест, куб та сфера.

Форма контакту конусом створює каверни, які далі необхідно зашліфувати або використовувати рідкий фотополімер, щоб загладити ці каверни. Поверхня з використанням форми контакту конус зображена на рис. 1.47.



Рисунок 1.47 – Вигляд поверхні після видалення підтримок

Форма контакту сфера створює виступи, які видаляються шліфуванням. Ця форма контакту є більш кращою. Форма контакту сфера зображена на рис. 1.48.



Рисунок 1.48 – Форма контакту сфера

Перевагою таких підтримок є:

- низька площа адгезії до ванни кожної гілки підтримок;
- низькі витрати матеріалу;

- легке видалення підтримок від моделі;
- мінімальна постобробка після видалення підтримок.

Недоліками таких підтримок є:

- невелика міцність таких підтримок. Неправильно встановлені підтримки і неправильне визначення їх кількості може призвести до відриву моделі від підтримок і великої адгезії до ванни, рис. 1.49.

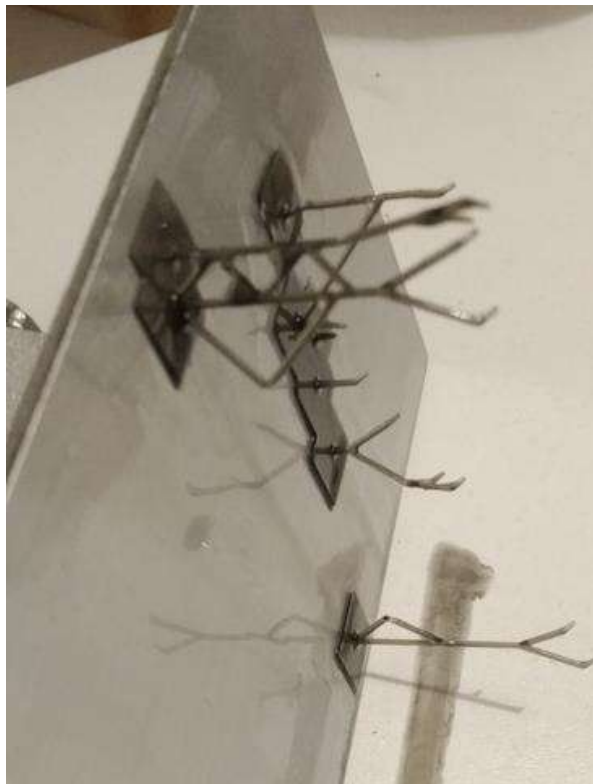


Рисунок 1.49 – Залишки підтримок з відірваною моделлю

Однак на сьогодні, окрім точкових підтримок для фотополімерного друку альтернатив немає. Тому існує необхідність пристосовуватися до умов використання лише точкових підтримок.

Після очистки виробу від залишкового фотополімеру та видаленні підтримок, виріб засвітлюється УФ випромінюванням, яке остаточно полімеризує виріб та надає йому кінцеві фізичні характеристики, це є третім етапом постобробки, після чого модель набуває фізичних властивостей та стає придатною для використання. Рекомендований час засвітлення зазвичай

становить від 20 хвилин до години. Камера постполімеризації зображена на рис. 1.50.



Рисунок 1.50 – Камера УФ полімеризації

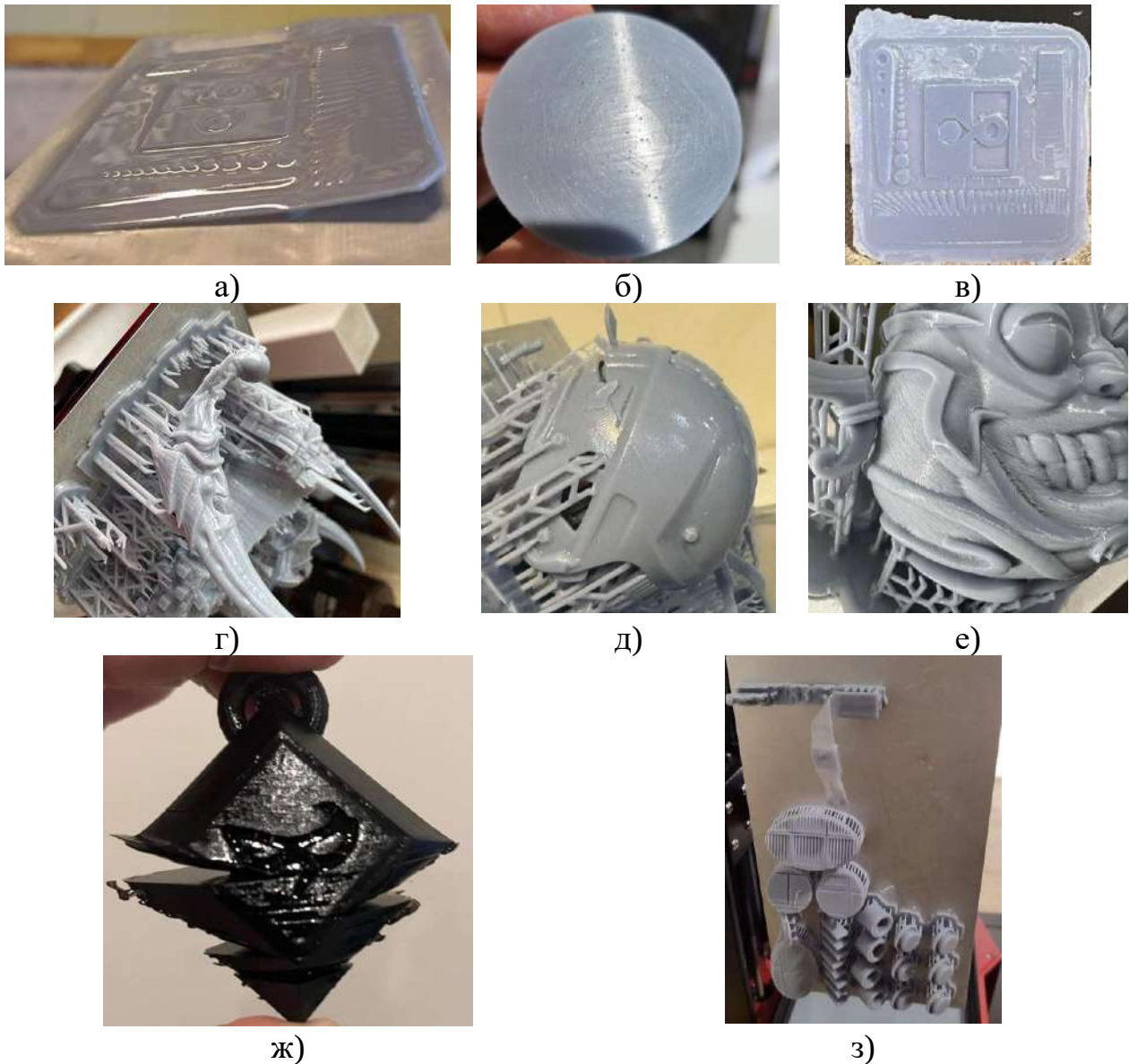
В якості дозасвітлення необхідно використовувати УФ лампи з діапазоном 395-405 нм, що відповідає характеристикам фотополімеру, використання інших спектрів не є ефективними, збільшуючи час дозасвітлення а при тривалому використанні ще й руйнує модель. Час дозасвітлення залежить від фотополімеру та необхідних умов використання.

При відсутності підтримок можливе поєднання дозасвітлення та ультразвукового очищення, що при меншому часі процесу дасть такий самий результат як і окремі операції.

В результаті аналізу технології постобробки можливо зробити висновок, що існує 3 типових етапи постобробки: ультразвукова очистка в спиртових розчинах, видалення підтримок з подальшим відновленням геометрії моделі та дозасвітлення в камері з УФ випромінюванням для отримання відповідних фізичних властивостей. Після виконання цих етапів постобробки, друкована модель стає готовою до прямого використання по призначенню.

1.9 Дефекти фотополімерного 3D-друку

І хоча процес виготовлення фотополімерних виробів по своїй суті доволі не складний та послідовний, як і в будь якому технологічному процесі можлива поява дефектів та браку виробу. На рис. 1.51, наведені основні дефекти друку [36].



- а – відлипання зразка від платформи; б – бульбашки на поверхні моделі;
 в – вдавлювання моделі в дно ванни; г – не до друк елементів;
 д – ступінчастість шарів; е – напливи шарів; ж – відшарування шарів;
 з – недостатній час експонування шару.

Рисунок 1.51 – Дефекте та брак під час фотополімерного 3D друку

Причин виникнення подібних дефектів на виробах доволі багато, але можна систематизувати наступні чинником.

Брак фотополімеру. Даний фактор може викликати наступні дефекти: не прилипання до платформи; збільшення часу експонування шару; погана адгезія між шарами моделі.

Вихід з ладу компонентів принтеру. Даний фактор, є доволі обширний і залежить від того, який саме компонент вийшов з ладу та яка технологія фотополімерного друку. В цілому їх можна поділити на вихід з ладу електронних компонентів та знос механічних компонентів верстату.

Наприклад до виходу з ладу електронних компонентів, можна віднести: часткове вигорання діодів на УФ-матриці; вигорання лампи DLP-проектора; виходу з ладу сканаторної системи в SLA принтерах, може призвести до відсутності полімеризації шарів моделі, збільшення часу експонування шару, або утворенню артефактів на поверхні моделі.

В LCD технології утворення дефектів моделі наряду залежить від якості та стану LCD-екрану, поява битих пікселів наряду впливе на деталізацію моделі та утворення паразитного засвічування моделі або утворенню раковин на моделі. Також як приклад невірна робота крокового двигуна підняття платформи, що може призвести наливання шарів моделі або в загалі відсутності шарів.

До виходу з ладу механічних компонентів можна навести: пошкодження плівки дна ванни (може виникати у всіх фотополімерних принтерах крім принтерах за технологією SLA «зверху вниз»); пошкодження платформи для друку; пошкодження ходового гвинта платформи та знос валів та лінійних підшипників. Всі ці чинники можуть впливати як і на адгезію, зміщення та наливання шарів моделі.

Помилки налаштування верстату і смоли перед друком. На відміно від попередніх від фактори, є доволі легко визначним, бо основиною підготовкою принтера до друку це налаштування зазору між плівкою дна фотополімерної

ванни та платформи для друку (цей зазор повинен бути дорівнювати висоті шару моделі) та виставлення платформи паралельно відносно дна фотополімерної ванни. Принципи налаштування платформ у більшості виробників фотополімерних принтерів, що за SLA, DLP та LCD технологіями є однаковими та простими, з допомогою регулювальних гвинтів платформи.

Також до базової підготовки принтера до друку, можна віднести натяг плівки дна ванни (Це налаштування є одним з головних для всіх фотополімерних принтерів за технологією побудови моделі «знизу верх»), бо якщо плівка натягнута не рівномірно і має провисання та це може причинити відсутність прилипання моделі до платформи або утворенню дефектів базових шарів.

До підготовки фотополімеру до друку є менше вимог, а саме: чистота фотополімерної ванни; відсутність бульбашок у фотополімерній смолі; кімнатна температура смоли 20-22°C перед початком друку. Від цього залежить адгезія шарів та утворення раковин на поверхні моделі.

Невірне налаштування параметрів друку моделі. Ця категорія є одною з найважливіших, бо через невірне вказання параметрів друку найбільша вірогідність утворення дефектів та браку моделі. Також на налаштування параметрів друку моделі впливають такі чинники, як [24, 38]:

- особливості геометрії моделі. Чим більше навісних елементів формі виробу тим більша необхідність створювати додаткових опор (підтримки) для навісних елементів. Також дуже важливе розташування моделі на платформі та кут нависання елементів;

- особливості фотополімерної смоли. У кожної фотополімерної смоли є свої регламентовані значення часу експонування базових та основних шарів, висоти шарів, дожини хвилі полімеризації фотополімеру;

- особливості технології фотополімерного друку. У кожній технології фотополімерного 3D-друку різне джерело для експонування шару та різний метод побудови шару, тому і параметри налаштування шару можуть бути різними.

Наприклад, якщо в DLP та LCD технології експонується весь переріз шару одночасно і необхідно тільки вказати час експонування базових та основних шарів, то в SLA технології, лазерний промінь проходить про всьому контуру перерізу шару моделі поступово, тому необхідно вказувати швидкість проходження лазерного проміння.

Всі ці особливості напряду впливають на якість моделі та успішність її побудови.

Якщо взяти до уваги тільки ті параметри друку які напряду можуть впливати на збереження геометричних розмірів моделі, адгезію шарів та утворення дефектів на поверхні, то до них входять:

- час експонування базових та основних шарів, с;
- висота шару, мкм;
- інтенсивність випромінювання, Лм.

Як можна судити причиною утворення дефектів є доволі багато і читко провести градацію доволі складно, бо на появу одного виду дефекту, можуть впливати один або декілька факторів.

Чіткої статистики немає, є тільки суб'єктивні спостереження. За два роки роботи та обслуговування п'яти принтерів за LCD-технологією фірми Anycubic Photon, було приблизно до 300 дефектів та браку друку 114 тестових зразків. Причиною появи яких з де більшого було невірне налаштування моделі. На рис. 1.52, наведена діаграма розподілу причин дефектів друку моделі, на принтерах Anycubic Photon.

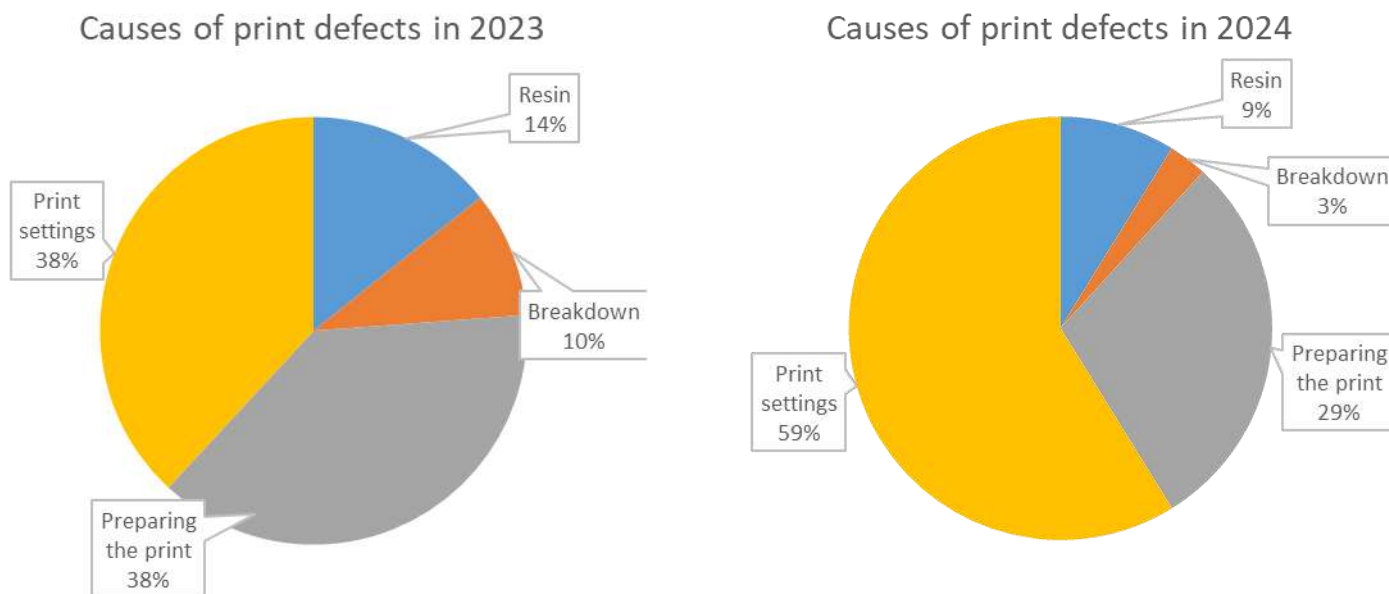


Рисунок 1.52 – Процентне відношення появи дефектів друку моделі

Слід зазначити що даний розподіл є доволі суб'єктивним і не може чітко судити про всю технологію LCD-друку або про фотополімерні принтери Anycubic Photon. То того ж більшість дефектів та відсоток браку наявний в перший рік друку, тому більшість проблеми другу пов'язані з базовою підготовкою до друку, налаштування параметрів друку, обслуговуванням верстату та фотополімерною смолою. У другий рік розподіл появи дефектів змінився, і відсоток дефектів через невірне налаштування параметрів друку виріс.

Тому хоча і дана діаграма базується на власному досвіді автора і має суб'єктивний характер, вона показує тенденцію

1.10 Аналіз якісних показників фотополімерного 3D-друку

На сьогодні використання друкованих деталей можливе лише при відповідності друкованої моделі встановленим показникам якості.

Це можуть бути як фізичні властивості такі як міцність, гнучкість та ін. Але одночасно з цими параметрами є базові параметри, які є однаковими для

всіх друкованих моделей, такими параметрами є відповідність розмірів друкованої моделі та шорсткість [34].

Відповідність розмірів це відношення розмірів, що встановлюються при проектуванні виробу до розмірів, що були отримані в результаті друку. Тобто відношення номінального розміру до отриманого. Відхилення розмірів призводить до зміни геометрії отриманої деталі що впливає на спроможність деталі виконувати задане призначення.

Відхилення розмірів, це сукупність факторів, що впливають на отримувані розміри. Кожний фактор може впливати на відхилення від площинності або від циліндричності, прямолінійності, округлості та інших видів відхилень. Фактори, що впливають на кінцеві розміри можуть залежати від конструкції принтера, використання комплектуючих, властивостей фотополімеру, налаштувань технологічних параметрів.

Шорсткість поверхні є наступним якісним показником, який залежить від багатьох факторів, таких як стабільність технологічних параметрів, відхилення механічної частини. Шорсткість поверхні впливає на надійність виробу, його довговічність. Від величини шорсткості залежать також міцність посадок із натягом, стабільність посадок із зазором та експлуатаційні показники виробу.

Основним технологічним параметром що впливає на шорсткість є розмір шару, час експонування та роздільна здатність зображення шару по осям ХУ.

Конструкційними параметрами, що впливають на шорсткість поверхні є жорсткість конструкції, крок системи лінійного переміщення та тертя лінійних направляючих, потужність та конструкція системи засвітлення, тип використовуваного екрану. Мінімальна роздільна здатність фотополімеру також є фактором, що впливає на отримувану шорсткість деталі.

Першим фактором, що визначає отримувану шорсткість друкованої деталі є жорсткість конструкції принтера. Побудова принтера з низькою жорсткістю конструкції визиває збільшені вібрації, відхилення основних вузлів конструкції та ін. що призводить до зміщення кожного шару моделі що друкується на різні відстані.

Наступним фактором є крок системи переміщення, цей фактор визначає мінімально можливий шар друкованої моделі, який також залежить від електричних компонентів, таких як кроковий двигун та драйвер крокового двигуна. В сукупності ці 3 компоненти встановлюють мінімально можливий шар моделі, який може бути менше 30 мкм.

Потужність та система засвітлення визначає час друку, шорсткість та відхилення розмірів. При перебільшенні потужності або часу експонування починається засвітлення фотополімеру за межами встановленого профілю шару, що також може називатися паразитним засвітленням. Також паразитне засвітлення може виникати при відсутності паралельності УФ випромінювання.

Використовуваний екран встановлює роздільну здатність моделі по осям ХУ, зі зменшенням пікселю екрану зменшується шорсткість моделі та більша відповідність розмірів до запланованих.

1.11 Аналіз технологічних параметрів фотополімерного друку та їх вплив на якісні показники

Одним з переваг фотополімерного друку є його висока точність, в порівнянні з іншими технологіями. Точність виробництва деталей забезпечується двома факторами, першим фактором є використання високоточних компонентів у побудові фотополімерних принтерів, іншим фактором є налаштування технологічних параметрів, які забезпечують збереження та відповідність встановленим якісним показникам, що висуваються до деталі. Налаштування технологічних параметрів забезпечує в собі поєднання впливу на друк як електричних компонентів так і впливу матеріалів. Неправильне налаштування одного технологічного параметра може призвести до виникнення дефектів. Кожний отриманий дефект свідчить про відхилення окремого технологічного параметра або декількох параметрів від еталонних показників, призводячи до створення браку.

Визначення технологічних параметрів є першочерговою задачею керування технологічним процесом фотополімерного друку, після вирішення якої на якісні показники буде впливати лише якість підготовки моделі до друку. Як було сказано раніше, параметри друку на фотополімерному принтері залежать від двох факторів, які між собою є взаємопов'язаними [32]:

- конструкція фотополімерного принтера;
- фізико-хімічні властивості фотополімерів.

Першим основним параметром, на який впливає як конструкція принтера так і властивості є час експонування. Він ділиться на два параметра, першим із яких є час експонування базових шарів, другим є експонування основних шарів.

Параметр базових шарів відповідає за адгезію моделі до платформи принтера.

Адгезія це процес зчеплення різнорідних або однорідних матеріалів між собою. В процесі адгезії рідкий пластик утворює між поверхнею та пластиком водневі зв'язки, виникає дифузія макромолекул з пластика в поверхню та затікання пластику у макротріщини або у мікропори поверхні. Міцність зчеплення залежить від властивостей матеріалу, форми контакту, рельєфу та шорсткості поверхонь та таких параметрів як тиск, температура та ін.

Основні шари моделі мають кращу адгезію між собою, так як зчеплення виконується між шарами одного матеріалу, тому для їх побудови зазвичай необхідно значно менше часу ніж на базові. В загальному вигляді адгезія фотополімеру між собою в рази краща ніж між фотополімером та металевою пластиною платформи.

На ці параметри впливають системи засвітлення, їх потужність, густина фотополімеру та його забарвлення, через додавання в фотополімер барвників, що може ускладнювати проходження УФ випромінювання.

Для налаштування цих параметрів необхідно експериментально виконати друк декількох тестових моделей, після чого визначити відхилення від встановлених якісних показників та наявність дефектів.

Дефекти, що характерні для параметру часу базових шарів, так звана «слоняча нога», коли існує відхилення до встановлених розмірів лише в базових шарах, рис. 1.53, виникає при перебільшенні часу експонування фотополімеру.



Рисунок 1.53 – Відхилення базових шарів від звичайних

Деламінація між базовими та основними шарами, коли адгезія між фотополімером, що полімеризувався на базових шарах та звичайних є недостатньою і модель в подальшому не прилипає до базових шарів, виникає із-за значно більшим часом експонування базових шарів ніж основних, рис. 1.54.



Рисунок 1.54 – Розшарування між базовими та звичайними шарами

Деламінація від платформи, коли адгезія між базовими шарами та платформою є недостатньою. В подальшому модель залишається у ванній. Виникає із-за недостатнього часу експонування базових шарів, рис. 1.55.



Рисунок 1.55 – Відшарування базових шарів від платформи

Сильна адгезія моделі до платформи після друку, це також є дефектом, що призводить до руйнування поверхні моделі під час зняття її з робочої платформи, частина моделі що знаходиться в контакті з платформою, має більш сильні міжповерхневі зв'язки, які виникають через значне перебільшення часу експонування базових шарів, в результаті чого модель дуже сильно приєднується до платформи.

Дефекти, на які впливає час експонування основних шарів:

– розшарування моделі, виникає через велику вагу моделі та сили відриву від плівки і замалого часу експонування основних шарів, рис. 1.56;



Рисунок 1.56 – Розшарування моделі

– відрив підтримок від моделі, руйнування поверхні моделі, виникає тоді коли існують занадто тонкі елементи та параметр часу експонування основних шарів є недостатнім, рис. 1.57;

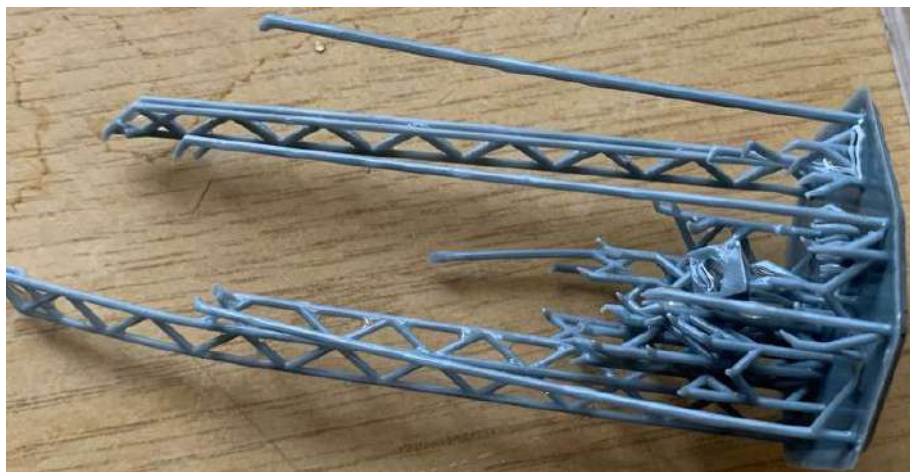


Рисунок 1.57 – Відрив моделі від підтримок

– виникнення дефекту, що виражається у фізичній зміні розмірів. Виникає як при недостатньому часу експонування так і в результаті перебільшення часу експонування основних шарів.

За допомоги експериментальних досліджень визначено залежність відхилення встановлених розмірів від часу експонування, що зведено в табл. 1.6 та 1.7.

Таблиця 1.6 – Залежність відхилення розмірів від часу експонування

Відхилення розмірів, мкм	Товщина мінімального шару, мкм	Час експонування основних шарів
-300	100	7
0	100	8
10	100	9
50	100	10
70	100	11
90	100	12
150	100	13

Для підтвердження результатів проведено повторене дослідження з меншим шаром друку в 50 мкм і зведено в табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Залежність відхилення розмірів від часу експонування

Відхилення розмірів, мкм	Товщина мінімального шару, мкм	Час експонування основних шарів
-100	50	7
30	50	8
10	50	9
50	50	10
60	50	11
880	50	12
100	50	13

Наступним технологічним параметром є кількість базових шарів, цей параметр одночасно з часом експонування базових шарів використовується для покращення адгезії з робочою платформою. Через відсутність базових шарів і хімічних властивостей фотополімера, який має меншу адгезію до металевої платформи ніж до дна ванни, модель буде залишатись у ванні. Велика кількість базових шарів із-за більшої полімеризації, яка змінює фізико-хімічну структуру фотополімеру, приведе до зменшення адгезії базових шарів до звичайних.

Так як в фотополімерні принтери за технологією LCD мають в своїй конструкції плівку в якості дна ванни, яка може розтягуватися та не має перемішувача фотополімера в процесі друку після засвітлення кожного шару

платформа підіймається на деяку відстань, після чого опускається на наступне положення. Це слугує одночасно для перемішування фотополімеру, заповнення ним всього простору ванни після полімеризації попереднього шару та для відриву деталі що друкується від плівки. Так як адгезія виникає не тільки між шарами полімерізованого фотополімеру та платформою а ще й між дном ємності та моделлю.

Основною причиною неможливості використання великого розміру ванни в технології LCD одночасно зі складністю виготовлення великих розмірів LCD екранів з великою роздільною здатністю є наявність прозорого дна ванни, яке повинно мати дуже низьку адгезію з фотополімером. Використання матеріалів, що не відповідають вимогам призводить до руйнування дна ванни та неможливістю друку моделей взагалі. Використання ж плівки великих розмірів призводить до збільшення навантаження на екран, що може призвести до його руйнування та розтягування плівки на велику відстань, з можливим подальшим її руйнуванням.

Таким чином переміщення виконується за допомоги двигунів і керується ПЗ, яке регулює висоту перемішування та його швидкість, що залежить від ступеня натягнення плівки та площі поперечного перерізу шару. При висоті перемішування, яка менше висоти, на яку розтягується плівка, друкована деталь в процесі друку перестає будуватися та залишається на платформі, що можна побачити на рис. 1.58.



Рисунок 1.58 – Залишки моделі на плівці

Швидкість перемішування визначається густиною фотополімеру. Занадто швидке переміщення може призвести до відриву тонких елементів від моделі та потрапляння їх у рідкий фотополімер, що призведе до дефектів на поверхні моделі або навіть до руйнування екрану з плівкою.

Товщина шару – технологічний параметр, що визначає шорсткість поверхні моделі та її вертикальну роздільну здатність. Чим менше розмір шару моделі, тим гладкіша поверхня моделі і тим краще будуть відтворені елементи на вертикальних поверхнях.

Цей параметр залежить одночасно від конструкційної особливості будови принтера та від властивостей фотополімеру, так як мінімальний розмір шару залежить від роздільної здатності принтера по осі Z, яка може становити від 10 мкм. Одночасно деякі фотополімери із-за своєї густини не мають можливості друкуватися на розмірах 10 мкм і мають встановлені мінімальні товщини від 30 або 50 мкм. Товщина шару впливає на інший технологічний параметр – час експонування. Для експонування шарів з товщиною 30 мкм та 100 мкм необхідно різний час експонування.

Також товщина шару напряду впливає на час друку моделі та займає собою 70% робочого процесу друку. Інші 30% займають собою переміщення платформи, перемішування та технологічні паузи, що слугують для охолодження світлодіодної матриці та екрану. Зменшення розмірів шару призводить до збільшення кількості робочих циклів, що включають в себе перемішування та паузи, тим самим друк деталі зі шаром 50 мкм буде в два рази довше ніж друк моделі з шаром 100 мкм. Одночасно з цим менша товщина шару потребує зменшення часу експонування, щоб не допустити перезасвітлення кожного шару і збільшення відхилення вихідних розмірів.

Параметр товщина шару ділиться на два технологічних параметра, що налаштовуються в слайсері: товщина базових шарів та товщина основних шарів.

Товщина базових шарів відповідають за краще зчеплення з платформою. Його можливий основний дефект, що утворюються при перебільшенні часу експонування, це зміна розмірів базових шарів відносно основних.

Для нівелювання дефекту в сучасних слайсерах є додаткова функція яка має назву Tolerance Compensation, рис 1.59.

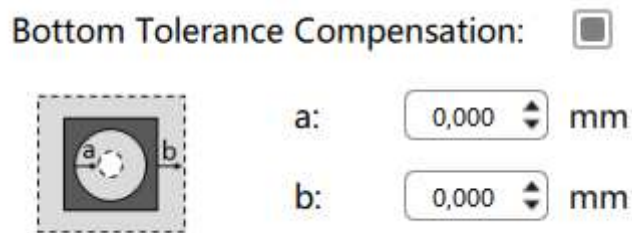


Рисунок 1.59 – Налаштування Bottom Tolerance Compensation

Або ще має назву Elephant Foot Compensation в NanoDLP, рис. 1.60. Всі ці інструменти змінюють розміри перших шарів на заданий процент або на зовнішній та внутрішній розмір у мм, для того щоб нівелювати зміну розмірів.

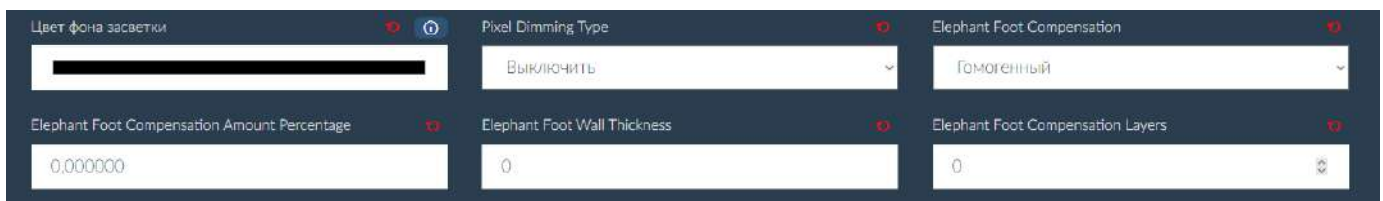


Рисунок 1.60 – Налаштування компенсації перших шарів у ПЗ NanoDLP

Таким чином основні дефекти, які можна отримати під час друку є:

- збільшення розмірів базових шарів в порівнянні зі звичайними;
- непродруковані тонкі елементи;
- зміна геометрії деталі;
- під час друку друковані моделі залишаються на дні ванни;
- дефекти зовнішньої поверхні.

2 ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДРУКУ НА ДЕФЕКТИ ТА ВІДХИЛЕННЯ РОЗМІРІВ МОДЕЛІ

2.1 Факторний аналіз фотополімерних смол

Першим етапом у проведенні подальших досліджень впливу параметрів експонування на появу дефектів друку та відхилення геометричних розмірів 3D-моделі є визначення конкретних фотополімерних смол, які будуть використовуватися для створення виробів. Метою даного етапу досліджень є визначення, які фотополімерні смоли будуть більш доцільні для виготовлення деталей.

Існують різноманітні типи фотополімерних смол, які використовуються для технології 3D-друку. Ось деякі з них: стандартні фотополімери; силіконові фотополімери; фотополімери високої температури; фотополімери для медичних застосувань; кольорові фотополімери; фотополімери для високошвидкісного друку; біорезорбовані фотополімери.

Розглянемо дев'ять стандартних марок фотополімерних смол, які найчастіше використовуються у фотополімерному 3D-друці. Для проведення факторного аналізу були обрані певні параметри для кожної марки смоли з відповідними характеристиками, як вказано у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Марки та характеристики фотополімерних смол

№	Назва смоли	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
1	Anycubic 405nm UV [43]	405	405	2,76	3,54	5	15	35	1600
2	Plexiwire Resin Basic [44]	405	450	3,04	3,82	7	20	35	1800

Продовження табл. 2.1 – Марки та характеристики фотополімерних смол

3	MonoFilament Basic [45]	405	450	2,37	4,22	7	25	35	1600
4	FunToDo [46]	225	415	1,27	2,43	6	17	20	2600
5	Wanhao Castable [47]	395	420	1,16	1,16	8	15	35	2600
6	BlueCast CR3A [48]	400	410	3,74	4,82	4	9	10	1800
7	Elegoo 3D [49]	385	450	5,37	5,74	3	10	35	1600
8	Weistek [50]	385	410	2,38	3,02	7	15	50	1800
9	Tevo [51]	380	420	3,53	4,22	8	12	50	2400

Факторний аналіз дозволяє скоротити обсяг вибірки, особливо коли об'єкт описується численними рисами чи характеристиками, які можуть взаємодіяти між собою (зміна однієї характеристики впливає на іншу). Факторний аналіз допомагає виконати зведення всіх цих характеристик та рис до меншої кількості, при цьому не порушуючи дані для подальшого аналізу [52 – 54]. Вибірка включає 9 фотополімерних смол та вісім параметрів, які характеризують певний тип смоли.

У налаштуваннях вказується розрахунок (KMO and Bartlett's test of sphericity), критерій сферичності. Це необхідно для того, щоб визначити, наскільки вдалим буде використання отриманих результатів у подальшому аналізі. Значення цього показника повинно перевищувати 0,5.

Також вибираємо метод (Varimax) для проведення факторного аналізу. У ході цього процесу здійснюються низка кореляційних аналізів з метою визначення взаємовпливу між змінними. Обраний метод спрощує та прискорює цей процес.

Встановлюємо меню (Factor Scores) у боці Regression з метою врахування змін факторного аналізу, які визначають можливість класифікації отриманих фотополімерних смол. Для виключення малозначущих факторів з низьким рівнем кореляції встановлюємо значення 0,5 в налаштуваннях. Значення

кореляції менше даного порогу вважається незначущим.

Після цього отримуємо результати розрахунків. Оцінюємо міру адекватності та критерій Бартлетта (KMO and Bartlett's test of sphericity), спостерігаємо значення 0,685. Це значення перевищує 0,5, що свідчить про успішність факторного аналізу, як показано на рис. 2.1 а. Інша таблиця, яка необхідна – це таблиця перевернутих матриць компонентів (Component Matrixa), рис. 2.1 б.

KMO and Bartlett's Test

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		,685
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	82,341
	df	28
	Sig.	,000

a)

Component Matrix^a

	Component		
	1	2	3
Max. Коефіцієнт усадки, %	,951		
Min. Коефіцієнт усадки, %	,943		
Інтенсивність випромінювання, Лм	-,775		
Час засвітлено шару, с	-,755	,540	
Час засвітлено базових шарів, с		,693	-,564
Товщина шару, мкм		,662	,602
Max. Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм		,609	
Min. Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	,501	,535	

Extraction Method: Principal Component Analysis.

a. 3 components extracted.

б)

а – міра адекватності та критерій Бартлетта; б – матриця перевернутих компонентів.

Рисунок 2.1 – Факторний аналіз

Початкові вісім характеристик у даній моделі розподілилися на три макрорефактори, і їхні взаємні кореляції виглядають наступним чином:

- максимальний коефіцієнт усадки має значущу кореляцію з першим фактором на рівні 0,951;
- час засвітлення шару одночасно корелює з першим фактором на рівні - 0,755 (значуща кореляція) та з другим фактором на рівні 0,54 (слабка кореляція).

Аналізуючи результати на рис. 2.1 б, можна відзначити, що в перший макрорефактор входять: максимальний діапазон довжини хвилі полімеризації; мінімальний коефіцієнт усадки; інтенсивність випромінювання; час засвітлення шару; мінімальний діапазон довжини хвилі полімеризації.

Це виглядає логічно та взаємопов'язано, оскільки:

- усадка може залежати від тривалості експонування шару, оскільки зменшення часу експозиції призводить до збільшення відсотку усадки від загального об'єму шару. Це пояснюється тим, що недостатня полімеризація шару зробить його більш схильним до усадки друкованого шару;
- мінімальний діапазон довжини хвилі полімеризації та інтенсивність випромінювання також можуть впливати на усадку, залежно від хімічних властивостей смоли.

До другого макрорефактора потрапили, наступні параметри: час засвітлено шару; час засвітлено базових шарів; товщина шару; максимальний діапазон довжини хвилі полімеризації; мінімальний діапазон довжини хвилі полімеризації.

Залежність цих параметрів також можливо пояснити:

- тривалість експозиції для основних та базових шарів може впливати на товщину шару, оскільки збільшення часу експонування збільшує ризик виникнення надмірного засвітлення шарів.
- довжина хвилі полімеризації також впливає на товщину шару, оскільки може виникати залежність від хімічних властивостей смоли. Зі збільшенням довжини хвилі рекомендована висота шару також зростає, як показано в

рис. 2.1 б.

До третього макроектора увійшли час експонування базових шарів та товщина шару. Кореляція тут пояснюється тим, що зі збільшенням висоти базових шарів менше часу експозиції потрібно для затвердіння бази. Для зручності подальшої оцінки фотополімерних смол перейменуємо отримані нові змінні: FAC1_1 – «Показники усадки»; FAC2_1 – «Час експонування та висота шару»; FAC3_1 – «Показники адгезії перших шарів».

Для того, щоб було зручно працювати далі, необхідно привести дані значення в нормальний стан. Для цього всі значення факторів необхідно розділити на три рівних проміжки (зробити ранжування ряду). Це дозволить описати значення за допомогою балів (1 – низький, 2 – середній; 3 – високий рівень) [54]. Якщо підставити ці значення під конкретну марку смоли, то отримуємо оцінку за трьома показниками, табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати оцінювання фотополімерних смол

№	Марка смоли	Показники оцінки			Середній бал
		Показники усадки	Час експонування та висота шару	Показники адгезії перших шарів	
1	Anycubic 405nm UV	3	1	2	2
2	Plexiwire Resin Basic	2	3	2	2,3
3	MonoFilament Basic	2	3	2	2,3
4	FunToDo	1	3	1	1,6
5	Wanhao Castable	1	2	3	2
6	BlueCast CR3A	3	1	1	1,6
7	Elegoo 3D	3	2	1	2
8	Weistek	1	2	3	2
9	Tevo	2	1	3	2

Виходячи з результатів, для подальшого проведення досліджень найкращими марками фотополімерних смол виявилися Plexiwire Resin Basic та

MonoFilament Basic. Ці смоли будуть використовуватися для створення тестових зразків.

2.2 Дослідження впливу параметрів друку на відхилення геометричних розмірів та появу поверхневих дефектів моделі

Для проведення досліджень впливу параметрів друку на відхилення геометричних розмірів та появу поверхневих дефектів моделі, буде використовуватися 3D модель куба з розмірами $20 \times 20 \times 5$ мм, рис. 2.2.

В якості програми для підготовки моделі до фотополімерного друку, буде використовуватися програма «Слайсер» ChituBox. Для виготовлення зразків використана фотополімерна смола Plexiwire Resin Basic Orange Transparent, обрана через її високі механічні і технологічні параметри малий час експонування та мінімальна можливо товщина шару.

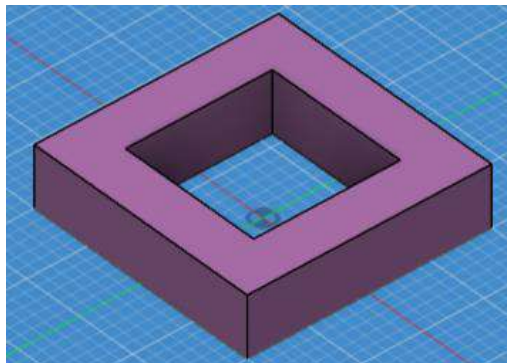


Рисунок 2.2 – 3D Модель для проведення досліджень

Для перевірки даних припущень були проведені 112 вимірювань відхилення отриманих загальних габаритних розмірів тестового зразка. Побудована модель лінійної регресії з урахуванням наступних параметрів:

- тривалість засвічення смоли від 7 с до 20 с;
- інтенсивність випромінювання максимальна 2800 Лм та мінімальна 1600 Лм;
- довжина хвилі випромінювання 405-435 нм;

– товщина базового шару 20 мкм та 50 мкм.

Результати вимірювань наведені в Додатку А. Для більшої наочності та більшого розуміння впливу досліджуваних параметрів на процес друку моделі наведені скорочені результати в діапазоні часу експонування від 7 с до 11 с наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Середні значення відхилень розмірів моделі за різних значень параметрів експонування

Довжина хвилі випромінювання 405 нм			
Інтенсивність випромінювання 1600 Лм		Інтенсивність випромінювання 2800 Лм	
Час експонування, с	Відхилення, мм	Час експонування, с	Відхилення, мм
7	+0,084	7	+0,102
8	+0,107	8	+0,129
9	+0,125	9	+0,135
10	+0,137	10	+0,165
11	+0,157	11	+0,17
Товщина шару 20 мкм		Товщина шару 50 мкм	
Час експонування, с	Відхилення, мм	Час експонування, с	Відхилення, мм
7	+0,092	7	+0,102
8	+0,111	8	+0,128
9	+0,122	9	+0,148
10	+0,142	10	+0,162
11	+0,152	11	+0,187
Середнє відхилення за інтенсивності випромінювання 1600 Лм та товщину шару 20 мкм		Середнє відхилення за інтенсивності випромінювання 2800 Лм та товщини шару 50 мкм	
Час експонування, с	Відхилення, мм	Час експонування, с	Відхилення, мм
7	+0,088	7	+0,102
8	+0,109	8	+0,128
9	+0,123	9	+0,141
10	+0,139	10	+0,163
11	+0,155	11	+0,178

Графічний опис залежності відхилень за різних значень параметрів експонування шарів моделі наведено на рис. 2.3.

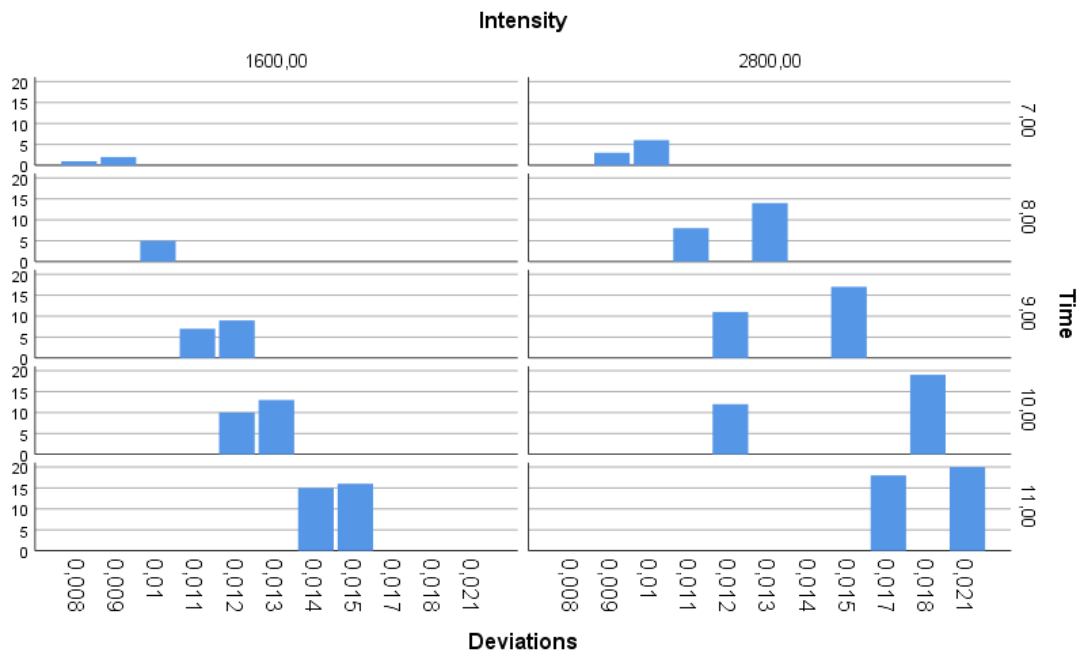


Рисунок 2.3 – Залежності відхилень розмірів провідників від параметрів експонування

Дані відхилення можуть бути пов'язанні з великою тривалістю засвічення фотополімера. Отриманий результат дозволив зробити наступні припущення:

- існує лінійна залежність між тривалістю засвічення та відхиленнями геометричних розмірів моделі. Чим більший час засвічення, тим більше відхилення розміру в сторону збільшення, відповідно за меншого часу засвічення – відхилення менше;

- за низької інтенсивності світлового потоку фотополімерна смола може не завершити процес полімеризації повністю через часткову прозорість екрану-маски, який поглинає частину ультрафіолетового випромінювання. Це впливає на здатність ультрафіолету до взаємодії зі смолою та може призвести до скорочення терміну служби екрану. Внаслідок недостатньої адгезії до заготовки, випромінювання ультрафіолету може залишити полімер у напівполімеризованому стані на плівці під час перенесення топології на заготовку. Це, в свою чергу, може призвести до зменшення терміну служби плівки. Низька інтенсивність світла, в поєднанні зі слабкою адгезією шару до заготовки, може викликати протравлення провідників та зменшення розмірів у напрямку, що менше за початковий;

– чим більша висота базового шару фотополімерної маски, тим більший зазор між екраном і заготовкою. Це може привести до більшої дифракції світлового потоку, відповідно більшого паразитного засвічення шарів моделі.

Зразок отриманої топології наведений на рис. 2.4.

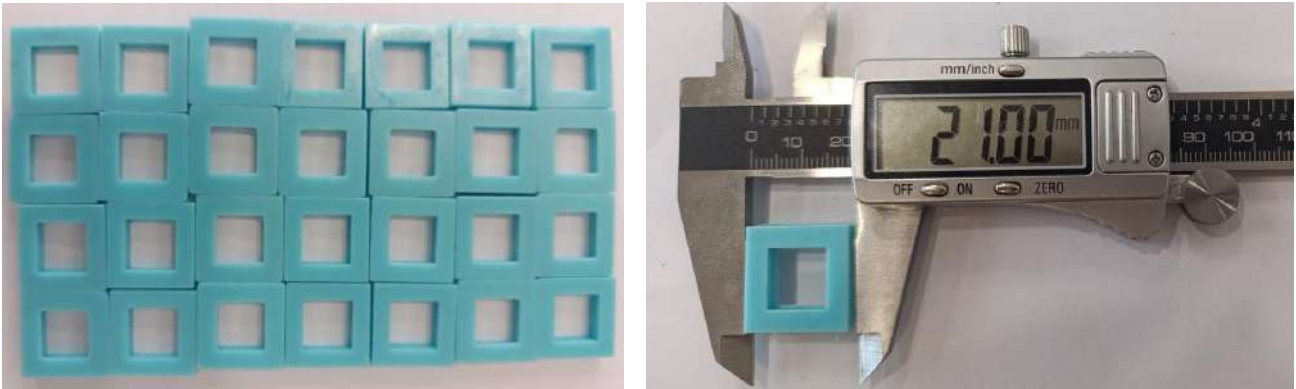


Рисунок 2.4 – Тестові зразки

2.3 Перевірка базових припущень множинної лінійної регресії

Для побудови моделі множинної лінійної регресії необхідно зробити перевірку базових припущень, які підтвердять або спростують адекватність початкових значень для розрахунку та дозволять переконатися, що параметри, які були включені в модель, дійсно впливають на залежну змінну.

Для перевірки базових припущень множинної лінійної регресії необхідно переглянути наступні припущення: відсутність викидів у вимірюваннях; відсутність мультиколінеарності між незалежними змінними; нормальний розподіл залишків; гомоскедастичність дисперсії залишків; лінійність зв'язку [55, 56].

У даній моделі використовується чотири незалежні змінні (час експонування (Time); товщина шару (Thickness); інтенсивність випромінювання (Intensity); довжина хвилі (Wavelength)). Виходячи з правила, що на кожную незалежну змінну мінімальна кількість вимірювань становить 20, то для побудови даної множинної лінійної регресії кількість вимірювань повинна бути

не менше 100 вимірювань. У даному випадку в цій моделі вимірювань 112, Додаток А.

2.3.1 Відсутність похибок у вимірюваннях

Для перевірки наявності викидів необхідно провести діагностику по вимірюваннях (Casewise diagnostics). Це дозволить отримати деякі відомості про похибки. Також необхідно визначити такі змінні, як: відстань Кука (Cook`s); стандартизовані залишки (Standardized); стандартизовані передбачені значення (Predicted Values).

Стандартизовані значення цих величин необхідні для того, щоб побачити чи знаходяться ці значення до діапазону норми. Після налаштувань отримуємо таблицю статистики залишків (Residuals Statistics^a), рис. 2.5.

Residuals Statistics ^a					
	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	,0100125	,0255892	,0178008	,00386310	112
Std. Predicted Value	-2,016	2,016	,000	1,000	112
Standard Error of Predicted Value	,000	,000	,000	,000	112
Adjusted Predicted Value	,0101091	,0255967	,0178070	,00386077	112
Residual	-,00328229	,00228059	,00000000	,00107548	112
Std. Residual	-2,996	2,082	,000	,982	112
Stud. Residual	-3,089	2,146	-,003	1,007	112
Deleted Residual	-,00348782	,00242340	-,00000611	,00113094	112
Stud. Deleted Residual	-3,221	2,184	-,005	1,018	112
Mahal. Distance	2,988	5,550	3,964	,884	112
Cook's Distance	,000	,119	,010	,018	112
Centered Leverage Value	,027	,050	,036	,008	112

a. Dependent Variable: Deviations

Рисунок 2.5 – Статистика залишків

Виходячи з того, що максимальні та мінімальні значення стандартизованих залишків (Std.Residual) та стандартизовані передбачені значення (Std.Predicted Value) не виходять з діапазону ± 3 , що свідчить про відсутність викидів у вимірюванні. Відстань Кука (Cook`s Distance) 0,119, що значно менше одиниці, що теж підтверджує відсутність викидів [57].

2.3.2 Відсутність мультиколінеарності між незалежними змінними

Наступне припущення, яке необхідно перевірити, це наявність мультиколінеарності між незалежними змінними. Для цього треба скористатися описовими статистиками (Descriptives) та діагностикою колінеарності (Collinearity diagnostics). У результаті отримуємо таблицю кореляцій, рис. 2.6.

Correlations						
		Deviations	Time	Thickness	Intensity	Wavelength
Pearson Correlation	Deviations	1,000	,904	,134	,300	,060
	Time	,904	1,000	,000	,000	,000
	Thickness	,134	,000	1,000	,000	,000
	Intensity	,300	,000	,000	1,000	,000
	Wavelength	,060	,000	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Deviations	.	,000	,079	,001	,267
	Time	,000	.	,500	,500	,500
	Thickness	,079	,500	.	,500	,500
	Intensity	,001	,500	,500	.	,500
	Wavelength	,267	,500	,500	,500	.
N	Deviations	112	112	112	112	112
	Time	112	112	112	112	112
	Thickness	112	112	112	112	112
	Intensity	112	112	112	112	112
	Wavelength	112	112	112	112	112

Рисунок 2.6 – Кореляція моделі

Мультиколінеарність – це лінійна залежність між незалежними змінними, тобто між самими предикторами (час експонування (Time); товщина шару (Thickness); інтенсивність випромінювання (Intensity); довжина хвилі (Wavelength)) [55, 56]. Між самими предикторами, залежності не повинно спостерігатися у вимірюваннях, або вона повинна бути мінімальною (менше 0,7). У даній моделі в кореляції Пірсона (Pearson Correlation), між змінними Time, Thickness, Intensity та Wavelength зв'язок дорівнює нулю. Щоб переконатися у відсутності мультиколінеарності, переходимо в таблицю коефіцієнтів регресії (Coefficients), рис. 2.7.

Coefficients ^a								
		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients			Collinearity Statistics	
Model		B	Std. Error	Beta	t	Sig.	Tolerance	VIF
1	(Constant)	-,007	,003		-2,225	,028		
	Time	,001	,000	,904	34,847	,000	1,000	1,000
	Thickness	3,575E-5	,000	,134	5,180	,000	1,000	1,000
	Intensity	1,998E-6	,000	,300	11,581	,000	1,000	1,000
	Wavelength	1,584E-5	,000	,060	2,295	,024	1,000	1,000

a. Dependent Variable: Deviations

Рисунок 2.7 – Коефіцієнти регресії «Coefficients»

Якщо судити за фактором інфляції дисперсії (VIF), який повинен бути менше 5, то у даній моделі показник (VIF) між незалежними змінними дорівнює 1, що піддержує відсутність мультиколінеарності між предикторами.

Показнику допустимості (Tolerance), який дорівнює $1/(VIF)$, повинен бути більше 0,2. Це доля дисперсії самого предиктора, кожного із вказаного, який не може бути отриманий від інших предикторів. У даній моделі він доповнює одиниці у всіх предикторах.

У діагностиці колінеарності (Collinearity Diagnostics^a), при за наближенні власних значень до нуля (Eigenvalue) збільшується показник обумовленості (Condition Index), він повинен бути менше 15, рис. 2.8.

Collinearity Diagnostics ^a								
			Condition Index	Variance Proportions				
Model	Dimension	Eigenvalue		(Constant)	Time	Thickness	Intensity	Wavelength
1	1	4,751	1,000	,00	,00	,01	,00	,00
	2	,136	5,906	,00	,06	,90	,04	,00
	3	,076	7,911	,00	,59	,01	,40	,00
	4	,036	11,465	,01	,34	,09	,55	,01
	5	,001	86,773	,99	,00	,00	,00	,99

a. Dependent Variable: Deviations

Рисунок 2.8 – Діагностика колінеарності «Collinearity Diagnostics^a»

У даному випадку в п'ятому вимірюванні цей показник дорівнює 86,773, що є великою загрозою мультиколінеарності між предикторами. Для того, щоб виправити це, необхідно виключити одну змінну з моделі. Використовуючи

долі дисперсії (Variance Proportions) виключаємо змінну, доля якої більше 0,9. У даному випадку це Wavelength, доля якої дорівнює 0,99. Перебудовуємо модель та отримуємо результати, наведені на рис. 2.9.

Correlations

		Deviations	Time	Thickness	Intensity
Pearson Correlation	Deviations	1,000	,904	,134	,300
	Time	,904	1,000	,000	,000
	Thickness	,134	,000	1,000	,000
	Intensity	,300	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Deviations	.	,000	,079	,001
	Time	,000	.	,500	,500
	Thickness	,079	,500	.	,500
	Intensity	,001	,500	,500	.
N	Deviations	112	112	112	112
	Time	112	112	112	112
	Thickness	112	112	112	112
	Intensity	112	112	112	112

a)

Coefficients^a

		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients			Collinearity Statistics	
Model		B	Std. Error	Beta	t	Sig.	Tolerance	VIF
1	(Constant)	7,533E-5	,001		,128	,898		
	Time	,001	,000	,904	34,178	,000	1,000	1,000
	Thickness	3,575E-5	,000	,134	5,081	,000	1,000	1,000
	Intensity	1,998E-6	,000	,300	11,359	,000	1,000	1,000

a. Dependent Variable: Deviations

б)

Collinearity Diagnostics^a

		Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions			
Model	Dimension			(Constant)	Time	Thickness	Intensity
1	1	3,768	1,000	,00	,01	,01	,00
	2	,133	5,314	,01	,09	,86	,05
	3	,076	7,059	,00	,55	,01	,45
	4	,023	12,762	,99	,36	,12	,50

a. Dependent Variable: Deviations

в)

а – кореляції моделі; б – коефіцієнти регресії;

в – діагностика колінеарності.

Рисунок 2.9 – Результати побудови моделі

У перебудованій моделі всі отримані результати відповідають попереднім правилам. Показник обумовленості (Condition Index) для всіх змінних менше 15. Тепер дана модель повністю відповідає припущенню про відсутність мультиколінеарності між незалежними змінними [57].

2.3.3 Нормальний розподіл залишків

Залишком називається різниця між залежною змінною та передбаченим значенням $\hat{Y}$, через яку проходить лінія регресії. Для перевірки нормального розподілу необхідно побудувати графік розподілу, за допомогою якого можливо побачити, наскільки сильно відхилиться розподіл від теоретичної апроксимованої лінії Гаусса, рис. 2.10.

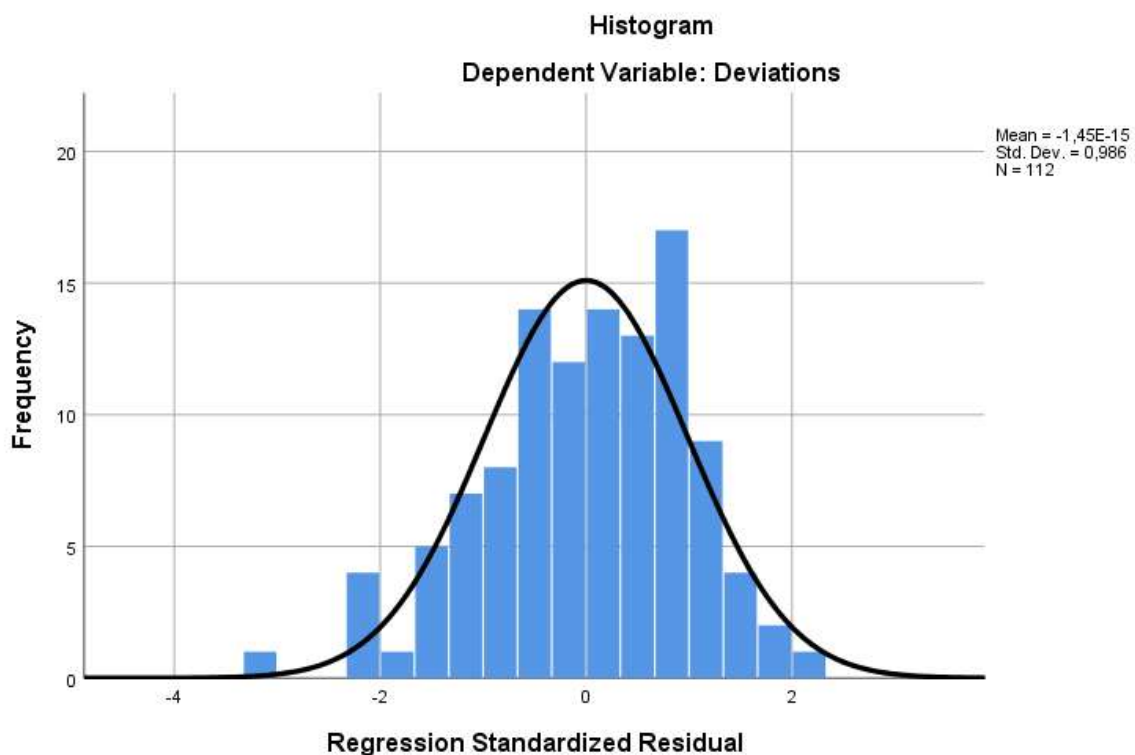


Рисунок 2.10 – Гістограма відхилення розподілу

На графіку ймовірностей, що накопичуються, можливо побачити, чи відхиляються спостереження від теоретичної прямої діагоналі, рис. 2.11.

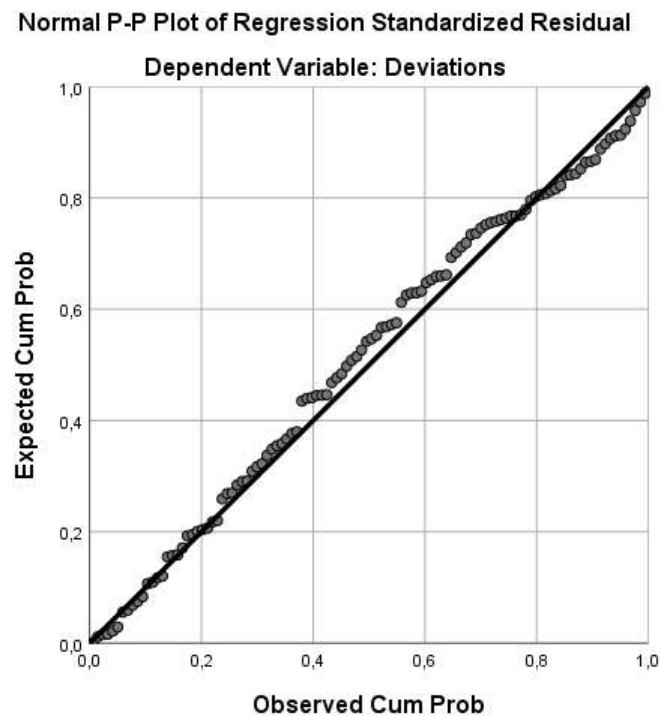


Рисунок 2.11 – Графік спостережень

Для того, щоб оцінити відхилення даних за нормальним розподілом (рисунок 2.10) та відхилення спостережень (рисунок 2.11), необхідно аналітично розглянути ці графіки та оцінити розподіл залишків.

У таблиці критерію нормального розподілу (Tests of Normality), у показниках значимості Kolmogorov-Smirnov та Shapiro-Wilk, значимість (Sig.) повинна бути більше, ніж 0,05, це дає підтвердження правила про нормальність розподілу залишків, рис. 2.12.

Tests of Normality						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Unstandardized Residual	,064	112	,200 [*]	,983	112	,153
Standardized Residual	,064	112	,200 [*]	,983	112	,153

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

Рисунок 2.12 – Таблиця критерію нормального розподілу «Tests of Normality»

У даному випадку значимість стандартизованих (Standardized Residuals) і нестандартизованих залишків (Unstandardized Residuals) за критерієм Kolmogorov-Smirnov складає 0,2, а за критерієм Shapiro-Wilk складає 0,153, що підтверджує нормальний розподіл залишків у моделі.

Якщо побудувати додаткову гістограму стандартизованих значень, можливо порівняти стандартизовану гістограму з першою гістограмою (рис. 2.10) та порівняти стандартні відхилення (Std.Dev.), і можливо переконатися, що вони однакові, та зберігається нормальний розподіл залишків, рис. 2.13.

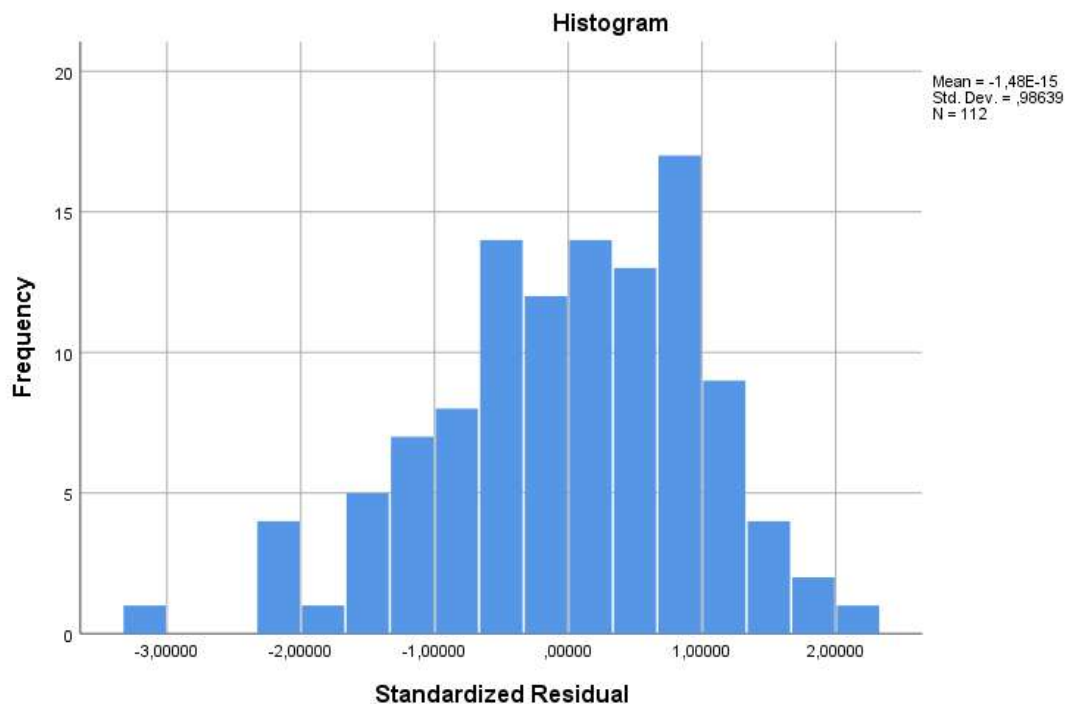


Рисунок 2.13 – Стандартизований залишок

2.3.4 Гомоскедастичність дисперсії залишків

Гомоскедастичність – це постійність дисперсії раптової помилки регресійної моделі [54].

Для перевірки даного припущення графічно обираємо по осі X стандартизовані передбачені значення (*ZPRED), а по осі Y стандартизовані залишки (*ZRESID).

За допомогою отриманого графіку (рис. 2.14) можливо переглянути наявність викидів у моделі, чи виходять значення за межі ± 3 , в даному випадку викидів у моделі немає.

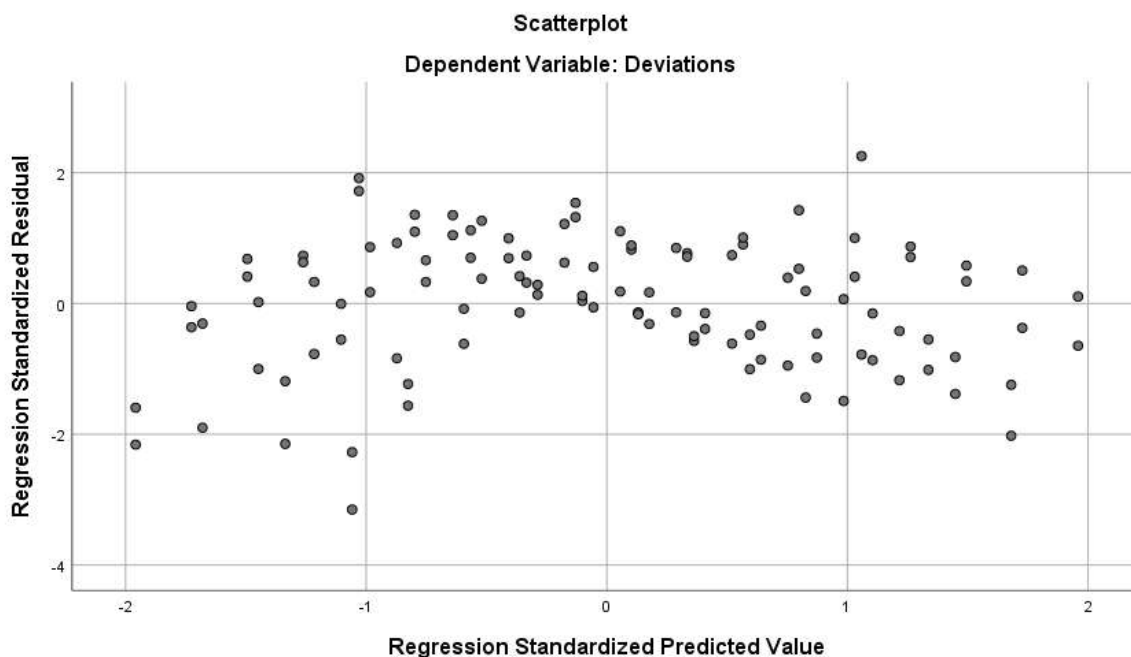
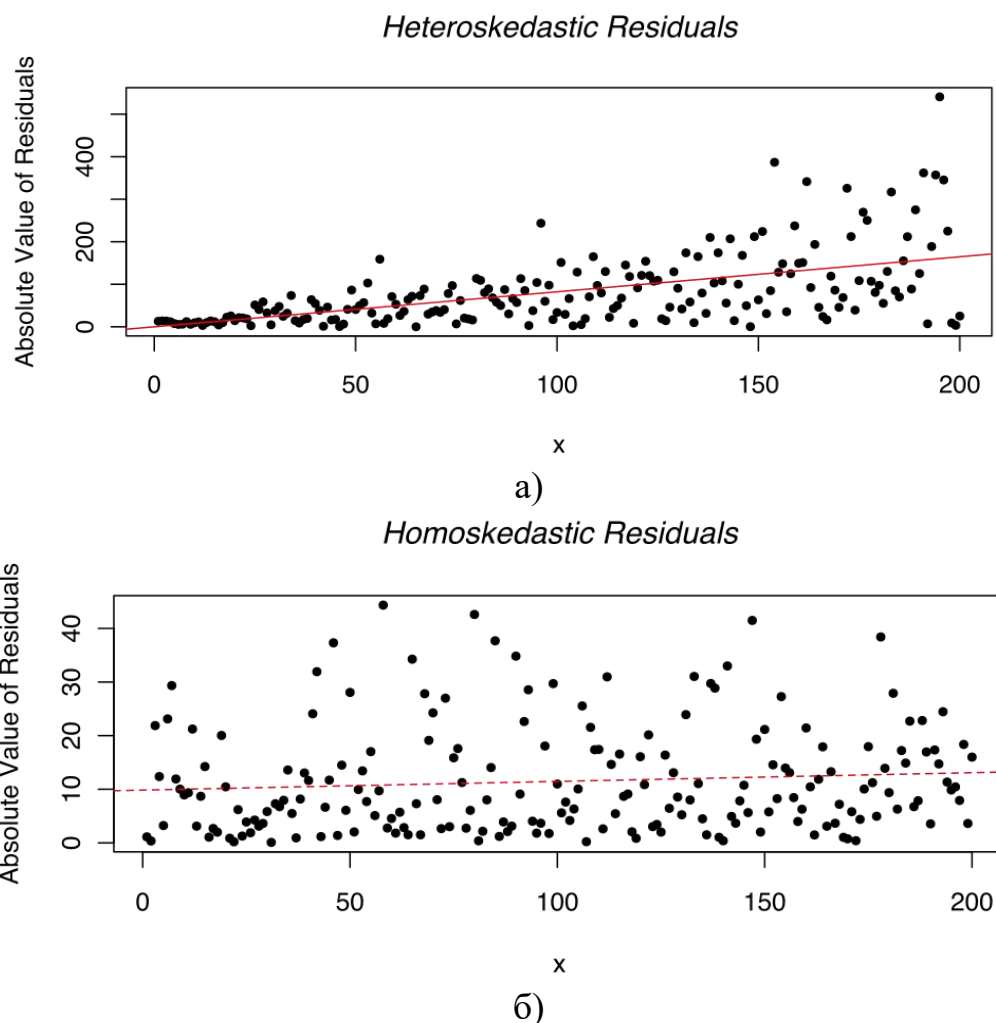


Рисунок 2.14 – Отриманий гомоскедастичний розподіл

Постійність або непостійність дисперсії помилок буде показувати, чи однаковий розкид по Y за умови збільшення X . Для того щоб пояснити, що собою являє гомоскедастичність, розглянемо гетероскедастичність, рис. 2.15.



а – приклад розподілу з гетероскедастичністю; б – приклад розподілу з гомоскедастичністю.

Рисунок 2.15 – Гомоскедастичність та гетероскедастичність розподілів

Гетероскедастичність (рис. 2.15, а) – це непостійність дисперсії помилки. Воно приводить до того, що розподіл залишків має закономірну форму через непостійність дисперсії помилки. Дані мають закономірну форму. Якщо за формою розподілу спостерігається закономірність, то це погано для моделі, необхідно щоб розподіл значень по осі Y вимірювався випадково – тому, що, коли будується модель, успішність моделі передбачення не однакова на всьому діапазоні значень [55, 56].

Проблема графічної оцінки гомоскедастичності моделі полягає в тому, що легше побачити відхилення від гетероскедастичності, а збережені правила

гомоскедастичності моделі до кінця бути впевненим важко. Тому використаємо спеціалізовані критерії перевірки гомоскедастичності.

Наприкінці розрахунку дивимося на критерій Breush-Pagan та критерій Koenker. Нульова гіпотеза цих критеріїв – це гомоскедастичність. Відповідно, щоб зберегти припущення про множинну лінійну регресію, необхідно, щоб значення цих критеріїв були більше, ніж 0,05. У даному випадку припущення щодо гомоскедастичності виконано Breush-Pagan дорівнює 4,480 та показник Koenker дорівнює 4,638, рис. 2.16 [57].

```

Total SS
  115,9104

R-squared
  ,0773

Sample size (N)
  60

Number of predictors (P)
  3

Breusch-Pagan test for Heteroscedasticity (CHI-SQUARE df=P)
  4,480

Significance level of Chi-square df=P (H0:homoscedasticity)
  ,2141

Koenker test for Heteroscedasticity (CHI-SQUARE df=P)
  4,638

Significance level of Chi-square df=P (H0:homoscedasticity)
  ,2003

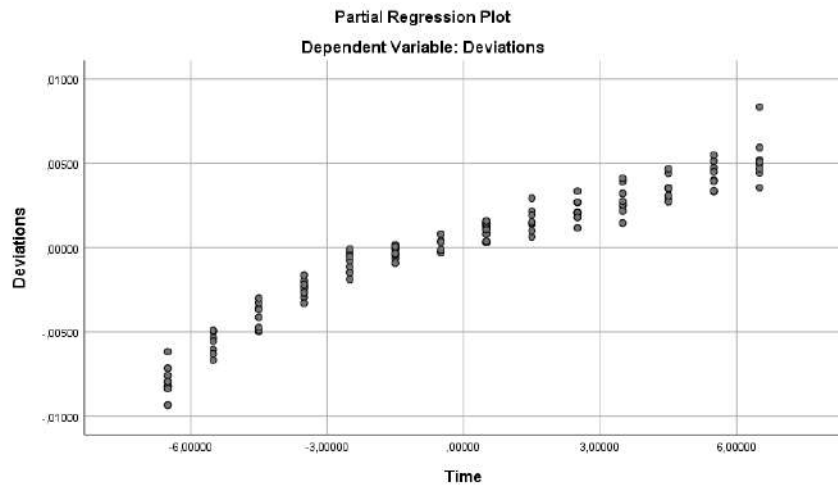
----- END MATRIX -----

```

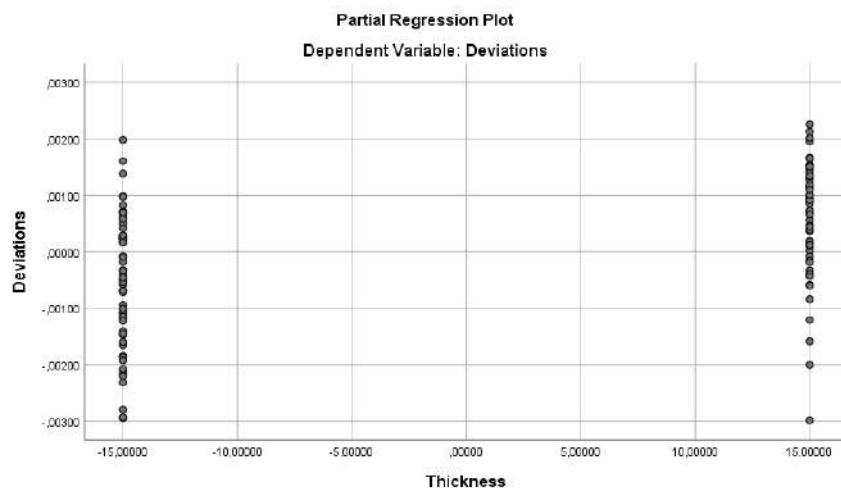
Рисунок 2.16 – Математична перевірка гомоскедастичності моделі

2.3.5 Лінійність зв'язку

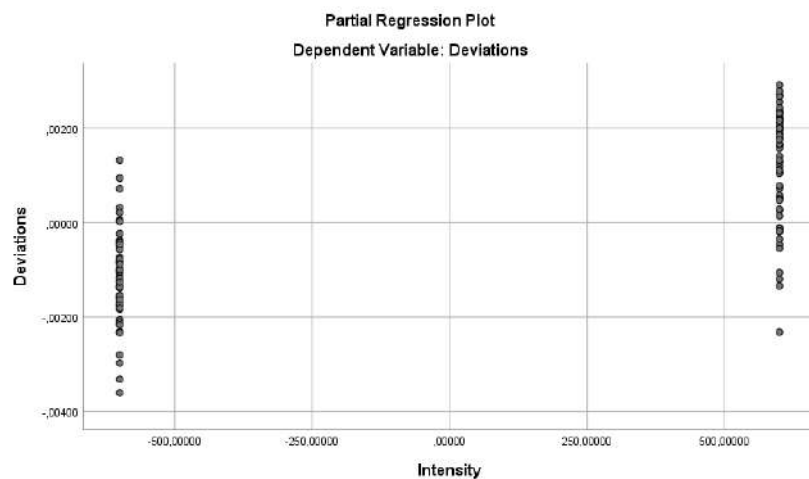
Для оцінки лінійності з в'язків використовуємо графіки приватної регресії. За допомогою функцій «Produce all partial plots» отримуємо графіки приватної регресії на кожну змінну, рис. 2.17.



а)



б)



в)

а – регресія відхилень від часу експонування; б – регресія відхилень від товщини шару; в – регресія відхилень від інтенсивності експонування.

Рисунок 2.17 – Значення приватних регресій

На основі отриманих розподілів можливо чітко постерігати, що наявність нелінійного патерну у графіках не простежується. Тому можна судити, що модель відповідає вимогам лінійності зв'язку [57].

2.4 Побудова моделі множинної регресії впливу параметрів експонування на геометричні розміри моделі

Використовуючи розрахунки (Зведення для моделі), отримуємо значення коефіцієнта детермінації $R = 0,962$. Це показник відповідності розрахованих моделлю значень (лінійної регресії) та отриманих експериментальних результатів, рис. 2.18.

Model Summary ^b									
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	,962 ^a	,925	,922	,00111683	,925	441,002	3	108	,000

a. Predictors: (Constant), Intensity, Thickness, Time
b. Dependent Variable: Deviations

Рисунок 2.18 – Зведення про модель

Для більшої точності перевірки отриманий результат перераховуємо на моделі з нестандартизованими передбаченими значеннями та розраховуємо кореляцію параметрів відхилення від стандартизованих значень (розрахованих відхилень), рис. 2.19.

Correlations			
		Deviations	Unstandardized Predicted Value
Deviations	Pearson Correlation	1	,962**
	Sig. (2-tailed)		,000
	N	112	112
Unstandardized Predicted Value	Pearson Correlation	,962**	1
	Sig. (2-tailed)	,000	
	N	112	112

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Рисунок 2.19 – Кореляція значень

Значення R при повторному розрахунку дорівнює 0,962, що доводить, що кореляція отриманих та передбачених значень існує.

Коефіцієнт множинної детермінації R^2 дорівнює 0,925. Це означає, що включені в систему параметри на 92,5% впливають на результат. Скоригований коефіцієнт R^2 дорівнює 0,922 або 92,2%. Стандартна помилка оцінки 0,00111683.

За таблицею ANOVA перевіряємо гіпотезу про умову $R^2 = 0$. Оскільки рівень «Значимість» $< 0,05$, то підтверджується правильність попередніх результатів, рис. 2.20.

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	,002	3	,001	441,002	,000 ^b
	Residual	,000	108	,000		
	Total	,002	111			

a. Dependent Variable: Deviations

b. Predictors: (Constant), Intensity, Thickness, Time

Рисунок 2.20 – Результати розрахунків значимості моделі

Для визначення ваги кожної змінної скористаємося Beta-коефіцієнтами, які показують, на скільки змінюється значення параметра від збільшення на

одиницю одного з факторів. Для пошуку Beta-коефіцієнтів розрахунок буде проводитися за допомогою стандартизованих значень (Z-балів).

Це необхідно для того, щоб переконатися, що стандартизовані значення і нестандартизовані збігаються, рис. 2.21.

Coefficients ^a									
		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients			Correlations		
Model		B	Std. Error	Beta	t	Sig.	Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	7,533E-5	,001		,128	,898			
	Time	,001	,000	,904	34,178	,000	,904	,957	,904
	Thickness	3,575E-5	,000	,134	5,081	,000	,134	,439	,134
	Intensity	1,998E-6	,000	,300	11,359	,000	,300	,738	,300

a. Dependent Variable: Deviations

Рисунок 2.21 – Результати розрахунків (Beta-коефіцієнтів)

Виходячи з рівня значущості коефіцієнтів, можна порівняти, чи відрізняється Beta-коефіцієнт даного фактору від нуля. У даному випадку всі значення значущості <0,05 що доводить, що всі фактори включені до моделі коректно. Результати кореляцій Пірсона факторів на відгук наведені на рис. 2.22.

		Correlations			
		Deviations	Time	Thickness	Intensity
Pearson Correlation	Deviations	1,000	,904	,134	,300
	Time	,904	1,000	,000	,000
	Thickness	,134	,000	1,000	,000
	Intensity	,300	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Deviations	.	,000	,079	,001
	Time	,000	.	,500	,500
	Thickness	,079	,500	.	,500
	Intensity	,001	,500	,500	.
N	Deviations	112	112	112	112
	Time	112	112	112	112
	Thickness	112	112	112	112
	Intensity	112	112	112	112

Рисунок 2.22 – Результати розрахунків кореляції Пірсона

У ході проведення експериментів та побудови лінійної регресійної моделі спостерігалася якісна адгезія полімеризованого фотополімеру до платформ для друку моделі.

Виходячи з отриманих значень Beta-коефіцієнтів можливо зробити висновки [58]:

- збільшення на одну одиницю часу впливає на збільшення значення відхилення розмірів моделі на 0,904;
- збільшення на одну одиницю інтенсивності випромінювання впливає на збільшення значення відхилення розмірів на 0,3;
- збільшення на 30 одиниць товщини впливає на збільшення значення відхилення розмірів на 0,134.

Це доводить, що найбільш вагомим фактором під час 3D-експонування є час. Тоді рівняння регресії виглядає таким чином:

$$Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3=0,002+0,904x_1+0,134x_2+0,3x_3. \quad (2.1)$$

де, Y – фактор відхилення геометричних розмірів 3D-моделі;

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.

З ПРОЦЕС НАГРІВАННЯ ФОТОПОЛІМЕРНОЇ СМОЛИ ПІД ЧАС ЕКСПОНУВАННЯ МОДЕЛІ

3.1 Фізичний явища, які викликають дефекти друку моделі

Незалежно від обраної технології фотополімерного 3D-друку можна ідентифікувати основні фактори, що впливають на стан об'єкта управління, а саме на відхилення геометричних розмірів моделі. Для зручності їх можна поділити на дві групи: параметри налаштування експонування шарів моделі; фізико-хімічні властивості фотополімерної смоли.

Параметри налаштування експозиції шарів моделі відносяться значення, встановлені у програмі для підготовки моделі до друку (наприклад, NanoDLP або Chitubox). Серед них можна виділити: висоту шару, мкм; кількість базових шарів; час експонування базових та основних шарів, секундах; інтенсивність випромінювання, Лм.

Характеристики моделі та збереження геометричних розмірів під час друку залежать від фізико-хімічних властивостей фотополімерної смоли, що обумовлені її хімічним складом. Серед цих властивостей можна відзначити: коефіцієнт усадки смоли, %; довжина хвилі поляризації, нм; коефіцієнт теплопровідності, Вт/м².

Технології фотополімерного 3D-друку, по свої суті беруть початок з класичного методу фотолітографії, а саме з перенесення зображення на поверхню заготовки (експонування зображення). Відмінності по факту тільки дві:

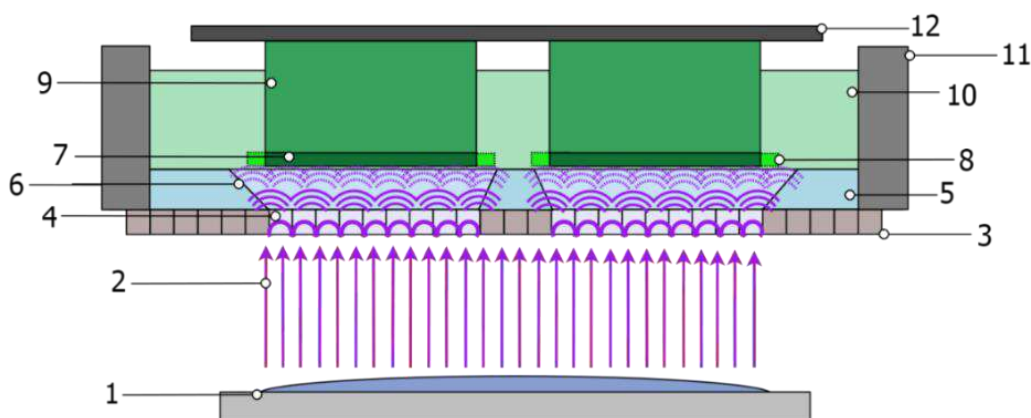
- фотолітографія використовуються для виготовлення 2D-структур, а фотополімерний друк для тривимірних об'єктів;
- у фотолітографії використовуються плівковий або рідкий фоторезист, у фотополімерному друку рідка фотополімерна смола.

Але не зважаючи на ці відмінності полімеризація фото-чутливого матеріалу відбуваються за допомогою світла, тому і виникнення дифракція

світла. Це явище виникає, що у фотолітографії, що і у фотополімерному друку при, і дефекти виробу, зазвичай пов'язують з дифракцією випромінювання при фотополімеризації.

Дифракція — це явище, яке виникає під час поширення хвиль, зокрема світлових і звукових. Воно полягає в здатності хвиль огинати перешкоди, завдяки чому хвильовий рух спостерігається навіть у тих областях за перешкодою, куди хвилі не можуть потрапити прямим шляхом [59].

У фотополімерному друці, поява дефектів поверхні як наливання зайвого фотополімеру та утворення артефактів поверхні, пов'язують з явище дифракції світла, інакшими словами просвітом шарів моделі. Це явище пояснюється інтерференцією хвиль на краях непрозорих об'єктів або при переході хвиль через неоднорідності між різними середовищами. Найбільш наочно можна це побачити на прикладі LCD друку, рис. 3.1.



- 1 – УФ матриця; 2 – УФ випромінювання; 3 – непрозорі пікселі LCD екрану;
 4 – прозорі пікселі LCD екрану; 5 – плівка дна фотополімерної ванни;
 6 – дифракція УФ-випромінювання; 7 – полімеризація шару фотополімеру;
 8 – зона зайвої полімеризації через дифракцію;
 9 – полімеризований фотополімер; 10 – рідка фотополімерна смола;
 11 – фотополімерна ванна; 12 – платформа для побудови моделі.

Рисунок 3.1 – Принцип виникнення дефектів друку через дифракцію світла

На розходження світової хвилі, впливають наступні чинники:

- довжина хвилі;
- ширина зазору через який проходить світовий потоку;
- оптичне середовище через яке проходить світовий потоку.

У випадку LCD технології джерело випромінювання є УФ-матриця, яке випромінює ультрафіове світло з довжиною 405-435 нм. Для полімеризації фотополімеру випромінювання проходить через чотири середовища, які мають різну оптичну проникність та товщину, а саме:

- повітря (відстань між УФ-матрицею та LCD екраном)
- LCD-екран (0,00135 м)
- плівка дна фотополімерної ванни (0,000125 м)
- фотополімерна смола (0,015 м)

Оптична проникність цих середовищ різна, що також може впливати на кут розходження випромінювання. Але для появи яскраво виражених дефектів друку, більшу роль грає саме час експонування. Це можливо пояснити тим що, фотополімерна смола полімеризується швидше при когерентному (направленому випромінюванні), а ніж при дифракційному опромінюванні. Оскільки через проходження випромінювання через всі ці середовища, виникає явище дифракції, то з розходженням хвилі на її раях менша інтенсивність випромінювання, або інакшими словами менша енергія для полімеризації фотополімерної смоли. Тому для появи великих відхилень розмірів а зонах зайвої полімеризації необхідно більше часу експонування фотополімерної смоли.

За звичай щоб зменшити вплив дифракції випромінювання, зменшують час експонування та висоту шару. При вірних налаштуваннях друку підібраних з урахуванням особливостей технології та матеріалу друку, ці відхилення розмірів неперевіщують 100 мкм, для невеликих моделей. Але при друці великогабаритних моделей з великим часом друку (від 6 годин), значення відхилень розмірів можуть доходити до 2-3 мм. Також з'являються поверхневі дефекти моделі при тих же значеннях параметрів друку, тому виникнення дефектів однією дифракцією світла пояснити не достатньо.

У цій роботі ми вирішили розглянути ще одне фізичне явище яке може викликати значні дефекти друку моделі, а саме теплове об'ємне розширення фотополімерної смоли під час експонування шарів.

Детальне розглядання принципу роботи фотополімерних технологій вказує на певну системність. У всіх трьох цих технологіях використовується випромінювання світла, енергія якого не лише спрямована на полімеризацію необхідних областей фотополімеру, але також на нагрівання самої фотополімерної смоли, зокрема за рахунок температурного коефіцієнта об'ємного розширення матеріалу (ТКОР).

Температурний коефіцієнт об'ємного розширення матеріалу (α) визначає, як змінюється його об'єм за умови зміни температури, і вимірюється в одиницях $1/^\circ\text{C}$ (або $1/\text{K}$). Він показує, на скільки одиниць зміниться об'єм матеріалу через зміну температури на один градус Цельсія [60].

Математично температурний коефіцієнт об'ємного розширення виражається за допомогою виразу (3.1).

$$\alpha = (\Delta v/v_0)/\Delta T, \quad (3.1)$$

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 варіюватися залежно від конкретного матеріалу. Вплив ТКОР під час формування кожного шару моделі виявляється дуже важливим, оскільки за занадто високої температури смоли збільшується коефіцієнт розширення матеріалу. Це може призводити до геометричних відхилень у шарах моделі, а також викликати проблеми, подібні до перезасвічення шарів, зображених на рис. 3.2.

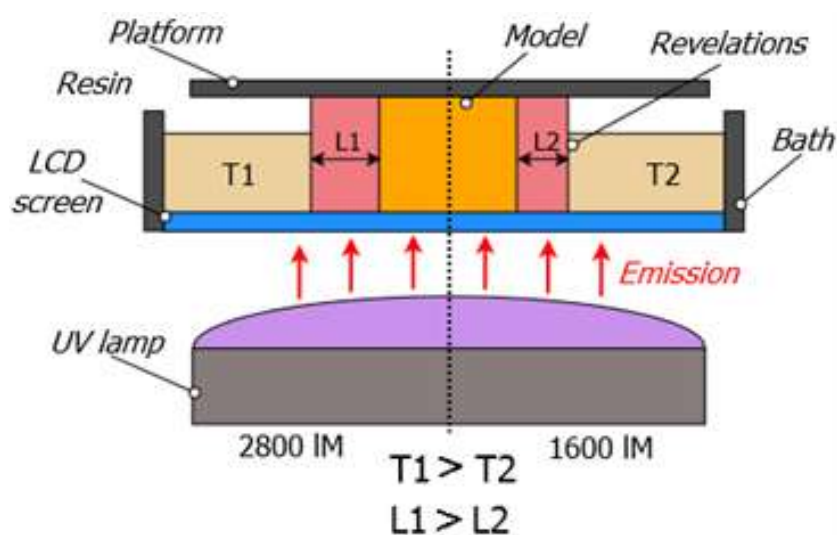


Рисунок 3.2 – Принцип впливу ТКОР у процесі експонування моделі

Отже, можна врахувати, що всі ці параметри, до певної міри, безпосередньо впливають на температуру нагрівання смоли під час друку, на ТКОР і, як наслідок – якісну оцінку процесу виготовлення 3D моделі, а саме на відповідність розмірів отриманої системи провідників. У результаті вивчення температурних впливів у процесі фотополімерного 3D-друку визначається актуальність досліджень.

3.2 Фізичний опис технологічного процесу нагрівання фотополімерної смоли під час експонування моделі

З фізичної точки зору можна розглядати процес нагріву фотополімерної смоли та виникнення температурного коефіцієнта об'ємного розширення як проблему теплообміну у тришаровій стінці.

Розглядаючи особливості фотополімерного 3D-друку за технологією LCD, детально розглянемо структуру тришарової стінки (рис. 3.3). Ця стінка складається з трьох щільно прилягаючих один до одного шарів з такими товщинами: « d_1 » (товщина LCD-екрану), « d_2 » (товщина плівки) та « d_3 » (товщина рідкої фотополімерної смоли). Кожен з цих шарів має власну теплопровідність (« λ_1 , λ_2 та λ_3 » відповідно).

Також відомі температури зовнішніх поверхонь « t_1 » і « t_4 ». Тепловий контакт між шарами є ідеальним, без взаємних зазорів і, відповідно, без повітряних проміжків. Температури в місцях контакту шарів позначаємо як « t_2 » і « t_3 ».

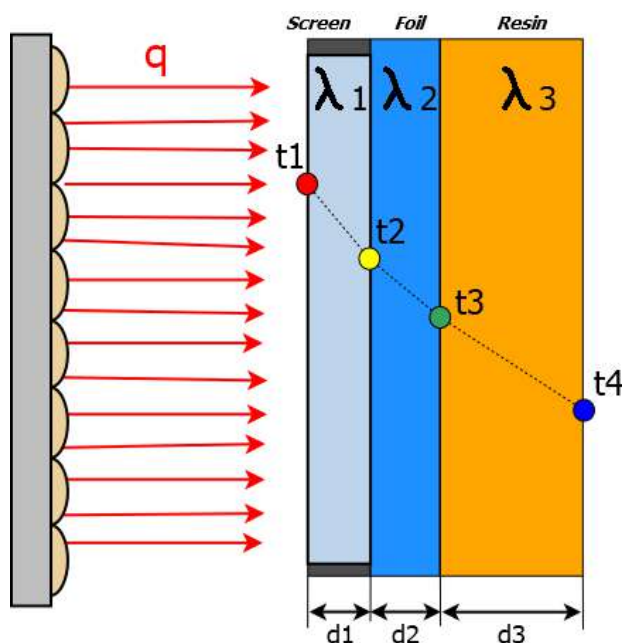


Рисунок 3.3 – Теплообмін у процесі фотополімерного LCD 3D-друку

Оскільки температури зовнішніх поверхонь постійні, тепловий потік – сталий, і відповідно, кількість теплоти, що проходить за одиницю часу – незмінна [60–62]. За стаціонарного режиму питомий тепловий потік « q » постійний і для всіх шарів однаковий. Тому можна записати для кожного з шарів:

$$\begin{aligned} q &= \frac{\lambda_1}{d_1} (t_1 - t_2) ; \\ q &= \frac{\lambda_2}{d_2} (t_2 - t_3) ; \\ q &= \frac{\lambda_3}{d_3} (t_3 - t_4) . \end{aligned} \quad (3.2)$$

З наведених виразів легко визначити значення локальних різниць температур на межах кожного шару за виразами (3.3):

$$\begin{aligned} t_1 - t_2 &= q \frac{d_1}{\lambda_1} ; \\ t_2 - t_3 &= q \frac{d_2}{\lambda_2} ; \\ t_3 - t_4 &= q \frac{d_3}{\lambda_3} . \end{aligned} \quad (3.3)$$

Складаючи по черзі ліві та праві частини рівнянь, отримаємо (3.4):

$$t_1 - t_4 = q \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} \right) . \quad (3.4)$$

Звідки отримуємо рівняння теплового потоку (3.5):

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} , \quad (3.5)$$

Температури на стику шарів « t_2 » та « t_3 » можна визначити із системи рівнянь:

$$\begin{aligned} t_2 &= t_1 - q \frac{d_1}{\lambda_1} , \\ t_3 &= t_4 + q \frac{d_3}{\lambda_3} . \end{aligned} \quad (3.6)$$

Іноді багатошарову стінку розраховують як одношарову товщиною « $d_{\text{заг}}$ », як суму всіх товщин шару. При цьому у розрахунок вводиться еквівалентний коефіцієнт теплопровідності « $\lambda_{\text{ек}}$ », який визначається з умови:

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} = \frac{\lambda_{\text{ек}}}{d} (t_1 - t_4) , \quad (3.7)$$

Звідси отримуємо рівняння еквівалентного коефіцієнту теплопровідності.

$$\lambda_{\text{ек}} = \frac{d}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}}, \quad (3.8)$$

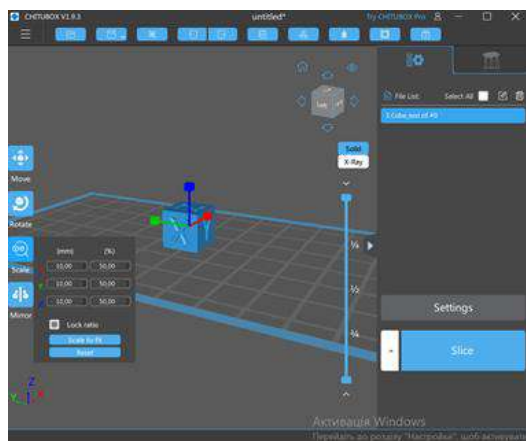
Під час виведення розрахункової формули для багатошарової стінки (формули 3.7 та 3.8) припускали, що шари щільно прилягають один до одного і завдяки ідеальному тепловому контакту поверхні, які дотикаються, мають однакову температуру. За умови шорсткої поверхні між шарами виникають повітряні зазори. А оскільки теплопровідність повітря у нормальних умовах « $\lambda_{\text{повітря}}$ » дорівнює 0,025 Вт/(м×°С), то наявність навіть дуже тонких повітряних прошарків різко погіршує теплопровідність конструкції.

3.3 Дослідження впливу температури фотополімерної смоли на геометричні відхилення розмірів моделі

Для проведення досліджень впливу температурного коефіцієнта об'ємного розширення на відхилення геометричних розмірів моделі спочатку треба оцінити, скільки змінюється температура фотополімерної смоли під час експонування моделі [63].

Для простоти вимірювань була обрана тестова модель куба розмірами 20×20×20 мм (рис. 3.4), яка буде друкуватися за наступних параметрів експонування:

- час засвічення смоли, що змінювався у межах від 7 с до 20 с з кроком 1 с для кожного випробування;
- висота шару, яка залишалася постійною і становила 35 мкм;
- максимальна інтенсивність випромінювання за значень 2800 Лм та 1600 Лм.



а) б)
а – модель у програмі Chitubox; б – тестовий зразок.

Рисунок 3.4 – Тестова модель для досліджень

В цілому буде 28 вимірювань. Як фотополімерна смола буде використовуватися фотополімер марки Plexiwire Resin Basic. Для заміру температури початкової та після друку буде використовуватися термістор.

Початковою температурою будемо вважати кімнатну у межах від 20 °С до 22 °С в середньому.

Результати вимірювань зміни температури під час експонування моделі наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Зміни температури фотополімерної смоли

Інтенсивність випромінювання, Лм	Час експонування, с	Початкова Температура смоли, °С	Температура нагріву смоли, °С	Зростання температури, °С	Середнє зростання температури, °С
1600	7	20,3	25,2	4,9	5,4
	8	20,6	24,7	4,1	
	9	20,5	25,5	5	
	10	21,1	25,8	4,7	
	11	20,4	25,6	5,2	
	12	20,9	26,1	5,2	
	13	21,0	25,9	4,9	
	14	21,5	26,4	4,9	
	15	20,9	26,7	5,8	
	16	21,3	26,7	5,4	
	17	20,6	27,0	6,4	
	18	20,8	27,2	6,4	
	19	20,1	27,3	7,2	
	20	21,2	27,1	5,9	

Продовження табл. 3.1 - Зміни температури фотополімерної смоли

2800	7	19,8	25,8	6	6,8
	8	20,5	26,2	5,7	
	9	21,3	26,5	5,2	
	10	20,5	26,4	5,9	
	11	20,4	27,2	6,8	
	12	21,4	27,6	6,2	
	13	20,7	27,7	7	
	14	21,8	27,5	5,7	
	15	20,7	28,2	7,5	
	16	22,2	28,3	6,1	
	17	21,4	28,6	7,2	
	18	21,0	28,9	7,9	
	19	20,0	29,2	9,2	
	20	20,7	29,4	8,7	

Температура нагрівання фотополімерної смоли значною мірою залежить не лише від часу друку, але й від інтенсивності УФ-випромінювання. Це можна визначити через відмінність між початковою температурою фотополімерної смоли та температурою після друку. Зміна інтенсивності випромінювання призводить до збільшення теплового впливу на фотополімер.

Враховуючи це, виконано визначення впливу температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів моделі. Були визначені наступні діапазони значень параметрів: час засвічування смоли: від 7 с до 16 с, з кроком 1 с для кожного випробування; висота шару: 35 мкм; максимальна інтенсивність випромінювання: 1600 Лм; температура фотополімерної смоли перед початком друку: від 10 °С до 45 °С, з кроком 5 °С для кожного випробування.

Максимальна інтенсивність випромінювання 1600 Лм була обрана для зменшення ризику перегріву фотополімерної смоли, оскільки за даної інтенсивності середній приріст температури становив 5,4 °С. Діапазон температури фотополімерної смоли від 10 °С до 45 °С обрали для зменшення ймовірності перегріву самої смоли та деформації плівки дна ванної.

Для отримання детальнішої інформації, необхідно провести серію експериментів на 80 зразках. За допомогою другого етапу експерименту буде можливо визначити, чи суттєво впливає температура фотополімерної смоли на

відхилення геометричних розмірів, чи, можливо, вплив визначають час експонування та інтенсивність випромінювання.

В якості тестового зразка, була обрана наступна модель, показана на рис. 3.5.

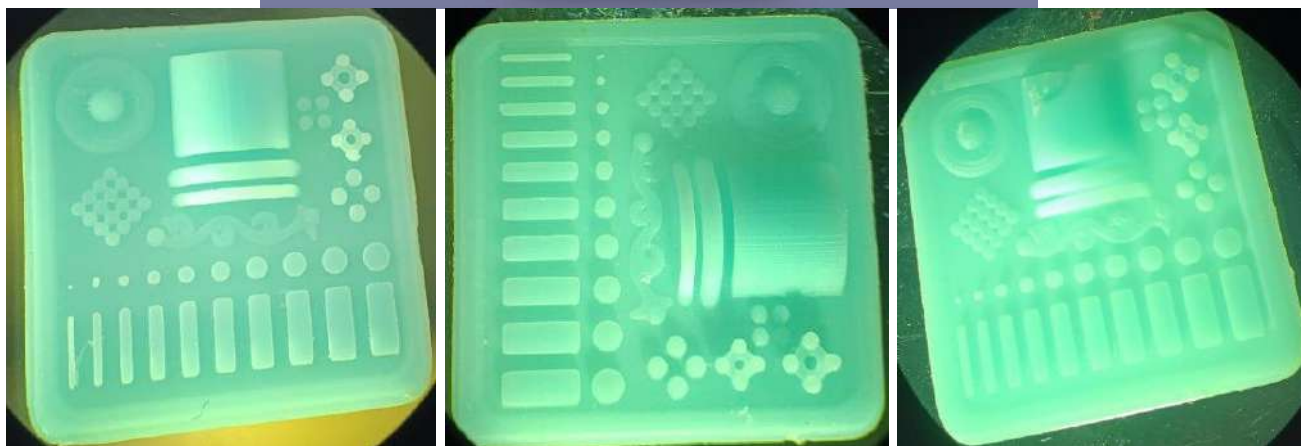
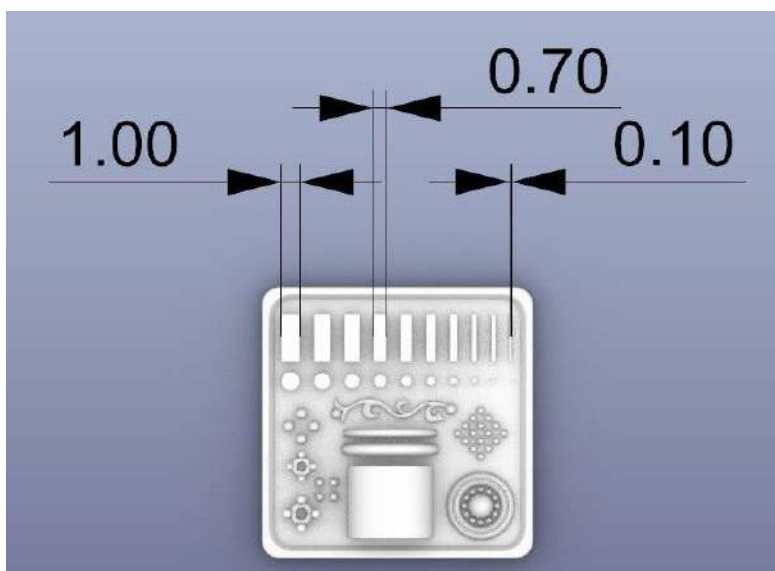


Рисунок 3.5 – Тестова модель

У табл. 3.2 наведені результати вимірювань відхилень геометричних розмірів моделі при різних значень температури фотополімерної смоли.

Таблиця 3.2 – Відхилення розмірів за різних значень температури

№	Час засвічення, с	Температура нагріву смоли, °C	Відхилення, розмірів по осях ХУ, мм	№	Час засвічення, с	Температура нагріву смоли, °C	Відхилення, розмірів по осях ХУ, мм
1	7	10	0,053	41	7	30	0,079
2	8		0,077	42	8		0,103
3	9		0,094	43	9		0,122
4	10		0,108	44	10		0,131
5	11		0,127	45	11		0,148
6	12		0,131	46	12		0,16
7	13		0,140	47	13		0,169
8	14		0,142	48	14		0,163
9	15		0,145	49	15		0,173
10	16		0,149	50	16		0,176
11	7	15	0,056	51	7	35	0,097
12	8		0,069	52	8		0,109
13	9		0,087	53	9		0,123
14	10		0,104	54	10		0,140
15	11		0,127	55	11		0,144
16	12		0,130	56	12		0,151
17	13		0,133	57	13		0,161
18	14		0,137	58	14		0,174
19	15		0,144	59	15		0,172
20	16		0,151	60	16		0,177
21	7	20	0,070	61	7	40	0,094
22	8		0,089	62	8		0,117
23	9		0,103	63	9		0,136
24	10		0,136	64	10		0,149
25	11		0,139	65	11		0,177
26	12		0,147	66	12		0,180
27	13		0,151	67	13		0,188
28	14		0,155	68	14		0,201
29	15		0,16	69	15		0,202
30	16		0,165	70	16		0,209
31	7	25	0,082	71	7	45	0,102
32	8		0,105	72	8		0,12
33	9		0,128	73	9		0,139
34	10		0,140	74	10		0,157
35	11		0,141	75	11		0,181
36	12		0,155	76	12		0,182
37	13		0,161	77	13		0,186
38	14		0,177	78	14		0,199
39	15		0,185	79	15		0,208
40	16		0,192	80	16		0,217

На підставі отриманих даних можна прийти до висновку, що зі збільшенням температури фотополімерної смоли зростає величина відхилень геометричних розмірів моделі, Додаток Б.

Можна спостерігати що гіпотеза про вплив температури фотополімерної смоли на відхилення розмірів та дефектів моделі має сенс. При збільшенні температури збільшуються геометричні розміри моделі, рис. 3.6.

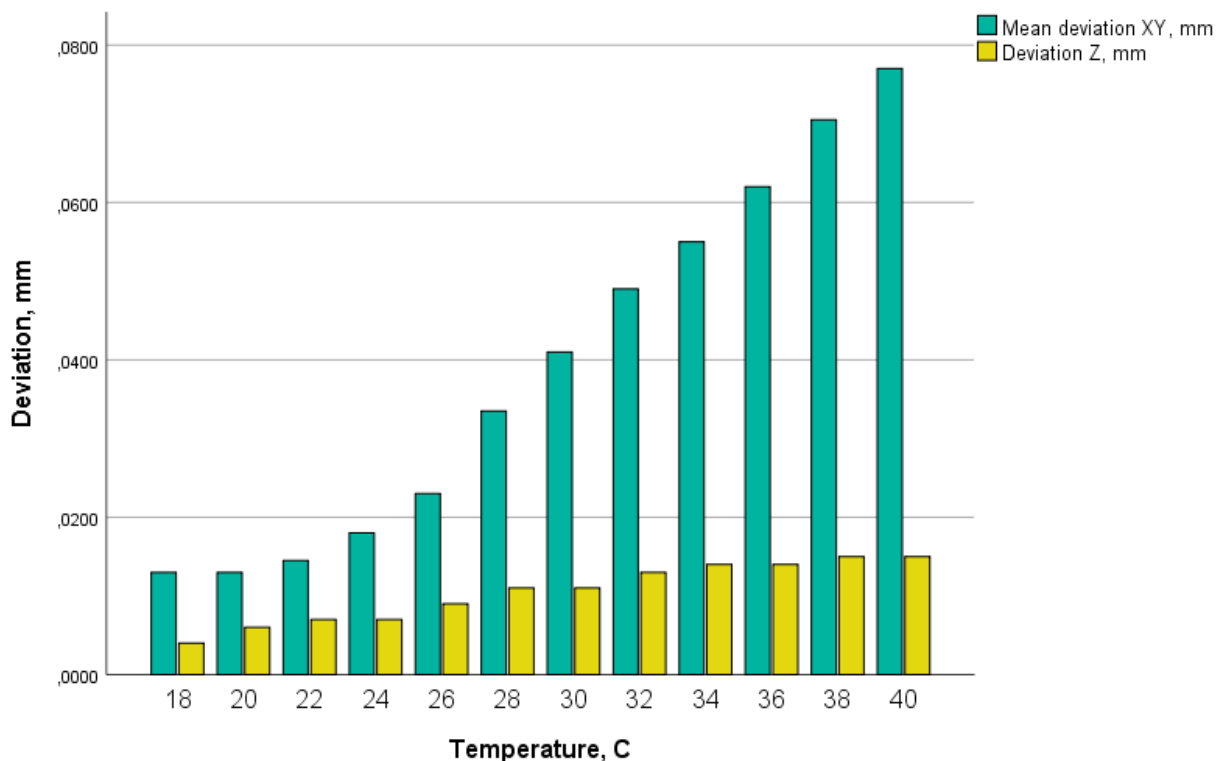


Рисунок 3.6 – Графік залежності відхилень розмірів зразків від температури фотополімерної смоли

За цими графіками та результатами спостережень, можна визначити що оптимальний діапазон температури фотополімерної смоли, при якому, дефекти та відхилення розмірів моделі мінімальні лежить в межах від 18°C до 24°C.

Подібне збільшення значень відхилень розмірів зразків при зростанні температури, можливо пояснити зростанням коефіцієнту TCVE фотополімерної смоли.

Для цього виходячи з загальних габаритів моделі, розрахуємо її об'єм, який складає $8 \times 10^{-9} \text{ м}^3$ та вимірювши розміри отриманих зразків знайдемо їх об'єм, табл. 3.3. Коефіцієнт TCVE розраховуємо за формулою 1, для того що

визначити ΔT , початкову температуру будемо задаємо 16°C і кожне наступне вимірювання будемо додавати по 2°C .

Таблиця 3.3– Коефіцієнт TCVE

№	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Оригінальний об'єм моделі, $\times 10^{-9} \text{ м}^3$	Об'єм зразків, $\times 10^{-9} \text{ м}^3$	TCVE, $\times 10^{-4} ^{\circ}\text{C}^{-1}$
1	18	8,0	8,004	2,5
2	20		8,004	2,5
3	22		8,00402	2,5125
4	24		8,00406	2,5375
5	26		8,00505	3,15625
6	28		8,00630	3,9375
7	30		8,00683	4,26875
8	32		8,00737	4,60625
9	34		8,0079	4,9375
10	36		8,00801	5,00625
11	38		8,00896	5,6
12	40		8,00949	5,93125

Тим саме отримуємо графік залежності TCVE фотополімерної смоли від температури, рис. 3.7.

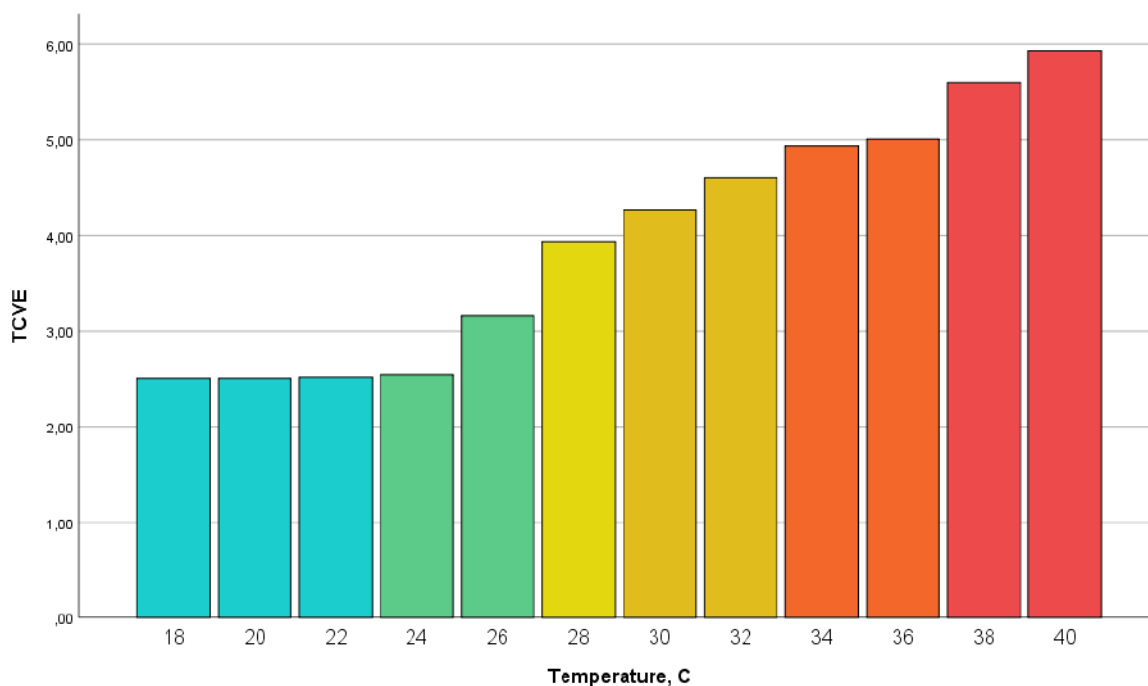


Рисунок 3.7 – Залежність TCVE від температури 3D друку

Значення TCVE можуть бути різними в залежності від складу фотополімерної смоли від призначення і бажаних характеристик, які закладає виробник, а саме від:

- основних мономерів;
- фотоініціатори;
- домішки (пластифікатори, стабілізатори, пігменти та барвники);
- наповнювачі;
- ретикулатори.

Також ступень полімеризації фотополімерної смоли, відіграє важливу роль на наявність дефектів та відхилення геометричних розмірів, тому ці значення можуть відрізнятися для різних марок фотополімерів, отже дані коефіцієнти необхідно підбирати для кожної марки окремо.

Графік залежності нагріву фотополімерної смоли від часу друку зразка наведено на рис. 3.8.

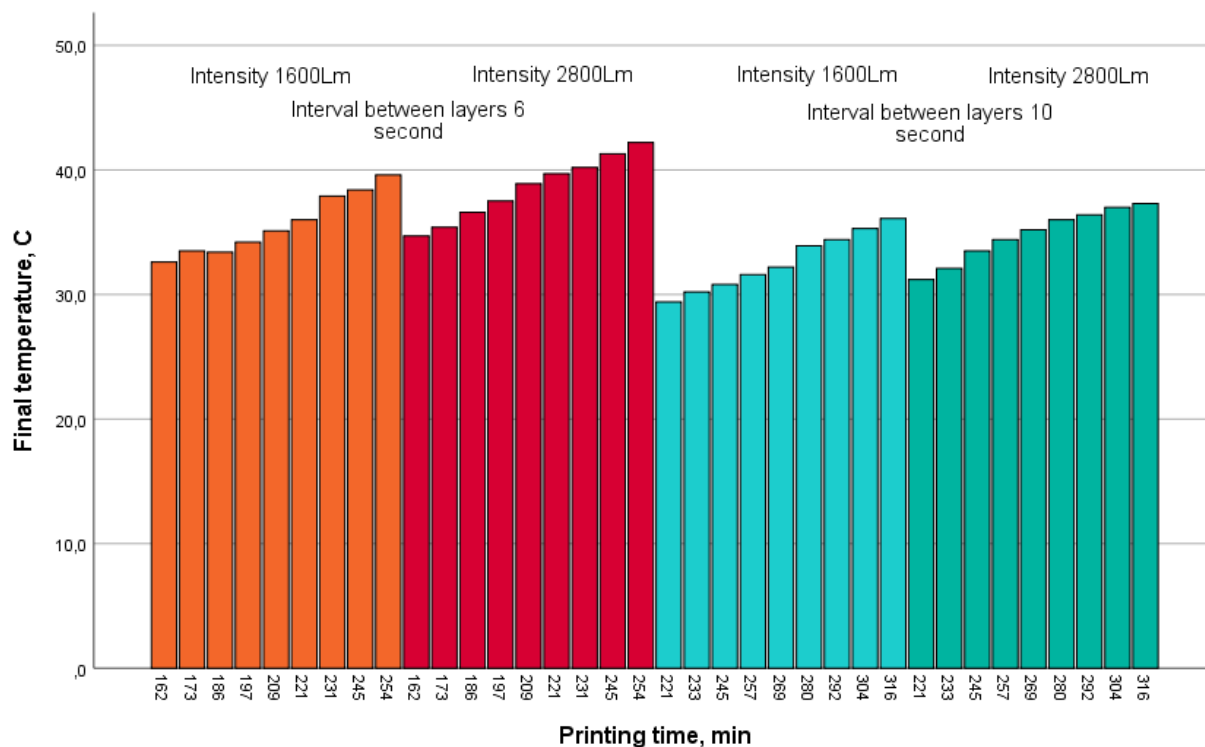


Рисунок 3.9 – Залежність температури фотополімерної смоли від часу друку

3.4 Оцінка витрат фотополімерної смоли під час 3D-експонування друкованих плат

Для коректного порівняння витрат у процесі виготовлення 3D моделі за технологіями DLP і LCD необхідно визначити оптимальні співвідношення умов експонування та необхідних параметрів виробу з мінімальними відхиленнями розмірів.

Попередні дослідження відхилення геометричних розмірів зразків під час 3D-експонування проводилися на 40 зразках фотополімерних масок за різних значень технологічних параметрів, таких як товщина шару експонування, час засвічення та інтенсивність випромінювання.

Тестова модель використовувалася та ж, як і в попередніх дослідженнях, рис. 3.4. Якості матеріалу для отримання експериментальних зразків була використана фотополімерна смола Plexiwire Resin Basic Orange Transparen. Перевагами даної смоли є: досить висока механічна міцність друкованих деталей, малий час експонування і відносно низька, в порівнянні з іншими аналогами, ціна смоли (880 грн за літр). До того ж дана смола за результатами попереднього факторного аналізу та проведених досліджень показала високий рівень адгезії до фольгованої склотекстолітової заготовки.

У табл. 3.4 наведені вартості фотополімерних смол, які найчастіше використовуються для 3D-друку.

Таблиця 3.4 – Вартість фотополімерних смол

№	Назва смоли	Вартість, грн/л
1	Anycubic 405nm UV	1400
2	Plexiwire Resin Basic	880
3	MonoFilament Basic	1320
4	FunToDo	2463
5	Wanhao Castable	1650
6	BlueCast CR3A	5927,40
7	Elegoo 3D	1283,37
8	Weistek	972
9	Tevo	1173,40

За результатами проведення низки експериментів з отримання тестових моделей, отримано дані, з урахуванням яких було виведено коефіцієнти кореляції Пірсона для факторів експонування фотополімерної 3D-маски, що впливають на відхилення геометричних розмірів під час друку, рис. 3.9.

Для розрахунку витрат фотополімера використовуються наступні параметри друку:

- шари від 20 мкм до 50 мкм;
- крок шарів 5 мкм; тимчасове засвічення від 7 с до 11 с.

Період засвічення шару до 11 с обраний, виходячи з того, що за умови збільшенні часу експонування фотополімерної маски, відхилення геометричних розмірів перевищує 0,1 мкм по осях X, Y.

У програмі ChituBox передбачена можливість розрахунку витрати фотополімерної смоли під час друку моделі, користуючись, цією опцією і змінюючи параметри експонування та висоти маски, були отримані наступні значення, табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати розрахунків витрат полімерної смоли

Товщина, мкм	Час, с	Об'єм, мл	Вартість, грн	Товщина, мкм	Час, с	Об'єм, мл	Вартість, грн
0,2	7	0,45	0,396	0,2	8	0,47	0,4136
0,25		0,54	0,4752	0,25		0,55	0,484
0,3		0,68	0,5984	0,3		0,71	0,6248
0,35		0,79	0,6952	0,35		0,79	0,6952
0,4		0,87	0,7656	0,4		0,89	0,7832
0,45		1,02	0,8976	0,45		1,03	0,906
0,5		1,1	0,968	0,5		1,1	0,968

Продовження табл. 3.5 – Результати розрахунків витрат полімерної смоли

Товщина, мкм	Час, с	Об'єм, мл	Вартість, грн	Товщина, мкм	Час, с	Об'єм, мл	Вартість, грн
0,2	9	0,47	0,4136	0,2	10	0,51	0,4488
0,25		0,56	0,4928	0,25		0,62	0,5456
0,3		0,72	0,6336	0,3		0,78	0,6864
0,35		0,81	0,7128	0,35		0,87	0,7656
0,4		0,92	0,8096	0,4		0,96	0,8448
0,45		1,01	0,968	0,45		1,08	0,9504
0,5		1,14	1,0032	0,5		1,21	1,0648
Товщина, мкм		Час, с		Об'єм, мл		Вартість, грн	
0,2		11		0,54		0,4752	
0,25				0,67		0,5896	
0,3				0,82		0,7216	
0,35				0,92		0,8096	
0,4				1,09		0,9592	
0,45				1,18		1,0384	
0,5				1,22		1,0736	

За результатами проведеного кореляційного аналізу можливо вивести наступні закономірності, рис. 3.10:

– зміна параметра «висоти шару» на 5 мкм впливає на збільшення або зменшення витрат фотополімерної смоли з коефіцієнтом лінійної регресії (b_1) на 0,97;

– зміна параметра "часу експонування" на 1 с впливає на збільшення або зменшення витрати смоли з коефіцієнтом лінійної регресії (b_2) на 0,215.

Correlations				
		Consumption	Thickness	Time
Pearson Correlation	Consumption	1.000	.970	.215
	Thickness	.970	1.000	.000
	Time	.215	.000	1.000
Sig. (1-tailed)	Consumption	.	.000	.108
	Thickness	.000	.	.500
	Time	.108	.500	.
N	Consumption	35	35	35
	Thickness	35	35	35
	Time	35	35	35

Рисунок 3.10 – Результати розрахунків кореляції Пірсона

Отримані експериментальні результати наведені на рис. 3.11, що демонструє залежність витрати фотополімерної смоли від часу експонування шарів моделі і висоти шару.

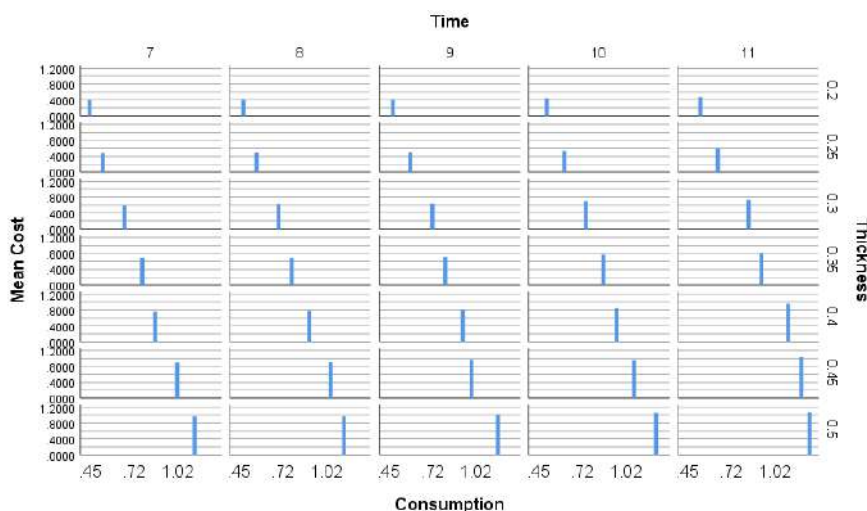


Рисунок 3.11 – Графічне зображення впливу параметрів експонування від витрат фотополімерної смоли

Під час виготовлення зразка витрачено 0,56 мл фотополімерної смоли марки Plexiwire Resin Basic. Якщо проаналізувати подібні зразки, то можливо виявити, що за умови збільшення часу на 1 с, за такої ж висоти шару 0,25 мкм, об'єм витрати смоли у середньому збільшується на 0,17 мл, але при цьому також збільшуються геометричні відхилення ширини провідників в середньому на $\pm 0,125$ мкм.

4 РОЗРОБКА МОДЕЛІ КОНТРОЛЮ НАГРІВУ ФОТОПОЛІМЕРНОЇ СМОЛИ ПІД ЧАС ДРУКУ

4.1 Аналіз моделі керування технологічним процесом виготовлення фотополімерної 3D-моделі

Для реалізації системи контролю експонування фотополімерних шарів на принципах фотополімерного 3D-друку та створення автоматизованого процесу виготовлення моделі за допомогою кіберфізичних систем необхідно визначити модель керування технологічним процесом виробництва та розробити принцип автоматизації даного процесу для виробничого цеху. Запропонована модель керування включає наступні ієрархічні рівні керування [64, 65]:

- фізичний рівень (технологічний процес експонування моделі та нагріву фотополімерної смоли);
- апаратний рівень (установка на базі LCD 3D-принтера);
- програмний рівень (програма для конвертації тривимірної моделі на код керування установкою (G-код));
- рівень керування (система комп'ютерного зору контролю відповідності отриманої моделі до вихідної).

На програмному рівні вихідний файл (*.stl) та завантажується у програму для підготовки до друку NanoDLP або Chitubox.

Дані програми перетворює (*.stl) файл в код керування друку (G-code), в якому внесені параметри та характеристики самої установки, а також вказуються параметри друку, які впливають на якість отриманої моделі, такі як: загальні розміри фотополімерного шару, мм; висота шару друку, мкм; час засвічення одного шару, с; потужність УФ-випромінювання, Лм.

Після генерації G-code програма через Wi-Fi направляє одержаний код на 3D-принтер.

Далі на апаратному рівні керуючий код розсилає команди на відповідні системи та вузли установки, а саме: система переміщення заготовки по осі Z,

яка відповідає за занурення платформи у фотополімерну смолу та за висоту шару маски; УФ-лампа LCD-принтера, який засвічує фотополімерну смолу; екран, на якому проектується зображення шару маски; система очищення заготовки від надлишків фотополімерної смоли після друку моделі.

Окремим компонентом апаратного рівня є система комп'ютерного зору для контролю поверхневих дефектів отриманої моделі та ідентифікації відхилень, а також система для контролю температури фотополімерної смоли.

На фізичному рівні відбувається безпосередній процес нанесення та експонування шарів моделі на платформу для друку. У ході даного технологічного процесу на вихідну модель впливають параметри друку, зазначені в G-code, та властивості фотополімерної смоли. Геометричні відхилення розмірів зображення шарів обумовлені різними комбінаціями зазначених факторів. Аналіз отриманих результатів дозволяє побудувати регресійно-кореляційну модель, яка автоматично поповнює базу знань вже на рівні керування.

На рівні управління система технічного зору за допомогою системи розпізнавання елементів моделі вимірює геометричні розміри отриманої моделі. Після цього порівнюються розміри заданої та отриманої моделі. За результатами порівняння система експертної оцінки діє в одному з двох можливих варіантів:

- якщо немає відхилень в отриманій моделі або вони в рамках допустимих від вихідного зображення шару, продовжувати процес експонування та спостереження;
- якщо відхилення великі, то експертна система на основі кореляції та значень температури фотополімеру вводить корективи у параметри друку та генерує новий G-code, і відбувається новий друк шару. Так цикл повторюється, поки відхилення стануть допустимими.

Модель керування наведено на рис. 4.1.

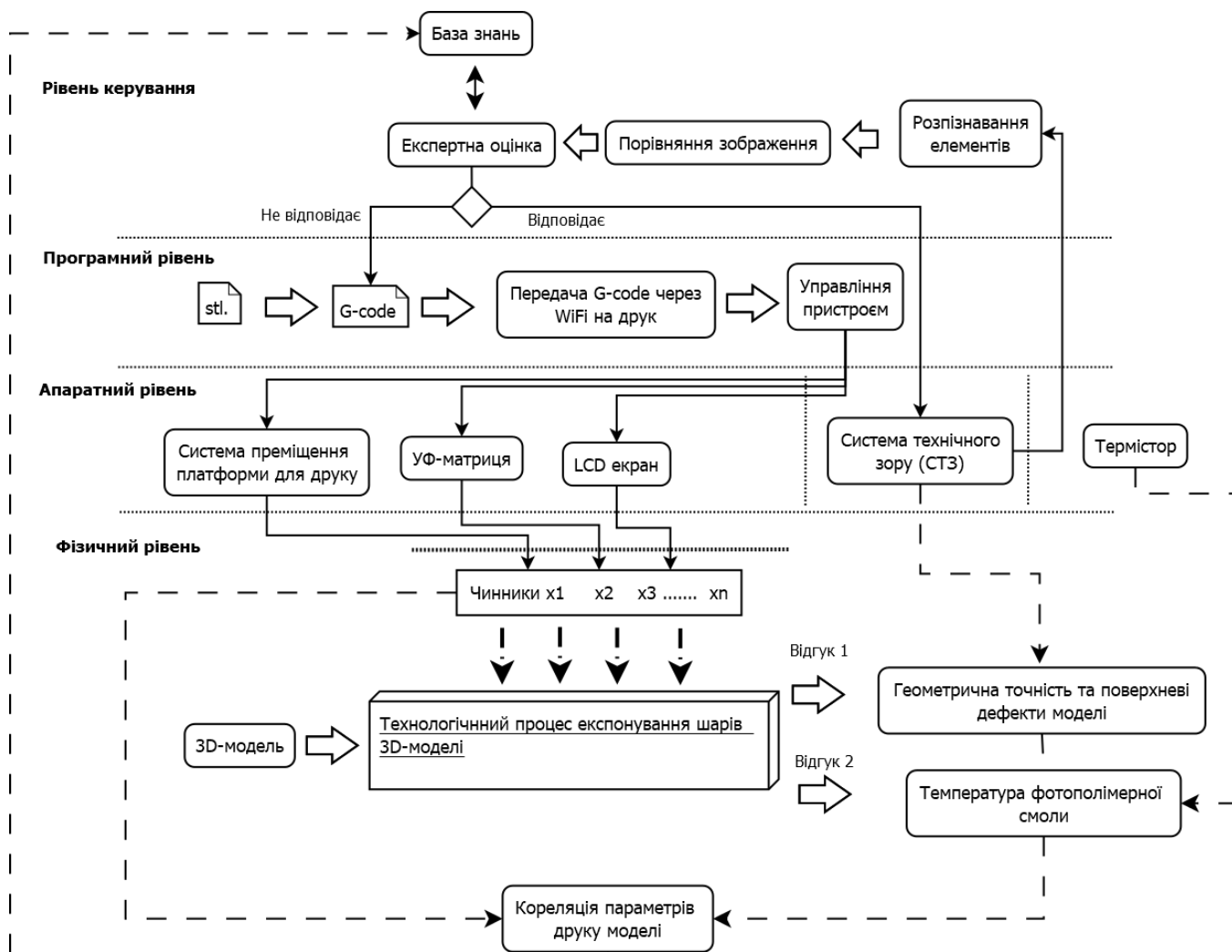


Рисунок 4.1 – Модель керування

Даний підхід організації кіберфізичної системи з внутрішньою інформаційною системою дозволяє візуалізувати отримані моделі та вносити корективи в роботу системи управління для отримання мінімальних відхилень геометричних розмірів.

4.2 Розробка математичної моделі впливу температури в пакеті Matlab Simulink

Першим етапом для моделювання впливу теплових процесів на ТКОР фотополімерної смоли та вирішення проблеми керуванням нагріву фотополімерном під час експонування шарів моделі, необхідно визначити сам

об'єкт керування та що саме можна вважати керуючим впливом для даної моделі.

LED-матриця задається генератором імпульсів, а довжина та скважність імпульсів задається за допомогою час засвічення та часу циклу. Амплітуду імпульсу будемо вимірювати через силу світла (кандели: $\text{кд} \times \text{ср} \times \text{Вт}^{-1}$).

Частина світла, проходячи до робочої зони, перетворюється на тепло в LCD-матриці, плівці ванни і фотополімері. Відсоток (коефіцієнт) поглинання залежить від оптичної прозорості та товщини цих шарів. Коефіцієнт визначається експериментально, товщина відома. Світло, що потрапило на стіл або модель, що друкується, фокусується на ньому і бере участь у полімеризації фотополімеру.

Вважаємо, що світло, яке залишилося, повністю витрачається на полімеризацію смоли. Коефіцієнтом відбиття від заготовки та поверхні деталі нехтуємо (поверхня заготовки матова, смола, що полімеризується, має малий коефіцієнт відбиття). Також на процес теплообміну у верстаті та нагрівання та охолодження фотополімерної смоли впливає примусова вентиляція електронних компонентів пристрою, що теж необхідно враховувати. Враховуємо взаємне нагрівання шарів. На рис. 4.2 наведена схема прийняття рішень АСУ ТП у процесі передачі тепла [66].

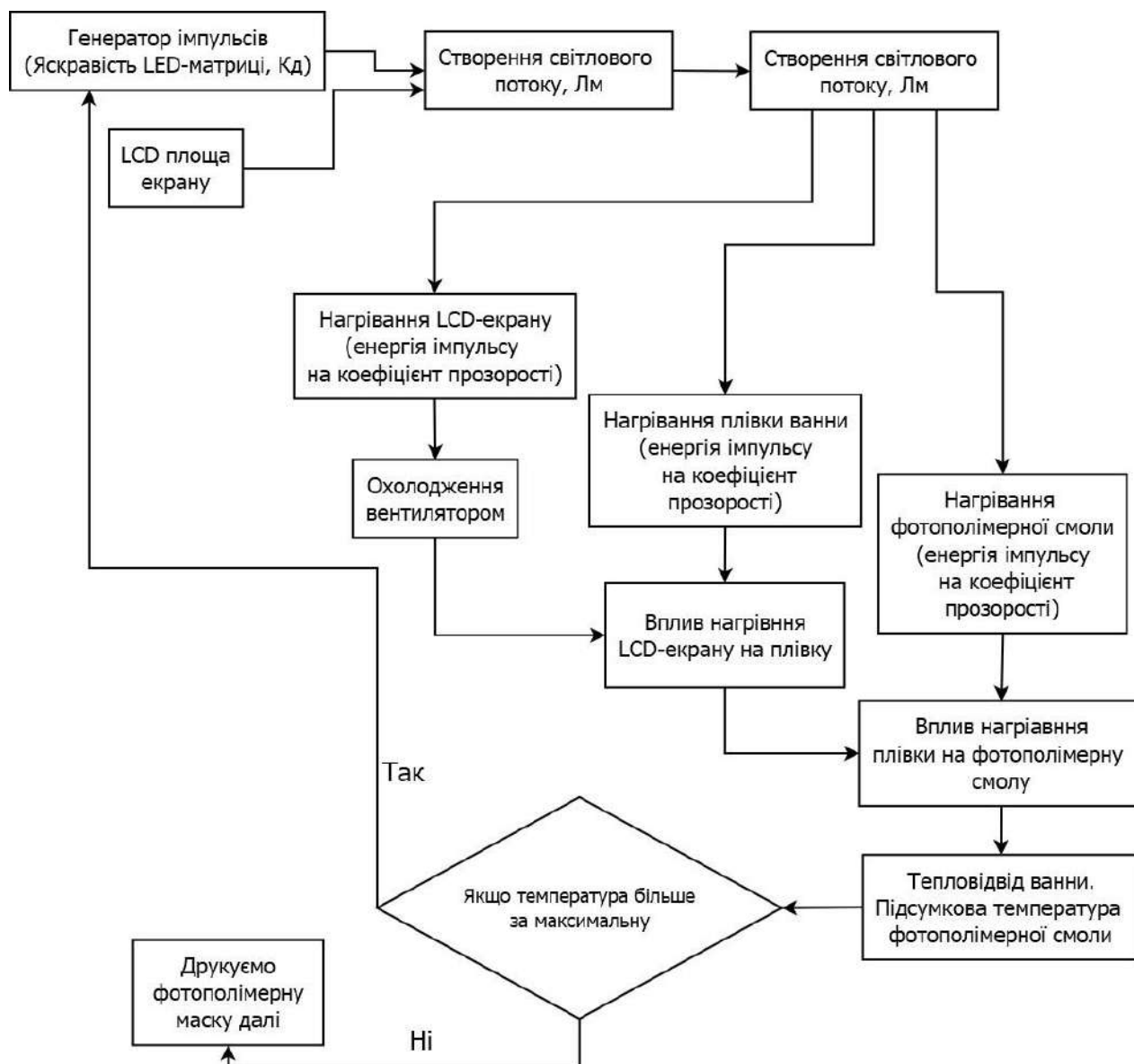


Рисунок 4.2 – Алгоритм роботи під час експонування шарів моделі

До параметрів верстату можливо віднести:

- об'єм зони корпусу верстату;
- елементи, які нагріваються під час експонування шарів LCD-екран, плівка та фотополімерна смола (теплоємність та теплосупротив цих елементів).

Дані елементи можна розглянути як стінки. У даній моделі буде використовуватися розрахунок з низькою теплоємністю, оскільки товщина стінок мала. Для створення стін з низькою теплоємністю у моделі було обрано значення повного опору (імпеданс) і ємнісного опору, наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Розрахунок повного та ємнісного теплового супротиву елементів моделі

Найменування	Товщина шару, м	Теплоємність, C , кДж/м ² ×К	Тепловий супротив R , м ² ×К/Вт	Питома теплоємність C_p , кДж/кг×К	Питома маса, кг/м ²
LCD-екран (скло)	0,00135	4,82	0,32	0,84	0,91
Плівка (полімерна)	0,000125	1,8	0,75	0,95	0,9
Фотополімерна смола (епоксидна смола)	0,015	0,17	0,026	1,2	1,16
Лінза УФ-матриці	0,010	4,82	0,32	0,42	0,91
Повітряний прошарок	0,025	0	0,160	0,00	0,00
Кількість діодів в УФ-матриці	24				
Площа дна ванни, мм ²	8160				
Об'єм відсіку для електроніки верстату, м ³	0,013				

З точки зору оптимізації автоматизованого контролю процесу, значення ТКОР фотополімерної смоли можливо описати за допомогою рис. 4.3.

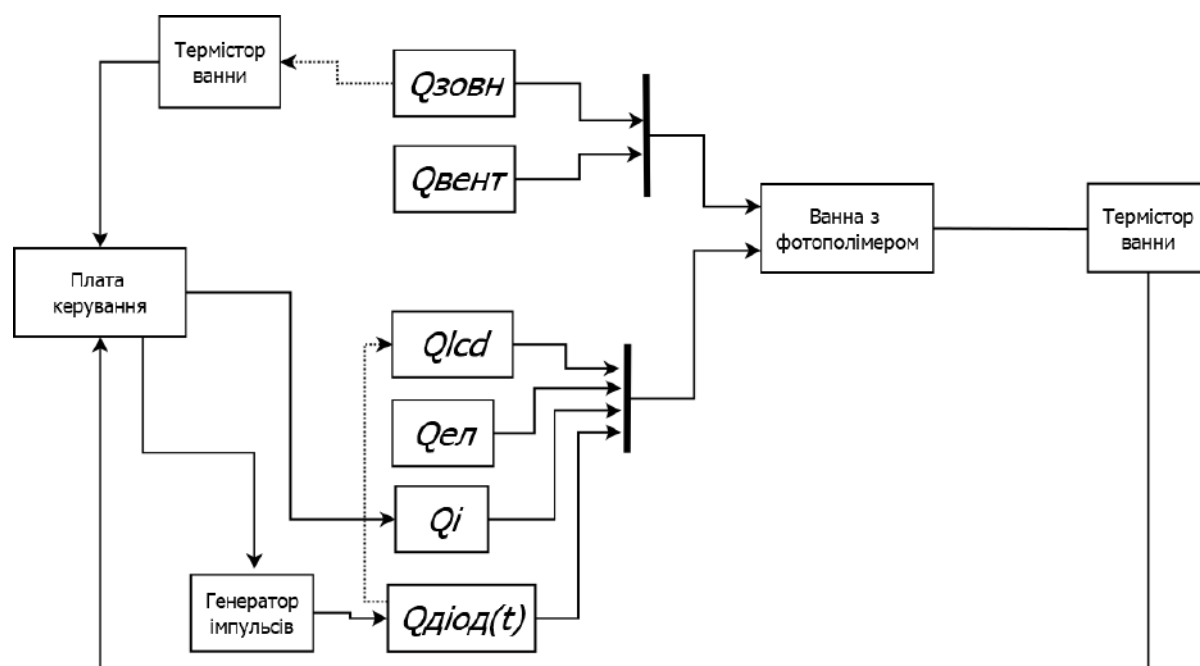


Рисунок 4.3 – Принцип роботи керуючого сигналу АСУ ТП для контролю нагрівання фотополімерної смоли

В даному випадку на систему нагрівання фотополімерної смоли впливає два типи теплових потоків:

- зовнішній нагрів на макет (температура у приміщенні, природня вентиляція у приміщенні);
- внутрішній нагрів всередині макету (нагрів від електроніки макету, нагрів від діодів УФ-матриці).

Зовнішніх теплових потоків в системі є два:

- $Q_{\text{зовн}}$ – кондукційний теплообмін крізь стінки приладу;
- $Q_{\text{вент}}$ – теплообмін від природньої вентиляції.

Математичний опис $Q_{\text{зовн}}$ можливо виразити за допомогою (4.1):

$$Q_{\text{зовн}} = \frac{\Delta T}{\Sigma R_{\text{тс}}} = US(T_{\text{в}} - T_{\text{з}}) , \quad (4.1)$$

де, $R_{\text{тс}}$ – термічний опір, К/Вт;

U – загальний термічний опір, Вт/м²×К;

S – площа дна ванни для фотополімерної смоли, мм²;

$T_{\text{з}}$ – температура зовні верстату, °С;

$T_{\text{в}}$ – температура в середні верстату, °С.

Загальний термічний опір знаходимо за виразом (4.2):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \Sigma \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_e}} , \quad (4.2)$$

де, L – товщина шару, м;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м²×К;

$h_{\text{з}}$ та $h_{\text{в}}$ – коефіцієнт внутрішнього і зовнішнього конвективного теплообміну відповідно, Вт/м²×К.

Математичний опис $Q_{\text{вент}}$ можливо виразити за допомогою виразу (4.3):

$$Q_{\text{вент}} = \Phi \rho_{\text{п}} c_{\text{п}} (T_{\text{в}} - T_{\text{з}}) . \quad (4.3)$$

де, Φ – потік повітря внаслідок природної вентиляції, $\text{м}^3/\text{с}$;

$\rho_{\text{п}}$ – щільність повітря ($1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$);

$c_{\text{п}}$ – питома теплоємність повітря ($1000 \text{ кДж}/\text{кг}$).

Потік повітря внаслідок природної вентиляції Φ знаходимо за допомогою виразу (4.4):

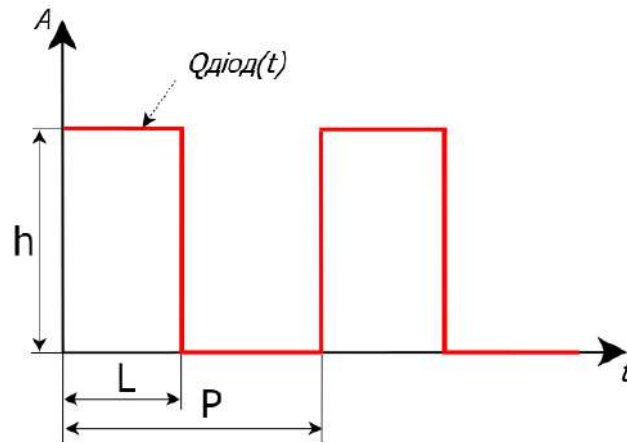
$$\Phi = \frac{nV}{3600} . \quad (4.4)$$

де, V – об'єм повітря в середні верстату, м^3 .

До внутрішніх чинників теплообміну можна віднести:

- Q_{LCD} – загальний внутрішній нагрів від УФ-матриці;
- $Q_{\text{ел}}$ – внутрішній нагрів від електронних компонентів верстата;
- Q_i – потік тепла внаслідок інфільтрації (примусова вентиляція);
- $Q_{\text{діод}}(t)$ – тепло від одного УФ-діода.

За допомогою Q_{LCD} , Q_i та $Q_{\text{діод}}(t)$ можливо контролювати ТКОР фотополімерної смоли. Основним елементом нагріву є УФ-матриця, яка генерує УФ-випромінювання. Для зниження можливості перегріву фотополімеру, вмикання діодів на УФ-матриці можливо зробити за допомогою імпульсів, тим самим робити інтервали між вмиканням та вимиканням діодів. Це буде дозволяти дати час смолі охолонути та зменшити імовірність перегріву та виникнення великого значення ТКОР. Отже автоматизований контроль буде відбуватися за допомогою керування теплового потоку $Q_{\text{діод}}(t)$, рис. 4.4.



A – амплітуда імпульсу; L – довжина імпульсу; P – період імпульсу.

Рисунок 4.4 – Принцип роботи керуючого сигналу

Опис $Q_{\text{діод}}(t)$ можна зробити за допомогою виразу (4.5):

$$Q_{\text{діод}}(t) = q_{\text{випром}} S_{\text{лінза}} SGF. \quad (4.5)$$

де, $q_{\text{випром}}$ – випромінювання діода, Вт/м²;

$S_{\text{лінзи}}$ – площа лінзи для фокусування УФ-випромінювання, мм²;

SGF – коефіцієнт посилення.

Випромінювання діода $q_{\text{випром}}$ знаходимо за формулою (4.6):

$$q_{\text{випром}} = \tau(E_{\text{пр}} + E_{\text{роз}})SGF. \quad (4.6)$$

де, τ – передана енергія;

$E_{\text{пр}}$ – пряма енергія випромінювання від діоду, Вт/м²;

$E_{\text{роз}}$ – пряма енергія випромінювання від діоду, Вт/м².

Загальний внутрішній нагрів від УФ-матриці Q_{LCD} можна виразити за допомогою формулою (4.7):

$$Q_{\text{LCD}} = H_{\text{д}} n_{\text{д}}. \quad (4.7)$$

де, $H_{\text{д}}$ – норма виробітки тепла діода, Вт;

$n_{\text{д}}$ – кількість діодів на УФ-матриці.

Внутрішній нагрів від електронних компонентів верстата $Q_{\text{ел}}$ будемо вважати за сталу величину.

Потік тепла внаслідок інфільтрації (примусова вентиляція) Q_i знаходимо за формулою (4.8):

$$Q_i = 0,013V_r(T_B - T_3) . \quad (4.8)$$

де, 0,013 – це об'єм нагрітого повітря всередні верстату, Дж/м³;

V_r – рівень вентиляції, м³/с.

Диференціальне рівняння, яке буде включати всі теплові потоки та пов'язувати їх вплив з температурою фотополімеру, буде мати наступний вигляд:

$$m_{\text{см}}c_{\text{см}} \frac{dT}{dt} = Q_{\text{діода}}(t) + Q_{LCD} + Q_{\text{ел}} + Q_{\text{зовн}} - Q_{\text{вент}} - Q_i . \quad (4.9)$$

де, $m_{\text{см}}$ – фотополімерної смоли в ванній, кг;

$c_{\text{см}}$ – питома теплоємність фотополімерної смоли.

Динамічну модель можливо виразити за допомогою електр-теплової аналогії. У схемі є 5 резисторів (середовища, через які відбуваються втрати теплових потоків) та чотири конденсатори (середовища, які поступово нагріваються у процесі експонування зображення топології), рис. 4.5.

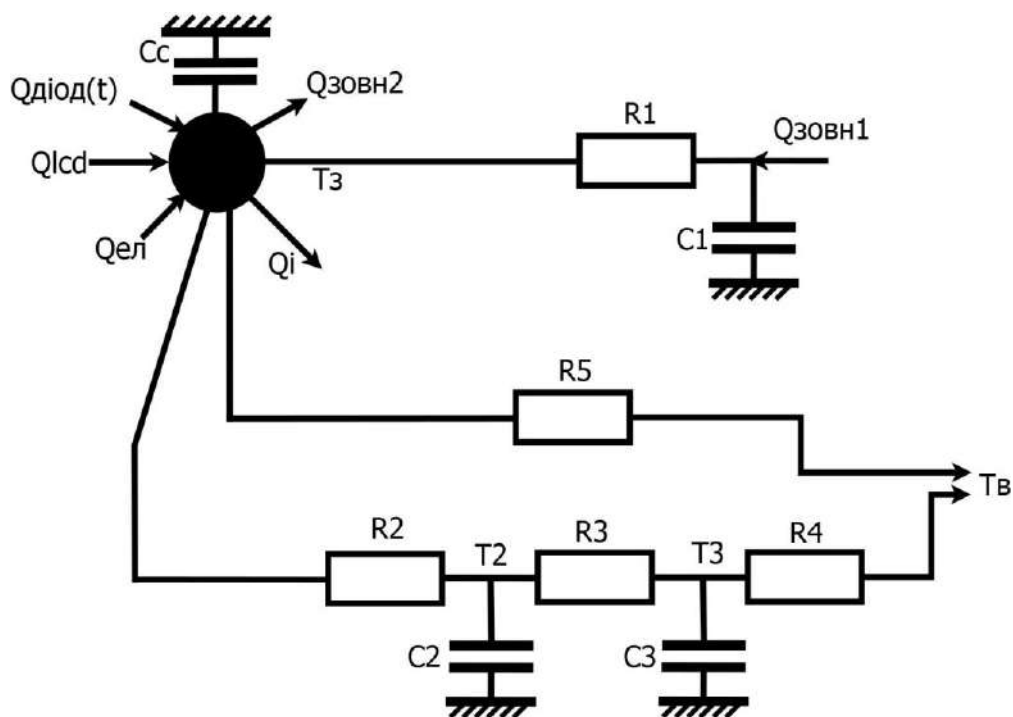


Рисунок 4.5 – Електоро-теплова схема теплообміну

За даною схемою виходить, що: $Q_{зовн1}$ – приплив теплоти безпосередньо від переміщення, Вт; $Q_{зовн2}$ – приплив теплоти від корпусу верстата, Вт; $Q_{вент}$ – приплив теплоти від природньої вентиляції, Вт; Q_{LCD} – приплив теплоти від загального внутрішнього нагріву від УФ-матриці, Вт; $Q_{ел}$ – приплив теплоти від електронних компонентів верстату, Вт; Q_i – приплив теплоти внаслідок інфільтрації повітря, Вт; $Q_{діод}(t)$ – приплив теплоти від одного УФ-діода, Вт; T_3 – температура зовні верстату, °С; T_v – температура всередині верстату, °С; T_2 – температура між УФ-матрицею та повітрям, °С; T_3 – температура між повітрям та LCD-екраном, °С; C_c – теплоємність фотополімерної смоли у ванній, Дж/К; C_1 – теплоємність матеріалів корпусу верстату, Дж/К; C_2 – теплоємність фіксуєної лінзи, Дж/К; C_3 – LCD-екрану, Дж/К; R_1 – опір матеріалів корпусу, К/Вт; R_2 – опір матеріалу лінзи, К/Вт; R_3 – опір повітря між лінзою та LCD-екраном, К/Вт; R_4 – опір LCD-екрана, К/Вт; R_5 – сумарний термічний опір.

Динамічний режим верстату можна змодельовати за допомогою системи звичайних лінійних диференціальних рівнянь. Ці рівняння можна переписати у вигляді матриць, а потім реалізувати динамічну модель у середовищі

MatLab/Simulink. Рівняння для температурних вузлів мають такий вигляд [67, 68], формула 4.10:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dT_1}{dt} &= \frac{1}{R_1} (T_3 - T_1) + q_{\text{випром}} S_{\text{лінза}} SGF \vartheta, \\ C_2 \frac{dT_2}{dt} &= \frac{1}{R_2} (T_3 - T_2) - \frac{1}{R_3} (T_2 - T_3), \\ C_3 \frac{dT_3}{dt} &= \frac{1}{R_3} (T_2 - T_3) - \frac{1}{R_4} (T_3 - T_4). \end{aligned} \quad (4.10)$$

де показник конвекції:

$$\begin{aligned} C_c \frac{dT_c}{dt} &= Q_{\text{діод}}(t) + Q_{LCD} + Q_{\text{ел}} + q_{\text{випром}} S_{\text{лінза}} (1 - \vartheta) + mcT_3 - \frac{1}{R_1} (T_3 - T_1) - \\ &\frac{1}{R_2} (T_3 - T_2) - \frac{1}{R_5} (T_3 - T_5). \end{aligned} \quad (4.11)$$

Якщо $\vartheta = 0$, то енергія випромінювання повністю передається через пікселі LCD-екрана. Якщо $\vartheta = 1$, то вся енергія випромінювання безпосередньо нагріває фотополімерну смолу.

Після перетворення рівняння мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{T}_1 &= \left(\frac{1}{R_1 C_1} \right) T_i + \left(-\frac{1}{R_1 C_1} \right) T_1 + \left(\frac{S_{\text{лінзи}} SGF \vartheta}{C_1} \right) q_{\text{випром}}; \\ \dot{T}_2 &= \left(\frac{1}{R_2 C_2} \right) T_i + \left(-\frac{1}{R_3 C_3} - \frac{1}{R_3 C_2} \right) T_2 + \left(\frac{1}{R_3 C_2} \right) T_3; \\ \dot{T}_3 &= \left(-\frac{1}{R_3 C_3} \right) T_2 + \left(-\frac{1}{R_3 C_3} - \frac{1}{R_4 C_3} \right) T_3 + \left(\frac{1}{R_4 C_3} \right) T_4; \\ \dot{T}_5 &= \left(\frac{1}{C_c} \right) Q_{\text{діод}}(t) + \left(\frac{1}{C_c} \right) Q_{LCD} + \left(\frac{1}{C_c} \right) Q_{\text{ел}} + \left(\frac{1}{C_c} \right) [q_{\text{изл}} S_{\text{стекл}} SGF (1 - \vartheta)] + \\ &\left(\frac{mc}{C_c} + \frac{1}{R_5 C_c} \right) T + \left(\frac{1}{R_1 C_c} \right) T_1 + \left(\frac{1}{R_2 C_c} \right) T_2 + \left(\frac{mc}{C_c} - \frac{1}{R_2 C_c} - \frac{1}{R_5 C_c} - \frac{1}{R_1 C_c} \right) T_3. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Рівняння (4.10) та (4.12) можна подати в матричному вигляді:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

З такими векторами отримуємо наступну матрицю рівнянь:

$$\begin{aligned}
 x &= \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_i \end{bmatrix}; & \dot{x} &= \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \\ \dot{T}_i \end{bmatrix}; & y &= \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_i \end{bmatrix}; & u &= \begin{bmatrix} T_B \\ Q_{\text{вент}} \\ Q_{\text{зовн}} \\ q_{\text{випром}} \end{bmatrix}; \\
 C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; & D &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\
 A &= \begin{bmatrix} \frac{-1}{R_1 C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{R_1 C_1} - \frac{1}{R_3 C_2} & \frac{1}{R_3 C_2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_3 C_3} & -\frac{1}{R_4 C_3} & 0 \\ \frac{1}{R_1 C_c} & \frac{1}{R_1 C_1} & 0 & -\frac{\dot{m}c}{C_c} - \frac{1}{R_2 C_c} - \frac{1}{R_5 C_c} - \frac{1}{R_1 C_c} \end{bmatrix}; \\
 B &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{S_{\text{лінза}} SGF \vartheta}{C_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_4 C_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\dot{m}c}{C_c} + \frac{1}{R_5 C_c} & \frac{1}{C_c} & \frac{1}{C_c} & \frac{S_{\text{лінза}} SGF \vartheta}{C_c} \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Дослідження теплових режимів фотополімерної смоли виконується шляхом комп'ютерного моделювання динамічної моделі у середовищі MatLab/Simulink [69]. Реалізація моделі у середовищі Simulink наведена на рис. 4.6.

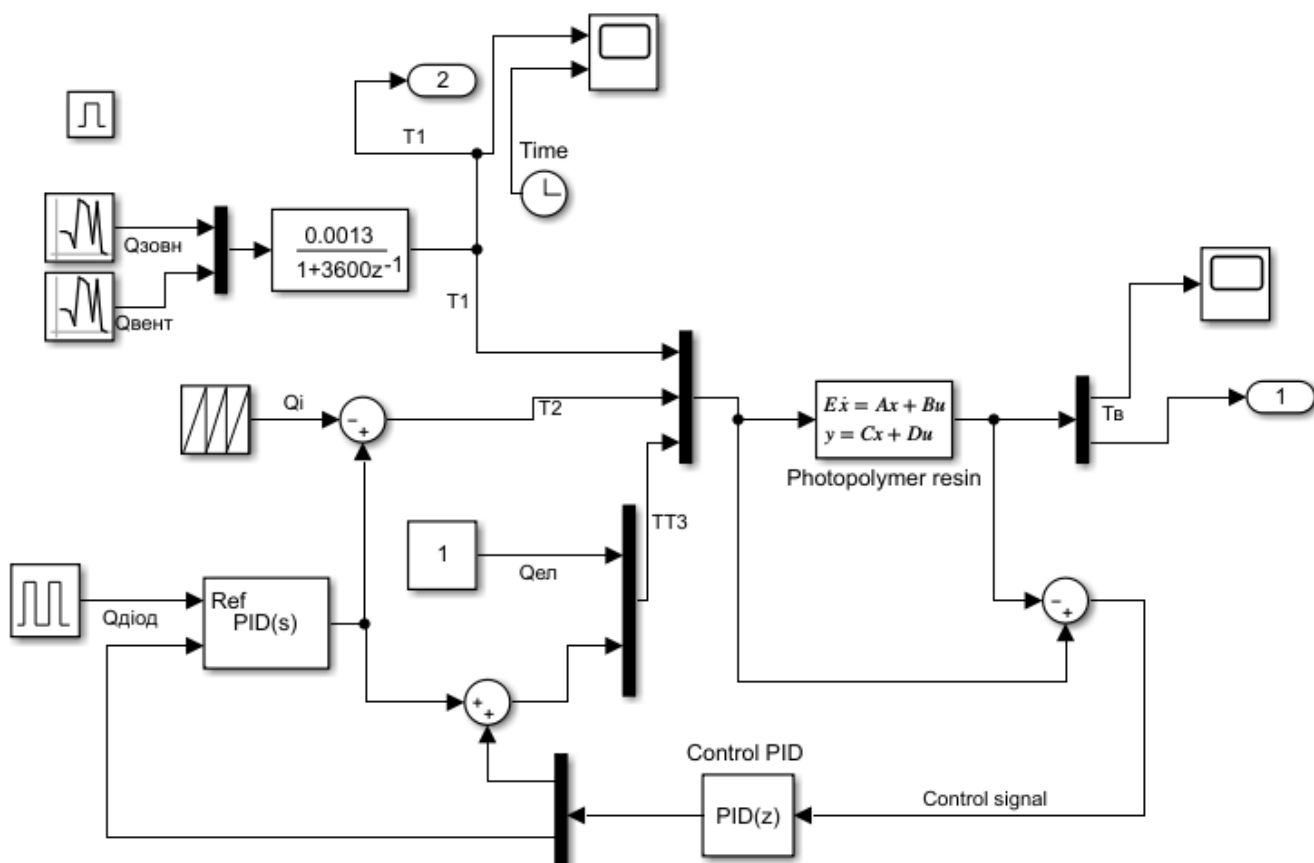


Рисунок 4.6 – Схема контролю температури фотополімерної смоли

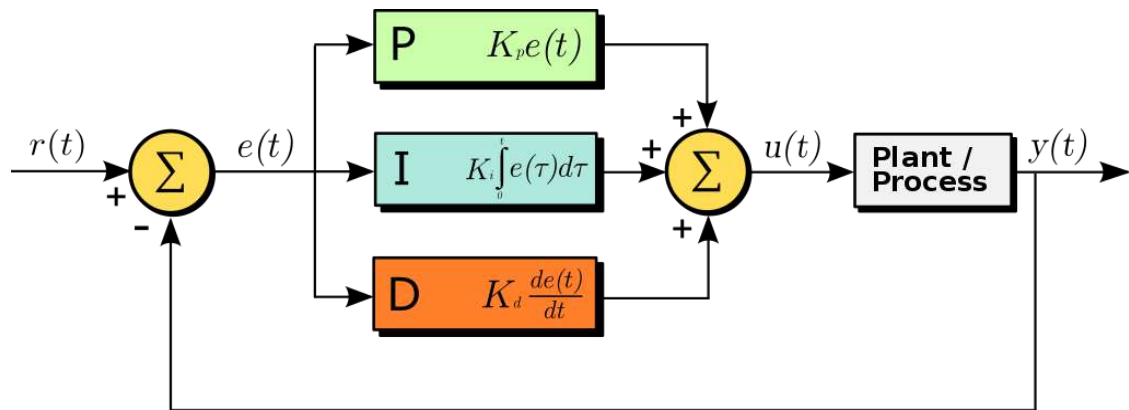
Розташування елементів в конструкції LCD-принтера впливає на температуру повітря всередині верстат. Для контролю температури фотополімерної смоли під час експонування зображення. У верстат буде встановлено два термістора: термістор контролю зовнішньої температури; термістор контролю температури фотополімерної смоли.

Для контролю сигналів імпульсів УФ-лампи верстату буде використовуватися PID-регулювання (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор) [70, 71].

PID-регулятор – пристрій у керувальному контурі зі зворотним зв'язком. Використовується в системах автоматичного керування для формування керуючого сигналу з метою отримання необхідних точності та якості перехідного процесу.

Призначення PID-регулятора у підтриманні заданого значення r деякої величини y за допомогою зміни іншої величини U . Значення r називається

заданим значенням (або уставкою), а різниця $e=(r-y)$ – нев'язкою (або помилкою регулювання), неузгодженістю або відхиленням величини від заданої. Наведені нижче формули справедливі у разі лінійності та стаціонарності системи, що рідко виконується на практиці, рис. 4.7.



$y(t)$ – вихідна величина; $r(t)$ – задане значення; $e(t)$ – похибка;

$U(t)$ – керуючий сигнал, що керує величиною $y(t)$

Рисунок 4.7 – Система керування зі зворотним зв'язком за участю PID-регулятора [70]

Вихідний сигнал регулятора U визначається трьома доданками, формула 4.14:

$$U(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}, \quad (4.14)$$

де, K_p , K_i , K_d – коефіцієнти посилення пропорційної, інтегрувальної та диференціувальної складових регулятора відповідно.

У системі пропорційно-інтегро-диференціального управління пристрій управління генерує сигнал, що є сумою трьох компонент: пропорційної похибки, інтегралу від похибки та похідної похибки. Передавальна функція пристрою управління або PID-регулятора визначається за формулою 4.15:

$$W(s) = k_1 + \frac{k_2}{s} + k_3 s, \quad (4.15)$$

Включення похідної від похибки у закон управління призводить до збільшення швидкості реакції системи на зміни вхідного впливу, підвищує її швидкодію, а також зменшує динамічну похибку системи та поліпшує її динамічні характеристики, рис. 4.8.

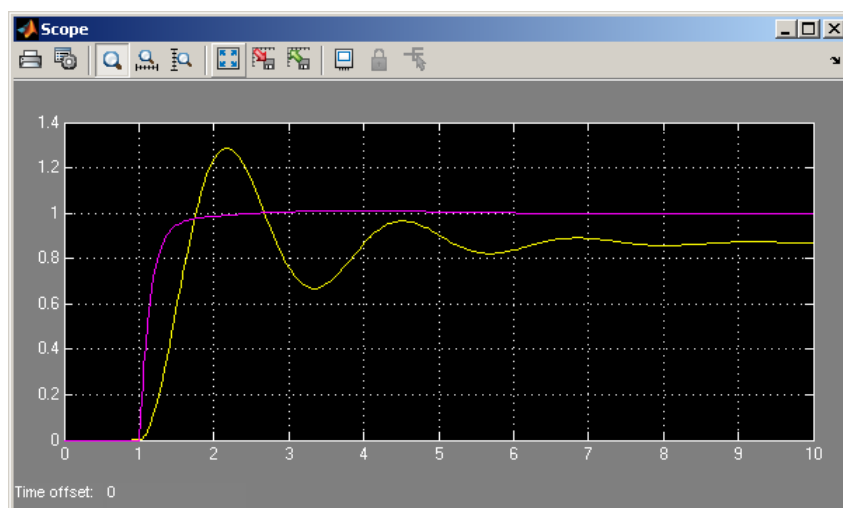


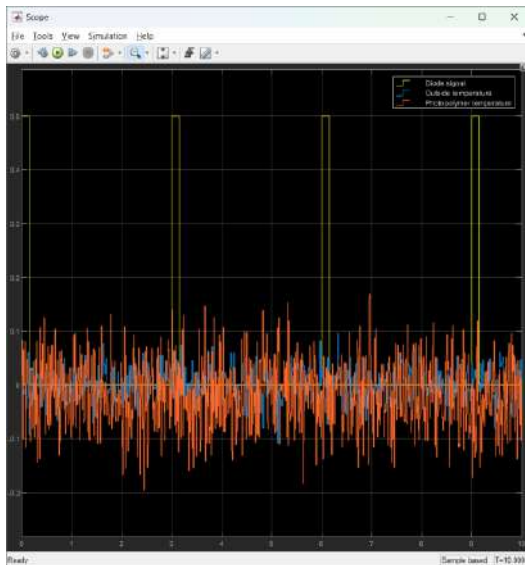
Рисунок 4.8 – Приклад управління сигналу за допомогою PID-регулятора [70]

Отже, за допомогою PID-регулятора буде відбуватися порівняння температури фотополімерної смоли зі значенням температури, вказаної на контролері, кожні 1000 мс. Значення на контролері вказується власноруч, або воно буде обиратися автоматично, виходячи з коливань зовнішньої температури навколо макету.

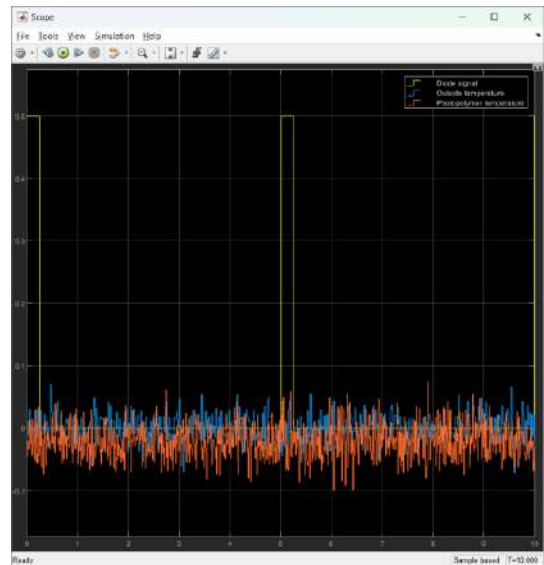
Якщо значення температури фотополімерної смоли під час експонування зображення більше, ніж значення на контролері, то PID-регулятор передає сигнал контролеру. Після цього контролер вносить корективи в G-code та робить більший інтервал між вмиканнями УФ-матриці. Тим самим збільшується час на охолодження фотополімерної смоли. Після цього знову відбувається порівняння температури.

Якщо коливання тепла в фотополімерній смолі не перевищують вказаної температури, то продовжується друк, якщо більше то знову збільшується час

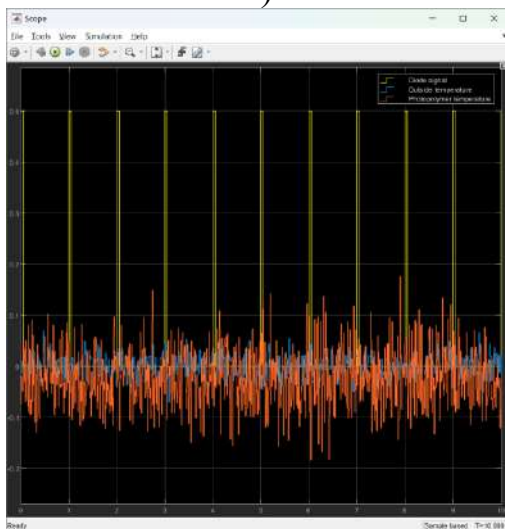
між вмиканням та вимиканням УФ-матриці. На рис. 4.9 наведені результати роботи системи контролю температури фотополімерної смоли.



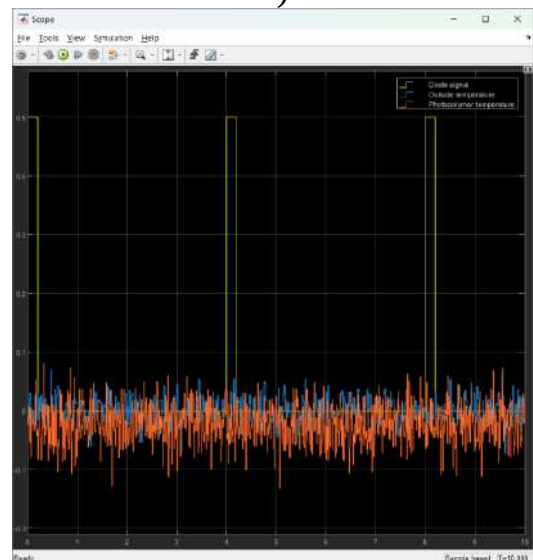
а)



б)



в)



г)

а – температура при роботі верстата без контролю з періодом експонування 3 с; б – температура при роботі верстата з контролем з періодом експонування 6 с; в – температура при роботі верстата без контролю з періодом експонування 1 с; г – температура при роботі верстата з контролем з періодом експонування 4 с.

Рисунок 4.9 – Результати роботи схеми контролю температури фотополімерної смоли

5 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ РОЗМІРІВ ФОТОПОЛІМЕРНИХ МОДЕЛЕЙ

5.1 Етапи підготовки реального зображення для розроблення ПЗ

Виходячи з моделі керування (рис. 4.1), для контролю відхилень розмірів топології ДП та порівняння між собою початкової топології та отриманої після нанесення фотополімерної маски необхідно розробити СТЗ з програмним забезпеченням (ПЗ). Це дасть можливість контролю та обробки результатів експонування топології. Даний тип задач найбільш поширений у кіберфізичних виробничих системах (CPPS).

В основу Industry 4.0 покладені передові дослідження в галузях: штучного інтелекту, робототехніки, хмарних обчислень, адитивних технологій і.т.д., синтез застосування яких дозволив удосконалити технологічні процеси виробництва. Розробити новий підхід у вигляді кіберфізичних виробничих систем (CPPS) [1-3]. Особливістю застосування CPPS – синтез фізичного та кібернетичного світу в єдиний інформаційний екопростір, який дозволяє створювати дуже гнучкі переналаштовувані виробничі лінії [4]. Однією з перспективних сфер застосування CPPS вважається їх впровадження в виробництва високотехнологічних виробів радіоелектронного призначення та вдосконалення систем технічного зору.

Обробка зображень топології друкованих плат є важливою складовою Industry 4.0, оскільки зображення можуть бути використані для автоматизованого контролю якості та візуальної інспекції виробничих процесів, пов'язаних з виробництвом друкованих плат. Основні застосування обробки зображень топології друкованих плат в Industry 4.0 включають [5]:

- контроль якості: обробка зображень може використовуватись для контролю якості друкованих плат, наприклад, для виявлення дефектів, які можуть бути непомітні для людського ока. Програмне забезпечення для обробки зображень може автоматично розпізнавати дефекти, такі як

пошкоджені доріжки, коротке замикання, відсутність деталей та інші, та сповіщати операторів про їх наявність;

- візуальна інспекція: обробка зображень може бути використана для візуального контролю друкованих плат у режимі реального часу. Вона може допомогти забезпечити точність та якість продукту під час виробництва;

- моніторинг процесу: обробка зображень може бути використана для моніторингу процесів виробництва друкованих плат. Вона може допомогти відслідковувати рух обладнання, контролювати температуру та інші параметри процесу виробництва;

- автоматичне розпізнавання топології: обробка зображень може бути використана для автоматичного розпізнавання топології друкованих плат. Це може допомогти в автоматизованому процесі монтажу електронних компонентів на друковані плати;

- віртуальна реальність: обробка зображень може бути використана для створення віртуальної моделі топології ДП.

Для обробки зображень використовують різні методи, такі як [6]:

- фільтрація зображень – використовується для зменшення шуму на зображенні, покращення контрасту та інших властивостей зображення. До методів фільтрації належать медіанна фільтрація, фільтрація Гауса та інші;

- сегментація зображень – використовується для виділення окремих об'єктів на зображенні. Це може бути корисно для автоматизованого розпізнавання об'єктів, класифікації зображень та іншого;

- визначення ознак – використовується для виділення специфічних ознак зображення, таких як кольорові характеристики, форма та текстура. Це може бути корисно для класифікації зображень та іншого;

- розпізнавання образів – використовується для автоматичного розпізнавання об'єктів на зображенні та класифікації зображень за допомогою алгоритмів машинного навчання.

Ці методи обробки зображень можуть використовуватися окремо або в комбінації для досягнення певної мети аналізу зображення. Для вирішення

задачі аналізу та порівняння зображень заданої та отриманої топологій ДП, необхідно підготувати зображення для подальшої обробки та порівняння за допомогою машинного зору. Дане завдання розробки програмного забезпечення складається з наступних етапів та графічних бібліотек: фільтрація; нормалізація (масштабування і поворот); виділення реперних точок; нормалізація (масштабування і поворот).

5.2 Методи фільтрації зображень

5.2.1 Лінійна фільтрація

Лінійні фільтри є частиною сімейства фільтрів і відрізняються своїм простим математичним описом, але надають можливість досягти різноманітних результатів. Опис лінійного фільтра визначається матеріально значущою функцією F , яка задана на растровому зображенні. Ця функція відома як ядро фільтра, і сам процес фільтрації виконується за допомогою операції дискретної згортки (зваженого підсумовування).

$$B(x, y) = \sum_i \sum_j F(i, j) \cdot A(x + i, y + j) , \quad (5.1)$$

Зазвичай ядро фільтра відрізняється від нуля тільки в певній області навколо точки $(0, 0)$, а за її межами значення $F(i, j)$ або дорівнює нулю, або дуже близьке до нього, таким чином, його можна ігнорувати. Ядро фільтра, що визначено на прямокутній області N , може бути представлене як матриця розміром m_{xn} , за умови, що довжини її сторін є непарними числами. Для задання матриці M_{kl} ядра її слід центрувати (5.2):

$$F(i, j) = M_i \frac{m-1}{2} j + \frac{n-1}{2} , \quad (5.2)$$

Коли піксель (x, y) розташований в межах околів границі зображення, в цьому випадку значення $A(x+i, y+j)$ може вказувати на піксель, що перебуває за межами зображення. Цю проблему можна вирішити декількома методами [72]:

- не проводити фільтрацію для таких пікселів, обрізавши зображення по краях або закрасивши їх, наприклад, чорним кольором;
- не включати відповідний піксель у підсумовування, розподіливши його вагу $F(i, j)$ рівномірно серед інших пікселів околу $N(x, y)$;
- визначити значення пікселів за межами зображення за допомогою екстраполяції;
- визначити значення пікселів за межами зображення за допомогою дзеркального відображення ($A(-2, 5) = A(2, 5)$).

Вибір конкретного способу потрібно робити з урахуванням конкретного фільтру та особливостей конкретного застосування. Також для встановлення необхідного порогу контрастності зображення підключаємо бібліотеку нормалізації зображення, Додаток В. Програмна реалізація коду для ПЗ наведено на рис. 5.1.

```
public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> gray)
{
    var normalizedOutput = new Image<Gray, byte>(gray.Width, gray.Height, new Gray(0));
    CvInvoke.Normalize(gray, normalizedOutput, 0, 255, NormType.MinMax);
    return normalizedOutput;
}
public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> firstImage, Image<Gray,
byte> secondImage)
{
    throw new NotImplementedException("Normalize is non lined image processor");
}
```

Рисунок 5.1 – Програмна реалізація коду лінійної фільтрації

На рис. 5.2, наведено приклад роботи лінійної фільтрації, для обробки зображень друкованих виробів.

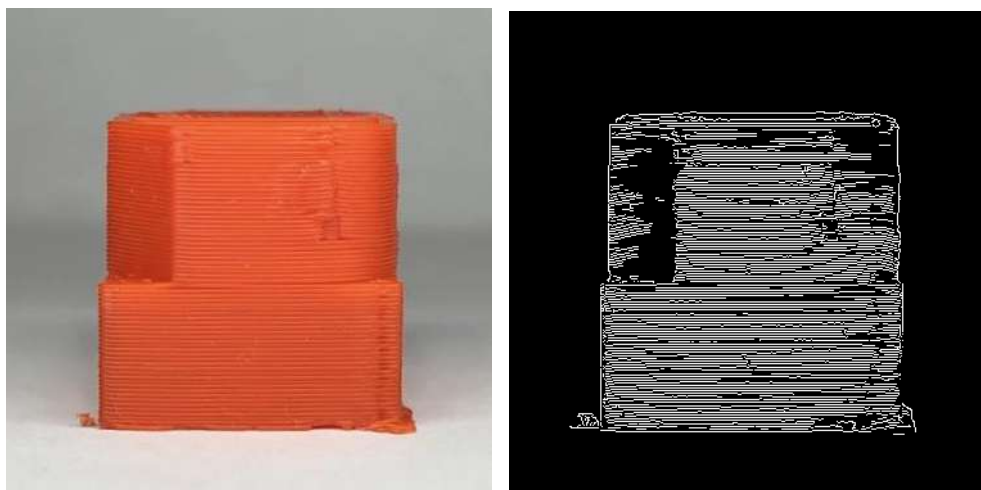


Рисунок 5.2 – Зображення до лінеаризації та після

5.2.2 Згладжувальні фільтри

Згладжувальні фільтри діють на зображення аналогічно мутному склу: зображення стає нерізким, розмитим. Найпростіший прямокутний згладжувальний фільтр радіуса r задається за допомогою матриці розміру $(2r+1) \times (2r+1)$, всі значення якої рівні (5.3):

$$\frac{1}{(2r+1)^2}, \quad (5.3)$$

Сума всіх елементів матриці дорівнює одиниці. При застосуванні фільтрації зі вказаним ядром, значення пікселя замінюється середнім значенням пікселів, розташованих у квадраті зі стороною $(2r+1)$ навколо нього [73].

Одним з можливих застосувань фільтрації є приглушення шуму, що означає відновлення вихідного зображення, до пікселів якого додано випадковий шум. Оскільки шум змінюється незалежно для кожного пікселя і за умови, що математичне сподівання значень шуму дорівнює нулю, то шуми сусідніх пікселів буде компенсувати один одного. Збільшення розміру вікна фільтрації призводить до меншої усередненої інтенсивності шуму, але при цьому спостерігається значне розмиття важливих деталей на зображенні.

Припущенням про вихідне не зашумлене зображення є подібність значень інтенсивності пікселів, розташованих поруч. Зазвичай, чим менша відстань між пікселями, тим ймовірніше їхня подібність. Це відрізняє вихідне не зашумлене зображення від шумових компонентів, для яких схожість пікселів не залежить від їхньої відстані. Враховуючи це, можна припустити, що використання прямокутного фільтра для шумозаглушення має суттєвий недолік: пікселі на відстані r від оброблюваного пікселя впливають на результат так само, як і сусідні.

Більш ефективне шумозаглушення можна, таким чином, здійснити, якщо вплив пікселів один на одного буде зменшуватися з відстанню. Цією властивістю володіє гаусівський фільтр з ядром.

$$F_{gauss}(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right). \quad (5.4)$$

Гаусівський фільтр має ядро нескінченного розміру, але швидко зменшується до нуля при віддалені від точки $(0, 0)$. На практиці можна обмежитися згорткою вікна навколо $(0, 0)$, наприклад, взявши радіус вікна на рівні 3σ . Гаусівська фільтрація також згладжує зображення. На відміну від прямокутного фільтра, точки при гаусівській фільтрації створюватимуть симетрично розмиту пляму, зі спаданням яскравості від середини до країв, набагато більш схожу на реальне розмиття від розфокусування лінз [74]. Очікувано, гаусівська фільтрація є більш ефективною при шумозаглушенні, оскільки вплив пікселів один на одного при гаусівській фільтрації зворотно пропорційний квадрату відстані між ними. Коефіцієнт пропорційності і ступінь розмиття визначаються параметром σ .

Програмно даний метод працює за наступною послідовністю. Виконується конвертація зображення до сірого, після чого створюється матриця пікселів, яка записується, і вмикається функція зниження шумів. Після цього оброблене зображення виводиться на екран. Програмна реалізація наведена на рис. 5.3, повний файл бібліотеки в Додатку Г.

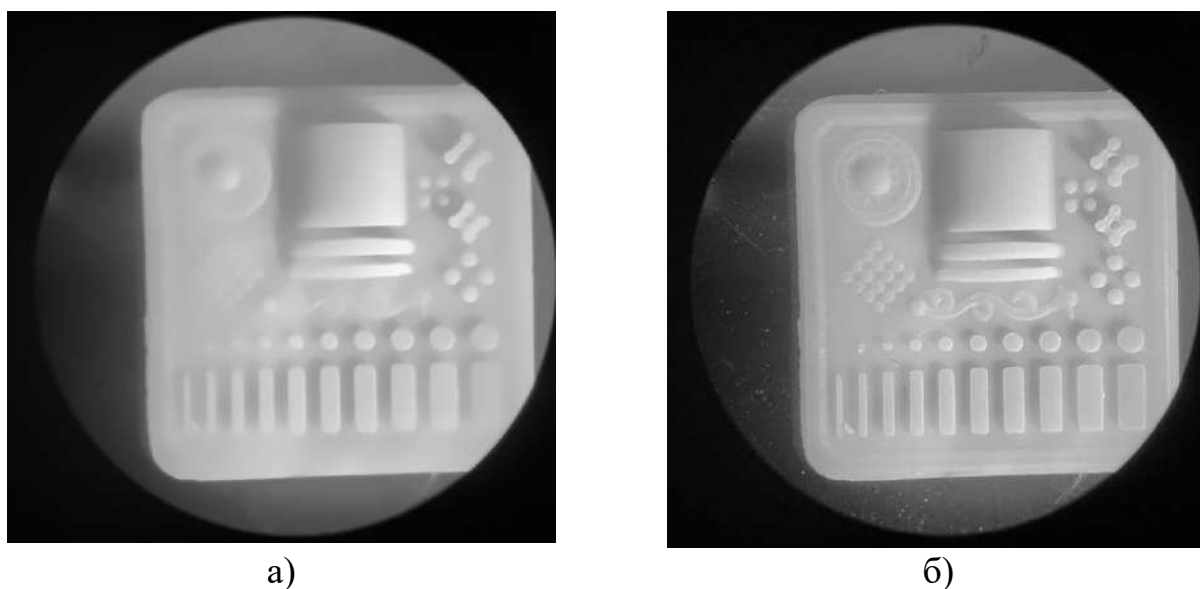
```

public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> gray)
{
    Mat output = new Mat();
    CvInvoke.FastNlMeansDenoising(gray.Mat, output, DenoiseFactor);
    return output.ToImage<Gray, byte>();
}

```

Рисунок 5.3 – Програмна реалізація згладжуючого фільтру

На рис. 5.4 наведені приклади роботи коду за різних значень згладжування зображення.



а) – при автоматичному значенні порогу згладжування 7; б) – при значенні порогу згладжування зображення 15.

Рисунок 5.4 – Реалізація глобальної бінарizaції

5.2.3 Бінарizaція

Процес бінарizaції зображення полягає у перетворенні кольорового зображення в двоколірне чорно-біле. Основним параметром цього процесу є поріг t , який порівнюється з яскравістю кожного пікселя. Внаслідок цього порівняння пікселю присвоюється значення 0 або 1. Це значення порогу є

ключовим критерієм перевірки інтенсивності кожної точки на зображенні [75, 76].

Існують різні методи бінаризації, які можна умовно розділити на дві групи – глобальні та локальні.

У першому випадку величина порогу залишається незмінною протягом усього процесу бінаризації. Математично це можливо описати виразом (5.5). У випадку адаптивної бінаризації, зображення розбивається на області, в кожній з яких обчислюється локальний поріг.

$$f(i,j) = \begin{cases} 0, & (i,j) < t \\ 1, & (i,j) \geq t \end{cases} \quad (5.5)$$

Функція глобальної бінаризації представлена на рис. 5.5.

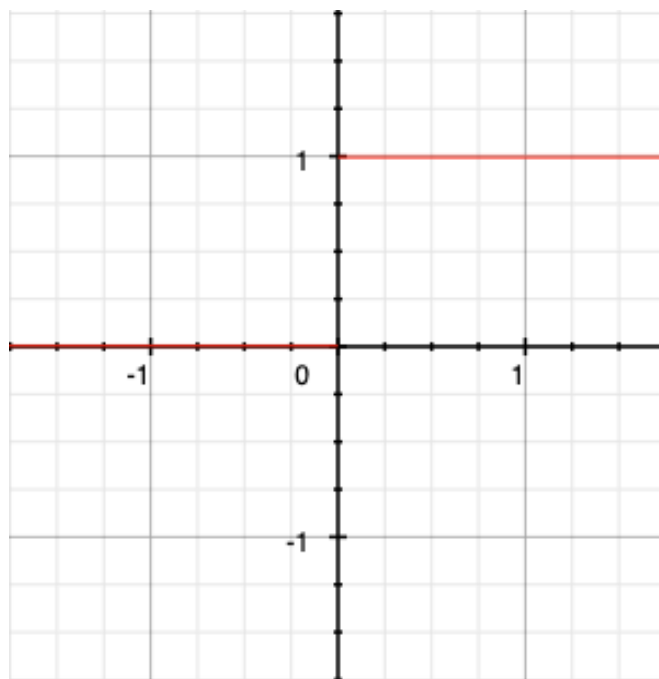
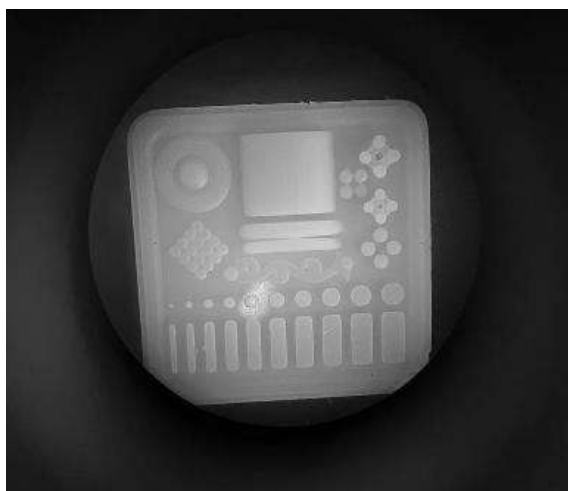


Рисунок 5.5 – Функція бінаризації

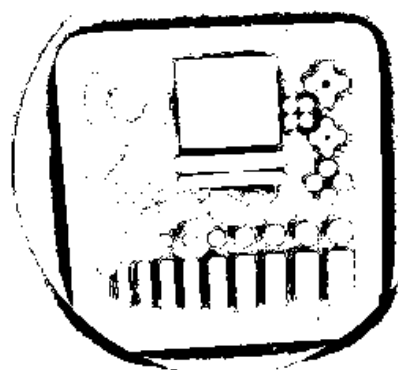
Головна мета бінаризації – це зменшення кількості інформації та залишення основних даних, з якими буде провадитися подальша обробка. Глобальна та локальна бінаризація являє собою базову обробку, і такий спосіб погано підходить для зображень з великим контрастом та з великою кількістю

шумів [77 – 789. Це пов'язано з визначенням порогових значень обробки пікселів, рис. 5.6.

Ефективна бінаризація значно спрощує подальшу обробку зображення. З іншого боку, невдачі у процесі бінаризації можуть призвести до неполадок, таких як розриви у лініях, втрата значущих деталей, порушення цілісності об'єктів, поява шуму і непередбачувані спотворення символів через неоднорідності фону [80].



а)



б)

а – вхідне зображення; б – бінаризоване зображення

Рисунок 5.6 – Реалізація глобальної бінаризації

Бібліотека бінаризації зображення наведена в Додатку Д. Програмна реалізація наведена на рис. 5.7.

```
public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> gray)
{
    if (IsOtsu)
    {
        _threshold = (int)this.Otsu(gray);
    }
    var binary = gray.ThresholdBinary(new Gray(_threshold), new Gray(255));
    if (binary != null)
    {
        return binary;
    }
    return gray;
}
```

Рисунок 5.7 – Програмна реалізація бінаризації зображення

У даній стоці коду виставляємо умову. Якщо порог знаходиться, то автоматично підключаємо метод Otsu, якщо ні, то вказуємо значення порогу Otsu власноруч.

5.2.4 Метод Otsu

Для визначення порогових значень у бініризації застосовується метод Otsu. Головна задача даного методу «Otsu» знаходження необхідного порогового значення бінаризації. Процес відокремлення пікселів переднього плану від фону називається порогуванням. Це метод на основі дисперсії для знаходження порогового значення, за якого зважена дисперсія між пікселями переднього і заднього плану є найменшою. Ключова ідея полягає в тому, щоб перебрати всі можливі значення порогу і виміряти розкид пікселів переднього і заднього планів. Потім потрібно знайти поріг, за якого розкид буде найменшим [81, 82].

Алгоритм ітеративно шукає поріг t , який мінімізує внутрішньокласову дисперсію, визначену як зважена сума дисперсії двох класів (фону і переднього плану). Кольори у відтінках сірого зазвичай знаходяться в діапазоні 0-255 (0-1 у випадку плаваючого відтінку). Отже, якщо ми виберемо поріг 100, то всі пікселі зі значеннями менше 100 стануть фоном, а всі пікселі зі значеннями більше або дорівнюють 100 стануть переднім планом зображення. Формула для знаходження внутрішньокласової дисперсії за будь-якого порогу t має вигляд (5.6).

$$\sigma_m^2(t) = \sigma_{bg}(t)\sigma_{bg}^2(t) + \sigma_{fg}(t)\sigma_{fg}^2(t), \quad (5.6)$$

де, σ_{bg} та σ_{fg} – ймовірності появи певного виду пікселів для кожного класу за порогового значення t ;

σ_m^2 – зважена за долями сума дисперсії.

Щоб зрозуміти, що означає ймовірність в даному випадку, нехай:

– P_{all} – загальна кількість пікселів у зображенні;

– $P_{BG}(t)$ – кількість пікселів фону на порозі t ;

– $P_{FG}(t)$ – кількість пікселів переднього плану в момент часу t .

Таким чином, ваги ймовірності можливо задати за (5.7) та (5.8):

$$\sigma_{bg}(t) = \frac{P_{BG}(t)}{P_{all}}, \quad (5.7)$$

$$\sigma_{fg}(t) = \frac{P_{FG}(t)}{P_{all}}. \quad (5.8)$$

Дисперсію можна розрахувати за (5.9):

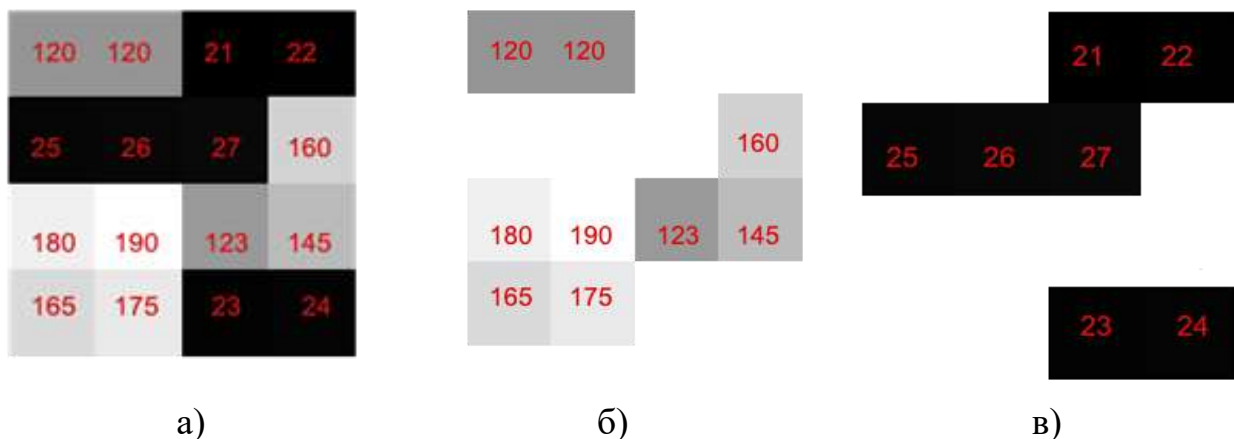
$$\sigma_m^2(t) = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}, \quad (5.9)$$

де, x_i – значення пікселя в позиції i у групі (bg або fg);

$\bar{x}$ – середнє значення пікселів у групі (bg або fg);

N – кількість пікселів.

Розглянемо ці формули на прикладі знаходження внутрішньокласової дисперсії за одного порогового значення $T=100$, рис. 5.8 [83]. Для наведеного зображення (рис. 5.8, а) за умови $T=100$ отримаємо фон і передній план, як показано на (рис. 5.8, б – рис. 5.7, в).



а) – повне зображення зі значеннями кольорів пікселів P_{all} ; б) – пікселі переднього плану P_{FG} ; в) – фонові пікселі P_{BG} .

Рисунок 5.8 – Приклад знаходження дисперсії пікселів зображення за методом Otsu [84]

У даному прикладі загальна кількість пікселів P_{all} дорівнює 16. Кількість пікселів в переднього плану P_{FG} дорівнює 7, а фонових пікселів P_{BG} – 9. Якщо підставити ці значення в (5.8) та (5.9), отримуємо значення ймовірностей ω_{bg} , яке дорівнює 0,44, а ω_{fg} дорівнює 0,56. Тепер, щоб знайти дисперсію, спочатку знайдемо середнє значення x_{bg} та x_{fg} . Для цього окремо складемо всі значення пікселів переднього плану та фонові пікселі і ділимо і x на кількість. Отримуємо: x_{bg} дорівнює 24, а x_{fg} 153,1. Дисперсії σ^2_{bg} та σ^2_{fg} , отриманих на основі (5.9) [85, 86]. Мають значення 4 та 657,43. Після цього, підставляючи отримані результати в формулу 5.7, знаходимо дисперсію значень кольорів σ^2 . У даному випадку σ^2 дорівнює 369,9208. Аналогічно ми можемо знайти і для інших значень t , табл. 5.1.

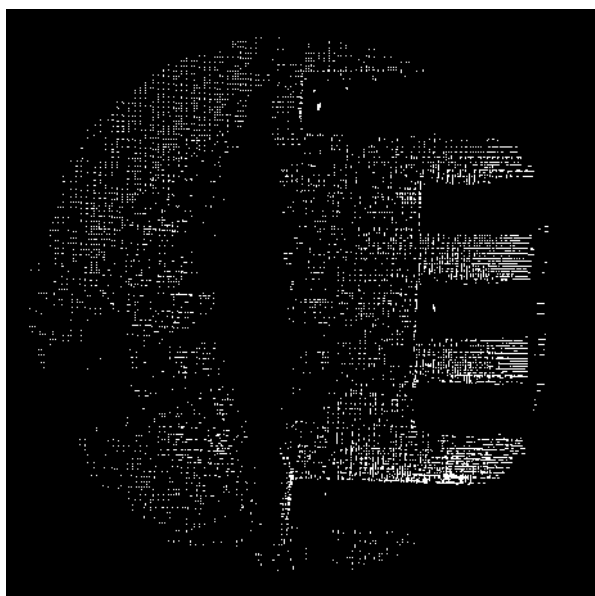
Таблиця 5.1 – Виявлення порогу бінаризації за методом Otsu [86]

$t=22, \sigma^2=4092,58$	$t=23, \sigma^2=3667,6$	$t=25, \sigma^2=2642,35$
$t=26, \sigma^2=2009,93$	$t=28, \sigma^2=371,55$	$t=124, \sigma^2=1316,48$

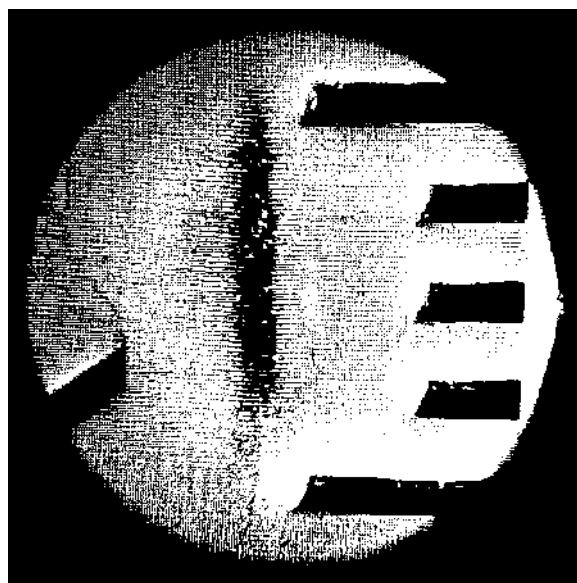
Значення дисперсії залишається однаковим від 28 до 120. Наведені вище дисперсії, то вони найменші за умови $T=28$ або, точніше, між 28 і 120. Таким чином, поріг дорівнює 28.

Різні методи бінаризації мають свої слабкі місця: так, наприклад, метод Otsu може призводити до втрати дрібних деталей і «злипання» прилеглих символів за умови невірного вибору прогонового значення, рис. 5.9.

Бібліотека бінаризації зображення за методом Otsu наведена в Додатку Е.



а)



б)

а – бінаризоване зображення; б – бінаризоване зображення за методом Otsu

Рисунок 5.9 – Приклад роботи методу Otsu для бінаризації зображень

5.2.5 Адаптивна бінаризація з визначенням «Block size»

Адаптивна бінаризація – це метод бінаризації зображень, за якого поріг бінаризації змінюється залежно від локального середнього значення пікселів в околі кожного пікселя. Адаптивна бінаризація виконується шляхом обчислення локального середнього значення пікселів у певному околі «Block size» навколо кожного пікселя, і потім порогове значення вибирається залежно від цього середнього значення. Якщо значення пікселя більше за поріг, то він вважається білим, інакше – чорним [87].

Цей метод використовується для бінаризації зображень зі змінним освітленням або шумами, які можуть змінювати глобальний поріг бінаризації. Дані властивості адаптивної бінаризації підходять для використання цих методів в аналізі та порівнянні між собою технічних зображень у виробництві,

отриманих за допомогою систем технічного зору. Цей метод застосовується в багатьох областях, таких як розпізнавання символів, аналіз зображень, медична діагностика тощо.

Основними параметрами для адаптивної бінаризації є:

- метод знаходження середнього значення пікселів у сканованій ділянці (середнє значення за Гаусом);
- розмір скучної ділянки «Block size».

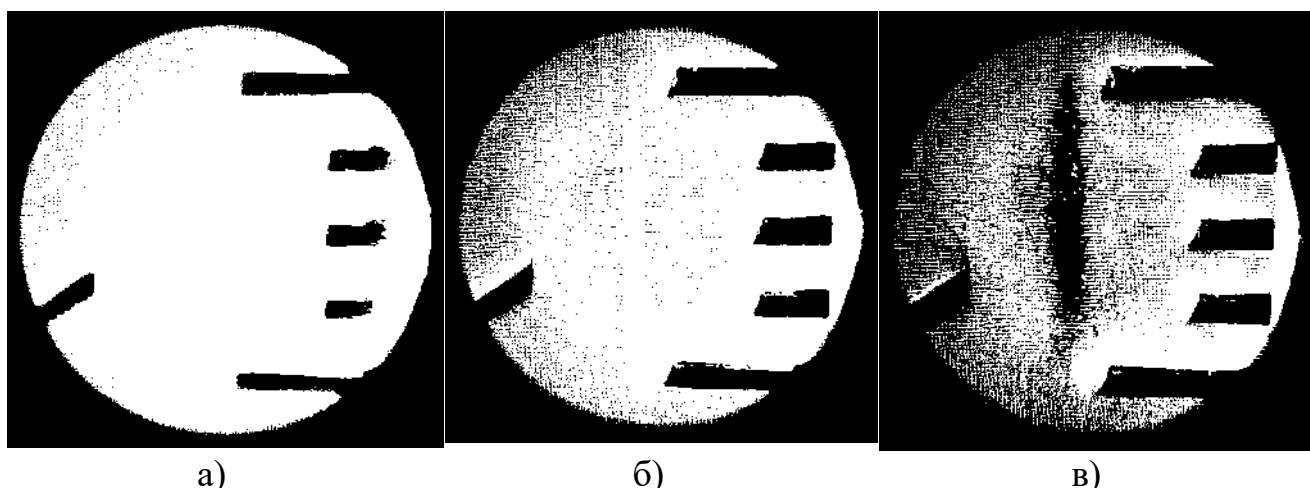
«Block size» в бінаризації означає розмір блоку, на який розбивається зображення перед застосуванням бінаризації. Зазвичай зображення розбивається на блоки однакового розміру, і для кожного блоку окремо застосовується бінаризація.

Розмір блоку в бінаризації може впливати на якість результату. Якщо блоки занадто маленькі, то деякі деталі можуть бути втрачені, а якщо блоки занадто великі, то результат може бути неоднорідним. Оптимальний розмір блоку залежить від розміру зображення, характеру зображення та застосовуваного методу бінаризації. Зазвичай для зображень високої роздільної здатності, таких як зображення медичних знімків або зображення високої якості, використовуються більші блоки, тоді як для зображень низької роздільної здатності, таких як зображення з веб-камер або мобільних телефонів, використовуються менші блоки. За своєю сутністю «Block size», є матрицею, в якій знаходяться значення пікселів, рис. 5.10.

i	5	120	223	45	154	68
	26	201	167	190	250	89
	78	143	208	80	158	184
	67	223	251	165	95	47
	84	245	84	68	135	69
	82	255	123	175	205	54
						j

Рисунок 5.10 – Приклад області Block size 3×3

Залежності від розмірів цієї матриці, змінюється здатність розпізнавання дрібних елементів зображення в бінаризації. Чим більше значення розмірів матриці «Block size», тим складніше деталізувати малі елементи, та навпаки: чим менше розмір матриці, тим більше знаходження дрібних елементів, рис. 5.11 [88].



а) порогове значення «Block size» дорівнює 23; б) порогове значення «Block size» дорівнює 423; в) автоматичне знаходження значення «Block size»

Рисунок 5.11 – Приклад знаходження області «Block size» за пропонованим алгоритмом

Залежно від складності зображення необхідно підбирати власні значення «Block size», що займає час у процесі обробки. Тому розробка автоматизованого знаходження значення «Block size», для різних зображень із різними типами елементів, є актуальною задачею [89].

«Block size» завжди повинен бути не парним числом для проведення сканування зображень з довільним розміром.

Для автоматичного вибору значень «Block size» був побудований наступний алгоритм дій:

- знаходимо глобальний порог бінаризації (t) за допомогою методу Otsu;
- бінаризуємо зображення та знаходимо середнє квадратичне відхилення (σ);

– якщо отримане значення парне, то віднімаємо одиницю, якщо значення не парне, то залишаємо, як є та підставляємо це значення в пошуку «Block size», рис. 5.12.

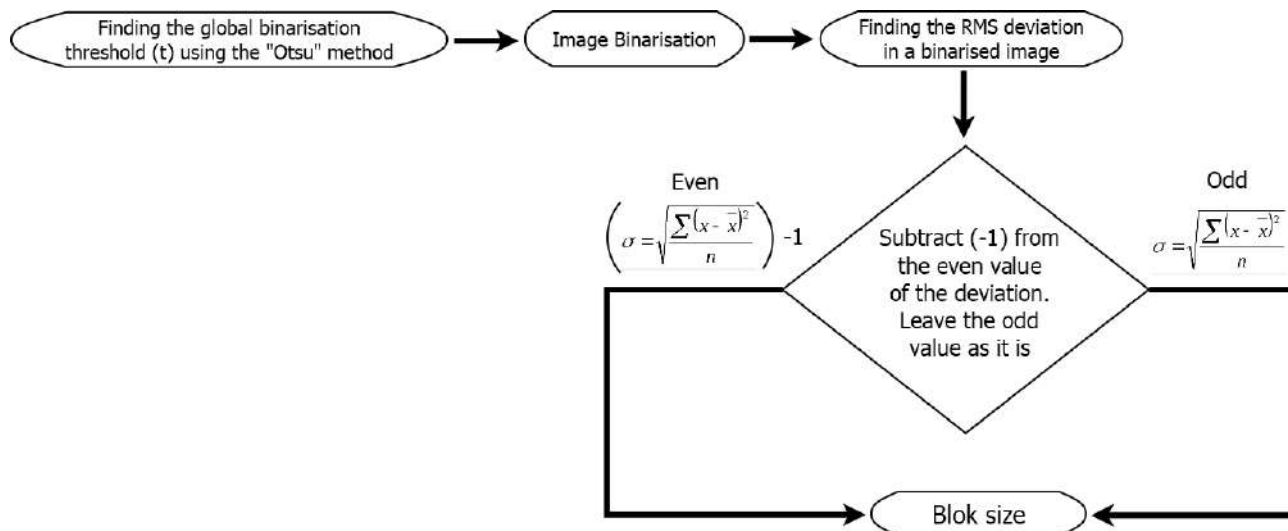
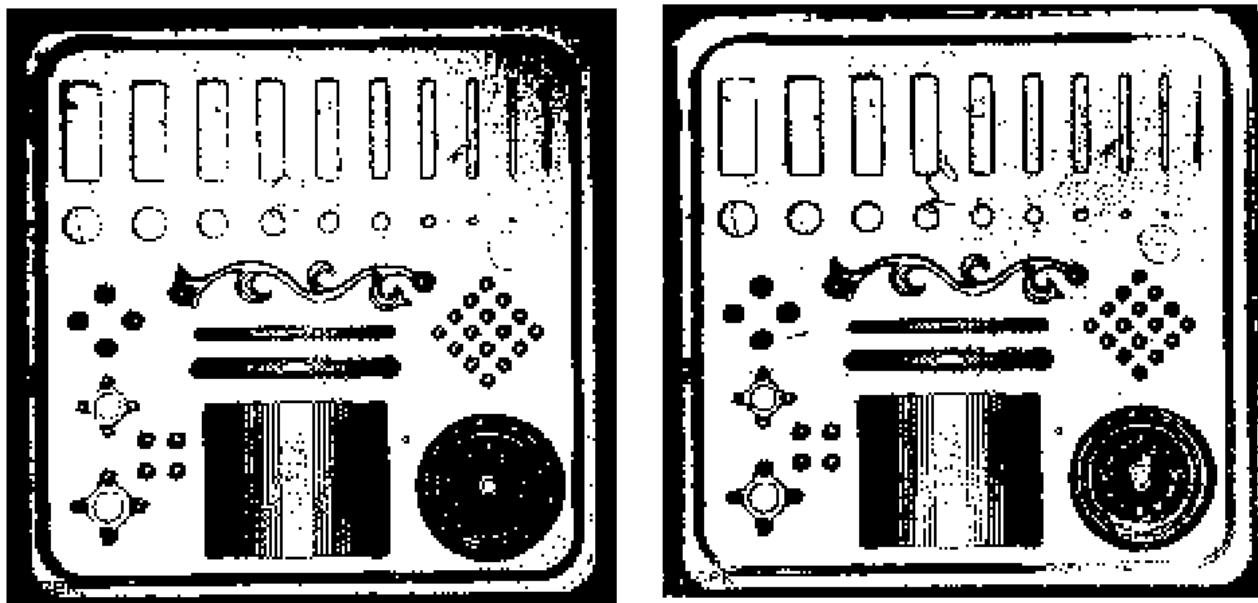


Рисунок 5.12 – Алгоритм знаходження автоматичного значення «Block size»

В даному підході ми знаходимо значення середнього квадратичного відхилення вже в бінаризованому зображенні, це дає інформацію про відхилення значень фону (наприклад, білий колір) та деталі (наприклад, чорний колір) зображення, яку можна використовувати як розмір скануючої ділянки «Block size».

За результатами розробленого алгоритму пошуку розмірів скануючої ділянки «Block size» в бінаризації зображень друкованої моделі можливо виділити наступні переваги даного методу, рис. 5.13:

- автоматичне знаходження оптимальної скануючої області «Block size»;
- опір шумам зображення без використання згладжувальних фільтрів;
- знаходження деталей у зонах перепаду контрасту.



а) глобальна бінаризація; б) адаптивна бінаризація з автоматичним налаштуванням розміру скануючої ділянки

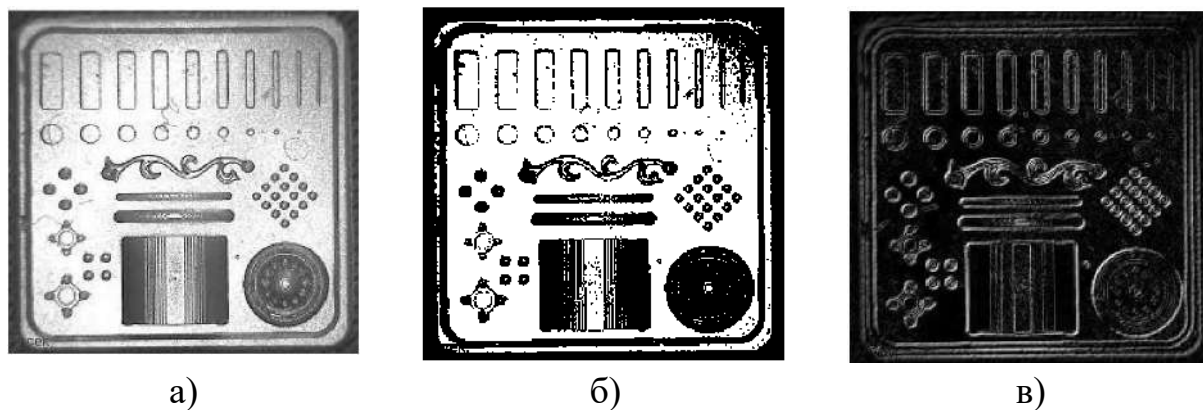
Рисунок 5.13 – Результати роботи алгоритму

Сенс використання середнього квадратичного відхилення у бінаризованому зображенні як розміру вікна у адаптивній бінаризації полягає у наступному:

- по-перше, даний підхід дозволяє отримати глобальне бінаризоване зображення з автоматичним порогом за методом «Otsu»;
- по-друге, використання середнє відхилення в бінаризованому зображенні, так як це дає середнє значення між розміром фону та елементами зображення.

Таким чином, отримуємо середнє оптимальне значення для виконання бінаризації і, як можна побачити з прикладів, автоматична адаптивна бінаризація дає, рис. 5.14:

- зменшення впливу шумів;
- зменшення перепаду контрасту;
- можливість знаходити більше деталей.



а) реальне зображення; б) бінаризоване зображення; в) бінаризоване зображення за пропонуваним алгоритмом з розміром значення сканованої ділянки

Рисунок 5.14 – Результати вдосконаленої бінаризації

З використанням автоматичного вікна сканування така обробка стає більш швидкою і більш точною.

До недоліків даного методу можливо віднести наступне:

- більш повільний, ніж звичайна глобальна бінаризація;
- параметр відхилення, а отже і знаходження порогу, залежить від глобальної бінаризації.

Бібліотека адаптивної бінаризації наведена в Додатку Ж. На рис. 5.15 наведений інтерфейс розробленої програми для обробки зображень з включенням адаптивної бінаризації.

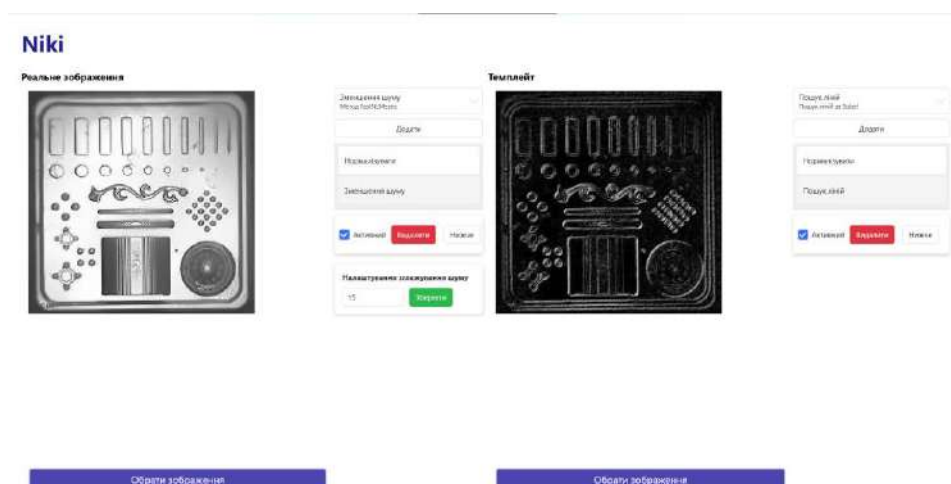


Рисунок 5.15 – Інтерфейс програми з адаптивною бінаризацією

5.3 Методи вирівнювання зображення

Технологія знаходження ключових точок зображень знаходить застосування в різних галузях, таких як вирівнювання зображень, обробка медичних зображень. Шляхом виділення характерних точок з певними особливостями для опису та реєстрації зображення, алгоритм реєстрації на основі особливостей пропонує численні переваги, включаючи низьку обчислювальну складність (у порівнянні з моделями штучного інтелекту), високу стабільність та ефективність реєстрації. Тому порівняння та вирівнювання широко використовується в галузі обробки зображень.

У класичних алгоритмах виділення ознак відзначаються такі методи, як SIFT (Scale-Invariant Feature Transform – масштабно-інваріантне перетворення ознак) [90, 91], прискорені стійкі ознаки SURF (Steerability Uniformity and Robustness Evaluation – оцінка рівномірності керованості та надійності) [92], орієнтовані ознаки, отримані за допомогою FAST (Features from Accelerated Segment Test – прискореного сегментарного тесту), та BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features – бінарні стійкі незалежні елементарні функції).

Також варто відзначити такі методи орієнтованих FAST та обернених BRIEF, як ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF – орієнтований FAST та повернутий BRIEF) [93], BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints – бінарні стійкі інваріантні масштабовані ключові точки) [94], KAZE (Keypoint Aligned Zone Extractor – виділення вирівняних зон за ключовими точками) [95, 96], AKAZE (Accelerated-Keypoint Aligned Zone Extractor – прискорений пошук зон з вирівнюванням за ключовими точками) [97, 98], а також різноманітні покращені версії цих алгоритмів.

Одними з доступних методів для виділення ознак в зображеннях є методи: BRISK, ORB та AKAZE.

Алгоритм ORB поєднує у собі оптимізований оператор визначення кутів FAST і дескриптор BRIEF, що сприяє значному підвищенню швидкості обчислень. Однак він не забезпечує масштабною інваріантності. З іншого боку,

алгоритм BRISK виділяє кутові особливості за допомогою адаптивного та загального прискореного сегментного тесту [9] і будує двійкові дескриптори, порівнюючи значення сірого кольору пікселів. Незважаючи на високу швидкість обчислень, його надійність низька. Новий алгоритм KAZE, що є модифікованою версією Harris-Z [100] використовує нелінійну дифузійну фільтрацію в нелінійному масштабному просторі для виявлення двовимірних характерних точок, зберігаючи межу об'єкта та досягаючи високої точності та деталізації.

Однак це пов'язано з високими обчислювальними витратами. У порівнянні з алгоритмом KAZE, який використовує адитивний оператор або схеми розщеплення, прискорена версія алгоритму KAZE – AKAZE використовує систему чисельного аналізу швидкої явної дифузії FED (Feature Enhanced Descriptor – дескриптор з розширеними можливостями) [101] для розв'язання рівняння нелінійної дифузійної фільтрації. Це підвищує точність і знижує складність реалізації.

Хоча модифікований двійковий бінарний алгоритм з локальними різницями (M-LDB) [102] в AKAZE значно прискорює час зіставлення описів ознак, його стійкість і розрізнявальна здатність не досягають таких високих показників, як у дескриптора SIFT [103], особливо під час виконання обертань, перспективних перетворень і змін масштабу. У випадку швидкісних візуальних подібностей [104] основний акцент зроблений на використанні відстані Хеммінга замість евклідової відстані для визначення відповідності або невідповідності між двома ознаками. З іншого боку, LDAHash [105] використовує лінійний дискримінантний аналіз та перетворює дескриптори в двійкову форму через встановлений поріг. Всі ці підходи зорієнтовані на покращення швидкості роботи алгоритму, а не його точності.

5.3.1 Метод AKAZE

Нелінійний масштабний простір являє собою набір різних масштабів вхідного зображення, які організовані в октави. Кожна октава містить чотири підрівні в алгоритмі AKAZE. На рис. 5.16 наведено псевдокод алгоритму для двох октав [106].

Input: Input image	Output: Output images
Preprocessing:	
$L_t \leftarrow \text{Gaussian filter}(\text{Input image})$	
Compute Kcontrast using input image	
for Octave = 1 to 2	
for Sublevel = 1 to 4	
Diffusivity:	
Compute L_{flow} based on L_t and Kcontrast for all pixels.	
FED:	
for $j = 1$ to N // N varies for different sublevels.	
Compute L_{step} using L_{flow} and L_t	
$L_t \leftarrow L_t + L_{step}$	
end for loop	
Output images { Octave, Sublevel } $\leftarrow L_t$	
end for loop	
Resize image	
end for loop	

Рисунок 5.16 – Псевдокод алгоритму AKAZE [106]

Алгоритм AKAZE включає два основних кроки попередньої обробки для генерації нелінійного масштабного простору та підготовки зображення для подальшого аналізу.

На першому кроці зображення підлягає гаусівській фільтрації для зменшення шуму, і обчислюється коефіцієнт контрастності зображення, який грає важливу роль у виділенні деталей. Цей коефіцієнт контрастності використовується на подальших етапах алгоритму [107, 108].

Другий крок полягає в обчисленні функції провідності з використанням градієнтів зображення та раніше обчисленого коефіцієнта контрастності, отриманого на попередньому етапі. Ця функція визначає, наскільки детально межі зображення будуть зберігатися у процесі подальшого розгортання. У даній роботі ми використовуємо функцію провідності [105] у вигляді (5.10), щоб враховувати цей аспект.

$$L_{flow}(i, j) = \frac{1}{1 + \frac{L_x^2(i, j) + L_y^2(i, j)}{K^2}} \quad , \quad (5.10)$$

де, K – коефіцієнт контрастності, а L_x та L_y – градієнти зображення, обчислені за допомогою фільтра Шарра в горизонтальному та вертикальному напрямках відповідно.

Використовуємо параметри фільтра Шарра, як показано на рис. 5.17.

$$\text{Vertical filter} \begin{bmatrix} +3 & +10 & +3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{bmatrix} \quad \text{Horizontal filter} \begin{bmatrix} +3 & 0 & -3 \\ +10 & 0 & -10 \\ +3 & 0 & -3 \end{bmatrix}$$

Рисунок 5.17 – Ваги у фільтрі Шарра

На третьому і останньому етапах обчислення FED отримуємо результат, позначений як L_{flow} , який обчислюється для кожного пікселя у зображенні. На цих етапах також створюється новий підрівень масштабного простору, використовуючи L_{flow} та дані з попереднього підрівня [109]. Процес FED включає в себе кілька ітерацій N , кількість яких змінюється залежно від рівня масштабного простору. Значення N для кожного підрівня визначається за допомогою попередньо обчисленого масиву з оригінального алгоритму AKAZE [106]. На кожному етапі значення постійного розміру кроку множиться на фільтрі.

У процесі FED на кожному етапі обчислюється сума значень центрального пікселя разом з чотирма його сусідніми пікселями у вертикальному і горизонтальному напрямках L_{flow} множенням на різницю між центральним пікселем і чотирма сусідніми пікселями вертикальними та горизонтальними з попереднього підрівня. Ця операція даного множення називається L_{step} . Обчислення FED представлені у (5.11) і (5.12).

$$L_{step}(i, j) = \sum \left(L_{flow}(i, j) + L_{flow}(i + k_1, j + k_2) \right) + (L_t^n(i, j) - L_t^n(i + k_1, j + k_2))s, \quad (5.11)$$

де, $k_1, k_2 \in \{-1, 1\}$, де L_{step} – результат FED обчислення;

L_t – попередній підрівень;

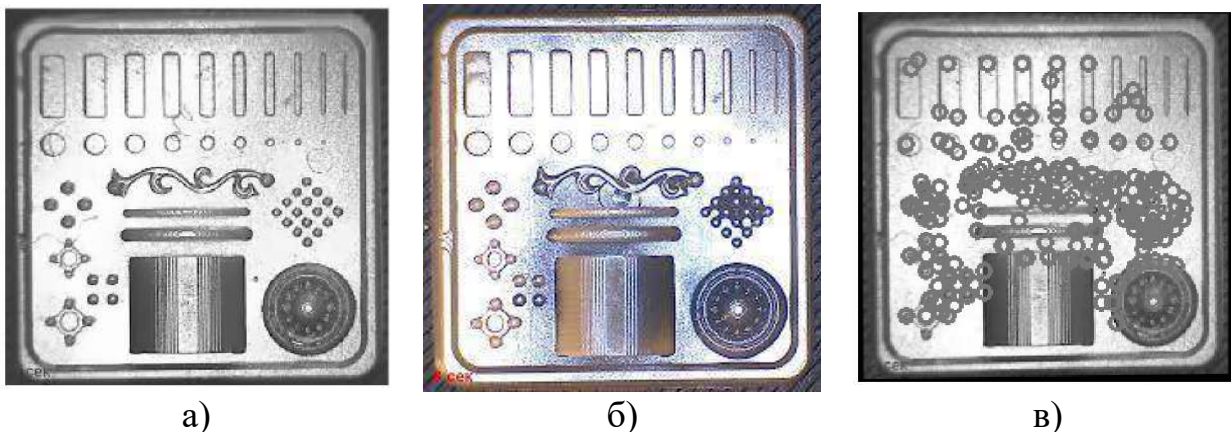
s – розмір кроку (константа, яка є різною для кожного підрівня) [107].

Наступний підрівень генерується згідно з (5.12).

$$L_t^{n+1} = L_{step} + L_t^n, \quad (5.12)$$

де, L_t^{n+1} – значення наступного підрівня у нелінійному масштабному просторі.

Бібліотека вирівнювання зображення з методом AKAZE наведена в Додатку Е. Приклад роботи програми наведений на рис. 5.18.



а – еталоне зображення; б – не вирівняне зображення топології;

в – зображення, вирівняне за допомогою методу AKAZE з знаходженням співпадінь з еталонним зображенням.

Рисунок 5.18 – Реалізація методу AKAZE

5.3.2 Метод BRISK

Алгоритм BRISK складається з трьох основних етапів: виявлення ключових точок, створення описів для ключових точок і зіставлення цих дескрипторів. На початку створюється піраміда масштабного простору, і стабільні екстремальні точки з субпіксельною точністю в неперервному

масштабному просторі визначаються за допомогою AGAST (адаптивний оператор виявлення кутів) [110]. Потім створюється двійковий дескриптор для кожного локального зображення, використовуючи відношення сірої шкали випадкових пар точок, які беруться з вибірки в околі цього локального зображення. Нарешті, для зіставлення ознак використовується відстань Хеммінга.

Методологія виявлення ключових точок BRISK походить від AGAST (адаптивний та загальний прискорений сегментний тест) [111]. FAST [110] поширено на площину зображення та масштабний простір. У рамках алгоритму BRISK простір масштабної піраміди складається з n октав c_i та n внутрішніх октави d_i , де $i=\{0,1,\dots,n-1\}$, зазвичай при $n=4$. Октави утворюються шляхом поступової напівдискретизації вихідного зображення (що відповідає C_0). Кожна внутрішня октава d_i розташована між шарами c_i та c_{i+1} , рис. 5.19. Перша внутрішня октава d_0 отримана шляхом зменшення дискретизації вихідного зображення C_0 в 1,5 рази, тоді як решта внутрішньооктавних шарів отримані шляхом послідовної половинної дискретизації. Отже, якщо t позначає масштаб, то $t(c_i)=2^i$ та $t(d_i)=1,5(2^i)$.

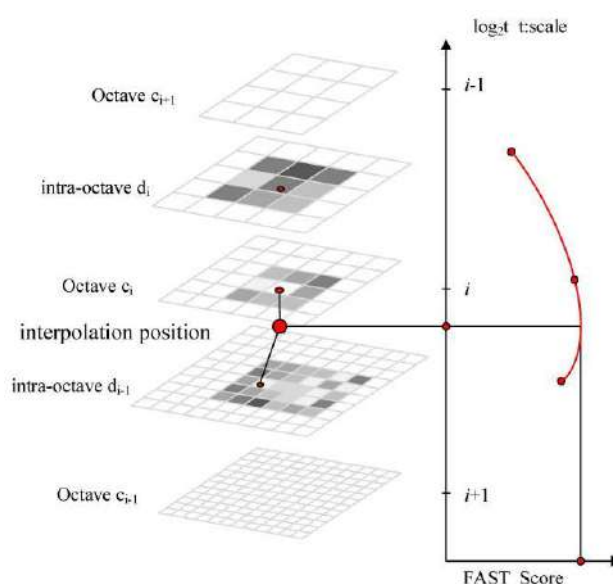


Рисунок 5.19 – Масштабнопросторове виявлення точок інтересу [107]

Алгоритм виявлення ключових точок складається з двох наступних кроків. Спершу детектор FAST 9-16 застосовується до кожної октави і внутрішньооктавних шарів окремо, використовуючи однаковий поріг T , для визначення потенційних областей інтересу. Після цього точки, які належать цим областям, підлягають немаксимальному приглушенню в масштабному просторі. Ключові точки повинні відповідати наступним двом умовам:

- оцінка FAST s_c точки, що виявляється, яка знаходиться в тому ж шарі, повинна бути більшою, ніж у інших восьми сусідніх точок;

- оцінки в шарі вище і нижче повинні бути меншими, ніж оцінка FAST s цієї точки. Виявлення максимумів на осі шкали в октаві c_0 є особливим випадком. Для того, щоб отримати оцінки FAST для віртуальної внутрішньооктавної d_{-1} нижче c_0 , ми застосовуємо маску FAST 5-8 [112] на c_0 . Однак, в цьому випадку не потрібно, щоб оцінки на ділянці d_{-1} були нижчими, ніж оцінка досліджуваної точки в октаві c_0 .

Зважаючи на важливість зображення як неперервної величини, не лише за самим зображенням, але і за його масштабом, ми виконуємо процес субпіксельного та неперервного уточнення масштабу для кожного знайденого піксельного максимуму. Для зменшення складності цього процесу спочатку ми застосовуємо метод найменших квадратів для підбору 2D квадратичної функції до трьох оцінок-плям (які отримані на різних рівнях шару ключової точки-шару вище і нижче), що дозволяє нам отримати три субпіксельні максимуми. Щоб уникнути втрати дискретизації, ми розглядаємо ділянку 3×3 навколо кожної оцінки на кожному рівні. Далі ці покращені оцінки використовуються для побудови одновимірної параболи вздовж шкали, що дає остаточну оцінку рівня яскравості та оцінку масштабу на максимумі. На останньому кроці ми виконуємо повторну інтерполяцію координат зображення між областями на різних рівнях шарів.

Опис ключових точок має суттєвий вплив на подальшу ефективність порівняння дескрипторів та впливає на продуктивність алгоритму в цілому. Кожна ключова точка у методі SIFT включає 128-векторний дескриптор, тоді як

у методі SURF ця кількість становить 64. Під час порівняння дескрипторів SIFT і SURF можливо використовувати лише евклідову відстань, що є менш ефективним методом. На відміну від SIFT та SURF, дескриптор BRISK представлений у вигляді бінарного бітового рядка, який був запропонований Майклом Калондором, і його порівняння здійснюється за допомогою відстані Хеммінга. Іншими словами, обчислення відстані Хеммінга можна провести дуже ефективно, використовуючи побітову операцію XOR.

На відміну від інших алгоритмів, які використовують випадково обрані пари точок для створення бінарних ознак (наприклад, BRIEF), дескриптор BRISK використовує фіксований шаблон для вибірки сусідніх точок для створення ознак. У межах цього шаблону будуються чотири концентричні кола з розміром 40×40 пікселів та центром в точці інтересу. На кожному з цих чотирьох концентричних кіл можна отримати N (де $N=60$) точок з рівномірним розподілом та однаковими відстанями між ними. На рис. 5.18 видно, що маленькі сині кружечки позначають місця вибірки взірців. Щоб уникнути ефекту згладжування під час вибору інтенсивності точки p_i на шаблоні, застосовується гаусове розмиття зі стандартним відхиленням σ_i , яке пропорційне до відстані між точками на відповідному колі, рис. 5.20.

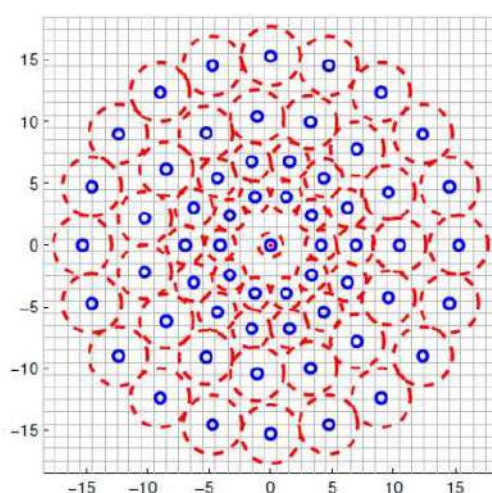


Рисунок 5.20 – Двійкова стійка інваріантна масштабована схема вибірки ключових точок BRISK [109]

Означимо множину пар точок, утворену всіма парами точок вибірки, як A , (5.13):

$$A = \{(p_i, p_j) \in R^2 \times R^2 \mid i < N \wedge j < i \wedge i, j \in N\}, \quad (5.13)$$

де (p_i, p_j) – пара точок множини A .

Значення сірого, згладжені пікселями p_i та p_j , позначаються відповідно як $I(p_i, \sigma_i)$ та $I(p_j, \sigma_j)$. Локальний градієнт між двома точками пікселів визначається наступним чином:

$$g(p_i, p_j) = (p_i - p_j) \times \frac{I(p_j, \sigma_j) - I(p_i, \sigma_i)}{\|p_j - p_i\|}, \quad (5.14)$$

де, $1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N$.

Відповідно до відстані між парами пікселів, множина точок дискретизації на коротких відстанях визначається як S , (5.15). А множина точок дискретизації на довгих відстанях визначається як L , (5.16).

$$S = \{(P_i, P_j) \in A \mid \|P_i - P_j\| < \sigma_{max}\} \subseteq A, \quad (5.15)$$

$$L = \{(P_i, P_j) \in A \mid \|P_i - P_j\| > \sigma_{min}\} \subseteq A, \quad (5.16)$$

де, σ_{max} – поріг дальніх відстаней, зазвичай становить $9,75t$;

σ_{min} – поріг прицільних відстаней, зазвичай σ_{min} становить $13,67t$;

t – просторовий масштаб характерних точок.

В алгоритмі BRISK вважається, що локальні градієнти знищують один одного, і локальний градієнт не потрібно враховувати під час обчислення загальної градієнтної моди. Таким чином, загальний напрямок моди для характерних точок можна оцінити за допомогою набору L , (5.17):

$$g = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \end{bmatrix} = \frac{1}{l} \times \sum_{(p_i, p_j) \in L} g(p_i, p_j), \quad (5.17)$$

де, l – довжина підмножини далеких пар L ;

$g(p_i, p_j)$ – позначає градієнт пари характерних точок (p_i, p_j) ;

g_x та g_y – сума градієнтів пари далеких точок, заданих по осі x та напрямку осі y .

Для того, щоб побудувати дескриптор з інваріантністю обертання та інваріантністю масштабу, шаблон вибірки повертається на кут θ навколо характерної точки k . θ обчислюється за виразом (5.18).

$$\theta = \text{actan2}(g_y, g_x) , \quad (5.18)$$

Потім порівнюється та каскадується інтенсивність сірого для набору пар на коротких відстанях S , генерується дескриптор ознаки за (5.19).

$$b = \begin{cases} 1, & I(p_j^\theta, \sigma_j) > I(p_i^\theta, \sigma_i) \\ 0, & I(p_j^\theta, \sigma_j) \leq I(p_i^\theta, \sigma_i) \end{cases} \quad (P_i^\theta, P_j^\theta) \in S , \quad (5.19)$$

де, p_i^θ – точка, на яку p_i обертається навколо виділеної точки k за умови повороту на кут θ ;

$I(p_i^\theta, \sigma_i)$ – інтенсивність сірого кольору $I(p_i^\theta, \sigma_i)$ після повороту на кут θ навколо опорної точки k .

Визначення відповідності між дескрипторами досягається через порівняння подібності між дескрипторами двох характерних точок. Оскільки алгоритм BRISK використовує бінарний бітовий рядок, що складається з «1» і «0», для опису виділених точок схожість дескрипторів визначається шляхом обчислення відстані Хеммінга для дескрипторів. Обчислення відстані Хеммінга реалізується за допомогою побітової операції XOR, де беруться два значення. Якщо відповідні біти однакові, результат – «0», інакше – «1». Потім обчислюється статистика кількості «1», і чим більше «1», тим більше відмінностей між двома дескрипторами; в іншому випадку – навпаки. Припустимо, що X та Y – це два дескриптори BRISK, і вони підлягають (5.20).

$$X = \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_i, \dots, \chi_N ;$$

$$Y = Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_N. \quad (5.20)$$

де, значення x_i та y_i дорівнюють "1" або "0".

Рівняння відстані Хеммінга задається наступним чином (5.21).

$$HD(X, Y) = \sum_{i=1}^N x_i \oplus y_i \sum_{i=1}^n b(x_i, y_i), \quad (5.21)$$

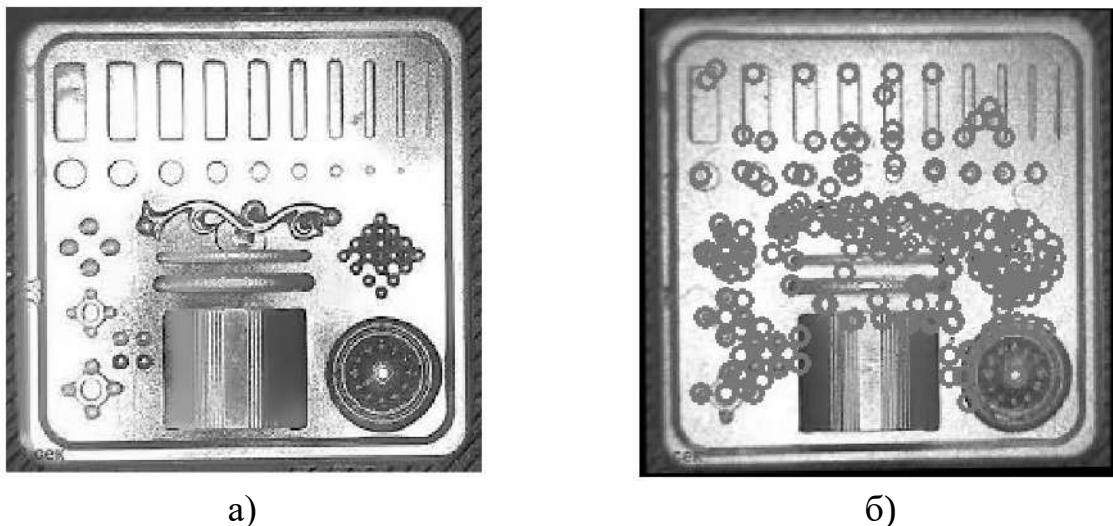
де, $b(x_i, y_i)$ позначає бітову нерівність, у рівнянні (формула 2.24) x_i та y_i – це i -ті біти дескрипторів X та Y відповідно (5.22).

$$b(x, y) = \begin{cases} 1 & x \neq y \\ 0 & x = y \end{cases}, \quad (5.22)$$

Символ $\oplus$ – це символ XOR. Значення відстані Хеммінга обчислюється для оцінки ступеня збігу двох дескрипторів BRISK. Чим більше значення відстані Хеммінга, тим менший ступінь збігу дескрипторів.

Бібліотека вирівнювання зображення за методом BRISK наведена в Додатку Ж.

Результати роботи за методом BRISK наведені на рис. 5.21.



а – початкова модель; б – оброблене зображення методом BRISK

Рисунок 5.21 – Знаходження ключових точок за методом BRISK

5.3.3 Метод ORB

Визначення характерних точок виконується за допомогою ORB, який являє собою поєднання орієнтованого детектора ключових точок FAST та обертового дескриптора BRIEF. Він виявляється набагато швидшим за SURF та SIFT [113], тому він є більш придатним для застосунків, які працюють в реальному часі.

Характерні точки на зображенні можуть бути сприйняті як основні точки, такі як контурні точки, яскраві об'єкти на темному тлі або темні області на світлому фоні. Алгоритм ORB використовує швидкий алгоритм [105-108] для визначення цих ключових точок. Основна ідея цього швидкого алгоритму полягає в порівнянні кожної точки з її сусідами, і якщо вона суттєво відрізняється від більшості навколишніх точок, то вона визнається як особлива точка за (5.23) [104].

$$N = \sum_{x \in \text{circle}(p)} |I(x) - I(p)| > \varepsilon_d, \quad (5.23)$$

де, $I(x)$ – відтінок сірого будь-якої точки на колі;

$I(p)$ – відтінок сірого центру;

ε_d – порогове значення різниці відтінків.

Якщо N більше заданого порогового значення, яке, як правило, становить три чверті навколишніх точок кола, то P вважається точкою-характеристикою.

Процес обчислення FAST можна описати таким чином: спочатку вибирається піксельна точка P і розглядається можливість використання її як опорної точки. Вважається, що значення яскравості цієї точки дорівнює M . Потім встановлюється певне порогове значення V , наприклад, 20 % від M . Якщо абсолютна різниця в яскравості між P і іншими точками перевищує V , то ці точки вважаються різними. Потім, з точкою P в центрі, відбираються 16 пікселів на колі радіусом 3. P вважається кутовою точкою, якщо середнє значення яскравості L точок з цих 16 більше за $(M+V)$ або менше від $(M-V)$. Тут L встановлено на 12, і якщо принаймні 12 точок задовольняють цю умову, то P

визнається опорною точкою; в іншому випадку вважається, що P не є опорною точкою. Для прискорення обчислень були введені додаткові оптимізації: якщо чотири точки навколо кандидатської точки розглядаються з інтервалом 90 градусів, то принаймні три з них повинні мати значну різницю в яскравості порівняно з кандидатською точкою. У протилежному випадку точка-кандидат не вважається особливою, і додаткові обчислення не проводяться. Схему швидкого визначення характерних точок показано на рис. 5.22.

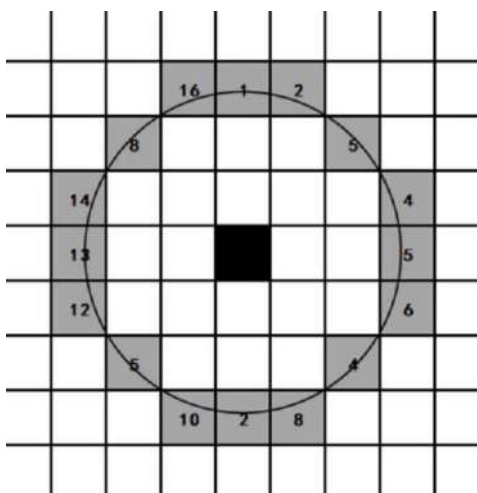


Рисунок 5.22 – Принципова схема виділення швидких особливих точок [114]

Високошвидкісний тест виконується для виключення великої кількості не кутів, у цьому тесті перевіряються лише чотири пікселі з координатами 1, 9, 5 та 13.

Оскільки алгоритм FAST не має можливості визначати напрямки точок, в алгоритмі ORB для досягнення масштабною інваріантності застосовується побудова тришарової піраміди гаусівських зображень [115]. Для забезпечення інваріантності до обертання точок використовується метод сірого центроїда [116]. У зазначеному методі для заданої частини зображення $I(x, y)$ створюється координатна система, де характерні точки визначають початок координат. Далі розраховується положення центроїда в околі цих точок, і формується вектор, який має початкову точку в характерних точках і кінцеву в центроїді. Для обчислення моменту відносно околу S використовується вираз (5.24).

$$M_{pq} = \sum_{x,y} x^p y^q I(x, y), \quad (5.24)$$

де, $I(x,y)$ – значення сірого кольору зображення, $x,y \in [-r,r]$;

r – радіус околу характерної точки;

S – положення центроїда околу.

За допомогою наведених вище моментів знайдено центр C латки (5.25):

$$C = \frac{M_{01}}{M_{00}}, \frac{M_{10}}{M_{00}}, \quad (5.25)$$

Орієнтація θ точки задається за допомогою виразу (5.26):

$$\theta = \tan^{-1} \frac{M_{01}}{M_{00}}. \quad (5.26)$$

Розрахувати дескриптори для характерних точок – це завдання, яке вирішує ORB, застосовуючи вдосконалений алгоритм для створення опису характерних точок. Цей алгоритм вирішує головну проблему, яка полягала в тому, що сам блок не був інваріантним до обертання. Основна ідея його роботи полягає у виборі пар точок N за певним шаблоном, які оточують характерну точку P , і у подальшому об'єднанні результатів порівняння цих пар точок N для створення дескрипторів.

Короткий дескриптор – це простий і швидкий метод, який базується на ідеї, що окіл зображення може бути представлений за допомогою обмеженої кількості контрастів інтенсивності. Ми визначимо критерій τ для області P в межах околу $S \times S$ зображення за допомогою виразу (5.27):

$$\tau(p; x, y) = \begin{cases} 1, & p(x) < p(y) \\ 0, & p(x) \geq p(y) \end{cases}, \quad (5.27)$$

де, $p(x)$ – інтенсивність P в точці x ;

$p(y)$ – інтенсивність P в точці y .

Виберемо n_d та пару позицій (x,y) , яка однозначно визначає бінарний критерій. Короткий дескриптор – це двійковий бітовий рядок розміром n_d розмірностей.

$$f_{nd}(p) = \sum_{1 \leq i \leq n} 2^{i-1} \tau(p; x, y). \quad (5.28)$$

Значення пікселів можуть складати 128, 256, 512 і так далі. Обираючи різні значення, можливо балансувати між швидкістю обробки, ефективністю зберігання і можливістю ідентифікації зображення.

Критерій сусідства зображень у описі розглядає лише окремий піксель, що робить його чутливим до шуму. Для подолання цього недоліку в методі ORB кожна тестова точка використовує вікно розміром 5×5 у межах 31×31 пікселів. Вибір цього вікна підпорядковується гаусівському розподілу, і для прискорення обчислень використовується інтегральне зображення. Сам опис не має орієнтації і не є інваріантним до обертання. Рішення, запропоноване в методі ORB, полягає у спробі додати напрямок до кожного блоку. У позиції (x_i, y_i) , для будь-якого n бінарних характерних ознак, що визначають матрицю розміром $2n$, використовується вираз (5.29).

$$S = \begin{pmatrix} x_1, x_2, \dots, x_n \\ y_1, y_2, \dots, y_n \end{pmatrix}, \quad (5.29)$$

Використовуючи напрямок околу θ та відповідну матрицю обертання R_θ , побудуємо виправлену версію S , $S_\theta: S_\theta = R_\theta S$. Таким чином, дескриптор Стіда Бріфа має вигляд (5.30).

$$g_n(p, \theta) = f_{nd}(p) | (x_i, y_i) \in S_\theta, \quad (5.30)$$

Після отримання шаблону для управління пошуком, використовуємо алгоритм ретельного пошуку [102], щоб знайти пари блоків розміром 256 пікселів, які мають найнижчу кореляцію серед всіх можливих пар піксельних блоків. Цей процес призводить до отримання остаточного опису. Схему обчислення дескриптора можна побачити на рис. 5.23.

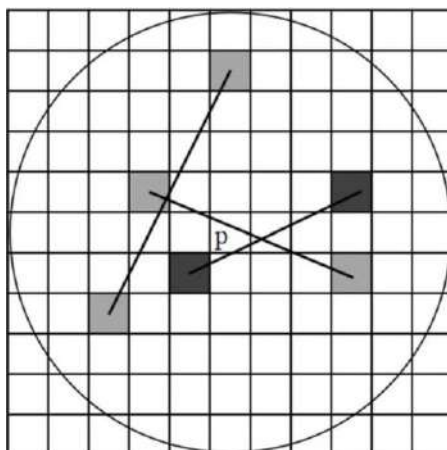


Рисунок 5.23 – Принципова схема розрахунку дескриптора [117]

Бібліотека вирівнювання зображення за методом ORB наведена в Додатку Ж.

5.4 Порівняння зображень за методом SAD

У процесі обробки цифрових зображень сума абсолютних різниць SAD (Sum of Absolute Differences) служить як міра подібності між різними блоками на зображенні. Її обчислення полягає у визначенні абсолютної різниці між кожним пікселем у вихідному блоці і відповідним пікселем у блоці, який порівнюється. Після цього, всі ці різниці складаються, щоб отримати просту метрику схожості між цими блоками. Ця метрика може також інтерпретуватися як норма L^1 різницевого зображення або Манхеттенська відстань між двома блоками зображень [118 – 119].

Сума абсолютних різниць (SAD) може мати різноманітні застосування, такі як:

- розпізнавання об'єктів: SAD може бути використана для порівняння областей на зображенні та визначення ступеня їхньої подібності, що корисно для завдань розпізнавання об'єктів;

- створення карт розбіжностей для стереозображень: вимірюючи різницю між відповідними пікселями на лівому і правому стереозображеннях за

допомогою SAD, можна створити карту розбіжностей, яка використовується для визначення глибини об'єктів на зображенні;

– оцінка руху для стиснення відео: SAD може бути використана для визначення різниці між кадрами відео, що допомагає в оцінці руху об'єктів у відеопослідовності. Ця інформація може бути використана для стиснення відео і зменшення обсягу даних без значної втрати якості.

У даному прикладі використовується сума абсолютних відмінностей для визначення того, яка частина пошукового зображення найбільше схожа на зображення-шаблон. У цьому конкретному випадку розмір шаблонного зображення становить 3×3 пікселі, тоді як зображення для пошуку має розмір 3×5 пікселів. Кожен піксель на зображеннях представлений одним цілим числом від 0 до 9, що можна побачити на рис. 5.24.

Шаблон			Зображення для пошуку				
2	5	5	2	7	5	8	6
4	0	7	1	7	4	2	7
7	5	9	8	4	6	8	5

Рисунок 5.24 – Сума абсолютних відмінностей

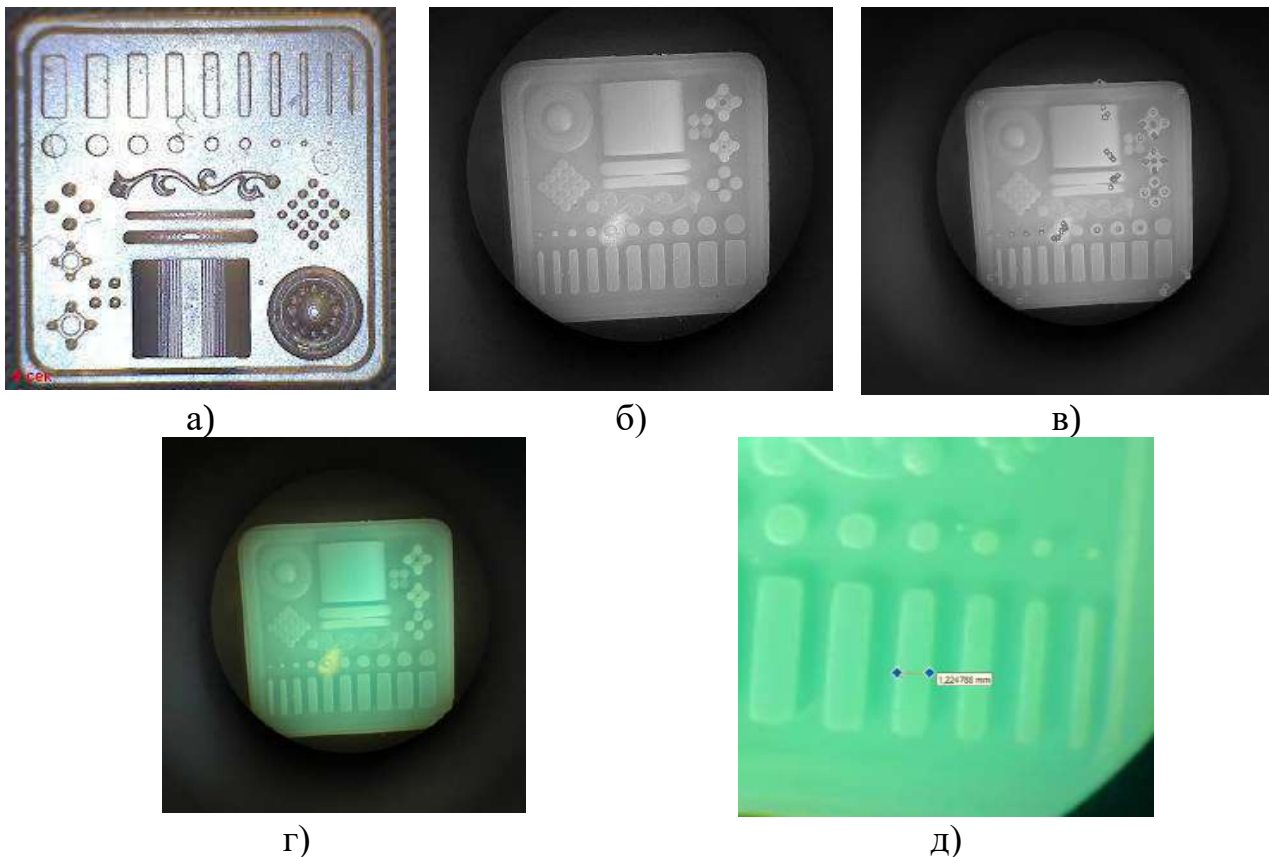
На зображенні існують рівно три унікальних місця, де може бути поміщений шаблон: лівий бік зображення, центр зображення та правий бік зображення. Для обчислення значень суми абсолютних різниць (SAD) використовується абсолютна різниця між кожною відповідною парою пікселів. Наприклад, різниця між 2 та 2 дорівнює 0 або 4, 1 дорівнює 3 або 7, а 8 дорівнює 1 і так далі. Обчислення значень абсолютної різниці для кожного пікселя для трьох можливих розташувань шаблону призводить до наступних результатів, які можна побачити на рис. 5.25.

Ліва частина	Центральна частина	Права частина
0 2 0	5 0 3	3 3 1
3 7 3	3 4 5	0 2 0
1 1 3	3 1 1	1 3 4

Рисунок 5.25 – Обчислення значень абсолютної різниці

Для кожної з цих трьох областей зображення, сума абсолютних різниць (SAD) для 9 пар відповідних пікселів складається як 20, 25 та 17 відповідно. На основі цих значень SAD можна зробити висновок, що права частина пошукового зображення найбільше схожа на шаблонне зображення, оскільки має найменшу суму абсолютних різниць порівняно з двома іншими областями.

Бібліотека SAD наведена в Додатку 3. Приклад роботи програми наведений на рис. 5.26.



а – еталоне зображення; б – отримане зображення топології; в – результат обробки обчислення зображень методом SAD; г – готовий зразок фотополімерної маски; д – розмір, визначений системою технічного зору

Рисунок 5.26 – Реалізація методу SAD

ВИСНОВКИ

Фотополімерний 3D-друк все ширше розповсюджуються в усьому світі, знаходячи застосування у найрізноманітніших галузях діяльності людини. Друковані вироби, найчастіше використовуються у різноманітних виробках різного призначення.

На основі ретельного аналізу проблем виготовлення фотополімерних деталей для різних застосувань сформовано декілька важливих завдань дослідження, зокрема завдання прогнозування появи дефектів друку моделей на етапі експонування шарів за рахунок аналізу параметрів друку та контролю температури фотополімерної смоли.

У ході розгляду даних проблем було запропоновано удосконалення контролю друку моделей за рахунок розробки регресійно-кореляційної моделі впливу параметрів експонування шарів на відхилення геометричних розмірів моделі та поверхневих дефектів.

Надано детальний опис фізичного процесу нагрівання фотополімерної смоли під час експонування моделі, у якому враховані особливості фотополімерного експонування за допомогою LCD-технології. Зосереджено увагу на передачі теплового потоку від УФ-випромінювання діодної матриці до фотополімерної смоли, що призводить до виникнення теплового коефіцієнту об'ємного розширення фотополімерної смоли під час друку моделі. Розроблено модель впливу температури у середовищі Matlab Simulink, що включає створення схеми керування тепловим потоком при фотополімерному експонуванні на основі задачі теплообміну між трьома стінками з різними коефіцієнтами теплопровідності. Дано опис формул та побудовано електричну схему нагрівання, яка відтворює процес нагрівання фотополімерної смоли. Крім того, здійснено симуляцію нагріву фотополімерної смоли в програмному середовищі Matlab Simulink.

Згідно з результатами досліджень можна зробити наступні висновки:

– зі збільшенням часу експонування шару відбувається збільшення температури фотополімерної смоли, що призводить до зростання відхилень розмірів моделі. Це пояснюється тим, що із збільшенням часу експонування зростає час друку моделі, що в свою чергу веде до збільшення впливу УФ-випромінювання на фотополімерну смолу та її нагрівання, а також збільшує значення температурного коефіцієнта розширення;

– температура нагрівання фотополімерної смоли значною мірою залежить не тільки від часу друку, але й від інтенсивності УФ-випромінювання. Це можна визначити за відмінністю між початковою температурою фотополімерної смоли та температурою після друку. Зміна інтенсивності випромінювання призводить до збільшення теплового впливу на фотополімер;

– оцінюючи значення відхилень геометричних розмірів моделі, можна прийти до висновку, що час експонування у межах від 17 с до 20 с є занадто великим, оскільки вони перевищують допустимі відхилення $\pm 0,02$ мм. Це особливо відчутно за інтенсивності випромінювання 2800 Лм;

– при збільшенні температури фотополімерної смоли збільшується значення відхилень геометричних розмірів моделі;

– при температурах у діапазоні від 10 °С до 20 °С середнє відхилення розмірів менше, ніж у попередніх дослідях за таких же значеннях часу експонування.

Було перевірено працездатність системи контролю температури фотополімерної смоли під час експонування шарів моделі. За рахунок розробленої системи контролю вдалося зменшити відхилення геометричних розмірів зразків в середньому на 0,03 мм (залежності від режимів експонування).

Крім того, можна додати наступні висновки. Існує лінійна залежність між тривалістю засвічення та геометричними розмірами моделі: чим довше триває засвічення, тим більше відхилення розміру в напрямку збільшення, у той час як при меншому часі засвічення відхилення менше.

При низькій інтенсивності світлового потоку може відбутися неповна полімеризація фотополімерної смоли через неповну прозорість екрану-маски, що абсорбує частину випромінювання. Це може призвести до зменшення впливу ультрафіолету на смолу та скорочення терміну служби екрану. Таким чином, недостатня інтенсивність ультрафіолетового випромінювання може призвести до слабкої адгезії до заготовки, що у свою чергу може призвести до залишкової полімеризації фотополімеру на плівці під час експонування шару. Це може призвести до скорочення терміну служби плівки. Недостатня інтенсивність світла, разом із слабкою адгезією до заготовки, також може призвести до протравлення провідників та зменшення їхніх розмірів порівняно з початковими.

Чим вище базовий шар фотополімерної маски, тим більший відстань між екраном і платформою для друку. Це може спричинити більшу дифракцію світлового потоку і, відповідно, більше паразитне засвічення провідників.

Крім того, було розроблено програмне забезпечення для контролю відхилень фотополімерних деталей та порівняння отриманих виробів з еталонними зразком у процесі друку моделі.

Ці дослідження можуть допомогти у вимірюванні відхилень фотополімерних деталей під час експонування шарів та порівнянні отриманих виробів з початковими зображеннями провідникових структур.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Arianna Martinelli, Andrea Mina, Massimo Moggi. (2021). The enabling technologies of industry 4.0: examining the seeds of the fourth industrial revolution. *Industrial and Corporate Change*, Volume 30, Issue 1, Pages 161–188, <https://doi.org/10.1093/icc/dtaa060>.
2. Núbia Carvalho, Omar Chaim, Edson Cazarini, Mateus Gerolamo. (2018). Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in Sustainable Manufacturing, *Procedia Manufacturing*, Volume 21, Pages 671-678. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.170>.
3. Mohammad Fakhar Manesh; Massimiliano Matteo Pellegrini; Giacomo Marzi; Marina Dabic. (2020). Knowledge Management in the Fourth Industrial Revolution: Mapping the Literature and Scoping Future Avenues, *IEEE Transactions on Engineering Management*, Volume: 68, Issue: 1, Page(s): 289 – 300. DOI: 10.1109/TEM.2019.2963489.
4. Andronie, Mihai, George Lăzăroiu, Mariana Iatagan, Iulian Hurloiu, and Irina Dijmărescu. (2021). "Sustainable Cyber-Physical Production Systems in Big Data-Driven Smart Urban Economy: A Systematic Literature Review". *Sustainability* 13, no. 2: 751. <https://doi.org/10.3390/su13020751>.
5. Nevliudov, I., & et al.. (2021). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems, *J. Math. Comput. Sci.*, 11(1), 520-542.
6. Theo Lins, Ricardo Augusto Rabelo Oliveira. (2020). Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*. Volume 139, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106193>.
7. Jabil Circuit Ukraine. Uzhgorod. [Type of medium]. Available: <https://www.jabil.com/contact/locations/uzhgorod.html>.
8. Juanjuan Hao, Yishu Wang, Yufeng Wu, Fu Guo. (2020). Metal recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspectives. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 157. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104787>.
9. Loris Pietrelli, Sergio Ferro, Marco Vocciante. (2019). Eco-friendly and cost-effective strategies for metals recovery from printed circuit boards. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 112, Pages 317-323. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>.
10. Liu, X., Fiedler, H., Gong, W. et al. (2018). Potential sources of unintentionally produced PCB, HCB, and PeCBz in China: A preliminary overview. *Front. Environ. Sci. Eng.* 12, 1 <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1036-9>.
11. Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2013). "Additive Manufacturing and Its Societal Impact: A Literature Review." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 1191-1203. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>

12. Berman, B. (2012). "3D Printing: The New Industrial Revolution." *Business Horizons*, 55(2), 155-162. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
13. Tay, Y. W., Tan, H. W., & Xie, L. (2017). "3D Printing Technologies: A Review of Developments, Applications, and Challenges." *Procedia CIRP*, 60, 151-156. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.01.046>
14. Leu, M. C., & Lee, J. (2015). "The Evolution of Additive Manufacturing Technology: Challenges and Opportunities." *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(6), 060901. <https://doi.org/10.1115/1.4031210>
15. Mao, C., & Zhang, Y. (2018). "3D Printing of Polymers and Composites: Processes and Applications." *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 129, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.03.001>
16. Cai, X., Yang, J., & Zhou, S. (2017). "Recent Advances in 3D Printing of Metal and Metal Matrix Composites." *Materials & Design*, 117, 273-287. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.042>
17. Zhang, Y., & Huang, Y. (2018). "3D Printing for Biomedical Applications: Current Status and Future Directions." *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 6, 67. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2018.00067>
18. Gebhardt, A., & Hötter, J. (2016). "Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing." Hanser Publishers. <https://doi.org/10.3139/9781569906538>
19. Feldmann, M., & Koch, R. (2018). "3D Printing: Fundamentals and Applications." Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-60160-5>
20. Tao, X., Zhao, Y., & Liu, Y. (2018). "3D Printing of Polymers and Composites: Processes and Applications." *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 129, 1-16.
21. Stereolithography: Materials, Processes and Applications / ed. by Paulo Jorge Bártolo. – Boston: Springer, 2011. – 340 p. – ISBN 978-1-4419-7424-7.
22. Barnatt C. 3D Printing: The Next Industrial Revolution. – New York: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. – 302 p. – ISBN 978-1484181768.
23. Манжілевський О. Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навч. посіб. / О. Д. Манжілевський. – Вінниця: ВНТУ, 2021. – 105 с.
24. Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є., Близнюк Д.С. Порівняльний аналіз технологій 3D прототипування SLA, DLP та LCD. Розробка автоматизованої станції для 3D друку // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 26 листопада 2020. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2020. 55 – 56 с.
25. А.Ю. Фартушна, І.М. Мацюк, О.М. Твердохліб. Вивчення технічних характеристик фотополімерних матеріалів та їх застосування у дисципліні «Технології 3D прототипування» // Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості і транспорту 2021, м. Дніпро, 23-

24 квітня : зб. наук. пр. міжнар. конф. ст 128 – 132. [Електронний ресурс] URI <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/160301>

26. V. Doroshenko, P. Kaliuzhnyi, S. Kolomiitsev. Examples of 3D-Technologies for the Production of Hardware and Polymer Patterns // December 2021, Casting processes 146(4):p 48-54.: [https://doi.org/ 10.15407/plit2021.04.048](https://doi.org/10.15407/plit2021.04.048).

27. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (І частина) / Г. О. Андрощук // Наука, технології, інновації. - 2017. - № 1. - С. 68-77.

28. Тулашвілі Ю.Й., Лук'янчук Ю.А. Використання сучасних SLA засобів в адитивних ІТ-технологіях // The XXIII International Science Conference «Theory, practice and science», April 27 – 30, 2021, Tokyo, Japan. P 462 – 467. ISBN-978-1-63848-669-5. <https://doi.org/10.4699/ISG.2021.I.XXIII>.

29. Valentina G. Sysyuk, Vasil M. Granchak. Optical and polymerization characteristics of the materials for 3D-printing depending on the nature of their composite component // Publishing House “Akademperiodyka” National Academy of Sciences of Ukraine 2017. p 226 – 237. <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.444.226>

30. Alfred Jacobsen, Trond Jorgensen, Qyvind Tafjord, and Endre Kirkhorn "Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads", Proc. SPIE 9376, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VII, 937605.

31. 3D printing. A Practical Guide / Redwood Ben, Garrat Brian, Chauffeur Philemon. - M.: DMK-Press, 2020. - 220 p.

32. Rossi, S.; Puglisi, A.; Benaglia, M. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing in Organic Synthesis. ChemCatChem 2018, 10, 1512– 1525, <https://doi.org/10.1002/cctc.201701619>.

33. Manapat J, Chen Q, Ye P, Advincula R (2017) 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography. Macromol Mater Eng 302:1600553.

34. Fiedor, P.; Pilch, M.; Szymaszek, P.; Chachaj-Brekiesz, A.; Galek, M.; Ortyl, J. Photochemical Study of a New Bimolecular Photoinitiating System for Vat Photopolymerization 3D Printing Techniques under Visible Light. Catalysts 2020, 10, 284.

35. T. Sibilieva, V. Alekseev, S. Barsuk, S. Berns, E. Boillat, I. Boiaryntseva, A. Boyarintsev, A. Carbone, A. De Roeck, S. Dolan, T. Driuk, A. Gendotti, I. Gerasymov, B. Grynyov, S. Hugon, U. Kose, O. Opolonin, A. Rubbia, D. Sgalaberna, M. Sibilyev, S. Tretyak, T. Weber, J. Wuthrich, X.Y. Zhao. «3D printing of inorganic scintillator-based particle detectors». Journal of Instrumentation, Volume 18, March 2023. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/03/P03007>

36. Yun, J.S., Park, T.W., Jeong, Y.H. et al. Development of ceramic-reinforced photopolymers for SLA 3D printing technology. Appl. Phys. A 122, 629 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0157-x>.

37. Rocheva, V. V.; Koroleva, A. V.; Savelyev, A. G.; Khaydukov, K. V.; Generalova, A. N.; Nechaev, A. V.; Guller, A. E.; Semchishen, V. A.; Chichkov, B.N.; Khaydukov, E. V. High-Resolution 3D Photopolymerization Assisted by

Upconversion Nanoparticles for Rapid Prototyping Applications. *Sci. Rep.* 2018, 8, 1– 10, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21793-0>.

38. Tomal, W.; Pilch, M.; Chachaj-Brekiesz, A.; Ortyl, J. Development of new high-performance biphenyl and terphenyl derivatives as versatile photoredox photoinitiating systems and their applications in 3D printing photopolymerization processes. *Catalysts* 2019, 9, 827.

39. FunToDo CB [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3dprinter.ua/shop/funtodo-cb-resin-dlp/> - 22.02.2025 р – Загол. з екрана.

40. MakerJuice WaxCast [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3ddevice.com.ua/product/fotopolimer-makerjuice-waxcast/> - 22.02.2025 р – Загол. з екрана.

41. Anycubic Dental (Skin) Non - Castable [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://prom.ua/p1439969120-stomatologicheskaya-zuboproteznaya-modelnaya>. 22.02.2025 р – Загол. з екрана.

42. Anycubic 405nm UV resin, ECO [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3dreams.com.ua/product/-anycubic-uv-resin/> - 22.02.2025 р – Загол. з екрана.

43. Anycubic 405nm UV [Type of medium]. Available: <https://ua.anycubic.biz/white-eco-plant-based-uv-resin-anycubic-1kg>.

44. Plexiwire Resin Basic Orange Transparen [Type of medium]. Available: <https://shop.plexiwire.com.ua/basic-resin/resin-orange-transparent-500/>.

45. MonoFilament Basic [Type of medium]. Available: <https://monofilament.com.ua/ua/products/fotopolimernie-smoli-dlya-3d-printera/resin-basic/>.

46. FunToDo [Type of medium]. Available: <https://www.funtodo.net>.

47. Wanhao Castable [Type of medium]. Available: <https://wanhao.store/products/wanhao-castable-resin-for-jewelry-green-color-1000ml-bottle>.

48. BlueCast CR3A [Type of medium]. Available: <https://www.uvelirmag.com/3d-printery-i-polimery/bluecast-cr3a-for-lcddlp-3dp/>.

49. Elegoo 3D [Type of medium]. Available: <https://www.elegoo.com/collections/resin>.

50. Weistek [Type of medium]. Available: <https://www.amazon.com/Standard-UV-Curing-Precision-Photopolymer-Printing/dp/B08L6P5PNK>.

51. Tevo [Type of medium]. Available: <https://3ddevice.com.ua/product/smola-dlia-3d-printera-nextdent-base/>.

52. Основи аналітики: навч. посіб. Київ: Видавництво Ліра-К, 2022. 248 с. ISBN 978-617-520-284-5.

53. SPSS Statis for Dumlins, 4th Edition /by Jesus Salcedo and Keith McCormick.[Book]. Published by: John&Sons.Inc. 2020. P. 444.

54. Statistical Methods in Psychiatry Research and SPSS. 2nd Edition./ By M. Venkataswamy Reddy. [Book]. Apple Academic Press. 2019. P.442. <https://doi.org/10.1201/9780429023309>.

55. Пріб К.А. Діагностика в системі управління [текст]: навч.посіб. / К.А. Пріб, П75 Н.І. Патика. – Київ: «Центр учбової літератури», 2016. – 432 с. ISBN 978-617-673-410-9.

56. Величко О.М., Гордієнко Т.Б. Основи системного аналізу і прийняття оптимальних рішень [текст]: навч.посіб. / Величко О.М., Гордієнко Т.Б.: «Олді+», 2021. – 672 с. ISBN 978-966-289-553-7.

57. Nevlyudov I., Razumov-Frizyuk E., Nikitin D., Badaniuk I., Strelets R. // Practical results of the study of photopolymer exposure of printed circuit board topology. ISBN 978-9984-891-22-4 UDC 658.012.32 Information systems in project and program management, [Text]: Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga: ISMA, 2023. 317 p. Recommended for publication by the Kharkiv National University of Radio Electronics (protocol No. 10 of October 06, 2023).

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

59. Born, M., & Wolf, E. (2013). Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference, and diffraction of light (6th ed.). Elsevier. ISBN 148310320X, 9781483103204.

60. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.

61. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного управління» для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології денної форми навчання [Електронний ресурс] / [Упорядник Я. В. Корпань]; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси: ЧДТУ, 2019. – 124 с.

62. Osadchyi S. I., Zozulya, V. A., Kalich, V. M., & Timoshenko, A. S. (2024). The frequency method for optimal identification of close-loop system elements . Radio Electronics, Computer Science, Control, (4), 195. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-4-18>

63. Нікітін Д.О., Балабанов І.В. Дослідження впливу температури фотополімерної смоли на збереження геометричних розмірів моделі під час 3D-друку // Science of XXI century: development, main theories and achievements: collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the V International Scientific and Theoretical Conference, January 26, 2024. Helsinki, Republic of Finland: International Center of Scientific Research. p. 197 – 203. ISBN 979-8-88955-774-6. <https://doi.org/10.36074/scientia-26.01.2024>

64. MATLAB Simulink [Software]. Version 2020a. Available: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>.

65. Levashenko, V., Liashenko, O., & Kuchuk, H. (2020). Building Decision Support Systems based on Fuzzy Data. *Advanced Information Systems*, 4(4), 48–56. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.07>

66. Никітін Д.О. Розробка моделі керуванням температури фотополімерної смоли на базі LCD-технології 3D-друку // Системи управління, навігації та зв'язку, Національний університет “Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка” – Полтава 2024: Збірник наукових праць, випуск 1 (75). 31 – 37 с. ISSN 2073-7394. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.031>.

67. Теорія автоматичного управління. Нелінійні та дискретні системи: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков. – Електронні текстові дані . – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 98 с.

68. Brian H. Hahn, Daniel T. Valentine. “Essential MATLAB for Engineers and Scientists”, *Academic Press*. ISBN: 978-0-08-100877-5, <https://doi.org/10.1016/C2015-0-02182-7>. (2017).

69. Невлюдов І.Ш. 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 р. – 366 с.

70. Rudenko O., Bezsonov O., Ilyunin O., Demirskiy O., Serdiuk N., Arsenyeva O., Semenenko O., 2023, Using a Neural Network Approach to Predict Deposits on the Surfaces of Heat Exchange Equipment, *Chemical Engineering Transactions*, 103, 697-702. <https://doi.org/10.3303/CET23103117>

71. S. Han and S. P. Bhattacharyya, “PID controller synthesis using a v-Hurwitz stability criterion,” *IEEE Control Syst. Lett.*, vol. 2, no. 3, pp. 525– 530, 2018. <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2018.2842784>.

72. Theo Lins, Ricardo Augusto Rabelo Oliveira. (2020). Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*. Volume 139, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106193>.

73. Никітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Баданюк І.С. Методи фільтрації зображення топології друкованих плат // Вінниця, UKR - Вена, AUT Випуск № 12-13 «ГРААЛЬ НАУКИ» за матеріалами III Міжнародної науково-практичної конференції "An Integrated Approach to Science Modernization: Methods, Models and Multidisciplinary". 351 – 355 с. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.29.04.2022.058>.

74. Liangyu Chen, Xin Lu, Jie Zhang, Xiaojie Chu, Chengpeng Chen; Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) *Workshops*, 2021, pp. 182-192.

75. Osypenko, V., Lurie, I., Yakobchuk, M., Savina, N., Boskin, O., Lytvynenko, V.: About innovation-investment designing of complex systems by inductive technology of system information-analytical research. In: *10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing*

Systems IDAACS, pp. 424–430 (2019).
<https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924434>.

76. Patel KK, Kar A, Khan MA (2019) Potential of reflected UV imaging technique for detection of defects on the surface area of mango. *J Food Sci Technol* 56(3):1295–1301.

77. P. Adarsh, P. Rathi and M. Kumar, "YOLO v3-Tiny: Object Detection and Recognition using one stage improved model," *2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, 2020, pp. 687-694, doi:10.1109/ICACCS48705.2020.9074315.

78. Jin, Z.; Zhang, Z.; Gu, G.X. Automated Real-Time Detection and Prediction of Interlayer Imperfections in Additive Manufacturing Processes Using Artificial Intelligence. *Adv. Intell. Syst.* 2020, 2, 1900130.

79. Weis, Á.A.; Mor, J.L.; Soares, L.B.; Steffens, C.R.; Drews, P.L., Jr.; de Faria, M.F.; Evald, P.J.; Azzolin, R.Z.; Nelson Filho, D.; Botelho, S.S. Automated seam tracking system based on passive monocular vision for automated linear robotic welding process. In Proceedings of the 2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Emden, Germany, 24–26 July 2017; pp. 305–310.

80. Liu, X. Recent progress in semantic image segmentation. *Artificial Intell. Rev.* 2019, 52, 1089–1106.

81. Petrov, K. E., & Kyrychenko, V. V. (2023). Removal of rain components from single images using a recurrent neural network. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (2), 91. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-2-10>

82. R. Lima, A. Pozo, A. Mendiburu, and R. Santana, "Automatic design of deep neural networks applied to image segmentation problems," in *Proc EuroGP*, 2021, pp. 98–113.

83. D. Devarajan, S. Ramesh, and B. Gomathy, "A metaheuristic segmentation framework for detection of retinal disorders from fundus images using a hybrid ant colony optimization," *Soft Comput.*, vol. 24, no. 17, pp. 13 347–13 356, 2020.

84. X. Chen, Y. Sun, M. Zhang, and D. Peng, "Evolving deep convolutional variational autoencoders for image classification," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 25, no. 5, pp. 815–829, 2020.

85. I. Badanyuk, I. Nevliudov, D. Nikitin. Topological image processing for comprehensive defect and deviation analysis using adaptive binarization // № 1 (23) (2023): Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 164 – 173 с. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.164>.

86. Gojcic, Z., Zhou, C., Wegner, J. D., Guibas, L. J., & Birdal, T. (2020). Learning multiview 3d point cloud registration. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 1759–1769.

87. Sun, Y., Zhao, L., Huang, S., et al: 'L2-SIFT: SIFT feature extraction and matching for large images in large-scale aerial photogrammetry', *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2014, 91, pp. 1–16.

88. Kumar Y, Sharan SN (2017) Automatic misalignment defects detection & correction in PCB using SURF (Speed up Robust Features) technique. *International*

Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), ISSN: 2278–0181 IJERTV6IS010166 Vol. 6.

89. Zhu, J. T., Gong, C. F., Zhao, M. X., Wang, L., and Luo, Y.: Image mosaic algorithm based on PCA-ORB feature matching, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-3/W10, p 83–89, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W10-83-2020>, 2020.

90. Nagendra Pratap Singh, Vibhav Prakash Singh: Efficient Segmentation and Registration of Retinal Image Using Gumble Probability Distribution and BRISK Feature, *Traitement du Signal* Vol. 37, No. 5, October, 2020, pp. 855-864. <https://doi.org/10.18280/ts.370519>.

91. Mukherjee, P., Lall, B.: ‘Saliency and KAZE features assisted object segmentation’, *Image Vis. Comput.*, 2017, 61, pp. 82–97.

92. S. A. K. Tareen and Z. Saleem, “A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK,” in *IEEE Int. Conf. on Computing, Math. & Eng. Technologies, Sukkur, iCoMET*, 2018, pp. 1-10.

93. J. W. Feifan Lv, Feng Lu and C. Lim, “Mblen: Low-light image/video enhancement using cnns,” in *British Machine Vision Conference (BMVC)*, 2018.

94. Y. Xiang, F. Wang, and H. You, “Os-sift: A robust sift-like algorithm for high-resolution optical-to-sar image registration in suburban areas,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 56, no. 6, pp. 3078–3090, 2018.

95. A. Jakubovic’ and J. Velagic’, “Image feature matching and object detection using brute-force matchers,” in *Int. Symp. ELMAR*, pp. 83–86 (2018).

96. Wu, M.: ‘Research on optimization of image fast feature point matching algorithm’, *EURASIP J. Image Video Process.*, 2018, pp. 106.11–106.27.

97. Bellavia, F., Tegolo, D., Valenti, C.: ‘Improving Harris corner selection strategy’, *IET Comput. Vis.*, 2011, 5, (2), pp. 87–96.

98. Grewenig, S., Weickert, J., Bruhn, A.: ‘From box filtering to fast explicit diffusion’. *Joint Pattern Recognition Symp.*, Darmstadt, Germany, September 2010, pp. 533–542.

99. Li, C., Ma, L.: ‘A new framework for feature descriptor based on SIFT’, *Pattern Recognit. Lett.*, 2009, **30**, (5), pp. 544–557.

100. L. Qian, H. Li, and M. Xu, “Image mosaic algorithm based on improved AKAZE,” in *3rd Int. Conf. Comput. Vis., Image and Deep Learn. & Int. Conf. Comput. Eng. and Appl. (CVIDL & ICCEA)*, pp. 1089–1093 (2022).

101. Yeo, C., Ahammad, P., Ramchandran, K.: ‘Rate-efficient visual correspondences using random projections’. *IEEE Int. Conf. Image Processing*, San Diego, CA, USA, October 2008, pp. 217–220.

102. Strecha, C., Bronstein, A.M., Bronstein, M.M., *et al*: ‘LDAHash: improved matching with smaller descriptors’, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2012, **34**, (1), pp. 66–78.

103. Jiang, G., Liu, L., Zhu, W., Yin, S., Wei, S.: A 127 fps in full HD accelerator based on optimized AKAZE with efficiency and effectiveness for image

feature extraction. In: *Proceedings of the 52nd Annual Design Automation Conference*, pp. 1–6 (2015).

104. Kalms, L., Elhossini, A., Juurlink, B.: FPGA based hardware accelerator for KAZE feature extraction algorithm. In: *International Conference on Field-Programmable Technology*, pp. 281–284 (2016).

105. Mentzer, N., Mahr, J., Payá-Vayá, G., Blume, H.: Online stereo camera calibration for automotive vision based on HW-accelerated A-KAZE-feature extraction. *J. Syst. Architect.* 97, 335–348 (2019).

106. Li, Y., Du, S., Ikenaga, T.: Temporally forward nonlinear scale space with octave prediction for high frame rate and ultra-low delay A-KAZE matching system. In: *16th International Conference on Machine Vision Applications*, pp. 1–4 (2019).

107. Guan, H., & Smith, W. A. 2017. BRISKS: Binary features for spherical images on a geodesic grid. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 4516–4524.

108. Dán, G., Khan, M. A., & Fodor, V. 2015. Characterization of SURF and BRISK interest point distribution for distributed feature extraction in visual sensor networks. *IEEE Transactions on Multimedia*, 17(5), pp. 591–602.

109. Shaharyar Ahmed Khan Tareen; Rana Hammad Raza.: Potential of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, BRISK, AGAST, and 7 More Algorithms for Matching Extremely Variant Image Pairs. In: *IEEE Xplore*: 20 April 2023. ISBN:979-8-3503-3531-6. <https://doi.org/10.1109/iCoMET57998.2023.10099250>.

110. Fan, X.N., Gu, Y.F., Ni, J.J., 2019. Application of Improved ORB Algorithm in Image Matching. *Computer and Modernization*, (2), 1-6,14.

111. Wei Chang, Yun Liu. An improved fast panoramic image stitching algorithm[J]. *Electronic measurement technology*, 2017, 40(7): 90-94.

112. Zhou, L.L.; Jiang, F. Image matching algorithm based on fast and brief. *Comput. Eng. Des.* 2015, 5, 1269–1273.

113. Luo, H.; Liu, K.; Jiang, S.; Li, Q.; Wang, L.; Jiang, W. CAISOV: Collinear Affine Invariance and Scale-Orientation Voting for Reliable Feature Matching. *Remote Sens.* 2022, 14, 3175.

114. Pang, S.; Du, A.; Mehmet, A.; Chen, H. Weakly supervised learning for image keypoint matching using graph convolutional networks. *Knowl.-Based Syst.* 2020, 197, 105871.

115. Chung, K.-L.; Tseng, Y.-C.; Chen, H.-Y. A Novel and Effective Cooperative RANSAC Image Matching Method Using Geometry Histogram-Based Constructed Reduced Correspondence Set. *Remote Sens.* 2022, 14, 3256.

116. Pu, X.C.; Tan, S.F.; Zhang, Y. Research on the navigation of mobile robots based on the improved fast algorithm. *CAAI Trans. Intell. Syst.* 2014, 9, 419–424.

117. Fan, X.N.; Gu, Y.F.; Ni, J.J. Application of improved ORB algorithm in image matching. *Comput. Mod.* 2019, 282, 1–6.

118. S. Li, “Research on SLAM loop detection based on ORB feature matching algorithm,” M.S. thesis, Softw. Eng., Beijing Univ. Technol., Beijing, China, 2020.

119. S. Chen, S. Zhong, B. Xue, X. Li, L. Zhao and C. -I. Chang, "Iterative Scale-Invariant Feature Transform for Remote Sensing Image Registration," in *IEEE*

Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 59, no. 4, pp. 3244-3265, April 2021, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3008609>.

Додаток А.

Вимірювання впливу технологічних параметрів експонування на
відхилення геометричних розмірів 3D-моделі

Таблиця А.1 – Вимірювання впливу технологічних параметрів
експонування на відхилення геометричних розмірів 3D-моделі

№	Відхилення, мкм	Час експонування, с	Товщина шару, мкм	Інтенсивність випромінювання, Лм	Довжина хвилі, нм
1	0,064	7	20	1600	405
2	0,087	8	20	1600	405
3	0,105	9	20	1600	405
4	0,117	10	20	1600	405
5	0,137	11	20	1600	405
6	0,142	12	20	1600	405
7	0,148	13	20	1600	405
8	0,153	14	20	1600	405
9	0,154	15	20	1600	405
10	0,161	16	20	1600	405
11	0,165	17	20	1600	405
12	0,169	18	20	1600	405
13	0,173	19	20	1600	405
14	0,190	20	20	1600	405
15	0,058	7	20	1600	435
16	0,091	8	20	1600	435
17	0,108	9	20	1600	435
18	0,116	10	20	1600	435
19	0,139	11	20	1600	435
20	0,139	12	20	1600	435
21	0,144	13	20	1600	435
22	0,148	14	20	1600	435
23	0,155	15	20	1600	435
24	0,161	16	20	1600	435
25	0,166	17	20	1600	435
26	0,175	18	20	1600	435
27	0,192	19	20	1600	435
28	0,224	20	20	1600	435
29	0,082	7	20	2800	405
30	0,109	8	20	2800	405
31	0,115	9	20	2800	405
32	0,135	10	20	2800	405
33	0,15	11	20	2800	405
34	0,158	12	20	2800	405
35	0,162	13	20	2800	405
36	0,167	14	20	2800	405
37	0,171	15	20	2800	405

Продовження таблиці А.1

№	Відхилення, мкм	Час експонування, с	Товщина шару, мкм	Інтенсивність випромінювання, Лм	Довжина хвилі, нм
38	0,176	16	20	2800	405
39	0,179	17	20	2800	405
40	0,191	18	20	2800	405
41	0,198	19	20	2800	405
42	0,2	20	20	2800	405
43	0,093	7	20	2800	435
44	0,115	8	20	2800	435
45	0,134	9	20	2800	435
46	0,148	10	20	2800	435
47	0,153	11	20	2800	435
48	0,164	12	20	2800	435
49	0,172	13	20	2800	435
50	0,178	14	20	2800	435
51	0,186	15	20	2800	435
52	0,191	16	20	2800	435
53	0,196	17	20	2800	435
54	0,2	18	20	2800	435
55	0,204	19	20	2800	435
56	0,208	20	20	2800	435
57	0,072	7	50	1600	405
58	0,091	8	50	1600	405
59	0,102	9	50	1600	405
60	0,122	10	50	1600	405
61	0,132	11	50	1600	405
62	0,152	12	50	1600	405
63	0,148	13	50	1600	405
64	0,162	14	50	1600	405
65	0,166	15	50	1600	405
66	0,172	16	50	1600	405
67	0,178	17	50	1600	405
68	0,186	18	50	1600	405
69	0,198	19	50	1600	405
70	0,203	20	50	1600	405
71	0,089	7	50	1600	435
72	0,102	8	50	1600	435
73	0,114	9	50	1600	435
74	0,129	10	50	1600	435
75	0,136	11	50	1600	435
76	0,142	12	50	1600	435
77	0,15	13	50	1600	435
78	0,155	14	50	1600	435
79	0,161	15	50	1600	435
80	0,169	16	50	1600	435
81	0,173	17	50	1600	435
82	0,182	18	50	1600	435
83	0,19	19	50	1600	435

Продовження таблиці А.1

№	Відхилення, мкм	Час експонування, с	Товщина шару, мкм	Інтенсивність випромінювання, Лм	Довжина хвилі, нм
84	0,198	20	50	1600	435
85	0,082	7	50	2800	405
86	0,108	8	50	2800	405
87	0,128	9	50	2800	405
88	0,142	10	50	2800	405
89	0,167	11	50	2800	405
90	0,171	12	50	2800	405
91	0,179	13	50	2800	405
92	0,189	14	50	2800	405
93	0,194	15	50	2800	405
94	0,202	16	50	2800	405
95	0,214	17	50	2800	405
96	0,229	18	50	2800	405
97	0,220	19	50	2800	405
98	0,226	20	50	2800	405
99	0,091	7	50	2800	435
100	0,112	8	50	2800	435
101	0,134	9	50	2800	435
102	0,148	10	50	2800	435
103	0,170	11	50	2800	435
104	0,171	12	50	2800	435
105	0,178	13	50	2800	435
106	0,191	14	50	2800	435
107	0,204	15	50	2800	435
108	0,208	16	50	2800	435
109	0,216	17	50	2800	435
110	0,222	18	50	2800	435
111	0,23	19	50	2800	435
112	0,234	20	50	2800	435

Додаток Б

Порівняння відхилень розмірів зразків при контролі температури

Таблиця Б.1 – Порівняння відхилень розмірів зразків при контролі температури

№	Відхилення 0,1 мм	Відхилення 0,3 мм	Відхилення 0,7 мм	Відхилення 1 мм
1	0,063	0,064	0,064	0,066
2	0,087	0,088	0,087	0,09
3	0,104	0,105	0,105	0,113
4	0,118	0,118	0,117	0,126
5	0,137	0,137	0,137	0,147
6	0,141	0,14	0,142	0,152
7	0,15	0,149	0,148	0,158
8	0,152	0,153	0,153	0,163
9	0,155	0,156	0,154	0,164
10	0,159	0,16	0,161	0,171
11	0,163	0,164	0,165	0,175
12	0,171	0,171	0,169	0,178
13	0,172	0,173	0,173	0,165
14	0,189	0,19	0,190	0,198
15	0,056	0,056	0,058	0,067
16	0,089	0,09	0,091	0,082
17	0,107	0,108	0,108	0,116
18	0,114	0,115	0,116	0,125
19	0,137	0,138	0,139	0,148
20	0,14	0,141	0,139	0,148
21	0,14	0,143	0,144	0,152
22	0,147	0,146	0,148	0,157
23	0,154	0,154	0,155	0,164
24	0,161	0,162	0,161	0,17
25	0,165	0,166	0,166	0,175
26	0,174	0,175	0,175	0,184
27	0,191	0,192	0,192	0,2
28	0,222	0,223	0,224	0,232
29	0,081	0,081	0,082	0,091
30	0,099	0,1	0,109	0,118
31	0,113	0,114	0,115	0,123
32	0,146	0,147	0,135	0,153
33	0,149	0,15	0,15	0,158
34	0,157	0,158	0,158	0,16
35	0,161	0,161	0,162	0,17
36	0,165	0,166	0,167	0,176
37	0,17	0,17	0,171	0,18
38	0,175	0,175	0,176	0,185
39	0,179	0,18	0,179	0,188
40	0,192	0,193	0,191	0,2
41	0,199	0,2	0,198	0,207

Продовження таблиці Б.1

№	Відхилення 0,1 мм	Відхилення 0,3 мм	Відхилення 0,7 мм	Відхилення 1 мм
42	0,201	0,2	0,2	0,209
43	0,092	0,091	0,093	0,102
44	0,115	0,114	0,115	0,124
45	0,138	0,139	0,134	0,143
46	0,15	0,15	0,148	0,157
47	0,151	0,152	0,153	0,162
48	0,165	0,166	0,164	0,173
49	0,171	0,172	0,172	0,181
50	0,177	0,178	0,178	0,187
51	0,185	0,186	0,186	0,195
52	0,192	0,192	0,191	0,2
53	0,193	0,194	0,196	0,205
54	0,199	0,2	0,21	0,209
55	0,203	0,204	0,204	0,213
56	0,207	0,208	0,208	0,217
57	0,071	0,072	0,072	0,091
58	0,079	0,08	0,091	0,099
59	0,103	0,104	0,102	0,111
60	0,122	0,123	0,122	0,132
61	0,131	0,132	0,132	0,141
62	0,148	0,149	0,152	0,163
63	0,15	0,15	0,148	0,157
64	0,159	0,16	0,162	0,174
65	0,163	0,164	0,166	0,175
66	0,173	0,174	0,172	0,192
67	0,176	0,177	0,178	0,187
68	0,184	0,185	0,186	0,195
69	0,196	0,197	0,198	0,207
70	0,201	0,202	0,203	0,212
71	0,087	0,088	0,089	0,098
72	0,099	0,1	0,102	0,111
73	0,113	0,114	0,114	0,123
74	0,13	0,131	0,129	0,138
75	0,134	0,135	0,136	0,145
76	0,141	0,142	0,142	0,151
77	0,151	0,151	0,15	0,158
78	0,154	0,155	0,155	0,164
79	0,16	0,165	0,161	0,172
80	0,167	0,168	0,169	0,178
81	0,174	0,174	0,173	0,181
82	0,181	0,182	0,182	0,188
83	0,189	0,192	0,19	0,197
84	0,196	0,197	0,198	0,204
85	0,084	0,084	0,082	0,088
86	0,107	0,108	0,108	0,114
87	0,126	0,127	0,128	0,137
88	0,139	0,139	0,142	0,151

Продовження таблиці Б.1

№	Відхилення 0,1 мм	Відхилення 0,3 мм	Відхилення 0,7 мм	Відхилення 1 мм
89	0,167	0,168	0,167	0,176
90	0,171	0,172	0,171	0,194
91	0,178	0,179	0,179	0,188
92	0,191	0,191	0,189	0,198
93	0,192	0,193	0,194	0,203
94	0,199	0,199	0,202	0,211
95	0,215	0,215	0,214	0,223
96	0,218	0,219	0,229	0,228
97	0,218	0,219	0,220	0,229
98	0,224	0,224	0,226	0,235
99	0,092	0,092	0,091	0,102
100	0,116	0,116	0,112	0,121
101	0,129	0,136	0,134	0,142
102	0,147	0,148	0,148	0,156
103	0,171	0,172	0,170	0,178
104	0,172	0,173	0,171	0,184
105	0,176	0,177	0,178	0,187
106	0,189	0,189	0,191	0,199
107	0,198	0,199	0,204	0,213
108	0,207	0,207	0,208	0,217
109	0,215	0,215	0,216	0,225
110	0,221	0,221	0,222	0,232
111	0,229	0,229	0,23	0,239
112	0,232	0,232	0,234	0,243

Додаток В

Підключення бібліотеки нормалізації зображення

```
using Emgu.CV;
using Emgu.CV.CvEnum;
using Emgu.CV.Structure;
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;

namespace ImageOperations
{
    public class Normalize : PreProcessorBase
    {
        public Normalize()
        {
            this.ProcessMethod = ProcessMethods.Normalize;
            this.ProcessName = "Нормалізувати";
        }
        public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> gray)
        {
            var normalizedOutput = new Image<Gray, byte>(gray.Width, gray.Height, new Gray(0));
            CvInvoke.Normalize(gray, normalizedOutput, 0, 255, NormType.MinMax);
            return normalizedOutput;
        }
        public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> firstImage, Image<Gray,
byte> secondImage)
        {
            throw new NotImplementedException("Normalize is non lined image processor");
        }
    }
}
```

Додаток Г

Підключення бібліотеки згладжування зображень

```

using Emgu.CV;
using Emgu.CV.Structure;
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;

namespace ImageOperations
{
    /// <summary>
    /// Реалізація Узагальненого шумодава
    /// </summary>
    public class DenoiseFilter : PreProcessorBase
    {
        // ступінь придушення шумодава
        public int DenoiseFactor { get; set; } = 7;
        public DenoiseFilter()
        {
            this.ProcessMethod = ProcessMethods.DenoiseFilter;
            this.ProcessName = "Зменшити шум";
        }
        public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> gray)
        {
            // переведення в серій передаємо зображення у вигляді матриці і записуємо вмикаємо
            функцію шумодава після чого повертаємо картинку
            Mat output = new Mat();
            CvInvoke.FastNlMeansDenoising(gray.Mat, output, DenoiseFactor);
            return output.ToImage<Gray, byte>();
        }
        public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> firstImage, Image<Gray,
byte> secondImage)
        {
            throw new NotImplementedException("Denoise is non lined image processor");
        }
    }
}

```

Додаток Д

Підключення бібліотеки бінаризації

```

using Emgu.CV;
using Emgu.CV.Structure;
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;

namespace ImageOperations
{
    public class SimpleBinary : PreProcessorBase
    {
        private readonly int histoSize = 256;
        // виставити порого бінаризації
        private int _treshold = 100;
        public int Threshold
        {
            get => _treshold; set
            {
                if (value < 0 || value > 255)
                {
                    _treshold = 100;
                    return;
                }
                _treshold = value;
            }
        }
        public bool IsOtsu { get; set; } = true;
        public SimpleBinary()
        {
            this.ProcessMethod = ProcessMethods.SimpleBinary;
            this.ProcessName = "Простий бінарний";
        }
        public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> gray)
        {
            // якщо то знаходити порого по отуц автоматично; якщо ні, то вказувати значення
            порого користувачем
            if (IsOtsu)
            {
                _treshold = (int)this.Otsu(gray);
            }
            var binary = gray.ThresholdBinary(new Gray(_treshold), new Gray(255));
            if (binary != null)
            {
                return binary;
            }
            return gray;
        }
    }
}

```

```

private int[] Histo(Image<Gray, byte> image)
{
    int[] histogram = new int[histoSize];
    for (int i = 0; i < image.Height; i++)
    {
        for (int j = 0; j < image.Width; j++)
        {
            int intensity = (int)Math.Round(image[i, j].Intensity);
            histogram[intensity] += 1;
        }
    }
    return histogram;
}

private double Otsu(Image<Gray, byte> image)
{
    int all_pixel_count = image.Width * image.Height;
    int all_intensity_sum = (int)image.GetSum().Intensity;
    int best_thresh = 0;
    double best_sigma = 0.0;
    int first_class_pixel_count = 0;
    int first_class_intensity_sum = 0;
    var hist = Histo(image);
    for (int thresh = 0; thresh < histoSize - 1; ++thresh)
    {
        first_class_pixel_count += hist[thresh];
        first_class_intensity_sum += thresh * hist[thresh];
        double first_class_prob = first_class_pixel_count / (double)all_pixel_count;
        double second_class_prob = 1.0 - first_class_prob;
        double first_class_mean = first_class_intensity_sum / (double)first_class_pixel_count;
        double second_class_mean = (all_intensity_sum - first_class_intensity_sum)
            / (double)(all_pixel_count - first_class_pixel_count);
        double mean_delta = first_class_mean - second_class_mean;
        double sigma = first_class_prob * second_class_prob * mean_delta * mean_delta;
        if (sigma > best_sigma)
        {
            best_sigma = sigma;
            best_thresh = thresh;
        }
    }
    return best_thresh;
}

public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> firstImage, Image<Gray,
byte> secondImage)
{
    throw new NotImplementedException("AdaptiveBinary is non lined image processor");
}
}

```

Додаток Е

Підключення бібліотеки адаптивної бінарizaції

```

using Emgu.CV;
using Emgu.CV.CvEnum;
using Emgu.CV.ML;
using Emgu.CV.Reg;
using Emgu.CV.Structure;
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Drawing;
using System.Drawing.Imaging;
using System.Linq;
using System.Numerics;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;

namespace ImageOperations
{
    public class AdaptiveBinary : PreProcessorBase
    {
        private readonly int histoSize = 256;
        public AdaptiveBinary()
        {
            this.ProcessMethod = ProcessMethods.AdaptiveBinary;
            this.ProcessName = "Адаптивна бінарizaція";
        }
        public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> gray)
        {
            // беремо зображення в отуц і отримуємо значення порога
            double otsuK = Otsu(gray);
            // робимо бінарizaцію за отриманим порогом
            Image<Gray, byte> globalBinary = gray.ThresholdBinary(new Gray(otsuK), new
Gray(255));
            // знаходимо середнє квадратичне відхилення в зображенні
            int mean = MeanColor(globalBinary);
            // робимо число парне знімаємо одиницю якщо не парне то залишаємо
            int blockSize = mean % 2 == 0 ? mean - 1 : mean;
            // потім робиться адаптивна бінарizaція
            var adaptiveOutput = new Image<Gray, byte>(gray.Width, gray.Height, new Gray(0));
            CvInvoke.AdaptiveThreshold(gray, adaptiveOutput, 255,
AdaptiveThresholdType.GaussianC, ThresholdType.Binary, blockSize, 10);
            return adaptiveOutput;
        }
        private int[] Histo(Image<Gray, byte> image)
        {
            int[] histogram = new int[histoSize];
            for (int i = 0; i < image.Height; i++)
            {
                for (int j = 0; j < image.Width; j++)
                {

```

```

        int intensity = (int)Math.Round(image[i, j].Intensity);
        histogram[intensity] += 1;
    }
    return histogram;
}
private double Otsu(Image<Gray, byte> image)
{
    int all_pixel_count = image.Width * image.Height;
    int all_intensity_sum = (int)image.GetSum().Intensity;
    int best_thresh = 0;
    double best_sigma = 0.0;
    int first_class_pixel_count = 0;
    int first_class_intensity_sum = 0;
    var hist = Histo(image);
    for (int thresh = 0; thresh < histoSize - 1; ++thresh)
    {
        first_class_pixel_count += hist[thresh];
        first_class_intensity_sum += thresh * hist[thresh];
        double first_class_prob = first_class_pixel_count / (double)all_pixel_count;
        double second_class_prob = 1.0 - first_class_prob;
        double first_class_mean = first_class_intensity_sum / (double)first_class_pixel_count;
        double second_class_mean = (all_intensity_sum - first_class_intensity_sum)
            / (double)(all_pixel_count - first_class_pixel_count);
        double mean_delta = first_class_mean - second_class_mean;
        double sigma = first_class_prob * second_class_prob * mean_delta * mean_delta;
        if (sigma > best_sigma)
        {
            best_sigma = sigma;
            best_thresh = thresh;
        }
    }
    return best_thresh;
}
private int MeanColor(Image<Gray, byte> image)
{
    int all = image.Height * image.Width;
    double mean = image.GetSum().Intensity / all;
    double sqMeand = 0;
    for (int i = 0; i < image.Height; i++)
    {
        for (int j = 0; j < image.Width; j++)
        {
            double intensity = image[i, j].Intensity;
            sqMeand += Math.Pow(intensity - mean, 2);
        }
    }
    var threshold = Math.Sqrt(sqMeand / all);
    return (int)Math.Round(threshold);
}
public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> firstImage, Image<Gray,
byte> secondImage)
{
    throw new NotImplementedException("AdaptiveBinary is non lined image processor");
}

```

Додаток Ж

Підключення бібліотеки вирівнювання зображення

```

using Emgu.CV;
using Emgu.CV.CvEnum;
using Emgu.CV.Structure;
using Emgu.CV.Features2D;
using Emgu.CV.Util;
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Drawing;
using System.IO;
using Emgu.CV.Flann;
namespace ImageOperations.processors
{
    public class AlignImages : PreProcessorBase
    {
        public string FeatureType { get; set; } = "orb";
        public string MatcherType { get; set; } = "bf";
        public AlignImages()
        {
            this.ProcessMethod = ProcessMethods.AlignImages;
            this.ProcessName = "Вирівнять изображения";
            this.CanProcessRefernceImage = true;
        }
        public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> input)
        {
            throw new NotImplementedException("Оберіть друге зображення");
        }
        public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> firstImage, Image<Gray,
byte> secondImage)
        {
            // Ключові точки
            VectorOfKeyPoint keyPoints1 = new VectorOfKeyPoint();
            VectorOfKeyPoint keyPoints2 = new VectorOfKeyPoint();
            // матриці описів
            Mat descriptors1 = new Mat();
            Mat descriptors2 = new Mat();
            // Встановлення детектора
            switch (FeatureType)
            {
                case "brisk":
                {
                    var brisk = new Brisk();
                    brisk.DetectAndCompute(firstImage, null, keyPoints1, descriptors1, false);
                    brisk.DetectAndCompute(secondImage, null, keyPoints2, descriptors2, false);
                    break;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    case "akaze":
    {
        var akaze = new AKAZE();
        akaze.DetectAndCompute(firstImage, null, keyPoints1, descriptors1, false);
        akaze.DetectAndCompute(secondImage, null, keyPoints2, descriptors2, false);
        break;
    }
    case "orb":
    {
        var orb = new ORB();
        orb.DetectAndCompute(firstImage, null, keyPoints1, descriptors1, false);
        orb.DetectAndCompute(secondImage, null, keyPoints2, descriptors2, false);
        break;
    }
    default:
    {
        throw new Exception("Не обрано тип детектору");
    }
}
// Знаходження відповідності між ключовими точками
VectorOfVectorOfDMatch matches = new VectorOfVectorOfDMatch();
// Узагальнений матчер
switch (MatcherType)
{
    case "bf":
    {
        var bfMathcer = new BFMatcher(DistanceType.Hamming);
        bfMathcer.Add(descriptors1);
        bfMathcer.KnnMatch(descriptors2, matches, 2);
        break;
    }
    default:
    {
        throw new Exception("Не обрано тип пошуку");
    }
}
Mat mask = new Mat(matches.Size, 1, DepthType.Cv8U, 1);
mask.SetTo(new MCvScalar(255));
Features2DToolbox.VoteForUniqueness(matches, 0.8, mask);
int count = Features2DToolbox.VoteForSizeAndOrientation(keyPoints1, keyPoints2,
matches, mask, 1.5, 20);
if (count < 4)
{
    throw new Exception("Зображення не збігаються");
}
Mat homography =
Features2DToolbox.GetHomographyMatrixFromMatchedFeatures(keyPoints1, keyPoints2,
matches, mask, 5);
// Застосування трансформації до першого зображення
Mat alignedImage = new Mat();
CvInvoke.WarpPerspective(firstImage, alignedImage, homography, secondImage.Size);
var points1 = keyPoints1.ToArray().Select(p => p.Point).ToArray();

```

```

    var points2 = keyPoints2.ToArray().Select(p => p.Point).ToArray();
    Drawpoints(points1, firstImage);
    var result = alignedImage.ToImage<Gray, byte>();
    Drawpoints(points2, result);
    return result;
}
private void Drawpoints(PointF[] points, Image<Gray, byte> image)
{
    foreach (var point in points)
    {
        Point one = Point.Round(point);
        CvInvoke.Circle(image, one, 4, new MCvScalar(120, 120, 120), 2);
    }
}
}
}

```

Додаток 3

Підключення бібліотеки «Sum of absolute differences»

```

using Emgu.CV;
using Emgu.CV.Structure;
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;

namespace ImageOperations
{
    public class Difference : PreProcessorBase
    {
        public Difference() {
            this.ProcessMethod = ProcessMethods.DifferenceImages;
            this.ProcessName = "Різниця";
            this.CanProcessRefernceImage = true;
        }
        public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> input)
        {
            throw new NotImplementedException("Оберіть друге зображення");
        }
        public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> firstImage, Image<Gray,
byte> secondImage)
        {
            Image<Gray, byte> resultImage = new Image<Gray, byte>(secondImage.Width,
secondImage.Height);
            CvInvoke.AbsDiff(firstImage, secondImage, resultImage);
            double diff = CvInvoke.CountNonZero(resultImage);
            diff = (diff / (secondImage.Width * secondImage.Height)) * 100;
            return resultImage;
        }
    }
}

```

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

Невлюдов І.Ш., Разумов-Фризюк Є.А., Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є.

**КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ
ФОТОПОЛІМЕРНОГО 3D-ДРУКУ**
[Монографія]

*Рекомендовано Вченою радою
Харківського національного університету радіоелектроніки
(протокол № 4 від 22. 05. 2025 року)*



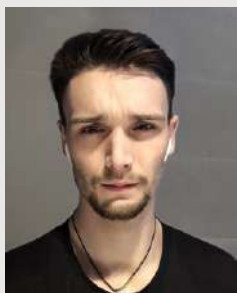
Ігор Шакирович Невлюдов

ЗАВІДУВАЧ КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ, АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКИ, ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ, ДОКТОР ТЕХНІЧНИХ НАУК, ПРОФЕСОР, ЗАСЛУЖЕНИЙ ДІЯЧ НАУКИ І ТЕХНІКИ УКРАЇНИ, ЛАУРЕАТ ДЕРЖАВНОЇ ПРЕМІЇ В ГАЛУЗІ НАУКИ І ТЕХНІКИ УКРАЇНИ; ЛАУРЕАТ ДЕРЖАВНОЇ ПРЕМІЇ УКРАЇНИ В ГАЛУЗІ ОСВІТИ; ЧЛЕН ВЧЕНОЇ РАДИ, ЧЛЕН ПРЕЗИДІЇ НМР, ГОЛОВА СЕКЦІЇ 4 НМР, ЧЛЕН ПРЕЗИДІЇ НТР, ЗАСТУПНИК ГОЛОВИ СЕКЦІЇ З НТР, ЧЛЕН РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ ЖУРНАЛУ «СУЧАСНИЙ СТАН НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ТЕХНОЛОГІЙ В ПРОМИСЛОВОСТІ», ЧЛЕН АСОЦІАЦІЇ ВИПУСКНИКІВ ХНУРЕ.



Євгеній Анатолійович Разумов-Фризюк

ДОЦЕНТ КАФЕДРИ КІТАК, ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ, КАНДИДАТ ТЕХНІЧНИХ НАУК, ДОЦЕНТ.



Нікітін Дмитро Олександрович

СТАРШИЙ ВИКЛАДАЧ КАФЕДРИ КІТАК, ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ, ДОКТОР ФІЛОСОФІЇ (PHD).



Стрілець Роман Євгенійович

АСИСТЕНТ КАФЕДРИ КІТАК, ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ.

У монографії викладено результати дослідження та розробки методів підвищення якості друкованих фотополімерних моделей для електронної апаратури, зокрема за рахунок технологічного забезпечення їх виробництва, а також розробки й удосконалення методів контролю та прогнозування впливу параметрів експонування шарів моделі на етапі, виготовлення.

Наведено фізико-технологічну модель впливу параметрів друку на якість фотополімерних деталей, а також модель впливу параметрів друку на нагрів фотополімерної смоли під час експонування шарів та появи відхилень розмірів та поверхневих дефектів моделі. Викладено сформовані на основі досліджень рекомендації з технологічного забезпечення якості друку фотополімерних виробів.

Представлено нові конструктивно-технічні рішення для контролю температури фотополімерної смоли. Викладено результати експериментальних досліджень із визначення впливу параметрів друку на якість виготовлення фотополімерних деталей.

Представлено новий метод контактування друкованих фотополімерних виробів на основі систем технічного зору.

Монографія може бути корисною для фахівців промисловості, наукових співробітників, а також аспірантів, магістрантів та здобувачів вищої освіти, які навчаються за спеціальностями, пов'язаними з розробкою, систем з числовим програмним керуванням та матеріалознавством.