

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення моделі впливу параметрів фотополімерного 3D-друку на міцність
виробу
(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання,
групи КІТПВМ-24-1
Максим ЛИСУН
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 174 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані
технологічні процеси і виробництва
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. КІТАР Дмитро НІКІТІН
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри

(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Я, Лисун Максим Дмитрович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

9 грудня 2025 р.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Lisun', written in a cursive style.

Максим ЛИСУН

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики та комп'ютеризованих технологій
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)
«_____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Лисуну Максиму Дмитровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення моделі впливу параметрів фотополімерного 3D-друку на міцність виробу
Затверджена наказом університету від 10.11.2025 р. №1029 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 24 грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи _____
 - 3.1 Технологія фотополімерного друку LCD;
 - 3.2 Програмне забезпечення для фотополімерного друку та підготовки моделі - Chitubox;
 - 3.3 Регресійно кореляційний аналіз;
 - 3.4 Програма для обробки статистичних даних IBM SPSS Statistics;
 - 3.5 Вплив параметрів експонування фотополімерної смоли на твердість виробу;
 - 3.6 LCD принтер Anycubic Photon;
 - 3.7 Фотополімерні смоли Anycubic Standart та Elegoo Standard Resin;
 - 3.8 Ультразвуковий твердомір ТКМ-459М.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
 - 4.1 Вступ;
 - 4.2 Аналіз предметної області, 3D-друку;
 - 4.3 Визначення параметрів друку які впливають на міцність друку;
 - 4.4 Аналіз САУ для управління ультрафіолетом у системі LCD принтера;
 - 4.5 Вибір моделі, матеріалів та проведення експериментів;
 - 4.6 Побудова регресійно-кореляційної моделі;
 - 4.7 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал у вигляді презентації формату PowerPoint (*.ppt) 10-12 с. формату А4

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області та 3D-друку	03.09.2025 – 17.09.2025	Виконано
2	Аналіз матеріалів для дослідження	18.09.2025 – 02.10.2025	Виконано
3	Аналіз параметрів які впливають на міцність друку	03.10.2025 – 10.10.2025	Виконано
4	Підбір програмного забезпечення та принтеру для проведення експериментів	11.10.2025 – 14.10.2025	Виконано
5	Аналіз САУ для управління ультрафіолетом у системі LCD принтера	15.10.2025 – 21.10.2025	Виконано
6	Побудова плану експерименту та проведення емпіричних досліджень	22.10.2025 – 16.11.2025	Виконано
7	Побудова регресійно-кореляційної моделі	17.11.2025 – 24.11.2025	Виконано
8	Оформлення кваліфікаційної роботи	25.11.2025 – 02.12.2025	Виконано
9	Подання роботи до нормоконтролю	10.11.2025	
10	Подання роботи на перевірку Інтернетсервісом StrikePlagiarism		
11	Подання роботи на рецензію		
12	Подання роботи на підпис зав. кафедри		
13	Подання атестаційної роботи в ЕК		

Дата видачі завдання 03 вересня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)
(прізвище, ініціали)

Максим ЛИСУН

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. каф. КІТАР Дмитро НІКІТІН
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до атестаційної роботи: 91 с., 5 табл., 45 рис., 3 дод., 28 джерел.

ФОТОПОЛІМЕРНИЙ ДРУК, LCD МАТРИЦЯ, ПОЛІМЕРИЗАЦІЯ, ПАРАМЕТРИ ДРУКУ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, РЕГРЕСІЙНО-КОРЕЛЯЦІЙНА МОДЕЛЬ.

Об'єктом дослідження є процес виготовлення виробів за фотополімерною технологією друку із застосуванням різних параметрів експонування смоли.

Предметом дослідження є вплив параметрів слайсеру та експонування фотополімерної смоли на твердостні характеристики виробів.

Мета роботи – покращення механічних властивостей готових деталей за рахунок технологічних змінних та розроблення моделі впливу параметрів фотополімерного 3D-друку на міцність виробу.

У роботі проаналізовано процеси полімеризації, що відбуваються у фотополімерних виробках під час експонування методом LCD-технології. Досліджено вплив технологічних параметрів друку – часу експонування, інтенсивності світлового потоку та довжини хвилі на формування твердості та інших механічних властивостей надрукованих моделей.

Розглянуто сучасні методи оцінювання механічних властивостей фотополімерних матеріалів та вплив технологічних параметрів експонування на ефективність процесу полімеризації.

Запропоновано статистичну регресійну модель, яка описує залежність твердості фотополімерних виробів від параметрів експонування та дозволяє прогнозувати результати друку за заданих режимів.

Результати дослідження також узгоджуються з цілями сталого розвитку: ЦСР 4 “Якісна освіта”, ЦСР 9 “Промисловість, інновації та інфраструктура” та ЦСР 12 “Відповідальне споживання та виробництво” а саме п.12.4

ABSTRACT

Explanatory note to the certification work: 91 p., 5 tabl., 45 fig., 3 app., 28 sources.

PHOTOPOLYMER PRINTING, LCD MATRIX, POLYMERIZATION, PRINTING PARAMETERS, MATHEMATICAL MODELING, REGRESSION-CORRELATION MODEL.

The object of the study is the process of manufacturing products using photopolymer 3D printing technology using different resin exposure parameters.

The subject of the study is the influence of slicer parameters and photopolymer resin exposure on the hardness characteristics of the products.

The purpose of the work is to determine the optimal technological polymerization modes to improve the mechanical properties of printed models, and to develop a regression-correlation model that will allow evaluating and predicting the hardness of photopolymer products depending on the selected exposure parameters.

The work analyzes the polymerization processes that occur in photopolymer products during exposure using LCD technology. The influence of technological printing parameters - exposure time, light intensity and wavelength - on the formation of hardness and other mechanical properties of printed models is studied.

Modern methods for evaluating the mechanical properties of photopolymer materials and the influence of technological exposure parameters on the efficiency of the polymerization process are considered.

A statistical regression model is proposed that describes the dependence of the hardness of photopolymer products on exposure parameters and allows predicting printing results under given modes.

The study results are also consistent with the Sustainable Development Goals: SDG 4, SDG 9, and SDG 12.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз предметної області.....	13
1.1 Види 3D-друку.....	13
1.1.1 Моделювання методом наплавлення, FDM.....	13
1.1.2 Селективне лазерне спікання, SLS.....	15
1.1.3 Селективне лазерне плавлення, SLM.....	17
1.1.4 Виготовлення об'єктів за допомогою ламінування, LOM.....	19
1.1.5 Електронно-променева плавка, EBM.....	21
1.2 Фотополімерний друк та його види.....	22
1.2.1 Лазерна стереолітографія, SLA.....	22
1.2.2 Цифрова світлодіодна проекція, DLP.....	24
1.2.3 Технологія LCD друку.....	26
1.2.4 Метод багатоструневого моделювання, MJM.....	29
1.3 Процес полімеризації фотополімерної смоли.....	30
1.4 Фотополімерні смоли та їх види.....	30
1.5 Методи постобробки фотополімерних смол.....	32
1.6 Висновки до першого розділу.....	34
2 Визначення параметрів друку які впливають на міцність друку.....	36
2.1 Підготовка моделі до друку.....	36
2.1.1 Первинне налаштування профілю принтера.....	36
2.1.2 Інструменти для налаштування моделі.....	39
2.1.3 Вибір та налаштування підтримок для обраних моделей.....	42
2.1.4 Налаштування параметрів друку моделі.....	45
2.2 Опис макету для проведення досліджень.....	48
2.3 Аналіз САУ для управління УФ у системі LCD принтера.....	51
2.4 Висновки до другого розділу.....	54

3	Проведення дослідження впливу параметрів експонування фотополімерної смоли на твердість виробу.....	56
3.1	Побудова плану експерименту.....	56
3.2	Проведення емпіричних досліджень.....	59
3.3	Побудова регресійно-кореляційної моделі.....	62
3.4	Висновки до третього розділу.....	68
4	Охорона праці під час роботи з фотополімерними матеріалами..	70
4.1	Правила безпеки під час роботи з фотополімерними матеріалами..	70
4.2	Висновки до четвертого розділу.....	72
	Висновки.....	74
	Перелік джерел посилання.....	76
	Додаток А Апробація результатів кваліфікаційної роботи.....	80
	Додаток Б Результати дослідження.....	87
	Додаток В Демонстраційний матеріал.....	90

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- УФ – ультрафіолет;
- CJP – (Color Jet Printing) кольоровий струменевий друк;
- EBM – (Electron-beam Melting) електронно-променева плавка;
- DLP – (Digital Light Processing) цифрова обробка світла;
- DMLS – (Direct Metal Laser Sintering) пряме лазерне спікання металу;
- FFF – (Fused Filament Fabrication) виробництво плавленої нитки;
- FDM – (Fused Deposition Modeling) моделювання плавленого осадження;
- LCD – (Liquid Crystal Display) рідкокристалічний дисплей;
- LOM – (Laminated Object Manufacturing) виготовлення об'єктів за допомогою ламінування;
- MJM – (Multi Jet Modeling) метод багатострунного моделювання;
- SLS – (Sodium Lauryl Sulfate) лаурилсульфат натрію;
- SLM – (Selective Laser Melting) селективне лазерне плавлення;
- SLA – (Selective Laser Sintering) селективне лазерне спікання;
- SHS – (Selective Heat Sintering) вибіркоче теплове спікання.

ВСТУП

Стрімкий розвиток технологій адитивного виробництва протягом останніх десятиліть істотно вплинув на підходи до виготовлення деталей, прототипів та готових виробів у різних галузях промисловості. 3D-друк, або ж тривимірне моделювання, поступово перетворився з експериментального методу швидкого прототипування у потужний інструмент серійного та індивідуального виробництва. Його головна особливість полягає у поетапному нарощуванні матеріалу, що дає змогу створювати об'єкти будь-якої складності без застосування традиційних формотворних процесів, таких як лиття, фрезерування чи пресування.

Серед різноманітних методів 3D-друку особливе місце займають фотополімерні технології (SLA, DLP, LCD), які базуються на процесі фотополімеризації рідких смол під дією ультрафіолетового випромінювання. Ці методи забезпечують надзвичайно високу точність, деталізацію та якість поверхні виробів, що робить їх особливо привабливими для використання у галузях медицини, ювелірного виробництва, дизайну, електроніки та машинобудування. Проте, незважаючи на широке впровадження таких технологій, донині залишається актуальною проблема забезпечення належних механічних властивостей готових виробів, зокрема їхньої міцності, жорсткості та стійкості до навантажень.

Міцність виробу, надрукованого за технологією фотополімеризації, безпосередньо залежить від низки технологічних параметрів, таких як інтенсивність ультрафіолетового випромінювання, час експозиції, товщина шару, температура друку, напрямок росту моделі та хімічний склад полімерної смоли. Неправильний вибір цих параметрів може призвести до появи дефектів структури, неоднорідності тверднення або внутрішніх напружень, що суттєво знижують експлуатаційні характеристики готових деталей. Тому дослідження закономірностей впливу технологічних параметрів на міцність полімерних

виробів є надзвичайно важливим для підвищення якості, надійності та функціональності 3D-друку.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення стабільності та передбачуваності механічних властивостей виробів, виготовлених методом LCD 3D-друку. Параметри експонування суттєво впливають на ступінь полімеризації фотополімерів, що визначає твердість, якість поверхні та точність геометрії моделей.

Створення регресійної моделі впливу технологічних параметрів на кінцеві властивості матеріалу забезпечує можливість оптимізації процесу полімеризації, зменшення кількості дефектів та підвищення ефективності виробництва фотополімерних деталей.

Об'єктом дослідження є процес виготовлення виробів за фотополімерною технологією друку із застосуванням різних параметрів експонування смоли.

Предметом дослідження є вплив параметрів слайсеру та експонування фотополімерної смоли на твердостні характеристики виробів.

Мета роботи – покращення механічних властивостей готових деталей за рахунок технологічних змінних та розроблення моделі впливу параметрів фотополімерного 3D-друку на міцність виробу.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз сучасних технологій адитивного виробництва та методів фотополімерного друку;
- дослідити фізико-хімічні процеси фотополімеризації та фактори, що впливають на формування структури матеріалу;
- визначити ключові параметри, які впливають на міцність полімерних виробів, виготовлених методом LCD-друку;
- побудувати математичну модель взаємозв'язку параметрів друку та механічних характеристик виробу;
- здійснити експериментальну перевірку моделі та провести аналіз отриманих результатів;

– оформити звіт з кваліфікаційної роботи згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також з методичними вказівками із підготовки та оформлення кваліфікаційних робіт здобувачів другого (магістерського) рівня спеціальності 174 «Комп’ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» [2].

Апробація результатів дослідження наведено у студентському збірнику тез «Виробництво & Мехатронні Системи 2025: матеріали ІХ-ої Міжнародної конференції, Харків, 25-26 жовтня 2025 р.: тези доповідей / [редкол. І.Ш. Невлюдов (відповідальний редактор)].-Харків: [електронний друк], 2025. – 115 с.» [3].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Види 3D-друку

3D-друк – це методика виготовлення об'ємних виробів на основі цифрових моделей. Незалежно від конкретної технології, явище процесу полягає в поступовому пошаровому відтворенні об'єктів. У цьому процесі застосовується спеціальний електронний пристрій – 3D принтер, який друкує певними видами матеріалів. Але кожна технологія суттєво відрізняється принципами друку.

1.1.1 Моделювання методом наплавлення, FDM

FDM – це аббревіатура з англійської «Fused Deposition Modeling», що перекладається як «Моделювання методом наплавлення». Власне, це найбільш ємкий опис, що характеризує 3D друк FDM, рисунок 1.1.

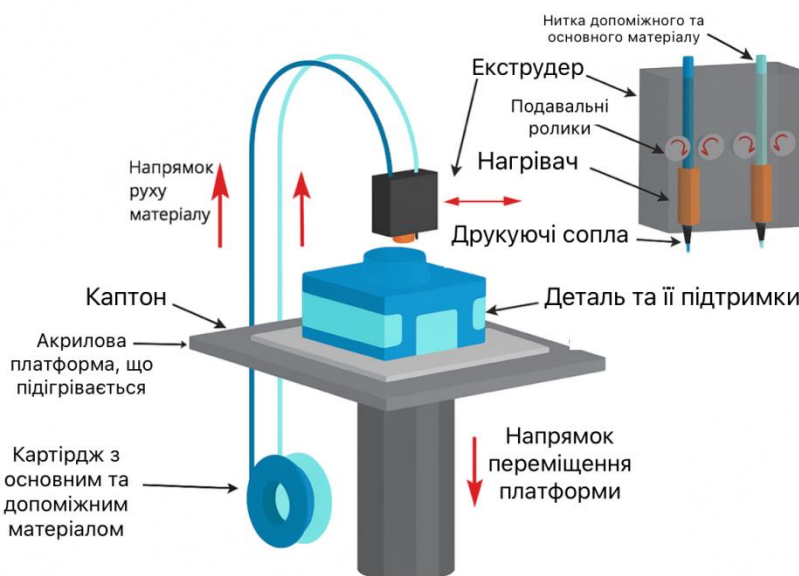


Рисунок 1.1 – Пристрій FDM 3D принтера

Метод 3D-друку FDM полягає в пошаровому відтворенні об'ємних виробів на основі цифрових даних (3D моделей). Як матеріал в FDM принтерах для цієї мети використовуються спеціальні нитки пластика [4]. По суті, 3D друк

FDM – це безперервна подача нитки матеріалу в екструдер (друкуючу головку), оснащений нагрівальним елементом. Останній призначений для нагрівання сопла, через яке подається матеріал. На цьому етапі відбувається плавлення пластику і екструзія (видавлювання) його на платформу 3D принтера. Кожен наступний шар видавлюється на попередній по заданій траєкторії, за рахунок чого і відбувається побудова виробу [5]. Для більш плавної подачі матеріалу, а також швидкого затвердіння шарів, екструдери оснащуються зовнішніми вентиляторами, які створюють різкий перепад температур.

Деякі 3D принтери FDM обладнані нагрівальною платформою, яка дозволяє працювати з більш «примхливими» матеріалами, такими, як ABS пластик. Нерідко такі принтери комплектуються також закритим корпусом. Також існують прилади з подвійними, і навіть потрійними екструдерами, які надають можливість роботи з декількома видами 3D пластика одночасно. Як правило, в таких випадках один матеріал є основним, а другий допоміжним. Часто в якості допоміжного матеріалу вибирають водорозчинний матеріал підтримки (PVA пластик).

3D друк FDM може похвалитися великою різноманітністю у виборі доступних матеріалів. Для роботи з FDM 3D принтерами розроблена величезна кількість пластику, проте не кожен принтер підтримує весь спектр матеріалів, які пропонує ринок. Цей фактор залежить від температури плавлення конкретного матеріалу і максимальної температури нагріву сопла пристрою. Грубо кажучи, прилади, сопло яких не розігрівається більш ніж на 250 °С, не зможуть друкувати матеріалами з температурою плавлення в 280 °С.

Якщо ж відкинути це обмеження, то в плані вибору витратних матеріалів 3D друк FDM сміливо можна назвати найбільш універсальною технологією адитивного виробництва. Користувачі мають можливість роботи з пластиками всіх кольорів і відтінків, прозорими, глянцевиими і матовими полімерами, з гнучкими і жорсткими інженерними матеріалами, з металізованим пластиком, і пластиком, що змінює колір. Також доступні водорозчинні, флуоресцентні, люмінесцентні матеріали, пластик з дерев'яним наповненням і багато іншого.

Виходячи з цього FDM 3D-друк є найдоступнішим у фінансовому плані, та функціональним, що пояснює високу популярність FDM 3D принтерів [7]. Не тільки за рахунок величезного вибору витратних матеріалів, а й за рахунок особливостей самої методики FDM 3D принтери можуть застосовуватися для найрізноманітніших завдань, що і робить їх надзвичайно затребуваними.

1.1.2 Селективне лазерне спікання, SLS

SLS є однією з методик друку яку широко застосовують в промисловості. Селективне лазерне спікання є виключно на дорогих професійних 3D принтерах і відрізняється високою якістю виробів. За допомогою цієї технології можна досягти результату, наближеного до відтворення виробів методом лиття під тиском, рисунок 1.2.

Селективне лазерне спікання, як і багато інших промислових методик адитивного виробництва використовує в якості матеріалу порошки та порошкові суміші. Ця методика дозволяє створювати повністю металеві об'єкти за лічені години [10]. А можливість виготовлення виробів складної форми пояснює її популярність серед промислових організацій з усього світу.

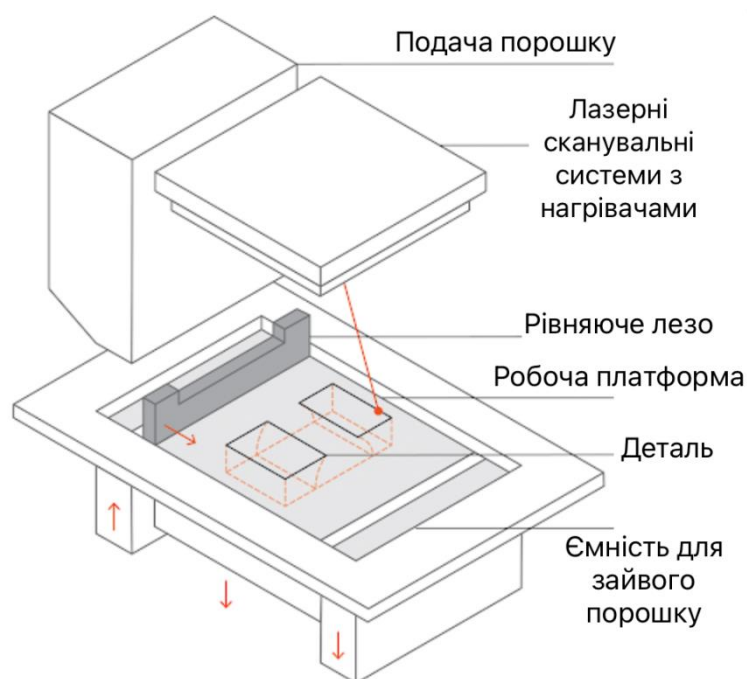


Рисунок 1.2 – Схема SLS 3D принтера

За допомогою лазерної установки і скануючого дзеркала промінь лазера направляється на необхідні ділянки порошку, спікаючи їх разом шар за шаром. Після спікання першого шару рівняюче лезо додає тонкий шар порошку поверх нього, і процес відбувається заново до повної побудови об'єкта. Тобто, відтворення об'єкта відбувається знизу-вгору, а за рахунок заповнення камери порошком не потрібні додаткові підтримки так як лазер випікає тільки задані програмою частини порошку а сама деталь продовжує лежати в цьому матеріалі. На рисунку 1.2 вище наочно продемонстровано пристрій SLS 3D принтера для кращого розуміння принципу методики.

Селективне лазерне спікання не може похвалитися великою різноманітністю кольорових витратних матеріалів, як, наприклад, FDM або SLA. Однак це не означає, що вибір обмежений. SLS друк орієнтований все ж на промислові цілі, за рахунок чого і матеріали виробляються відповідні [11]. На сьогоднішній день є безліч видів різноманітних порошкових сумішей, серед яких нейлон, кераміка, полістирол, і т.д.

З явних плюсів цієї технології можна виділити:

- велика область побудови в 3D принтерах. Промислове обладнання для SLS друку зазвичай обладнано великої областю побудови, що дозволяє створювати не тільки великі деталі, але і при бажанні виконувати дрібносерійне виробництво;

- висока якість 3D друку. Ця методика дозволяє практично повністю уникнути видимості шарів на моделі;

- відсутність необхідності в побудові підтримок. Селективне лазерне спікання дозволяє створювати вироби складної геометрії без необхідності побудови підтримують структур. Це не тільки розширює можливості друку, але і добре позначається на якості поверхні виробу;

- висока швидкість і продуктивність. За рахунок того, що матеріал не плавиться повністю, SLS 3D принтери працюють набагато швидше за інших своїх порошкових побратимів. Чим вища швидкість друку, тим вища продуктивність виробництва.

Що стосується сфер застосування, селективне лазерне спікання популярно виключно в промисловості за рахунок високої вартості витратних матеріалів та обладнання, а також великих габаритів [12]. Тому і сфери застосування відповідні, а саме: функціональне тестування; прототипування; дрібносерійне виробництво; виготовлення виробів зі складною геометрією; розробка і виготовлення автомобільних деталей і т.д.

1.1.3 Селективне лазерне плавлення, SLM

SLM, або Selective Laser Melting – селективне, вибіркоче лазерне плавлення. Це новаторська технологія виготовлення складних за формою і структурою виробів з металевих порошків з математичних CAD-моделей. Цей процес полягає в послідовному пошаровому расплавленні порошкового матеріалу за допомогою потужного лазерного випромінювання. SLM відкриває перед сучасними виробництвами найширші можливості, так як дозволяє створювати металеві вироби високої точності і щільності. Селективне лазерне плавлення – одна з технологій 3D-друку металом, які здатні з успіхом замінити класичні виробничі процеси. Воно дозволяє виготовити вироби, що перевершують за фізико-механічними властивостями продукти стандартних технологій. За допомогою селективного лазерного плавлення можна створити унікальні складнопрофільні вироби без використання механічної обробки і дорогого оснащення, зокрема, завдяки можливості управляти фізико-механічними властивостями виробів.

Процес селективного лазерного плавлення виглядає так (рисунок 1.3):

– перш за все цифрова 3D-модель деталі розділяється на шари, щоб кожен шар, який має товщину 20-100 мікрон, був візуалізований в 2D. Спеціалізоване програмне забезпечення аналізує дані в STL-файлі і зіставляє їх зі специфікаціями 3D-принтера;

– другим етапом після обробки отриманої інформації є побудова, яка складається з великої кількості циклів для кожного шару створюваного об'єкта. Спочатку металевий порошок наноситься на плиту побудови, яка в свою чергу

закріплена на платформі побудови. Потім лазерний промінь сканує перетин шару виробу, після чого платформа опускається в колодязь побудови на глибину, що збігається з товщиною шару. Побудова виконується в камері SLM-машини, яка заповнена інертним газом (аргоном або азотом). Основний обсяг газу витрачається на початковому етапі, коли шляхом продувки з камери побудови видаляється все повітря. По завершенні процесу побудови деталь разом з плитою виймають з камери порошкового 3D-принтера, а потім відділяють від плити, видаляють підтримки і виконують фінальну обробку виробу.

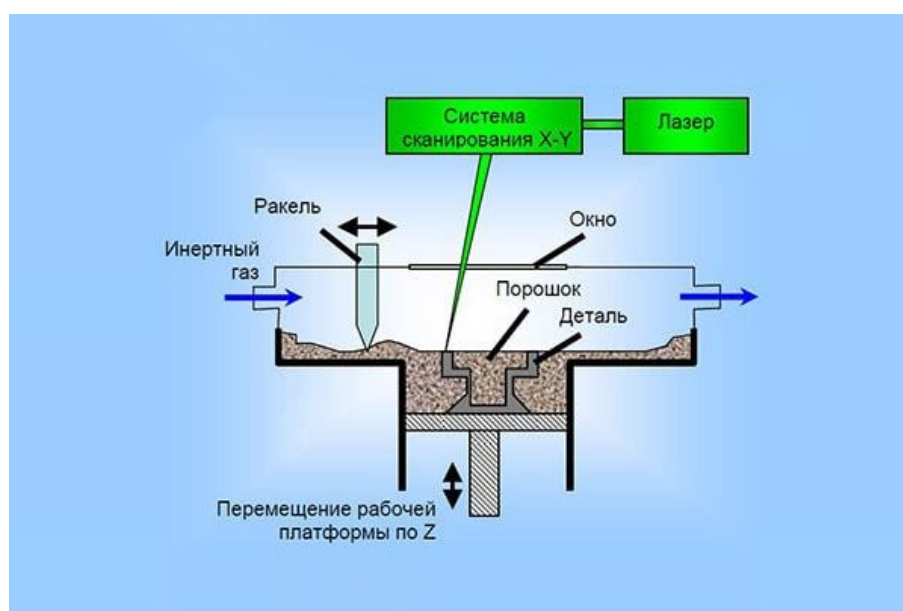


Рисунок 1.3 – Схема SLM 3D принтера

Сама SLM технологія забезпечує високу точність повторюваність, вирішує складні технологічні завдання, пов'язані з виготовленням геометрично складних виробів та скорочує цикл науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, забезпечуючи побудова сложнопрофільних деталей без використання оснастки. Тому SLM машини покликані вирішувати складні завдання на авіакосмічних, енергетичних, нафтогазових, машинобудівних виробництвах, в металообробці, медицині і ювелірній справі. Їх також використовують в наукових центрах, конструкторських бюро і навчальних закладах при проведенні досліджень і експериментальних робіт.

1.1.4 Виготовлення об'єктів за допомогою ламінування, LOM

Суть технології полягає у послідовному склеюванні листів витратного матеріалу (паперу, фольги тощо) між собою (рисунок 1.4). Для того, щоб кожен шар матеріалу відповідав шару заданої 3D моделі, він обрізається по необхідному контуру лазером або ножем. Після запуску моделі до друку на робочу платформу 3D принтера подається витратний матеріал (окремий лист, або з рулону), розігрівається до потрібної температури і розподіляється під певним тиском. Після цього за допомогою спеціального ножа або лазера на аркуші вирізається контур першого шару, причому ділянки, що вимагають видалення після завершення 3D друку надрізаються за певним візерунком.

Далі платформа опускається на висоту одного шару. У разі застосування матеріалу в рулоні рулон провертається, подаючи новий матеріал і прибираючи залишки. Якщо використовуються листи, з кожним новим шаром подається новий лист. При цьому перед нанесенням кожного наступного шару витратний матеріал покривається знизу спеціальним клеєм. За рахунок нагрівання та укладання під тиском формується цілісний виріб. Процес вирізання шарів і нанесення нових аркушів матеріалу повторюється аж до повної побудови об'єкта, після чого 3D друк із паперу можна вважати завершеним. Готовий виріб виймається з 3D принтера і за потреби піддається постобробці [13,15].

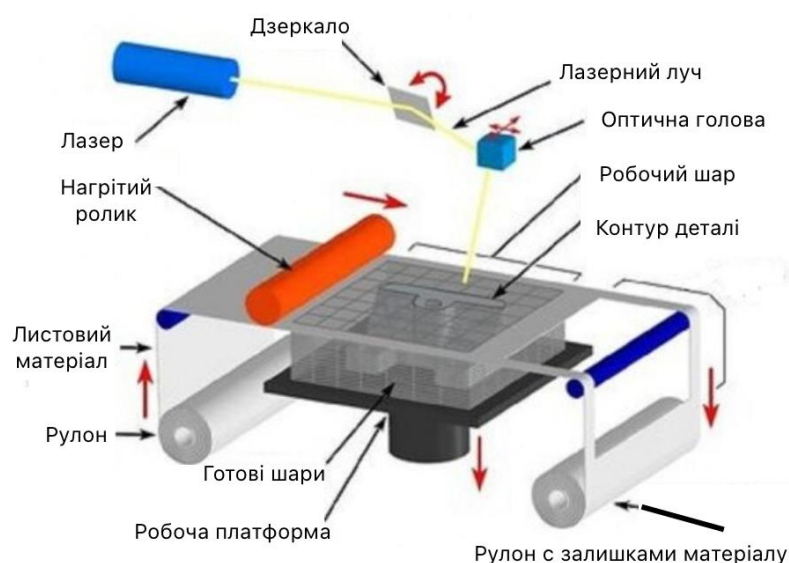


Рисунок 1.4 – Схема LOM 3D принтера

3D друк із паперу відрізняється від інших методик адитивного виробництва та має деякі цікаві особливості. Так, точність цього виду друку безпосередньо залежить від виду використовуваного матеріалу, товщина якого буде відповідати висоті шару об'єкта, що формується. Також вироби, виготовлені цим методом, непогано піддаються постобробці, оскільки за фактурою нагадують деревину. При цьому готові об'єкти вимагають покриття лаком.

Сама методика має низьку вартість виробництва. Хоча 3D друк з паперу і не є найдешевшою методикою, собівартість відтворення виробів з її допомогою набагато нижча, ніж у інших професійних методик (SLS, SLM тощо). Також у цьому відіграє роль та ціна обладнання. Також є можливість створення повнокольорових виробів, рисунок 1.5. Деякі LOM 3D принтери орієнтовані на виготовлення об'єктів у заданих кольорах, що дозволяє дуже прискорити і спростити їх постобробтку.

Але є у цієї методики два дуже суттєвих недоліки, а саме: точність друку та небезпека розшарування. За якістю виробів 3D друк з паперу суттєво поступається іншим технологіям. Середня висота шару, що пропонується принтерами LOM, становить 300 мікрон. Тож очевидно, що високою міцністю одержувані моделі похвалитися не можуть, за відсутності належного догляду вироби можуть просто розходитись по перерізу шарів.



Рисунок 1.5 – один з простіших виробів зроблений за допомогою технології ламінування

1.1.5 Електронно-променева плавка, EBM

Електронно-променева плавка (Electron Beam Melting або EBM) – метод адитивного виробництва металевих виробів. Ця технологія найчастіше класифікується як метод швидкого виробництва. Електронно-променева плавка (EBM) схожа на вибіркочу лазерну плавку (SLM) – головна відмінність полягає у використанні електронних випромінювачів, так званих електронних гармат замість лазерів як джерела енергії для плавки. В основі технології лежить використання електронних пучків високої потужності для сплавлення металевого порошку у вакуумній камері з утворенням послідовних шарів, що повторюють контури цифрової моделі. На відміну від технологій спікання, електронно-променева плавка дозволяє створювати деталі особливо високої щільності та міцності.

Цей метод виробництва деталей довільних форм дозволяє створювати металеві моделі високої густини з металевого порошку. Готові вироби практично не відрізняються від литих деталей за механічними властивостями. Пристрій зчитує дані файлу, що містить тривимірну цифрову модель, і наносить послідовні шари порошкового матеріалу. Контури шарів моделі викреслюються електронним пучком, що плавить порошок у місцях зіткнення. Плавка виробляється у вакуумних робочих камерах, що дозволяє працювати з матеріалами, чутливими до оксидації, наприклад, з чистим титаном. На рисунку 1.6 представлена одна з установок для EBM технології.

Електронно-променева плавка проводиться при підвищених фонових температурах, що досягають порядку 700-1000 °С, що дозволяє створювати деталі, що не страждають від залишкової механічної напруги, що викликається градієнтом температур між вже охолодженими і гарячими шарами [14]. Крім того, повна плавка витратного порошку дозволяє виробляти монолітні вироби – звідси максимальна міцність та відсутність необхідності випалення.



Рисунок 1.6 – Промислова EBM установка виробництва шведської компанії Arcam AB

Використання як витратних матеріалів титанових сплавів дозволяє використовувати технологію EBM для виробництва медичних імплантатів. Технологія отримала застосування в аерокосмічній галузі: Boeing, Lockheed Martin та NASA використовують EBM для виробництва деталей реактивних та ракетних двигунів, а також несучих елементів конструкції літальних апаратів.

1.2 Фотополімерний друк та його види

Види фотополімерного друку класифікуються в основному за технологіями затвердіння смоли: SLA (лазерна стереолітографія), DLP (з використанням проектора) та LCD (з використанням РК-екрана). Також до фотополімерного друку відноситься багатоструменева технологія MultiJet/MJM.

1.2.1 Лазерна стереолітографія, SLA

Стереолітографія є не тільки однією з перших технологій в світі для 3D друку, але і однією з найбільш точних методик адитивного виробництва. У деякому роді вона унікальна, адже в ній в якості витратного матеріалу

застосовується рідка фотополімерна смола. Суть технології полягає в засвітленні фотополімера за певним алгоритмом який задається програмою-слайсером на основі 3D моделі. Під впливом лазерного випромінювання смола застигає, формуючи готовий об'єкт.

SLA друк паралельно з побудовою об'єкта вимагає побудови підтримок при наявності в моделі нависаючих елементів. По суті, ця методика нагадує SLS друк, але замість порошку виступає рідкий фотополімер. В іншому це те ж саме пошарове відтворення виробів за заданими 3D моделями. Основна схема зображена нижче на рисунку 1.7.

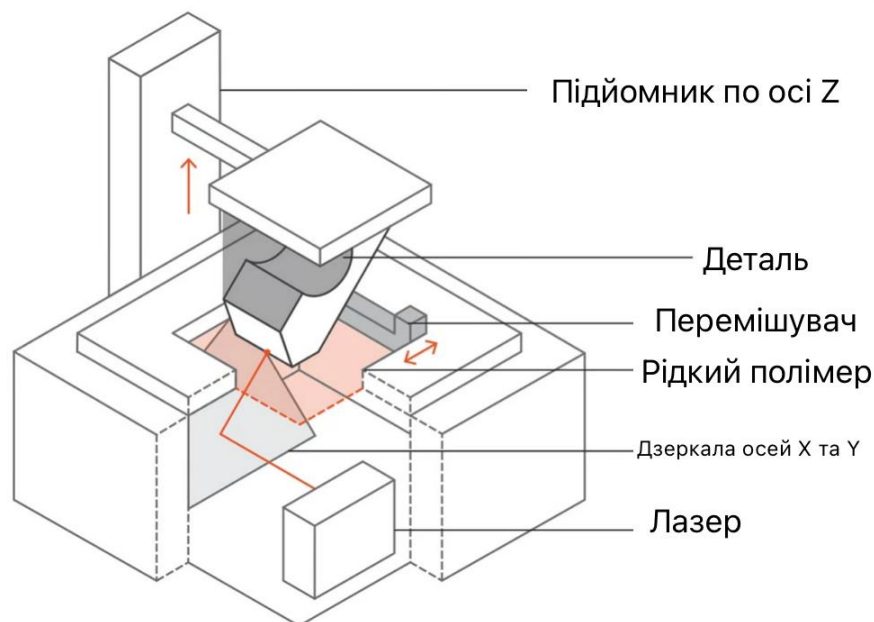


Рисунок 1.7 – Схема SLA 3D принтера

Отже, на цьому зображенні лазер розташований знизу, а робоча платформа поступово підіймається вгору. В ємність з фотополімером занурюється сітчаста платформа, на глибину не більше 0,05-0,13 мм (саме такою є товщина шару). Після чого активується лазер, який має вплив на певні ділянки матеріалу задані програмою. Вплив лазерного випромінювання викликає затвердіння першого шару фотополімера. Далі платформа підіймається ще на шар вище, лазер знову активується, продовжуючи формувати об'єкт, і так до остаточної побудови виробу. Після друку обов'язковим є промивання виробу в спеціальних розчинах

а також опромінення готової моделі ультрафіолетовим світлом. Перше потрібно для остаточного очищення виробу від залишків фотополімера, а друге для повного його затвердіння.

В 3D принтерах, що працюють за технологією лазерної стереолітографії, застосовуються рідкі фотополімерні смоли, звані ще фотополімерами. Це особливі речовини, які змінюють свої властивості під впливом світла. Найчастіше активним випромінюванням є ультрафіолет. Аналогічні речовини широко застосовуються в стоматологічній практиці. На ринку настільних 3D принтерів сьогодні можна знайти гнучкі і жорсткі, інженерні та декоративні, стоматологічні та інші фотополімерні смоли всіх кольорів і відтінків. Звичайно, асортимент ще НЕ настільки широкий, як, наприклад, в FDM друку, але саме SLA та витратні матеріали до нього знаходяться на другому місці за популярністю серед користувачів по всьому світу.

1.2.2 Цифрова світлодіодна проекція, DLP

DLP друк – це одна з методик адитивного виробництва, в якій для побудови об'єктів використовуються рідкі фотополімерні смоли, які тверднуть під впливом світлових хвиль. Принцип роботи DLP 3D принтерів дуже схожий на метод друку SLA. Однак затвердіння об'єкта під час DLP друку відбувається під впливом іншого джерела світла.

В цілому DLP 3D друк можна охарактеризувати як прямий аналог 3D друку SLA, який в деяких аспектах навіть перевершує його. Наприклад, швидкість друку в DLP 3D принтерах на порядок вище, ніж в SLA пристроях. А різниця в точності відтворення об'єкту варується в залежності від конкретного обладнання та витратних матеріалів, і в основному невелика.

Є два види DLP друку: зворотній та прямий. Для зворотнього друку характерно те, що спеціальна ємність 3D принтера заповнюється фотополімерною смолою до певного рівня. Платформа побудови опускається в ємність так, щоб зазор між нею і дном дорівнював висоті одного шару. Під ємністю розташований DLP проектор. На платформу проектується світло,

відповідний перетину першого шару моделі. Після його затвердіння платформа піднімається вгору і починається засвічення другого шару (рисунок 1.8).

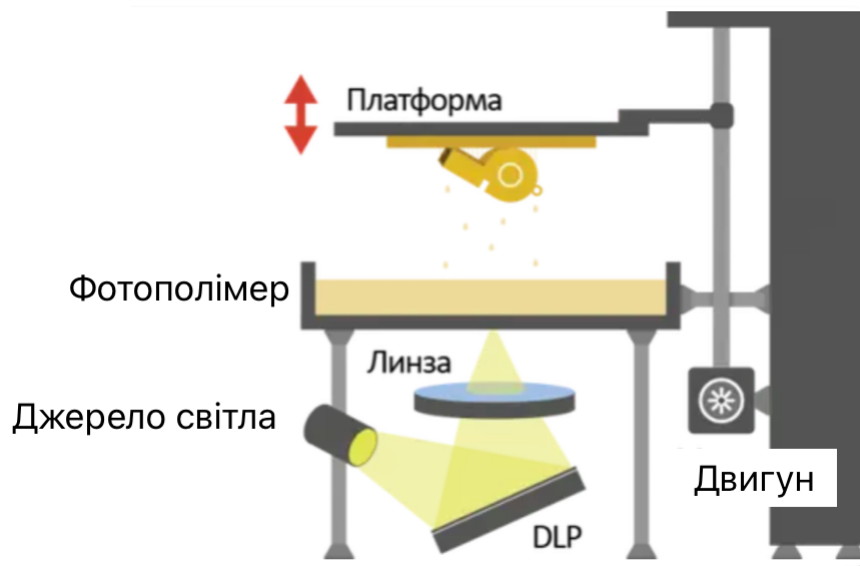


Рисунок 1.8 – Схема DLP 3D принтера

Так, крок за кроком і створюється фізичний об'єкт. По завершенню друку платформа піднімається вище рівня фотополімера, виріб витягується і очищується від залишків витратних матеріалів. Після цього необхідно виконати фінальне засвічення в УФ-лампі для повного затвердіння матеріалу.

На відміну від зворотнього друку, у прямому DLP проектор розташований зверху, над ємністю з фотополімером. При цьому робоча платформа знаходиться безпосередньо в ній. Для побудови першого шару платформа піднімається вгору так, щоб зазор між нею і поверхнею витратного матеріалу відповідав висоті першого шару. Перетин першого шару проектується на платформу, фотополімер твердне, після чого платформа опускається вниз на висоту одного шару. Ці кроки повторюються аж до повної побудови виробу. Подальші дії ідентичні описаним в зворотньому друці: об'єкт витягується, очищається від витратного матеріалу і піддається додатковому засвіченню.

DLP з кожним днем набуває все більшої популярності а саме через такі переваги:

– більш висока швидкість друку порівняно з SLA 3D принтерами. На відміну від лазерної стереолітографії DLP 3D друк проектує на фотополімер відразу цілий шар, а не проходить поступово його ділянки лазером. За рахунок цього швидкість створення виробів підвищується в кілька разів;

– висока точність друку;

– великий вибір витратних матеріалів;

– доступна ціна обладнання. DLP проектори набагато дешевше лазерних установок, що впливає на вартість 3D принтерів для DLP друку в кращу сторону. Технологія розвивається стрімко і багато сьогодні роблять вибір саме на користь цифрової світлодіодної проекції.

1.2.3 Технологія LCD друку

Технологія фотополімерного LCD друку – це метод 3D-друку, який пошарово затверджує рідку фотополімерну смолу під дією ультрафіолетових світлодіодів та LCD маски. Спеціальна матриця формує зображення кожного шару, пропускаючи світло тільки там, де необхідно затвердіння матеріалу, що дозволяє створювати об'єкти з високою точністю, деталізацією та гладкою поверхнею.

Принцип роботи LCD друку ділиться на декілька продовжуючих етапів. Першим і найпростішим є етап з підготовки смоли: у ванночку принтера заливається рідка фотополімерна смола. Після цього платформа для друку опускається у смолу, а зверху розташовується LCD-дисплей та УФ-світлодіоди, цей етап частіше за все називають засвіткою. УФ-світлодіоди світять крізь LCD-маску, яка пропускає світло лише через певну ділянку. Ця ділянка смоли полімеризується та твердне, формуючи один шар об'єкта. Платформа піднімається і процес засвітки повторюється, накладаючи наступний шар поверх попереднього, доки модель не буде повністю сформована.

Конструкція принтера будується лише по системі знизу-вгору, так як основне джерело зображення та УФ випромінювання знаходяться знизу принтера, рисунок 1.9.

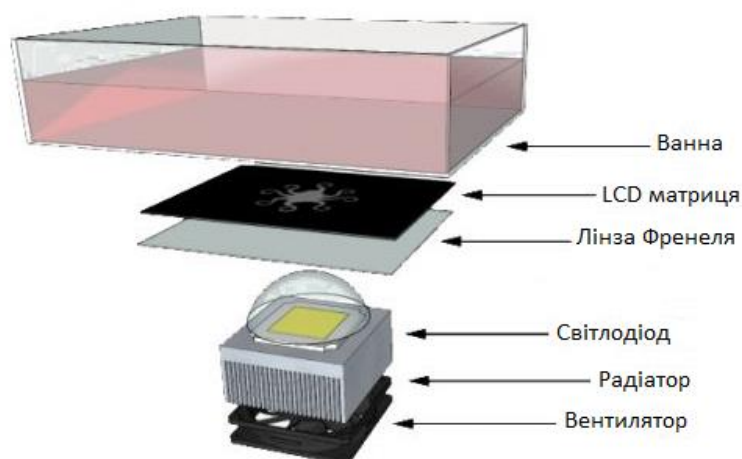


Рисунок 1.9 – Типова конструкція принтера по технології LCD

Як джерело ультрафіолетового випромінювання зазвичай застосовують світлодіод або світлодіодну матрицю, випромінювання якої проходить крізь екран і потрапляє на дно ванни (рисунок 1.10). Основною особливістю таких джерел є їхній спектр випромінювання, який знаходиться в діапазоні від 390 нм до 415 нм. Саме цей діапазон обирають завдяки властивостям фотополімерів, що найефективніше полімеризуються під дією ультрафіолетового випромінювання зазначених довжин хвиль [16-17]. Використання інших діапазонів призводить до зниження швидкості та якості засвітлення. Відхилення довжини хвилі може викликати неповну полімеризацію моделі, що стане причиною браку.



Рисунок 1.10 – приклади світлодіодних матриць

Технологія такого друку стала можливою тоді, коли було запропоновано використовувати LCD екрани, в якості світлопропускної маски, звідси і назва технологій друку, бо такий екран є її основою. Але тільки після того, як були прибрані елементи, що заважають проходженню УФ випромінювання, а саме підсвітка та поляризаційна плівка, використання таких екранів стало можливим у фотополімерному друці. В результаті видалення зайвих елементів проходження УФ випромінювання через екран з мінімальними втратами стає можливим і залишається шар, який безпосередньо відповідає за формування зображення. Для формування цього шару використовуються білі та чорні пікселі. Білі пікселі мають максимальне пропускання ультрафіолету, чорні ж навпаки, блокують його проходження. Таким чином підставляючи під екран джерело ультрафіолетового випромінювання, можливо регулювати подавання УФ світла на друковану область.

Якість друку моделі та її роздільна здатність по осях X та Y безпосередньо визначаються характеристиками LCD-екрана, а зокрема його фізичними розмірами та роздільною здатністю. Для екранів із розмірами 100 мм × 50 мм і роздільною здатністю 2К друк забезпечує точність близько 35-39 мкм по осях X–Y. Якщо ж використовувати екран з роздільною здатністю 4К при тих самих розмірах 100 мм × 50 мм, то розмір пікселя становитиме вже 23-26 мкм, що дозволить досягти значно вищої деталізації моделі, приклади зображені нижче на рисунку 1.11.



Рисунок 1.11 – Порівняння надрукованих деталей з використанням екранів з різними розмірами пікселя

1.2.4 Метод багатоструневого моделювання, MJM

У MultiJet Modeling (MJM) рідкі акрилові полімери наносяться шарами на будівельну платформу за допомогою друкуючої головки з одним або декількома соплами і затверджуються під впливом УФ-ламп. Друкувальна головка переміщається по платформі траєкторіями, заздалегідь заданими моделлю, поки шар не буде повністю надрукований. УФ-лампи розташовані безпосередньо на голівці, що друкує, і пластик твердіє відразу після його нанесення. Інтенсивність УФ-випромінювання регулюють таким чином, щоб верхній шар не твердів повністю, завдяки чому досягається стабільне з'єднання між накладеними шарами. Після того, як останній рівень надрукований, УФ-лампи проходять через весь компонент кілька разів, щоб завершити твердіння. На малюнку 1.12 зображена вище описана технологія.

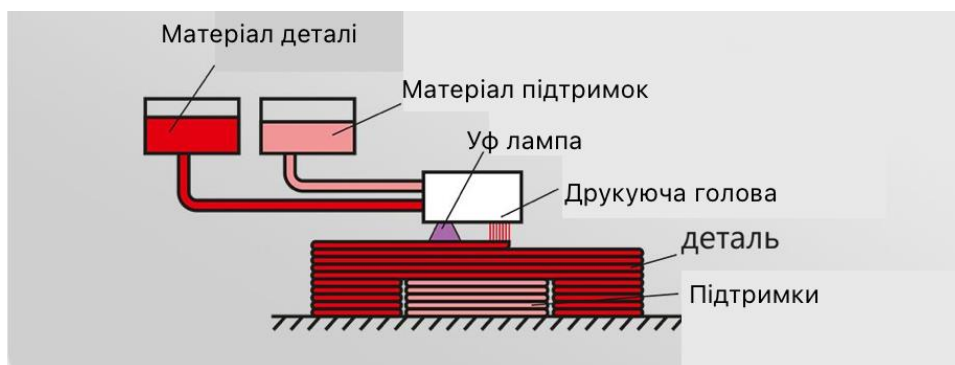


Рисунок 1.12 – Схема MJM 3D принтера

Перевага Multi Jet Modeling полягає в тому, що, в залежності від обладнання, що використовується, в соплі можна змішувати різні матеріали, щоб можна було отримати абсолютно різні кольірні відтінки або ступеня твердості для компонентів, які можна фарбувати, різати або шліфувати в процесі обробки. Моделі MJM мають високу точність та високий рівень деталізації з тонкою структурою. На моделях немає залишків полімеру, і необхідно видаляти тільки матеріал, що підтримує основну модель. Завдяки точним формам, які можуть бути створені, дизайнери можуть обґрунтовано перевіряти свої розробки та виявляти потенційні помилки або слабкі місця на

ранній стадії. Це означає значне підвищення ефективності процесу розробки продукту та скорочення часу виходу продукту на ринок.

1.3 Процес полімеризації фотополімерної смоли

Фотополімерна смола це рідкий синтетичний матеріал, який відрізняється чутливістю до УФ-випромінювання. Такий матеріал змінює свою структуру під впливом світла або сильного випромінювання, тобто з рідкого стану смола перетворюється на твердий стан.

За хімічним складом фотополімери складаються з мономерів, олігомерів та фотоініціаторів. Мономери є основою смоли та саме вони відповідають за створення структури. Олігомери надають виробу еластичність та міцність. А фотоініціатори запускають хімічну реакцію затвердіння під впливом уф світла.

Сам процес і принцип фотополімеризації доволі простий. Смола наливається у ванну фотополімерного принтера. Потім пристрій пошарово засвічує ділянки моделі. Під впливом світла відбувається затвердіння потрібних ділянок, що створює точну та гладку деталь. Потім змиваються залишки смоли. Для повної полімеризації необхідно виробу забезпечити додатковий вплив ультрафіолету. Для стабільного робочого процесу важливо враховувати точність довжини хвилі, найчастіше це значення складає приблизно 405 нм.

1.4 Фотополімерні смоли та їх види

Умовно фотополімерні смоли поділяються на кілька видів: стандартні, інженерні, стоматологічні, а також ювелірні або випалювані, рисунок 1.13.

Стандартні смоли. Цей вид чудово підходить для того, щоб створювати декоративні моделі. Готовий виріб виходить міцним і твердим, але цього не достатньо, щоб отримати функціональний виріб. Такі види смол поділяються на свої підвиди.

Інженерні. Донедавна така смола застосовувалася для виготовлення майстер-моделей або моделей з високою точністю, але на даний момент з матеріалу виготовляються повністю функціональні деталі. Для цього були розроблені фотополімерні смоли, характеристика яких покращена. Є посилені фотополімерні смоли, які мають більш високу термостійкість і більшу ударну міцність. Є гнучкі смоли, які можуть нагадувати силіконові чи гумові вироби.

Стоматологічні смоли. Такий вид застосовується стоматологами на вирішення різних завдань у цій галузі. Широко використовують тривимірний друк у даній галузі, щоб створити макети зубів та ясен. Також спеціалісти виготовляють коронки. Тут також є свої підвиди, які призначені для виконання певних завдань.

Випалювані смоли. Тривимірний друк активно застосовується і в ювелірній справі, і завдяки цьому бажані моделі можна отримати в більш короткий час, ніж виготовляти їх традиційними методами. Саме для цієї галузі були створені смоли, які називаються випалювані. Підвидів також багато, і якщо смоли, які призначені для створення невеликих моделей, але деталізації їх буде на найвищому рівні. Існують моделі, призначені для того, щоб надалі їх застосовувати для лиття в металі.



Рисунок 1.13 – приклад одного виробу з різних видів фотополімерної смоли

Є деякі запобіжні заходи при роботі з фотополімерною смолою, а саме:
– під час роботи варто захищати руки за допомогою рукавичок;

- перед тим, як застосовувати фотополімер, його необхідно добре перемішати, оскільки деякі компоненти можуть осідати на дно;
- зберігання необхідно організувати далеко від світла і ємність має бути непрозорою;
- якщо потрібно з принтера злити залишки смоли, необхідно процідити масу;
- друк треба здійснювати у приміщенні, яке добре провітрюється;
- перед застосуванням слід добре ознайомитися з інформацією про продукт, оскільки можуть бути деякі особливості використання.

Завдяки тому, що є багато видів фотополімерних смол, тривимірний принтер стає універсальним інструментом, завдяки якому можна виготовити модель будь-якої складності. Завдяки такому виду друку можна скоротити чималий виробничий ланцюжок на підприємстві.

1.5 Методи постобробки фотополімерних смол

3D-друк фотополімером має один головний недолік – необхідність постобробки виробів до остаточного затвердіння.

Обробка деталей є практично однаковою для будь якого з методів друку. Вона зазвичай включає наступні етапи: промивання (вручну або автоматично), очищення платформи, висихання, постзатвердіння (за допомогою розчину), видалення опор, склеювання, сухе шліфування, мокре шліфування, ґрунтування та фарбування деталей.

Ізопропіловий спирт (IPA) або монометіловий ефір трипропіленгліколь (TPM) розчиняють рідку смолу, роблячи їх ефективними для миття деталей, надрукованих на 3D-принтерах SLA і DLP. Це необхідно для видалення тонкого шару рідкої смоли з поверхні надрукованих деталей. Для промивання вручну, потрібно акуратно тримати виріб, бажано пінцетом і промивати його в спеціальній ємності, дати виробу висохнути на серветці. Існують і спеціальні

прилади для автоматичного промивання, наприклад Anycubic Wash & Cure, в який виріб поміщається, а все інше робиться автоматично.

Вироби треба залишати повністю сухими перед наступним затвердінням або обробкою. Для летючих розчинників, таких, як IPA, треба дати їм висохнути протягом не менше 30 хвилин після промивання, щоб розчинник повністю випарувався з поверхні деталей. Також обов'язково треба забезпечити відповідну вентиляцію, поки розчинник випаровується. Для розчинників, які погано випаровуються, такі як TPM, треба дати частинам повністю висохнути, а потім промивати їх водою або IPA, поки все решта TPM не розчиниться.

Постзатвердіння або дозасвітлення є необов'язковим для стандартних смол. Інші типи смол вимагають додаткового затвердіння для досягнення їх оптико-механічних властивостей [20]. Чим більше обсяг смоли, тим довше процес дозасвітлення. Вироби поміщають під ультрафіолетову лампу. Деякі виробники забезпечують своїх клієнтів необхідним обладнанням, наприклад Formlabs мають можливість постачання таких пристроїв в комплекті з самим принтером. У 3D Systems серії ProJet елементи дозасвітлення вбудовані в сам принтер.

Опори потрібно видалити після затвердіння, оскільки деталі можуть деформуватися під впливом світла й тепла без структурної підтримки, рисунок 1.14. Використовуючи фрези, скальпель, кусачки або ніж можна видалити опори. Деякі способи видалення опор можуть призвести до їх відриву. Треба остерігатись уламків і обов'язково надівати захисні окуляри й рукавички, щоб захистити шкіру й очі.

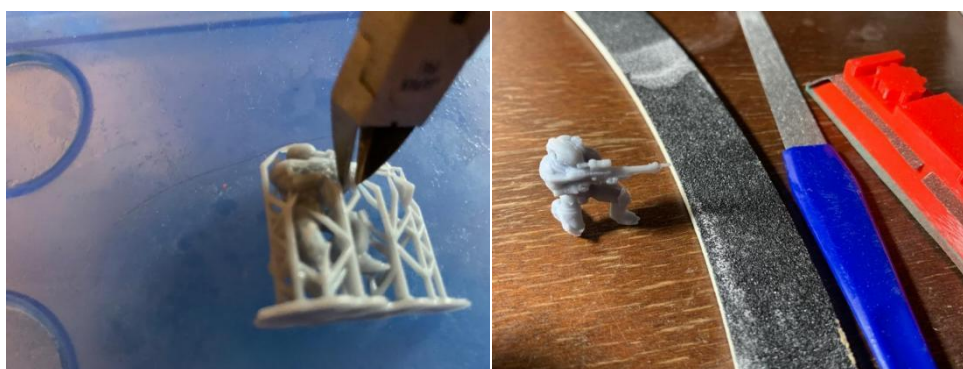


Рисунок 1.14 – видалення опорів та шліфування виробу

Після видалення опорів їх мітки видаляються сухим або мокрим шліфуванням. Підійде й звичайна пилка для нігтів. Для повного згладжування можна використовувати шкірку з дрібним зерном.

Розмір робочої зони фотополімерних 3D-принтерів призводить до того, що багато виробів доводиться збирати по частинах після друку, за допомогою склеювання. Якщо склеювальна поверхня досить тонка, застосовують ще трохи фотополімеру. Це кріплення мало помітне, дуже міцне і його можна скоригувати поки смола не застигла. Багато хто склеює цианакрилатом, бо це дуже дієвий спосіб, але потрібно враховувати, що його не можна використовувати в медицині й імплантології. Ще один спосіб - використання розчинника, але підходить він не для всіх смол, він може розчинити сам матеріал і його дуже важко випарити для дозасвітлення.

Залежно від області застосування деталі й бажаної обробки, наступні етапи обробки можуть включати шліфування, ґрунтування й нанесення друкованих зображень. Для шліфування використовують абразивний папір, але гладкі вироби досить і знежирити перед фарбуванням. Ґрунт використовують акриловий. Фарбу необхідно використовувати для аерографів, частіше балончики.

1.6 Висновки до першого розділу

У результаті проведеного аналізу технологій тривимірного друку встановлено, що сучасні методи адитивного виробництва охоплюють широкий спектр технічних рішень, які базуються на різних фізико-хімічних принципах формування об'єкта. Найбільш поширеною технологією є FDM (Fused Deposition Modeling), що характеризується простотою реалізації, економічністю та можливістю використання великої кількості термопластичних матеріалів, таких як PLA, ABS, PETG, нейлон, TPU тощо. Саме ця технологія є базовою для виготовлення прототипів і функціональних деталей у малосерійному виробництві.

Водночас промислові методи, зокрема SLS, SLM та EBM, базуються на принципі селективного спікання або плавлення порошкових матеріалів під дією лазерного чи електронного променя. Ці технології забезпечують високу точність, однорідність структури та можливість виготовлення деталей складної геометрії з металів, кераміки або полімерних порошоків.

Окрему групу становлять фотополімерні технології (SLA, DLP, LCD), у яких використовується процес фотополімеризації рідких смол під дією ультрафіолетового випромінювання. Цей тип друку дає змогу отримувати вироби з надзвичайно високою роздільною здатністю, гладкою поверхнею та точним відтворенням дрібних деталей. Дослідження властивостей фотополімерних смол показують, що зміна складу мономерів, типу фотополімеризатора та режимів опромінення істотно впливають на механічні характеристики, міцність, жорсткість та термостійкість готових виробів. Саме тому вивчення полімеризаційних процесів і підбір оптимальних матеріалів є одним із ключових напрямів розвитку сучасних адитивних технологій.

Узагальнюючи результати аналізу – розвиток 3D-друку базується на постійному вдосконаленні матеріалів та технологічних процесів, спрямованих на досягнення балансу між точністю, міцністю, швидкістю та вартістю виготовлення. Різноманіття технологій – від FDM до SLA і SLS – дає змогу ефективно застосовувати 3D-друк у різних галузях: від інженерії та медицини до ювелірної справи й дизайну. Подальші дослідження полімерних смол і процесів їх фотополімеризації мають стратегічне значення для підвищення якості, надійності та функціональності тривимірно надрукованих об'єктів.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДРУКУ ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА МІЦНІСТЬ ДРУКУ

2.1 Підготовка моделі до друку

2.1.1 Первинне налаштування профілю принтера

Процес виготовлення фотополімерної моделі можливо розділити на такі етапи, рисунок 2.1:

- 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 (подібні програми називаються «слайсерами», для фотополімерного 3D-друку). 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.

Для подальшої роботи була обрана програма-слайсер під назвою 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 [22]. Вона має найбільш гнучку можливість налаштування різних параметрів друку, тож надасть набагато більше інформації для подальшого дослідження.

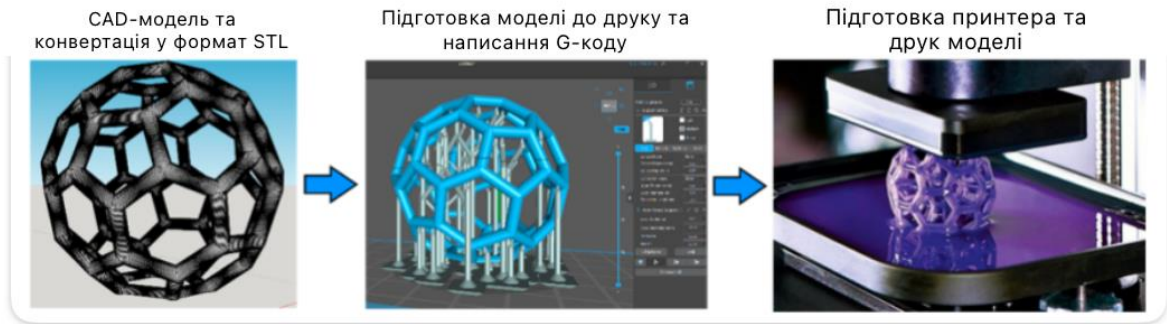


Рисунок 2.1 – Етапи підготовки моделі до фотополімерного друку

Ось основні можливості програмного забезпечення Chitobox:

- нарізання моделі: перетворює тривимірні об'єкти на шари, які принтер відтворює послідовно, формуючи готовий виріб;
- створення опор: додає підтримувальні структури – автоматично або вручну - для елементів, що виступають, щоб забезпечити стабільність під час друку;
- видалення порожнин і створення дренажу: дозволяє зменшити витрати матеріалу, роблячи модель порожнистою й додаючи отвори, які допомагають уникнути накопичення смоли;
- інструменти для виправлення моделей: виявляє й усуває недоліки, наприклад нерівні краї чи небажані отвори;
- сумісність із різними принтерами: працює з багатьма моделями 3D-принтерів, такими як Elegoo, Anycubic, Creality тощо;
- гнучкі параметри друку: дозволяє точно налаштувати час засвічення, швидкість підйому, висоту шару та інші важливі характеристики.

Підтримка файлових форматів:

- формати для імпорту: STL, OBJ, 3MF, AMF та інші;
- формати для експорту: .cbddlp, .photon, .ctb та інші спеціалізовані формати, залежно від моделі принтера.

Розглянемо більш детально інтерфейс та інструменти в програмі Chitobox, рисунки 2.2 – 2.15.

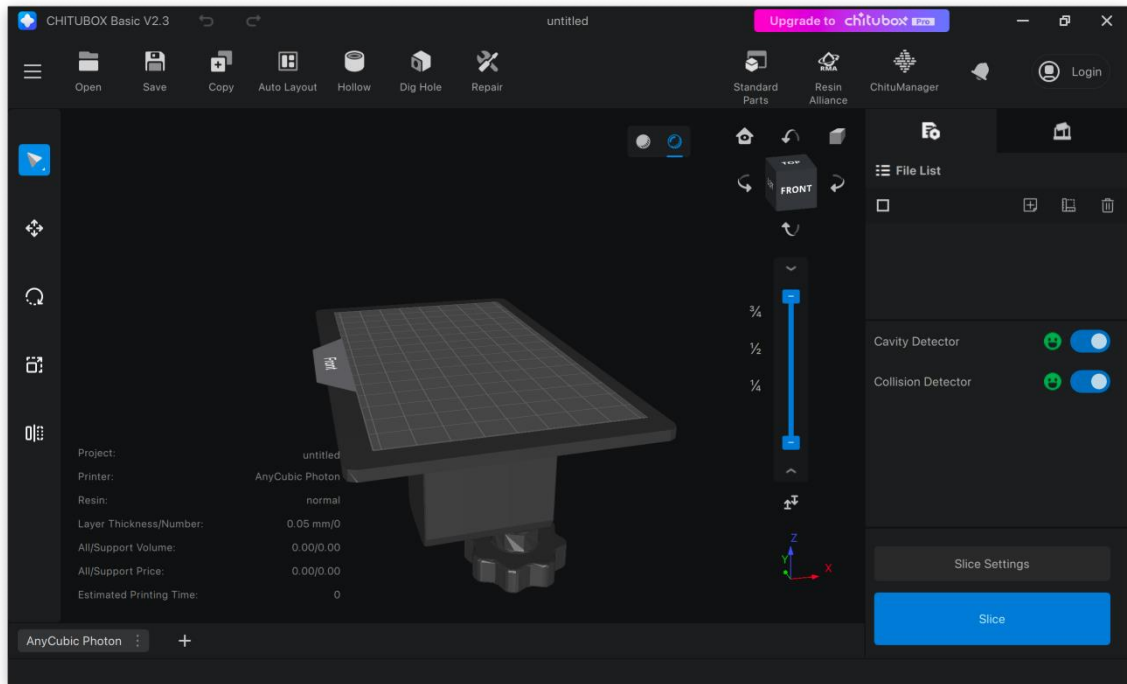


Рисунок 2.2 – Робочий екран Chitubox

Перший крок – створити робочий профіль програми для того 3D-принтера, на якому планується друк моделей. У Chitubox уже доступні як готові профілі для конкретних фотополімерних принтерів, так і варіанти для саморобних пристроїв, пункт – «Custom Printer». Щоб вибрати потрібний принтер, слід натиснути кнопку «+» у нижньому лівому куті, після чого в новому вікні на вкладці «Add Printer» обрати модель свого 3D-принтера, рисунок 2.3.

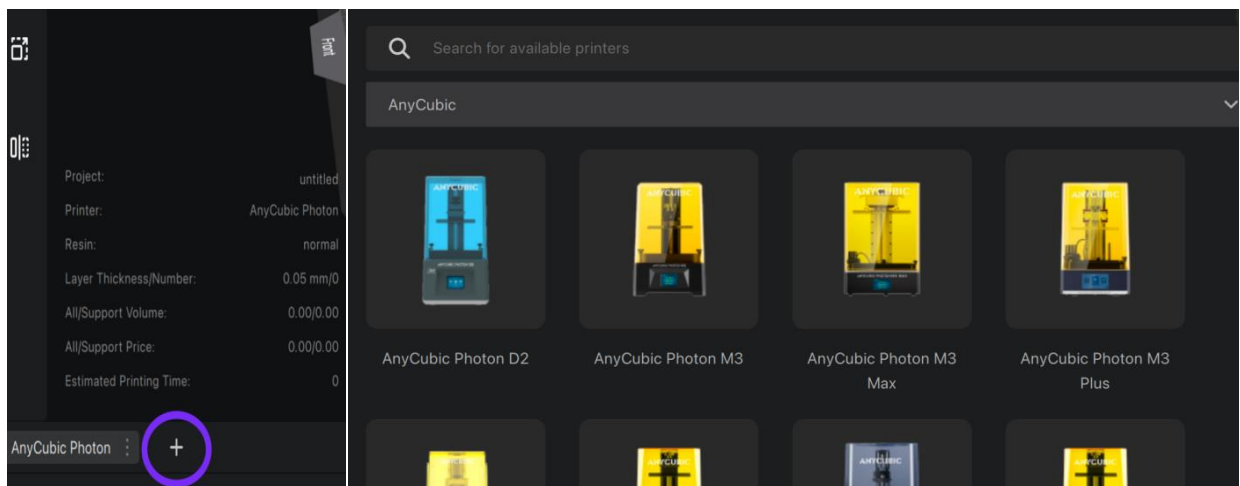


Рисунок 2.3 – Вибір 3D-принтера у Chitubox

Якщо обрати пункт «Custom Printer», то у вкладці «default» → «Next» потрібно ввести параметри самостійно зібраного принтера в розділі Machine. Тут задаються:

- технологія роботи принтера («Mirror»): Normal, LCD mirror або DLP normal;
- роздільна здатність дисплея («Resolution»);
- габарити області друку («Size»);
- зміщення зони побудови («Build Area Offset»), якщо конструкція принтера має певні обмеження (рисунок 2.4).

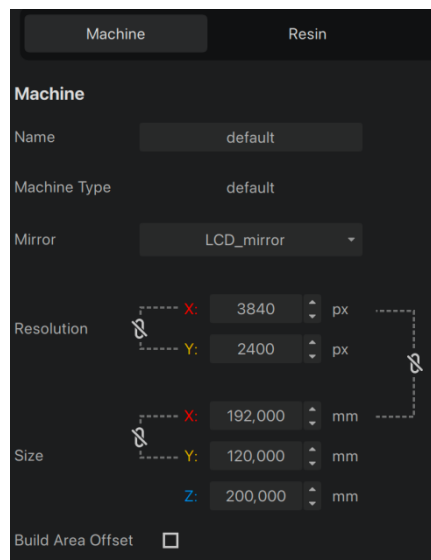


Рисунок 2.4 – Налаштування «Custom Printer»

Якщо ж використовувати стандартний 3D-принтер, але з певними модифікаціями, їх також можна задати в профілі. Потрібно вибрати модель пристрою, натиснути «Next» та перейти в розділ Machine, де вказуються всі необхідні коригування. Після внесення змін треба натиснути «Apply».

2.1.2 Інструменти для налаштування моделі

Щоб імпортувати модель у програму, можна скористатися двома способами: перетягнути файл у робочу зону за допомогою курсора (рисунок

2.5), або відкрити його через кнопку «Open», розташовану у верхньому лівому куті інтерфейсу.

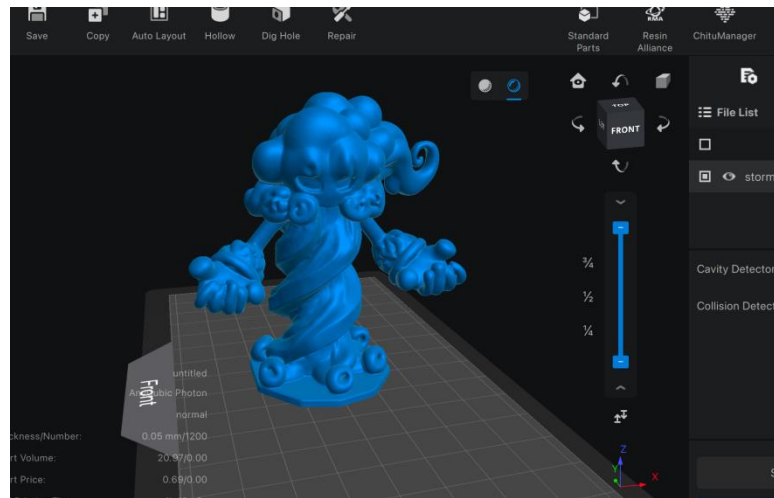


Рисунок 2.5 – Імпортована модель у Chitubox

Після появи моделі на робочому полі стануть доступними інструменти для її переміщення, обертання, зміни масштабу та віддзеркалення – вони знадобляться для правильного розташування об'єкта (рисунок 2.6).

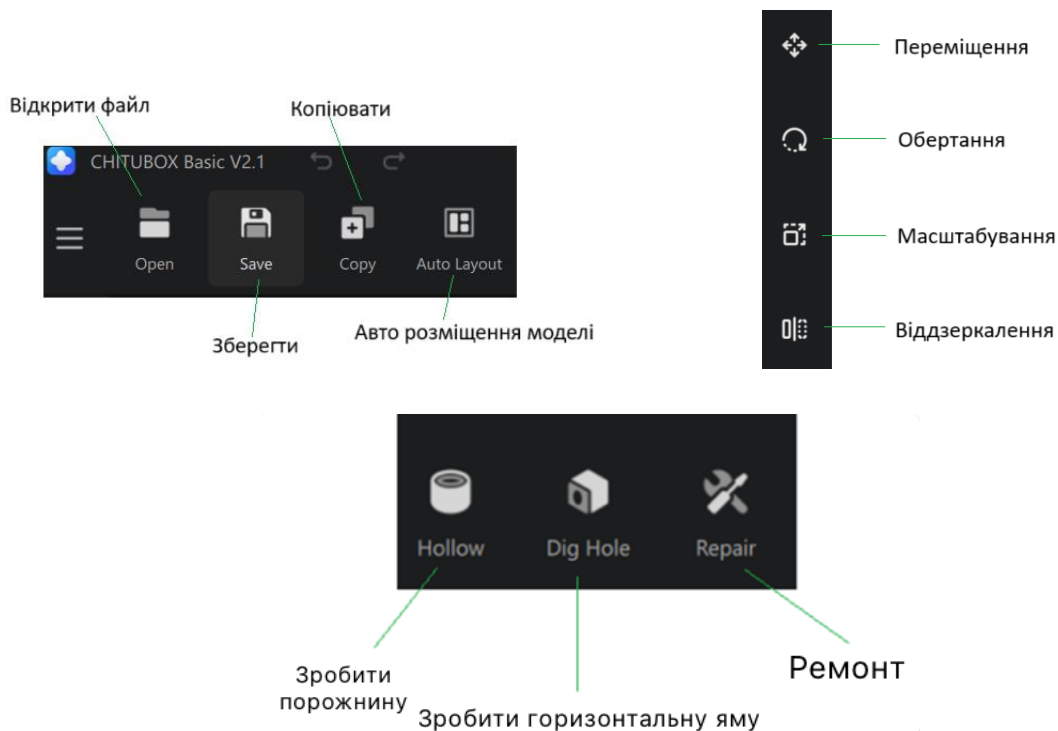


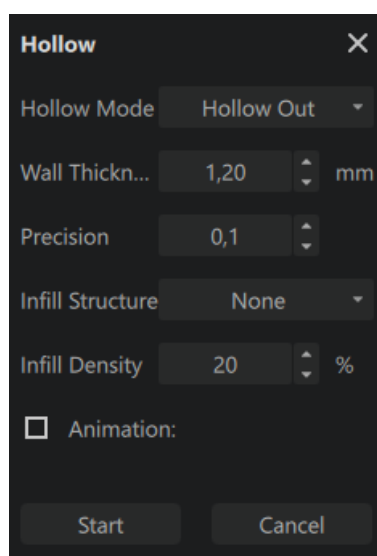
Рисунок 2.6 – Інструменти для роботи з моделлю у Chitubox

Усі ці інструменти працюють із моделлю по трьох осях – X, Y та Z. Крім того, у програмі доступні засоби для створення порожнистих моделей, додавання дренажних отворів для виведення фотополімерної смоли зсередини, а також для виправлення пошкоджених полігонів у файлі STL.

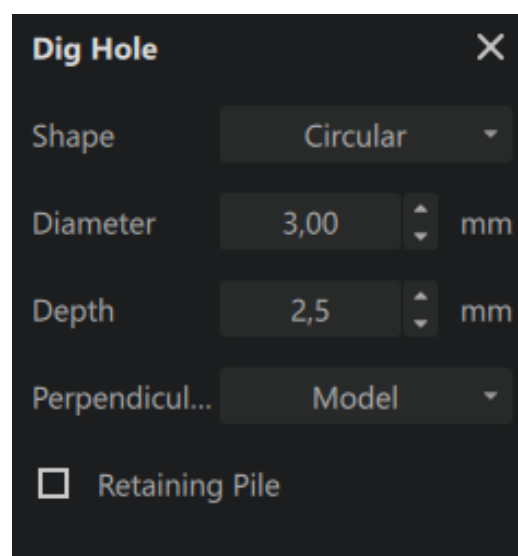
Для кожного з інструментів передбачено розширені налаштування. Наприклад, у параметрах функції Hollow можна задати режим порожнистості (Hollow Mode) та вибрати тип формування внутрішнього простору – «Peel» (шкірка) або «Hollow Out» (виймка), рисунок 2.7, а. Доступно також встановлення товщини стінок (Wall Thickness), точності (Precision), типу внутрішньої структури (Infill Structure) і рівня її заповнення (Infill Density).

У налаштуваннях інструмента для створення дренажного отвору (Dig Hole) можна вказати такі параметри (рисунок 2.7, б):

- форму отвору (Shape);
- діаметр (Diameter);
- глибину (Depth);
- напрям перпендикулярності щодо моделі або екрану (Perpendicular to);
- наявність утримувальної палі (Retaining Pile).



а)



б)

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

Рисунок 2.7 – Налаштування параметрів інструментів

2.1.3 Вибір та налаштування підтримок для обраних моделей

Для встановлення підтримок моделі у Chitubox, є спеціальний редактор, який знаходиться в головному вікні програми, рисунок 2.8.

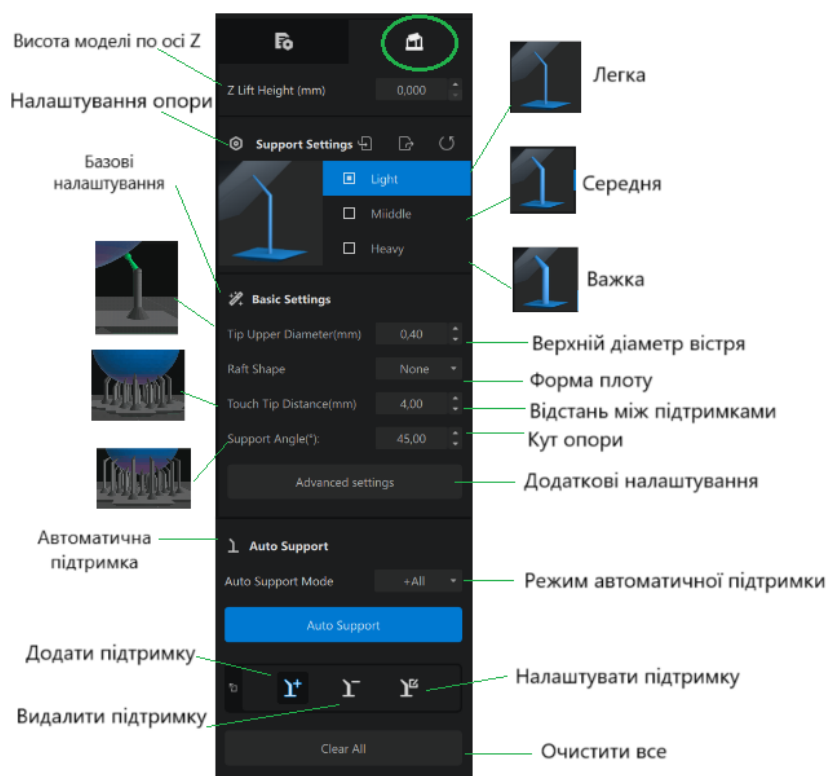


Рисунок 2.8 – Налаштування підтримок у Chitubox

У параметрі «Z Lift Height» можна задати висоту підйому моделі над платформою. Це налаштування залежить від конструкції моделі: чи має вона достатньо широку основу для надійного зчеплення з платформою, чи, навпаки, нижня поверхня нерівна і потребує додаткового підйому.

У вкладці «Support Settings» доступний вибір типу підтримок: легкі (Light), середні (Middle) та важкі (Heavy).

Під час друку складних об'єктів часто застосовують одразу два або навіть три різні типи підтримок. Вибір конкретного типу залежить від розміру та маси нависних елементів моделі [27-28]. Для встановлення точних параметрів – діаметрів і розмірів підтримок – слугують додаткові опції у розділі «Advanced Settings».

У вкладці «Basic Settings», використовуючи параметр «Tip Upper Diameter», можна визначити діаметр кінчика підтримки (рисунок 2.9). Це допомагає полегшити постобробку готової моделі та спростити видалення підтримок після друку.

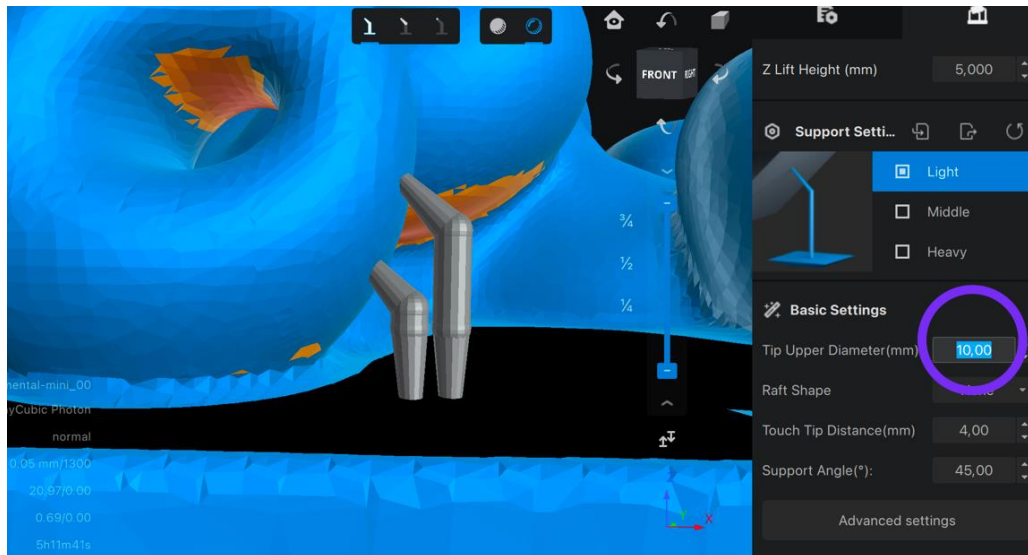
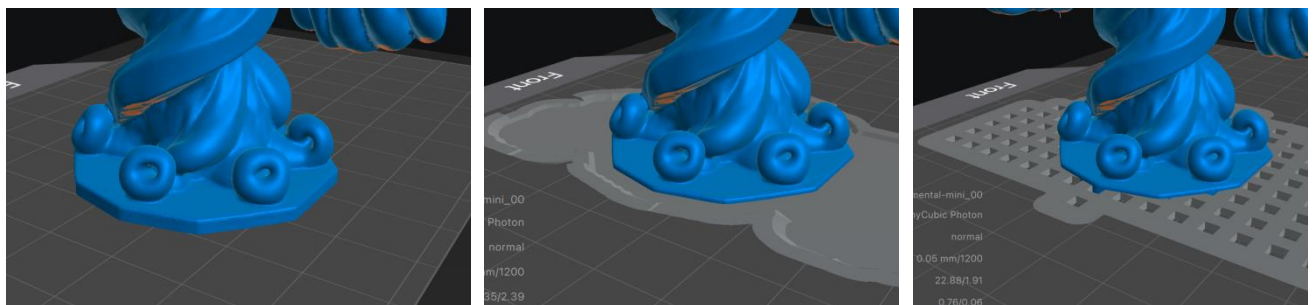


Рисунок 2.9 – Параметр «Tip Upper Diameter»

За допомогою параметру «Raft shape», можливо вказувати форму плоту, ти саме підвищити адгезію моделі та підтримки до платформи. В цілому є три типи плоту, рисунок 2.10:

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



а)

б)

в)

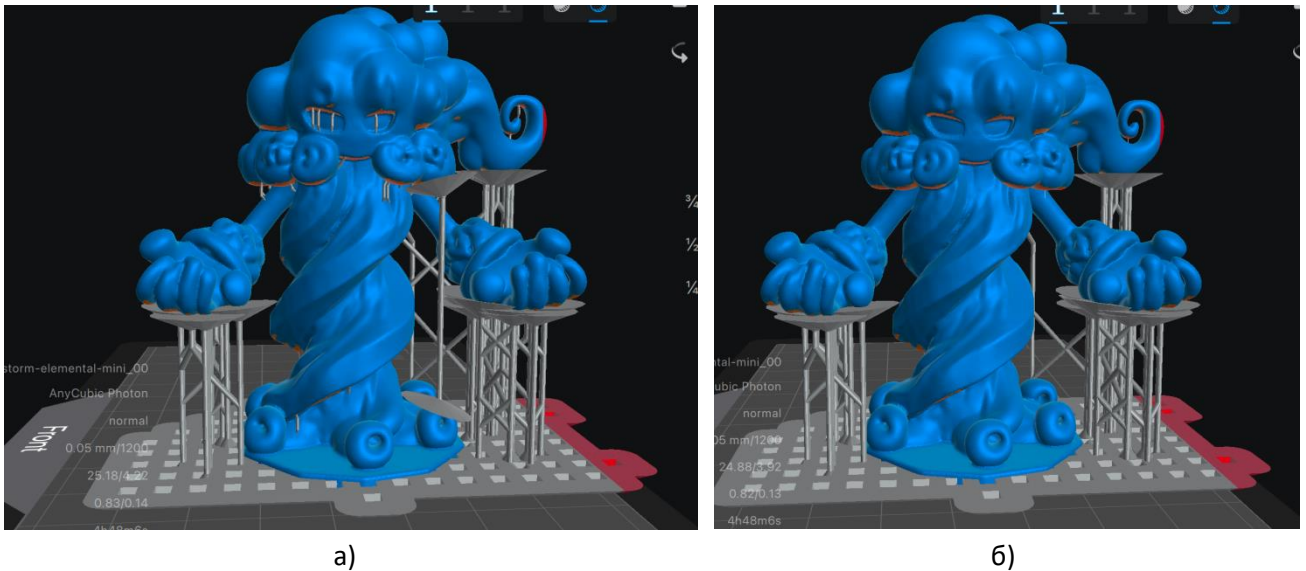
а – тип прилипання до платформи «None»; б – тип прилипання до платформи «Skate»; в – тип прилипання до платформи «Cross grid»

Рисунок 2.10 – Типи «Raft shape»

Крім цього, у базових параметрах підтримок можна налаштувати відстань між окремими елементами підтримки (Touch Tip Distance), тобто їхню щільність, а також задати кут, починаючи з якого ці підтримки будуть створюватися (Support Angle). Обидва параметри підбираються індивідуально залежно від специфіки моделі.

У вкладці «Auto Support» доступний вибір режиму автоматичного створення підтримок (Auto Support Mode). Програма пропонує два варіанти (рисунок 2.11):

- створення підтримок на всіх необхідних ділянках (All);
- створення підтримок лише від платформи (Platform).



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

Рисунок 2.11 – Види «Auto Support Mode»

В Chitubox, також є можливість самостійного додавання, видалення та налаштування окремих підтримок.

Вкладка додаткових налаштувань підтримок «Advanced settings», наведена на рисунку 2.12. Де можна окремо налаштовувати кожний елемент підтримки, такі як: верхня частина «Top», нижня частина «Bottom», середня частина «Middle» та плот (основа) «Raft».

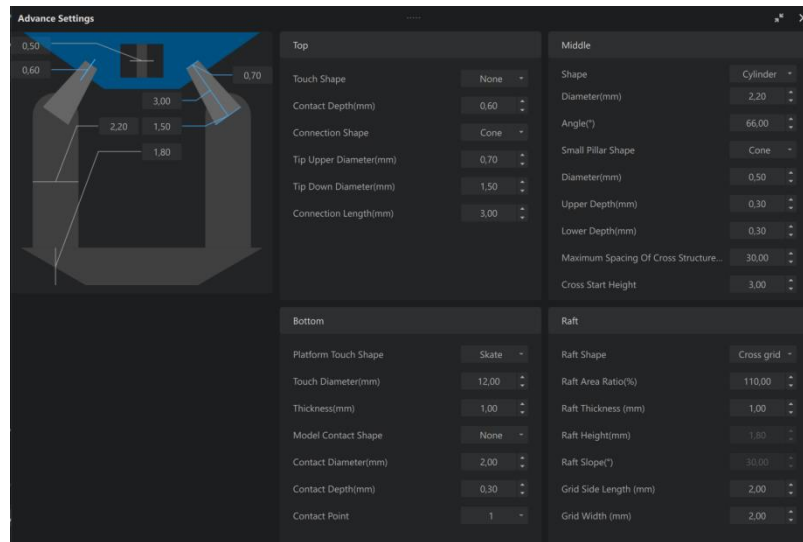


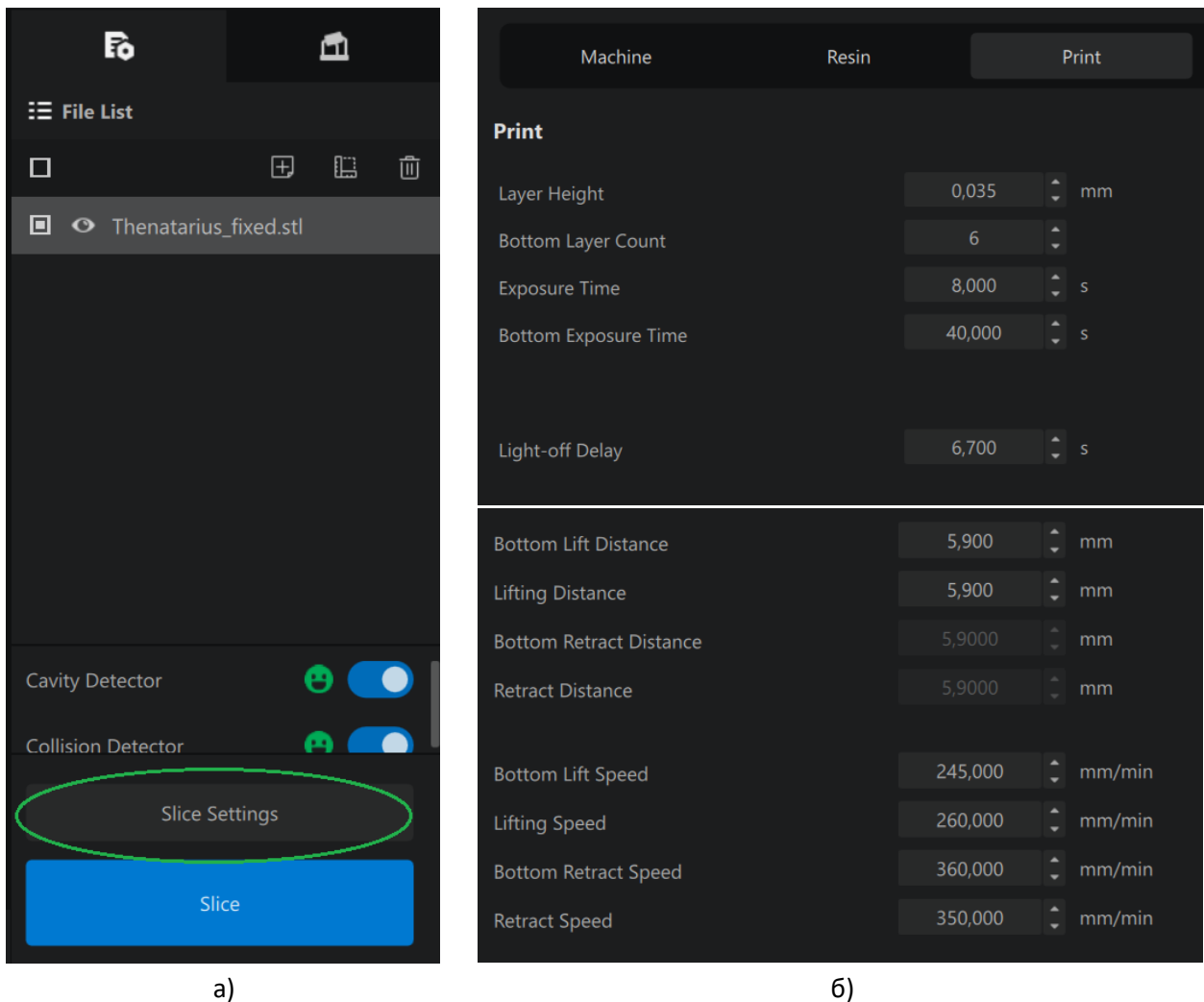
Рисунок 2.12 – Налаштування «Advanced settings»

2.1.4 Налаштування параметрів друку моделі

Наступним етапом є вказання параметрів експонування моделі. Для цього у вкладці «Slice Settings» → «Print» треба вибрати необхідні параметри, рисунок 2.13.

До головних параметрів, що визначають процес друку, належать:

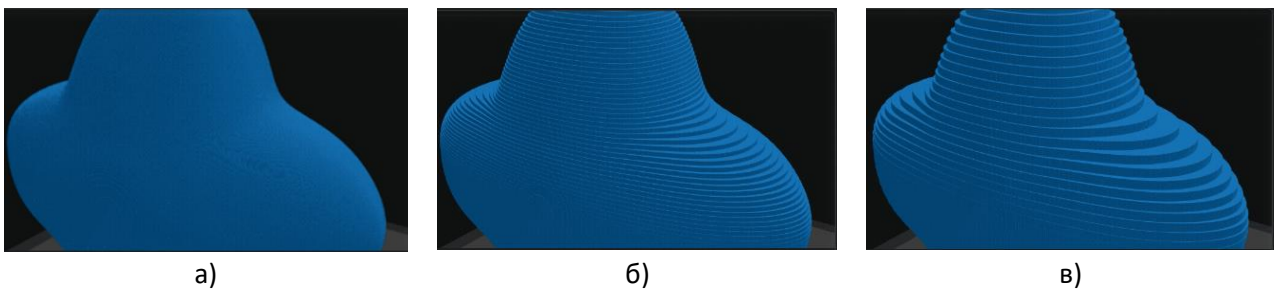
- Layer Height (висота шарів);
- Bottom Layer Count (кількість базових шарів);
- Exposure Time (час експонування основних шарів);
- Bottom Exposure Time (час експонування стартових шарів);
- Light-off Delay (пауза між вимкненням і повторним увімкненням лампи для її охолодження).



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

Рисунок 2.13 – Налаштування друку моделі

Від параметра Layer Height залежить рівень деталізації: що менша висота шару, то точнішою буде поверхня моделі, але час друку збільшиться, адже модель складатиметься з більшої кількості шарів (рисунок 2.14).



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

Рисунок 2.14 – Модель з різною висотою шару

Параметри «Bottom Layer Count» (кількість базових шарів) і «Bottom Exposure Time» (час їх експонування) визначають, наскільки надійно модель закріпиться на платформі. Оскільки більшість фотополімерних принтерів формують об'єкт знизу догори, під час друку існує ризик, що модель може відірватися від платформи. Щоб цього уникнути, потрібно забезпечити міцну адгезію між початковими шарами та поверхнею платформи. Тому перші 6–10 шарів друкують із підвищеним часом експонування – близько 15–40 секунд – щоб підсилити полімеризацію смоли.

Час експонування основних шарів (Exposure Time) значно менший, ніж у базових, і саме він найбільше впливає на загальну тривалість друку. Параметр «Light-off Delay» визначає паузу між вимкненням і повторним увімкненням УФ-лампи, що допомагає її охолодити та продовжує ресурс роботи.

Усі ці параметри – час експонування та кількість базових шарів – залежать від властивостей смоли та маси моделі.

Окрім базових налаштувань, програма дає змогу регулювати параметри підйому моделі від дна ванни та руху платформи:

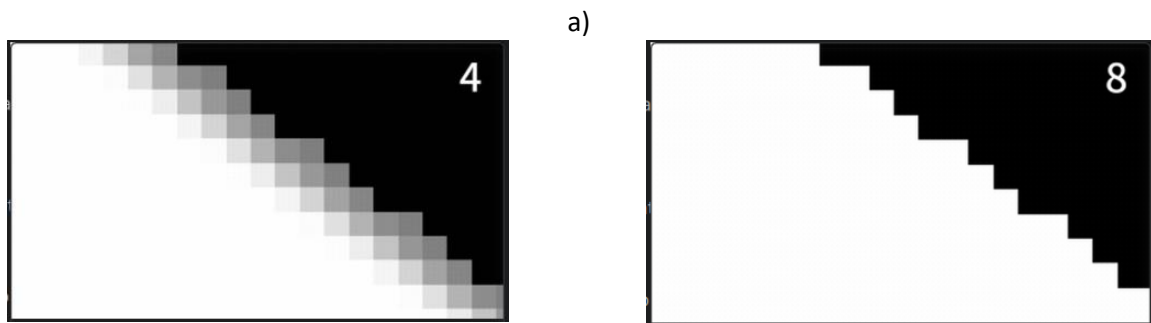
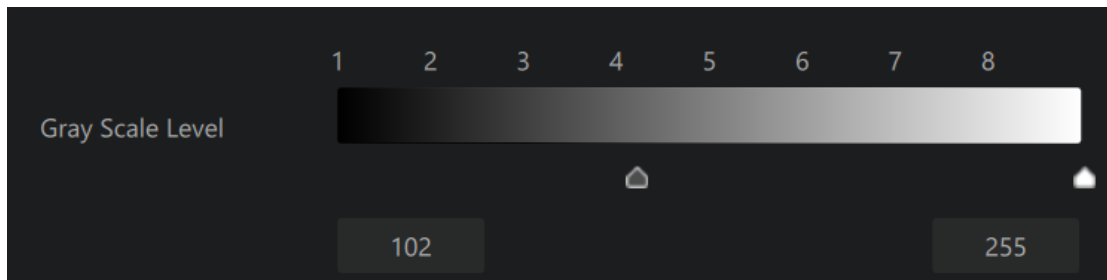
- Bottom Lift Distance: висота підняття платформи після друку базових шарів;
- Lifting Distance: висота підйому між експонуванням основних шарів;
- Bottom Lift Speed: швидкість підняття платформи після базових шарів;
- Lifting Speed: швидкість підйому між звичайними шарами;
- Bottom Retract Speed: швидкість занурення платформи до дна ванни;
- Retract Speed: швидкість переміщення платформи над поверхнею смоли.

У вкладці «Advance» є додаткові параметри, що впливають на “ступінчатість” моделі. Один із них – Anti-aliasing – відповідає за згладжування контурів, зменшуючи видимість пікселізації. Його робота ґрунтується на тому, що крайові пікселі робляться напівпрозорими, тож світло УФ-лампи проходить частково, полімеризуючи смолу з меншою інтенсивністю, що згладжує край.

Параметр Anti-aliasing має три режими:

- None: без згладжування;

- Gray Scale Level: рівень відтінків сірого (рисунок 2.15, а);
- Anti-aliasing Level: рівень згладжування (рисунок 2.15, б).



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

Рисунок 2.15 – Інструменти згладжування «Anti-aliasing»

2.2 Опис макету для проведення досліджень

Для проведення досліджень був обраний Anycubic Photon, який є одним із найпоширеніших бюджетних принтерів початкового та середнього рівня (рисунок 2.16).



Рисунок 2.16 – Зовнішній вигляд LCD принтеру Anycubic Photon

Цей принтер відзначається стабільною якістю друку, простотою обслуговування та відкритою екосистемою матеріалів.

Anycubic Photon належить до класу SLA/LCD-принтерів з УФ-експонуванням, що забезпечує високу деталізацію моделі завдяки використанню джерела ультрафіолетового світла та LCD матриці (рисунок 2.17).

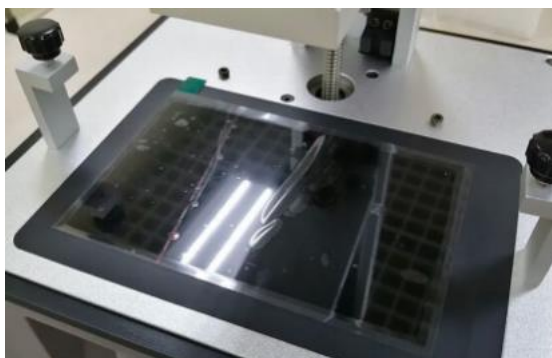


Рисунок 2.17 – Встановлена LCD матриця під якою знаходиться джерело ультрафіолетового випромінювання

Принцип побудови базується на експонуванні тонких шарів фотополімерної смоли через LCD-панель, яка пропускає світло у визначених пікселях, формуючи кожен шар моделі.

Основні технічні характеристики Anycubic Photon наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Ключові характеристики 3D-принтера Anycubic Photon

№	Характеристика	Опис
1	Область друку	115 мм × 65 мм × 155 мм – підходить для точних дрібних і середніх моделей
2	Тип УФ-екрану	LCD-панель 2K (2560×1440) з товщиною пікселя 47–50 мкм, що формує високу деталізацію шару
3	Джерело світла	LED-матриця 405 нм – стандартна довжина хвилі для більшості смол
4	Механізм осі Z	Трапецієподібний гвинт T8 та жорстка лінійна направляюча

Продовження таблиці 2.1

5	Ванна смол	Акрилова ємність з FEP-плівкою
6	Платформа	Алюмінієва з текстурованою поверхнею для кращої адгезії
7	Плата керування	Photon Mainboard V1.3
8	Екран керування	Сенсорний TFT-дисплей 2.8'
9	Програмне забезпечення	Chitubox / Photon Workshop
10	Тип файлів	.photon, .cbddlp
11	Інтерфейс	USB, монохромний дисплей управління

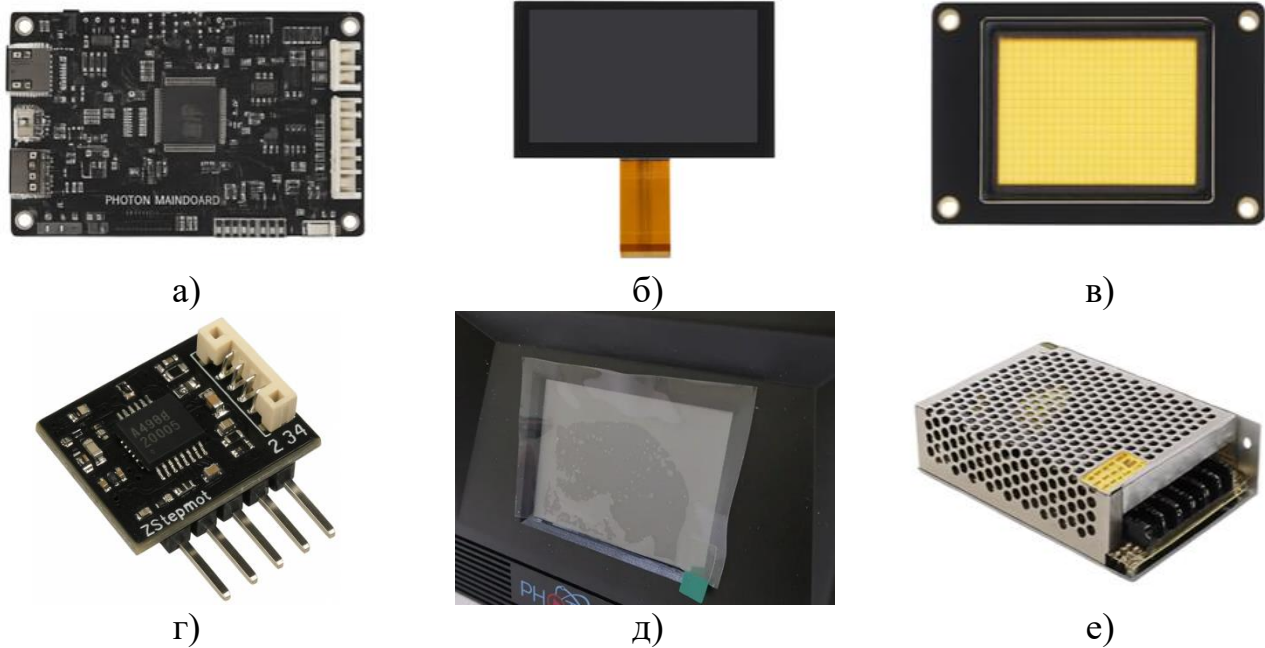
Завдяки надійній конструкції осі Z, стабільному джерелу УФ-світла та високій роздільній здатності LCD-екрану, Anycubic Photon забезпечує контрольовані умови для дослідження впливу експозиції, висоти шару, інтенсивності світла та параметрів підйому платформи.

Макет LCD-принтера Anycubic Photon у рамках дослідження має стандартну конструкцію, проте обладнаний додатковими вимірювальними можливостями:

- система контролю температури смоли: цифровий датчик DS18B20 (не втручається в штатну роботу);
- вимірювач інтенсивності УФ-випромінювання (зовнішній UV-метр);
- логування параметрів друку через програму Chitubox.

Це дозволяє відслідковувати залежність між експозицією, рівномірністю УФ-поля та якістю друку.

На рисунку 2.18 наведені основні електронні компоненти макета 3D-принтера Anycubic Photon.



а – плата керування Photon Mainboard; б – LCD-екран 2К; в – УФ-LED матриця 405 нм; г – драйвер осі Z; д – сенсорний дисплей управління; е – блок живлення 60 Вт

Рисунок 2.18 – Електроні компоненти макету для проведення досліджень

Блок живлення забезпечує стабільні 12 В для матриці, материнської плати та механіки, що є критичним для стабільності УФ-джерела [25].

2.3 Аналіз САУ для управління ультрафіолетом у системі LCD принтера

Згідно з технічним завданням, заносимо вихідні параметри системи автоматичного управління інтенсивністю УФ-випромінювання у LCD-принтері до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення параметрів САУ

Найменування	Позначення	Значення
Коефіцієнт підсилення плати керування	$K_{ПП}$	150
Коефіцієнт підсилення драйвера УФ-матриці	K_D	1,8
Стала часу драйвера УФ-світлодіодів	T_D	0,01 с
Коефіцієнт перетворення матриці в інтенсивність (світловіддача)	K_{UV}	0,85
Стала часу теплової інерції світлодіодного масиву	$T_{ім}$	0,12 с

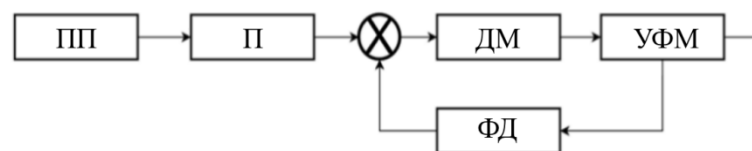
Продовження таблиці 2.2.

Ефективна площа випромінювання	S_e	30–60 см ²
Стала часу фотодатчика	$T_{дат}$	0,015 с
Коефіцієнт чутливості фотодатчика	$K_{дат}$	0,9В·мВт ⁻¹ ·см ²

Таблиця 2.3 – Вимоги до якості процесу керування

Найменування	Позначення	Значення
Максимальний час встановлення	t_c	$\leq 0,3$ с
Допустиме перерегулювання	σ	≤ 5 %
Статична похибка	$\epsilon_{ст}$	≤ 2 %

Нижче на рисунку 2.19 наведено структурну (функціональну) схему системи управління інтенсивністю УФ.



Система управління інтенсивність УФ-матрицею (УФМ) містить: УФМ як об'єкт регулювання, плата керування (ПП), підсилювач (П), драйвер матриці (ДМ) та фотодатчик (ФД)

Рисунок 2.19 – Функціональна схема САУ

Пояснення вищевказаних елементів:

- ПП: плата керування (задавач/підсилювач), видає керуючу напругу/цифровий сигнал;
- ДМ: драйвер який перетворює сигнал керування в струм/напряження для LED-матриці;
- УФМ: об'єкт регулювання, LED-масив, який за величиною подає інтенсивність УФ;
- ФД: фотодатчик який вимірює фактичну інтенсивність і формує зворотний сигнал.

Формула елемента порівняння:

$$e(t) = E_{\text{зад}}(t) - E_{\text{вих}}(t), \quad (2.1)$$

де $e(t)$ – сигнал помилки (різниця між бажаним і фактичним положенням інтенсивності);

$E_{\text{зад}}(t)$ – задане значення інтенсивності УФ-матриці;

$E_{\text{вих}}(t)$ – фактичне значення інтенсивності УФ-матриці.

Передавальну функцію плати керування (ПП), знаходимо за формулою (2.2):

$$U_{\text{ПП}}(s) = K_{\text{ПП}} \cdot E(s), \quad (2.2)$$

де $U_{\text{ПП}}(s)$ – вихідна напруга плати керування;

$K_{\text{ПП}}$ – коефіцієнт підсилення ПП;

$E(s)$ – сигнал помилки в образі Лапласа.

Передавальну функцію драйвера, знаходимо за формулою (2.3):

$$W_{\text{д}}(s) = \frac{K_{\text{д}}}{T_{\text{д}}s + 1}, \quad (2.3)$$

де $W_{\text{д}}(s)$ – передавальна функція драйвера;

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт підсилення драйвера;

$T_{\text{д}}s$ – стала часу драйвера.

Передавальну функцію LED-матриці з урахуванням теплової інерції, знаходимо за формулою (2.4):

$$W_{\text{UV}}(s) = \frac{K_{\text{UV}}}{T_{\text{ім}}s + 1}, \quad (2.4)$$

де $W_{\text{UV}}(s)$ – передавальна функція LED-матриці;

K_{UV} – коефіцієнт перетворення матриці в інтенсивність;

$T_{\text{ім}}$ – стала часу теплової інерції;

s – комплексна змінна Лапласа.

Передавальну функцію фотодатчика, знаходимо за формулою (2.5):

$$W_{\text{дат}}(s) = \frac{K_{\text{дат}}}{T_{\text{дат}}s + 1}, \quad (2.5)$$

де $W_{\text{дат}}(s)$ – передавальна функція фотодатчика;

$K_{\text{дат}}$ – коефіцієнт чутливості фотодатчика;

$T_{\text{дат}}$ – стала часу фотодатчика;

s – комплексна змінна Лапласа.

Функція всієї замкненої системи, має виглядати наступним чином:

$$W_{\text{САУ}}(s) = \frac{K_{\text{ПП}} \cdot K_{\text{Д}} \cdot K_{\text{UV}}}{(T_{\text{Д}}s + 1)(T_{\text{ім}}s + 1)(T_{\text{дат}} + 1) + K_{\text{ПП}}K_{\text{Д}}K_{\text{UV}}K_{\text{дат}}}. \quad (2.6)$$

Спрощена модель другого порядку виглядає:

$$\begin{aligned} W_{\text{САУ}}(s) &= \frac{K_{\text{ПП}}}{(T_{\text{ім}}s + 1)(T_{\text{дат}} + 1) + K_{\text{ПП}}K_{\text{дат}}} = \\ &= \frac{150}{1,12 \cdot 1,015 + 150 \cdot 0,9}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.4 Висновки до другого розділу

У цьому розділі були визначені та проаналізовані основні параметри фотополімерного 3D-друку, які безпосередньо впливають на міцність та якість виготовлених моделей. Детально розглянуто етапи підготовки цифрової моделі, процес створення профілю принтера та особливості налаштування інструментів у програмі Chitubox, що дозволяють контролювати геометричну точність та структурну цілісність друкованого виробу. Окрему увагу приділено вибору підтримок, параметрам експонування та підйому платформи, оскільки саме ці характеристики визначають рівномірність полімеризації смоли, точність формування шарів та адгезію моделі до платформи.

Проведено опис макету дослідницького стенда на базі LCD-принтера Anycubic Photon, технічні властивості якого забезпечують стабільність умов експерименту. Наявність додаткових вимірювальних засобів дозволяє фіксувати зміни інтенсивності УФ-випромінювання, контролювати температуру смоли та аналізувати формування шарів у реальному часі.

Також виконано аналіз системи автоматичного управління інтенсивності ультрафіолетового випромінювання, наведено її параметри та вимоги до якості регулювання. Це створює основу для подальшого моделювання, синтезу та оптимізації САУ, що дозволить підвищити точність експозиції та, відповідно, механічну міцність фотополімерних виробів.

3 ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЕКСПОНУВАННЯ ФОТОПОЛІМЕРНОЇ СМОЛИ НА ТВЕРДІСТЬ ВИРОБУ

3.1 Побудова плану експерименту

Виходячи з мети роботи, а саме розробка моделі, що дозволяє оцінювати міцність виробу та прогнозувати вплив параметрів фотополімерного 3D-друку на міцність, необхідно розробити серію дослідів, які б дозволили отримати реальну регресійно-кореляційну модель впливу параметрів експонування на механічні властивості і появу дефектів друку. Для цього будуть виконані такі напрацювання:

- визначити які параметри дійсно впливають на міцність виробу;
- визначити фотополімерні матеріали, на яких проводитиметься дослідження;
- визначити методи оцінки механічної міцності;
- розробити і описати модель тестового зразка для вимірювань;
- побудувати регресійно-кореляційну модель впливу параметрів експонування на міцність.

Виходячи з літературного та практичного аналізу, встановлено, що на міцність фотополімерних виробів найбільш істотно впливають наступні технологічні параметри експонування і матеріалу:

- час експонування шару від 7 с до 12 с, з кроком 1 с. цей час є рекомендованим для більшості видів фотополімерних смол;
- інтенсивність випромінювання шарів 1600 Лм та 2800 Лм;
- довжина хвилі випромінювання полімеризації 405 нм та 435 нм;
- тип фотополімеру смоли для дослідження буде використовуватися два типи для порівняння, а саме Anycubic Standart V2 та Elegoo Standard Resin,

рисунок 3.1. Саме ці смоли є найвживаними для використання у фотополімерному 3D друці.



а) а – фотополімерна смола Anycubic Standart V2; б) б – Elegoo Standard Resin

Рисунок 3.1 – Фотополімерні смоли для проведення дослідження

Задана повна факторна комбінація 24 серії експериментів параметрів на кожен тип фотополімеру. Базові параметру друку для всіх тестових зразків будуть наступні:

- висота шару експонування 0,1 мм;
- кількість базових шарів 7;
- час експонування базових шарів 20 с.

Для зручності вимірювань була обрана тестова модель куба з розмірами 20 мм × 20 мм × 20 мм, яка буде в себе включати різні контрольні елементи – отвори, пази та додаткові геометричні фігури рис. 3.2. Для дослідження використовувався фотополімерний 3D-принтер за технологією LCD Anycubic Photon Mono та тестові зразки.

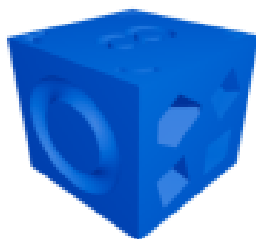


Рисунок 3.2 – Модель тестового зразка

Для вимірювань твердості фотополімерних виробів буде використовуватися ультразвуковий твердомір ТКМ-459М, рисунок 3.3.



Рисунок 3.3 – Ультразвуковий твердомір ТКМ-459М

В табл. 3.1 наведені основні його характеристики.

Таблиця 3.1 – Характеристики твердоміра ТКМ-459М

№	Параметр/характеристика	Значення/опис
1	Метод вимірювання	ультразвуковий (UCI – Ultrasonic Contact Impedance)
2	Діапазон вимірювань	– за Роквеллом: 20 – 70 HRC; – за Брінеллем: 90 – 460 HB; – за Віккерсом: 230 – 940 HV.
3	Похибка вимірювань	– Роквелл (HRC): ± 2 HRC; – Брінелл (HB): від ± 10 до ± 20 HB (залежно від діапазону); – Віккерс (HV): ± 15 до ± 20 HV (залежно від діапазону).
4	Пам'ять результатів	64 кБайт
5	Живлення	акумуляторне (є можливість використовувати батарейки)
6	Габарити	150 мм \times 80 мм \times 30 мм
7	Маса приладу	0,4 кг
8	Робочий температурний діапазон	від -10 °C до $+40$ °C

3.2 Проведення емпіричних досліджень

Виходячи з плану експерименту була проведена серія дослідів з 48 друкованих тестових зразків для двох видів фотополімерної смоли Anycubic Standard V2 та Elegoo Standard Resin. Таким чином виходить що для кожного фотополімеру було виготовлено по 24 тестових зразків з різними технологічними параметрами, а саме:

- час експонування шару від 7 с до 12 с, з кроком 1 с. цей час є рекомендованим для більшості видів фотополімерних смол;
- інтенсивність випромінювання шарів 1600 Лм та 2800 Лм;
- довжина хвилі випромінювання полімеризації 405 нм та 435 нм.

Твердість фотополімерних моделей, отриманих методом LCD друку, визначається енергією світлової дії, яку отримує кожен шар під час експонування. Енергійна залежність полімеризації встановлюється через добуток інтенсивності світла на час експонування, що у загальному вигляді описується рівнянням (3.1)

$$E = I \cdot t, \quad (3.1)$$

де E – енергія опромінення шару (умовні одиниці);

I – інтенсивність світла, Лм;

t – час експонування, с.

Чим більшою є поглинута енергія, тим вищим є ступінь полімеризації та, відповідно, твердість затверділої смоли. Проте збільшення енергії має характер насичення після досягнення певного рівня подальше збільшення часу або інтенсивності не дає пропорційного підвищення твердості.

На рис. 3.4 наведені тестові зразки з різними параметрами полімеризації фотополімерної смоли.



Рисунок 3.4 – Перевірені тестові зразки для дослідження

За допомогою ультразвукового твердоміра ТКМ-459М можливо визначити як сильно впливають параметри експонування моделі на її механічну міцність. Результати вимірювань наведені у Додаток Б.

За результатами дослідження вже можна судити що при збільшені часу експонування моделі збільшується її твердість рис. 3.5.

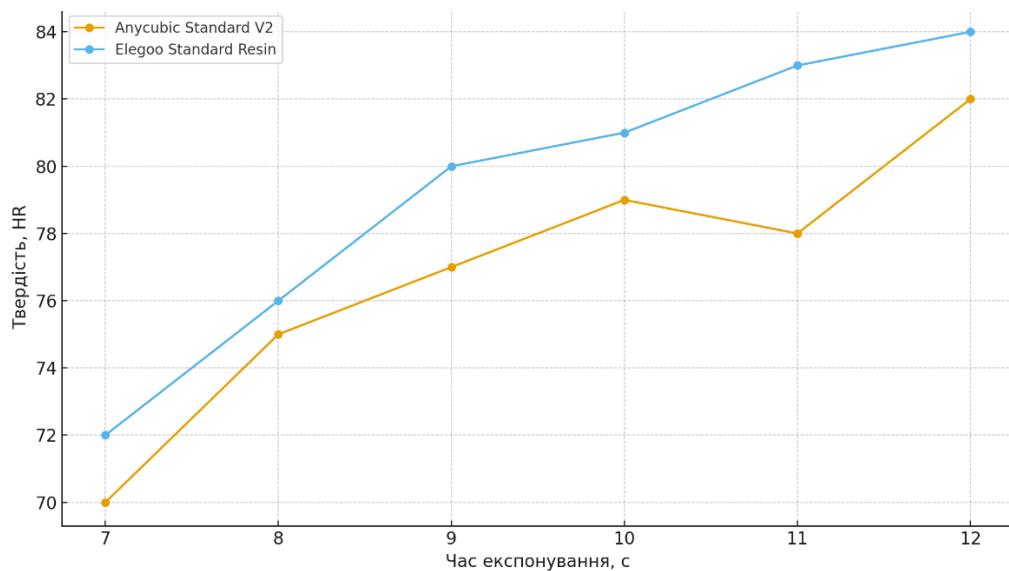


Рисунок 3.5 – Залежність твердості моделі від часу експонування

Залежність твердості моделі від енергії опромінення шару, наведено на рис. 3.6.

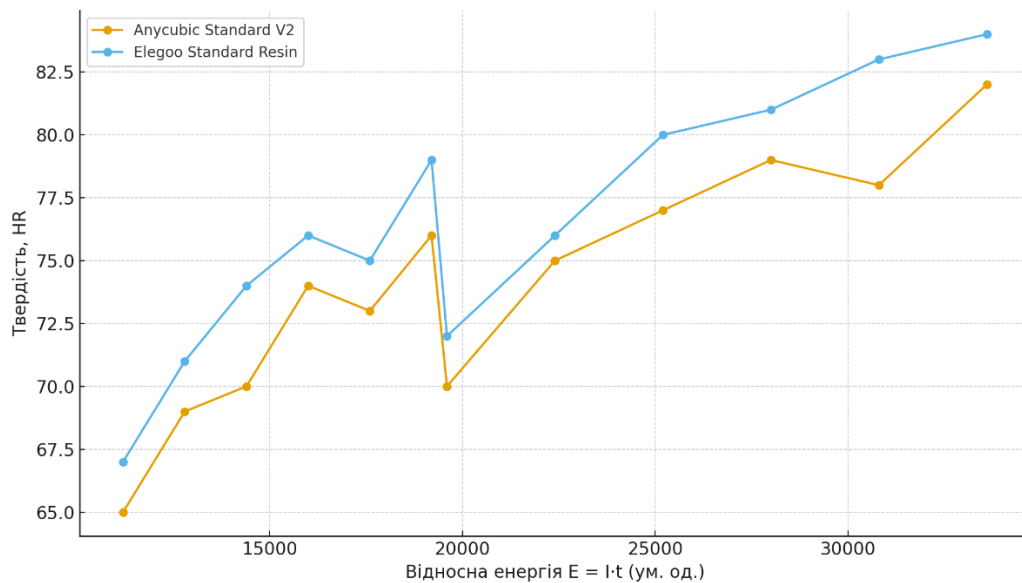


Рисунок 3.6 – Залежність твердості моделі від енергії опромінення шару

У ході дослідження параметрів експонування фотополімерних смол було встановлено, що одним із найважливіших чинників, які визначають твердість готових виробів, є тривалість опромінення. Для зразків із смол Anycubic Standard V2 та Elegoo Standard Resin чітко простежується закономірність: зі збільшенням часу експонування від 7 с до 12 с твердість поступово зростає. Це пов'язано з тим, що світло проникає глибше у шар матеріалу, активує більшу кількість фотоініціаторів і формує щільнішу полімерну структуру. Найбільш помітний приріст твердості спостерігається в межах від 7 с до 9 с, тоді як після 10 с процес майже досягає насичення. У цей момент подальше збільшення часу вже не дає суттєвих переваг і навіть може призвести до надмірної полімеризації, що негативно впливає на точність та якість моделі.

Не менш значущим фактором є інтенсивність світлового потоку. Порівняльний аналіз експонування при 1600 Лм та 2800 Лм показує, що збільшення інтенсивності забезпечує додатковий приріст твердості приблизно від 4 HR до 6 HR у тих самих умовах. Це пояснюється більшою кількістю фотонів, які за короткий час активують фотоініціатори у смолі та прискорюють

хімічні процеси полімеризації. Найбільший вплив високої інтенсивності проявляється при коротких експозиціях, коли саме потужність освітлення визначає швидкість переходу матеріалу з рідкого у тверду фазу.

Також важливу роль відіграє спектральний склад світла. Для сучасних фотополімерних смол найефективнішою є довжина хвилі 40 нм, оскільки більшість фотоініціаторів розраховані саме на цей діапазон. Порівняння експонування при 405 нм та 435 нм підтвердило, що перший варіант забезпечує твердість від 3 HR до 5 HR вищу за однакових умов. Випромінювання з довжиною хвилі 435 нм поглинається гірше, тому полімеризація проходить менш інтенсивно, що відображається у зниженні механічних властивостей.

Окремо слід зазначити вплив самого матеріалу. Експериментальні результати показали, що смола Elegoo Standard Resin забезпечує твердість приблизно від 2 HR до 3 HR вищу, ніж Anycubic Standard V2. Це свідчить про її дещо іншу хімічну формулу, ймовірно про більшу кількість твердих полімерних складових або більшу чутливість до світла, що забезпечує повнішу полімеризацію в аналогічних умовах.

Підсумовуючи, можна сказати, що твердість фотополімерних виробів визначається сукупною дією трьох основних параметрів експонування: часу, інтенсивності та довжини хвилі світла. Усі вони взаємопов'язані й спільно формують структуру полімеру під час тверднення матеріалу. Найкращі результати досягаються при поєднанні оптимального часу від 10 с до 12 с, підвищеної інтенсивності 2800 Лм та використання світла з довжиною хвилі 405 нм. Крім того, вибір конкретної смоли також впливає на кінцеві властивості виробу, тому його слід враховувати ще на етапі планування друку.

3.3 Побудова регресійно-кореляційної моделі

Для обробки даних та побудови регресійно-кореляційної моделі вводимо її у програмне забезпечення IBM SPSS Statistics, де проводиться базовий

аналіз параметрів експонування 3D-моделі. Дані введені у таблиці і наведені на рисунках 3.7 та 3.8.

	resin	time	intensity	wavelength	hardness		resin	time	intensity	wavelength	hardness
1	0	7	1600	405	65	1	1	7	1600	405	67
2	0	8	1600	405	69	2	1	8	1600	405	71
3	0	9	1600	405	70	3	1	9	1600	405	74
4	0	10	1600	405	74	4	1	10	1600	405	76
5	0	11	1600	405	73	5	1	11	1600	405	75
6	0	12	1600	405	76	6	1	12	1600	405	79
7	0	7	1600	435	60	7	1	7	1600	435	62
8	0	8	1600	435	64	8	1	8	1600	435	66
9	0	9	1600	435	67	9	1	9	1600	435	69
10	0	10	1600	435	66	10	1	10	1600	435	68
11	0	11	1600	435	70	11	1	11	1600	435	72
12	0	12	1600	435	69	12	1	12	1600	435	71
13	0	7	2800	405	70	13	1	7	2800	405	72
14	0	8	2800	405	75	14	1	8	2800	405	76
15	0	9	2800	405	77	15	1	9	2800	405	80
16	0	10	2800	405	79	16	1	10	2800	405	81
17	0	11	2800	405	78	17	1	11	2800	405	83
18	0	12	2800	405	82	18	1	12	2800	405	84
19	0	7	2800	435	65	19	1	7	2800	435	67
20	0	8	2800	435	67	20	1	8	2800	435	71
21	0	9	2800	435	72	21	1	9	2800	435	74
22	0	10	2800	435	70	22	1	10	2800	435	73
23	0	11	2800	435	75	23	1	11	2800	435	77
24	0	12	2800	435	74	24	1	12	2800	435	76

Рисунок 3.7 – Введені дані для обчислення та побудови регресійно-кореляційної моделі

	Name	Type	Width	Decimals	Label	Values	Missing	Columns	Align	Measure	Role
1	resin	Numeric	1	0	Тип смоли, Anycubic	None	None	8	Right	Nominal	Input
2	time	Numeric	2	0	Час експонування, с	None	None	8	Right	Nominal	Input
3	intensity	Numeric	4	0	Інтенсивність УФ, Лм	None	None	8	Right	Scale	Input
4	wavelength	Numeric	3	0	Довжина хвилі, нм	None	None	8	Right	Scale	Input
5	hardness	Numeric	2	0	Твердість, HR	None	None	8	Right	Scale	Input

а)

	Name	Type	Width	Decimals	Label	Values	Missing	Columns	Align	Measure	Role
1	resin	Numeric	1	0	Тип смоли, Elegoo	None	None	8	Right	Nominal	Input
2	time	Numeric	2	0	Час експонування, с	None	None	8	Right	Nominal	Input
3	intensity	Numeric	4	0	Інтенсивність УФ, Лм	None	None	8	Right	Scale	Input
4	wavelength	Numeric	3	0	Довжина хвилі, нм	None	None	8	Right	Scale	Input
5	hardness	Numeric	2	0	Твердість, HR	None	None	8	Right	Scale	Input

б)

а – смола від Anycubic; б – смола Elegoo

Рисунок 3.8 – Змінені значення та опис у таблицях для проведення подальших досліджень

За результатами обчислень у модулі Model Summary визначається значення коефіцієнта детермінації R для кожного типу філаменту, рис. 3.9.

Model Summary									
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	Change Statistics			
						F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	,965 ^a	,932	,922	1,499	,932	91,380	3	20	<,001

a. Predictors: (Constant), Довжина хвилі, нм, Інтенсивність УФ, Лм, Час експонування, с

а)

Model Summary									
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	Change Statistics			
						F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	,969 ^a	,939	,930	1,472	,939	102,564	3	20	<,001

a. Predictors: (Constant), Довжина хвилі, нм, Інтенсивність УФ, Лм, Час експонування, с

б)

а – Anycubic; б – Elagoо

Рисунок 3.9 – Зведення для моделі (Model Summary)

Коефіцієнт R відображає ступінь узгодженості між реальними значеннями залежної змінної та тими, які отримує модель, тобто показує, наскільки точно модель відтворює експериментальні дані. Має бути від 0 до 1. Чим ближче до 1 – тим сильніше модель пояснює залежність. Для смоли Anycubic це значення 0,965 а для Elagoо 0,969.

Показник R^2 (коефіцієнт детермінації) демонструє, яку частку варіації результуючої величини можна пояснити факторами, включеними до моделі. Наприклад, для смоли Anycubic модель пояснює 93,2% змінності, а для Elagoо – 93,9%.

У середньому скоригований R^2 для всіх досліджених матеріалів становить 92,6%, а середня стандартна похибка моделі — 1,486 що перевищує мінімальне прийнятне значення 0,5. Дані в усіх напрямках показують, що R^2 стабільно більший за 0,5.

Також дивимось на значення у таблиці ANOVA. Вона використовується для перевірки припущення про те, що реальний зв'язок між змінними відсутній (тобто $R^2 = 0$). Якщо значення Sig. менше 0,05, це означає, що модель є

статистично значущою і результати не випадкові. У випадку цього дослідження значення для обох використуваних смол $\epsilon < 0,001$ що також вказано на рис. 3.10.

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	615,706	3	205,235	91,380	<,001 ^b
	Residual	44,919	20	2,246		
	Total	660,625	23			

a. Dependent Variable: Твердість, HR
b. Predictors: (Constant), Довжина хвилі, нм, Інтенсивність УФ, Лм, Час експонування,
с

а)

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	666,667	3	222,222	102,564	<,001 ^b
	Residual	43,333	20	2,167		
	Total	710,000	23			

a. Dependent Variable: Твердість, HR
b. Predictors: (Constant), Довжина хвилі, нм, Інтенсивність УФ, Лм, Час експонування,
с

б)
а – Anycubic; б – Elagoо

Рисунок 3.10 – Результати розрахунків значимості “ANOVA”

Для оцінки впливу кожного окремого фактора застосовують стандартизовані коефіцієнти Beta. Вони відображають, наскільки зміниться результативний показник, якщо один із параметрів збільшити на одиницю. Це наочно показано на рис. 3.11.

Coefficients ^a											
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients Beta	t	Sig.	Correlations			Collinearity Statistics	
		B	Std. Error				Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
1	(Constant)	123,916	8,810		14,065	<,001					
	Час експонування, с	1,936	,179	,630	10,807	<,001	,630	,924	,630	1,000	1,000
	Інтенсивність УФ, Лм	,004	,001	,484	8,309	<,001	,484	,881	,484	1,000	1,000
	Довжина хвилі, нм	-,192	,020	-,548	-9,398	<,001	-,548	-,903	-,548	1,000	1,000

a. Dependent Variable: Твердість, HR

а)

Coefficients ^a											
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients Beta	t	Sig.	Correlations			Collinearity Statistics	
		B	Std. Error				Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
1	(Constant)	128,722	8,653		14,876	<,001					
	Час експонування, с	2,000	,176	,628	11,368	<,001	,628	,931	,628	1,000	1,000
	Інтенсивність УФ, Лм	,004	,001	,490	8,875	<,001	,490	,893	,490	1,000	1,000
	Довжина хвилі, нм	-,200	,020	-,552	-9,985	<,001	-,552	-,913	-,552	1,000	1,000

a. Dependent Variable: Твердість, HR

б)

а – Anycubic; б – Elagoo

Рисунок 3.11 – Значення «Standardized Coefficients Beta»

Значення коефіцієнтів Beta можна інтерпретувати як кореляційні коефіцієнти. Ці коефіцієнти можуть бути підставлені в рівняння лінійної регресії вказаної нижче

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (3.1)$$

де Y – фактор міцності виробу;

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

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

На прикладі розрахуємо модель для параметру hardness смоли Elagoo, значення перенесені у таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення B для смоли Elagoo

Назва	Значення
Constant	128,722
Час експонування (time)	2
Інтенсивність УФ (intensity)	0,004
Довжина хвилі (wavelength)	-0,200

Підставивши значення у формулу (3.1) отримаємо:

$$Y=128,7+2 \cdot T+0,004 \cdot I-0,2 \cdot W. \quad (3.2)$$

В показує, на скільки зміниться Y при зміні X на 1 одиницю, якщо інші змінні фіксовані. Також з рисунку 3.11 значення Sig. усіх коефіцієнтів $<0,001$ отож усі вони суттєво впливають на міцність виробу.

На рисунку 3.12 наведені результати кореляції Пірсона та перевірки на мультиколінеарність.

Correlations						
		Твердість, HR	Час експонування, с	Інтенсивність УФ, Лм	Довжина хвилі, нм	Тип смоли, Anycubic
Pearson Correlation	Твердість, HR	1,000	,630	,484	-,548	.
	Час експонування, с	,630	1,000	,000	,000	.
	Інтенсивність УФ, Лм	,484	,000	1,000	,000	.
	Довжина хвилі, нм	-,548	,000	,000	1,000	.
	Тип смоли, Anycubic	.	.	.	.	1,000
Sig. (1-tailed)	Твердість, HR	.	<,001	,008	,003	<,001
	Час експонування, с	,000	.	,500	,500	,000
	Інтенсивність УФ, Лм	,008	,500	.	,500	,000
	Довжина хвилі, нм	,003	,500	,500	.	,000
	Тип смоли, Anycubic	,000	,000	,000	,000	.
N	Твердість, HR	24	24	24	24	24
	Час експонування, с	24	24	24	24	24
	Інтенсивність УФ, Лм	24	24	24	24	24
	Довжина хвилі, нм	24	24	24	24	24
	Тип смоли, Anycubic	24	24	24	24	24

а)

Correlations						
		Твердість, HR	Час експонування, с	Інтенсивність УФ, Лм	Довжина хвилі, нм	Тип смоли, Elegoo
Pearson Correlation	Твердість, HR	1,000	,628	,490	-,552	.
	Час експонування, с	,628	1,000	,000	,000	.
	Інтенсивність УФ, Лм	,490	,000	1,000	,000	.
	Довжина хвилі, нм	-,552	,000	,000	1,000	.
	Тип смоли, Elegoo	.	.	.	.	1,000
Sig. (1-tailed)	Твердість, HR	.	<,001	,008	,003	<,001
	Час експонування, с	,001	.	,500	,500	,000
	Інтенсивність УФ, Лм	,008	,500	.	,500	,000
	Довжина хвилі, нм	,003	,500	,500	.	,000
	Тип смоли, Elegoo	,000	,000	,000	,000	.
N	Твердість, HR	24	24	24	24	24
	Час експонування, с	24	24	24	24	24
	Інтенсивність УФ, Лм	24	24	24	24	24
	Довжина хвилі, нм	24	24	24	24	24
	Тип смоли, Elegoo	24	24	24	24	24

б)

а – Anycubic; б – Elegoo

Рисунок 3.12 – Кореляція Пірсона

Зв'язок між твердістю (HR) та параметрами друку на прикладі смоли Anycubic:

- час експонування: 0,630 (чим довше опромінення тим твердіший матеріал);
- інтенсивність УФ: 0,484 (зі збільшенням інтенсивності УФ-світла твердість зростає, але зв'язок слабший, ніж з часом);
- довжина хвилі: -0,548 (при переході від 405 до 435 нм твердість зменшується).

Найбільше на твердість впливає час експонування, далі інтенсивність. Перехід на більшу довжину хвилі (435 нм) знижує твердість.

У всіх параметрів моделі кореляції між самими незалежними змінними (мультиколінеарність) вказано значення 0 що вказує на те що параметри не пов'язані, отож у них немає ризику мультиколінеарності.

3.4 Висновки до третього розділу

У рамках проведеного дослідження було розроблено та реалізовано повний експериментальний підхід для визначення впливу параметрів експонування фотополімерної смоли на твердість виробів, виготовлених методом LCD-друку. На основі аналізу літературних джерел та практичних характеристик фотополімерних матеріалів сформовано план повного факторного експерименту, що охоплює основні технологічні змінні: час експонування, інтенсивність УФ-випромінення та довжину хвилі світла. Для дослідження обрано два найбільш поширені на ринку матеріали – Anycubic Standard V2 та Elegoo Standard Resin, що дозволило оцінити залежності як у межах однієї смоли, так і при порівнянні матеріалів між собою.

Проведення 48 експериментальних друків із варіацією трьох ключових параметрів показало, що твірність фотополімерних виробів визначається сумарною енергією опромінення шару, яка прямо залежить від добутку часу експозиції та інтенсивності світлового потоку. Найбільш виражений вплив на

твердість має час експонування, який забезпечує найбільший приріст полімеризації в діапазоні 7–10 с, після чого спостерігається ефект насичення. Інтенсивність світла також істотно підсилює процес тверднення, особливо при коротких експозиціях, тоді як довжина хвилі визначає ефективність активації фотоініціаторів: випромінення 405 нм забезпечує значно кращу твердість порівняно з 435 нм.

Порівняння двох типів фотополімерів показало, що Elegoo Standard Resin демонструє вищу твердість за аналогічних умов друку, що пояснюється її більшою світлочутливістю або особливостями хімічного складу. Проте характер впливу параметрів експонування на обидві смоли залишається подібним, що підтверджує універсальність виявлених закономірностей.

Побудована регресійно-кореляційна модель засвідчила високу точність опису експериментальних даних. Значення коефіцієнта детермінації R^2 перебувають у межах 0,93–0,94, що свідчить про те, що понад 90% варіації твердості можна пояснити обраними технологічними факторами. Результати ANOVA підтвердили статистичну значущість моделей (Sig. < 0,001). Стандартизовані коефіцієнти Beta показали, що найсильнішим фактором є час експонування, другим за важливістю — інтенсивність, тоді як довжина хвилі чинить зворотний вплив. Аналіз мультиколінеарності продемонстрував відсутність кореляцій між незалежними змінними, що гарантує коректність регресійної моделі.

Загалом результати дослідження підтверджують, що механічні властивості фотополімерних виробів можуть бути ефективно передбачені та керовані шляхом оптимізації параметрів експонування. Найвищі значення твердості забезпечує поєднання часу експонування 10–12 с, підвищеної інтенсивності 2800 Лм та довжини хвилі 405 нм. Отримана регресійно-кореляційна модель може бути використана для прогнозування міцності виробів та подальшої оптимізації процесу 3D-друку у практичних задачах.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД ЧАС РОБОТИ З ФОТОПОЛІМЕРНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

4.1 Правила безпеки під час роботи з фотополімерними матеріалами

Робота з фотополімерними матеріалами у технологіях SLA, DLP та LCD-друку належить до категорії процесів з підвищеним рівнем хімічної небезпеки. Фотополімери містять мономерні, акрилатні, метакрилатні, стабілізаторні та інші реакційно-активні органічні сполуки, що відповідно до ДСанПіН 2.2.4-171-10 класифікуються як речовини, здатні викликати подразнення шкіри й слизових оболонок, сенсibiliзацію та системні токсичні ефекти. У зв'язку з цим законодавство України з охорони праці вимагає дотримання комплексу технічних, санітарно-гігієнічних та організаційних заходів під час роботи з такими матеріалами.

Основою безпечної експлуатації фотополімерного обладнання є правильна організація робочого середовища. Відповідно до вимог ДБН В.2.5-67:2013 “Опалення, вентиляція та кондиціонування”, робоче приміщення повинно бути обладнане припливно-витяжною вентиляцією, яка забезпечує необхідний повітрообмін та запобігає накопиченню шкідливих парів мономерів і органічних розчинників. Особливо важливим є облаштування локальної витяжки у зоні друку та очищення моделей, оскільки за нормами ДСН 3.3.6.042-99 концентрація органічних летких речовин у повітрі не повинна перевищувати гранично допустимих рівнів.

Вимоги до освітлення регламентуються ДБН В.2.5-28:2018, згідно з яким рівномірне і достатнє за інтенсивністю освітлення є обов'язковою умовою для виконання робіт, пов'язаних із дрібними деталями та хімічними речовинами. Погане або недостатнє освітлення може підвищувати ризик помилок, випадкового контакту зі смолою або неправильної взаємодії з УФ-обладнанням. Працівник допускається до роботи лише після проведення інструктажу згідно з

НПАОП 0.00-4.12-05 “Типове положення про порядок проведення навчання та перевірки знань з питань охорони праці”. Він повинен бути ознайомлений із паспортами безпеки матеріалів (MSDS), які визначають токсикологічні властивості фотополімеру, вимоги до зберігання, захисту та утилізації.

Засоби індивідуального захисту є обов’язковими при роботі з фотополімерною смолою. Згідно з нормами НПАОП 0.00-3.03-18 працівник має бути забезпечений нітриловими рукавичками, захисними окулярами, лабораторним халатом або фартухом. За умов недостатньої вентиляції використовується респіратор типу FFP2 або FFP3 відповідно до вимог ДСТУ EN 149:2017. Використання латексних рукавичок не допускається, оскільки вони не забезпечують бар’єрного захисту від акрилатів.

Під час експлуатації фотополімерного принтера слід дотримуватися вимог електробезпеки, визначених у Правилах безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.21-98). Перед роботою перевіряється цілісність електропроводки, наявність заземлення та відсутність оголених струмопровідних частин. Забороняється самовільне втручання у конструкцію обладнання, особливо в частину, де знаходиться джерело ультрафіолетового випромінювання.

Під час взаємодії зі смолою необхідно уникати її контакту зі шкірою та очима. Всі операції, такі як наливання смоли, діставання надрукованих деталей чи перенесення моделей до промивальної ванни, виконуються лише з використанням інструментів. Відкривати кришку принтера у момент роботи УФ-матриці забороняється згідно з вимогами ДСТУ EN 62471:2017, який встановлює норми безпеки щодо впливу оптичного випромінювання на людину.

Етап постобробки, що включає промивання моделей у розчинниках, регламентується вимогами пожежної безпеки, визначеними у НПАОП 0.00-1.31-99 “Правила пожежної безпеки в Україні”. Ізопропіловий спирт належить до легкозаймистих рідин, а тому його використання повинно здійснюватися у герметичних ємностях, на відстані від нагрівальних приладів та відкритих

джерел вогню.

Фотополімерні відходи підлягають спеціальній утилізації відповідно до вимог Закону України “Про відходи” та ДСТУ 4462:2005. Заборонено зливати смолу в каналізацію або викидати забруднені матеріали у побутові контейнери. Перед утилізацією смола повинна бути полімеризована під дією УФ-випромінювання до твердого стану, що мінімізує її токсичність та запобігає забрудненню навколишнього середовища.

Після завершення роботи принтер вимикається від мережі, робоча поверхня очищується від залишків смоли, а всі ємності щільно закриваються. Працівник повинен вимити руки з милом та перевірити, чи немає відкритих джерел хімічних випаровувань. У разі потрапляння смоли на шкіру або слизові оболонки слід діяти відповідно до вимог ДСанПіН 2.2.4-171-10, тобто негайно промити уражену ділянку великою кількістю води та при необхідності звернутися за медичною допомогою.

Таким чином, регламентована нормативними актами система заходів охорони праці забезпечує комплексний захист працівника від хімічних, фізичних та пожежонебезпечних факторів, що супроводжують роботу з фотополімерами.

4.2 Висновки до четвертого розділу

У цьому розділі було проаналізовано основні вимоги охорони праці, які регламентують процес роботи з фотополімерними матеріалами та обладнанням для 3D-друку. Розгляд чинних нормативних документів ДБН В.2.5-67:2013, НПАОП 0.00-4.12-05, ДСанПіН 2.2.4-171-10, НПАОП 0.00-1.31-99 та інших підтверджує, що безпечне виконання технологічних операцій є можливим лише за умови суворого дотримання встановлених технічних, санітарно-гігієнічних, організаційних та протипожежних вимог.

Забезпечення ефективної вентиляції, правильного освітлення, технічної справності обладнання, а також використання засобів індивідуального захисту

дає змогу істотно зменшити вплив небезпечних факторів. Дотримання норм щодо зберігання, використання та утилізації фотополімерних матеріалів виключає можливість виникнення аварійних ситуацій та негативного впливу токсичних речовин на здоров'я працівників.

Проведений огляд свідчить, що дотримання положень національних стандартів та нормативів не лише забезпечує безпечність роботи персоналу, а й сприяє стабільності технологічного процесу, підвищенню якості продукції та відповідності діяльності вимогам законодавства України.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено комплексне дослідження технологічних параметрів LCD 3D-друку та їхнього впливу на твердість фотополімерних матеріалів після полімеризації. Робота охоплює аналіз предметної області, вивчення фізико-хімічних властивостей фотополімерів, експериментальну оцінку впливу параметрів експозиції на механічні характеристики виробів, а також побудову регресійно-кореляційної моделі для прогнозування кінцевих властивостей матеріалу.

У першому розділі було розглянуто принципи роботи технології LCD-друку, властивості сучасних фотополімерних смол, особливості формування моделі під дією світлового випромінювання та ключові параметри процесу: час експозиції, інтенсивність світла, довжину хвилі та вплив типу смоли. Також було проаналізовано типові дефекти, що виникають через недополімеризацію або перевитримку, та визначено їхній вплив на міцнісні характеристики. Це дозволило сформувати теоретичну базу для проведення подальших експериментів.

У другому розділі був проведений аналіз фізичних процесів, що супроводжують фотополімеризацію: поглинання світла, механізм утворення полімерної решітки, вплив спектральних характеристик джерела випромінювання та впливу товщини шару на рівень затвердіння. Особливу увагу приділено впливу часу експозиції та інтенсивності LED-матриці на глибину полімеризації та рівномірність затвердіння моделі. Розглянуто методи вимірювання твердості та оцінки якості полімеризованих зразків. Ці дані дали змогу сформулювати гіпотези щодо взаємозв'язків між параметрами друку та твердістю матеріалу.

У третьому розділі проведено експериментальні дослідження для двох типів фотополімерів з варіацією часу експозиції, інтенсивності освітлення та довжини хвилі світла. Зібрані дані були опрацьовані в IBM SPSS Statistics, на основі чого побудовано багатofакторну лінійну регресійну модель. Модель

показала високий рівень точності, а саме понад 96%, що підтверджує сильний вплив досліджуваних параметрів на твердість матеріалу. Аналіз ANOVA продемонстрував статистичну значущість моделі, а коефіцієнти Beta дозволили визначити внесок кожного фактора. Було встановлено, що інтенсивність світла та час експозиції мають найбільший вплив на твердість, а різні фотополімери демонструють відмінну чутливість до спектральних характеристик LED-матриці.

Створена модель дозволяє прогнозувати рівень твердості залежно від обраних технологічних параметрів і може бути використана для оптимізації процесу друку та зменшення кількості пробних відбитків.

Отримані результати можуть бути використані під час розроблення технологічних карт, модернізації режимів полімеризації, налаштування 3D-принтерів, а також у подальших дослідженнях фотополімерних композицій та автоматизації контролю якості LCD-друку.

Результати дослідження також узгоджуються з цілями сталого розвитку: ЦСР 4 “Якісна освіта”, ЦСР 9 “Промисловість, інновації та інфраструктура” та ЦСР 12 “Відповідальне споживання та виробництво” а саме п.12.4.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2024. 57 с.
3. Виробництво & Мехатронні Системи 2025: матеріали ІХ-ої Міжнародної конференції, Харків, 25-26 жовтня 2025 р.: тези доповідей / [редкол. І.Ш. Невлюдов (відповідальний редактор)].-Харків: [електронний друк], 2025. – 115 с.
4. Положення про організацію проведення практики здобувачів вищої освіти Харківського національного університету радіоелектроніки [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 03 травня 2019 р. No 222. – Режим доступу :<https://nure.ua/wp-content/uploads/222-vid-03.05.2019-pro-vvedennja-vdijurishennja-vchenoi-radi-universitetu.pdf>
5. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 02 лютого 2021 р. No50. – Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-akademichnudobrochesnist.pdf
6. Положення про організацію освітнього процесу у ХНУРЕ [електронний ресурс]:https://nure.ua/wpcontent/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennjaproorganizaciju-osvitnogo-procesu-v-hnure-2023.pdf
7. Стандарт вищої освіти за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» для другого (магістерського) рівня вищої освіти, затверджений наказом МОН України No 1022 від 10.08.2020р. «Про

затвердження стандарту вищої освіти за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології для другого (магістерського) рівня вищої освіти»
 Режим доступу: [www/ URL: https://mon.gov.ua/staticobjects/mon/sites/1/vishchaosvita/zatverdzeni%20standarty/2020/08/10/151-avtomatizatsiya-ta-kit-magistr.pdf](http://www.mon.gov.ua/staticobjects/mon/sites/1/vishchaosvita/zatverdzeni%20standarty/2020/08/10/151-avtomatizatsiya-ta-kit-magistr.pdf)

8. Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР) [Електроний ресурс]/– Режим доступу: [www/ URL: https://nure.ua/department/kafedra-komp-yuterno-integrovanih-tehnologiy-avtomatizatsiyi-ta-mehatroniki-kitam](http://www.nure.ua/department/kafedra-komp-yuterno-integrovanih-tehnologiy-avtomatizatsiyi-ta-mehatroniki-kitam) – 10.10.2025 р. – Загол. з екрану.

9. 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.

10. 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>.

11. Jabil Circuit Ukraine. Uzhgorod. [Type of medium]. Available: <https://www.jabil.com/contact/locations/uzhgorod.html>.

12. 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>.

13. 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>.

14. 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>.

15. Cathleen Shamieh (2019). *Electronics For Dummies*. John Wiley & Sons, 2019, Pages 432 p. ISBN: 1119675596, 9781119675594.

16. Shamkhalichenar, H., J. Bueche C., Choi, J.W.; Printed Circuit Board (PCB) Technology for Electrochemical Sensors and Sensing Platforms. *Electrical and Electro-Optical Biosensors. Biosensors* 2020, 10(11), 159; <https://doi.org/10.3390/bios10110159>.

17. Huijun Gao, Zhengkai Li, Xinghu Yu, Jianbin Qiu; Hierarchical Multiobjective Heuristic for PCB Assembly Optimization in a Beam-Head Surface Mounter. *IEEE Transactions on Cybernetics*. Volume: 52, Issue: 7, July 2022, Page(s): 6911 – 6924p. DOI: 10.1109/TCYB.2020.3040788.

18. Zhichao Liu, Baida Qu. Machine vision based online detection of PCB defect. *Microprocessors and Microsystems*. Volume 82, April 2021, <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103807>.

19. Quanyin Tan, Lili Liu, Miao Yu, Jinhui Li. An innovative method of recycling metals in printed circuit board (PCB) using solutions from PCB production. *Journal of Hazardous Materials*. Volume 390, 15 May 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121892>.

20. Dedi Suwandi¹, Rofan Aziz, Agus Sifa, Emin Haris, Jos Istiyanto, Yudan Whulanza. Dry film photoresist application to a printed circuit board (PCB) using a maskless photolithography method. *International Journal of Technology* 10(5): 1033-1041. *IJTech* (2019). ISSN 2086-9614. <https://doi.org/10.31224/osf.io/27f49>

21. Zhao, J., Wu, Y., Xue, C., Yang, S., Wang, L., Zhu, F., Zhu, Z., Liu, B., Wang, Y., Tai, R., 2017. Fabrication of High Aspect Ratio Nanoscale Periodic Structures by the Soft X-ray Interference Lithography. *Microelectronic Engineering*, Volume 170, pp. 49–53.

23. Kim, K.Y.; Chang, H.; Lee, W.D.; Cai, Y.F.; Chen, Y.J. The influence of blood glucose meter resistance variation on the performance of a biosensor with a gold-coated circuit board. *J. Sens.* 2019, 2019, 5948182.

24. Chao Sun, Roman Mikhaylov, Yongqing Fu, Fangda Wu, Hanlin Wang, Xichen Yuan, Zhihua Xie, Dongfang Liang, Zhenlin Wu, Xin Yang. Flexible Printed Circuit Board as Novel Electrodes for Acoustofluidic Devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Volume: 68, Issue: 1, January 2021, Page(s): 393 – 398p.

<https://doi.org/10.1109/TED.2020.3039760>.

25. Kearney, D. J., Kicin, S., Bianda, E., & Krivda, A. (2017). PCB embedded semiconductors for low-voltage power electronic applications. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 7, 387–395. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2017.2651646>.

26. Qi, Z., Pei, Y., Wang, L., Yang, Q., & Wang, K. (2022). A highly integrated PCB embedded GaN full-bridge module with ultralow parasitic inductance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37, 4161–4173. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3128694>.

27. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Разумов-Фризюк Є.А. Аналіз технології лазерного експонування друкованих плат // *Технологія приладобудування*. 2020, № 1. 56 – 59 с.

28. Nevliudov I., Bliznyuk D., Gurin D., Nikitin D., Razumov-Frizyuk E., Strelets R. Technology of laser exposure of topology of printed boards // №27 2021 *International independent scientific journal VOL. 1. 27 – 32 с.*