

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

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

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНИХ
ПОКАЗНИКІВ ФОТОПОЛІМЕРНОГО 3D ДРУКУ В
АВТОМАТИЗОВАНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

[Монографія]

Харків

2026

Рекомендовано до друку Науково-технічною радою Харківського національного університету радіоелектроніки (протокол №6 від 21.05.2026)

Рецензенти:

Борщов Вячеслав Миколайович

Перший заступник генерального директора-головний конструктор ТОВ «Наково-виробниче підприємство «ЛТУ», Заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, Лауреат Премії Кабінету Міністрів України за розроблення та впровадження інноваційних технологій, д.т.н., професор.

Бояринцев Андрій Юрійович

Заступник директора Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України, д.т.н., професор.

Євсєєв Владислав В'ячеславович

д.т.н., професор, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії (КІТАРБІ), ХНУРЕ

Технологічне забезпечення якісних показників фотополімерного 3D друку в автоматизованому виробництві: монографія / І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипенко, Є.А. Разумов-Фризюк, Д.О. Нікітін, Р.Є. Стрілець, Д.В. Гурін – ХАРКІВ: Видавництво..., 2026. – 211 с.

У монографії викладено результати дослідження та розробки методів підвищення якісних показників, що висуваються до моделей, що надруковані за допомоги фотополімерного друку за рахунок вдосконалення технологічних процесів друку та розробки й удосконалення методів контролю процесу фотополімерного 3D-друку.

Наведено модель впливу технологічних параметрів на показники якості друкованої деталі, вплив технологічних параметрів фотополімерного 3D-друку на параметри якості виробів з використанням тестових моделей. Розроблено математичну модель залежності відхилення розмірів від технологічних параметрів.

Представлено нові конструктивно-технічні рішення для контролю відриву шару фотополімера від фторопластової плівки в процесі фотополімерного друку. Викладено результати експериментальних досліджень із визначення сили відриву від часу експонування та інших технологічних параметрів.

Розроблено автоматизованої системи керування фотополімерним друком.

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

ISBN: 978-617-8742-07-2

DOI: 10.30837/978-617-8742-07-2

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

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ФОТОПОЛІМЕРНОГО 3D-ДРУКУ	9
1.1 Огляд технологій фотополімерного 3D-друку.....	9
1.2 Фотополімерні смоли, які використовуються у фотополімерному 3D-друці та особливості їх полімеризації.....	31
1.3 Фотополімерна технологія 3D-друку у виробництві робототехнічних систем та радіоелектроніки	42
1.4 Автоматизована система керування фотополімерного друку	48
1.5 Технологічний процес перемішування фотополімерного друку	54
1.6 Аналіз основних технологічних параметрів слайсерів для фотополімерного друку	60
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФОТОПОЛІМЕРНОГО 3D-ДРУКУ	75
2.1 Дослідження впливу технологічних параметрів фотополімерного друку якісні показники друкованої деталі.....	75
2.2 Дослідження впливу технологічних параметрів фотополімерного 3D-друку на параметри якості виробів з використанням тестових моделей ..	82
2.3 Розробка математичної моделі залежності відхилення розмірів від технологічних параметрів	103
3 РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ФОТОПОЛІМЕРНИМ 3D-ДРУКОМ	116
3.1 Загальний процес керування фотополімерним 3D-друком	116
3.2 Математична модель автоматизованого керування процесом фотополімерного 3D-друку за силою відриву фотополімеру від плівки	128

3.3 Імітаційне дослідження математичної моделі керування технологічним процесом фотополімерного друку за силою відриву фотополімеру від плівки.....	134
3.4 Моделювання автоматизованої системи керування процесом фотополімерного 3D-друку	137
4 ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ФОТОПОЛІМЕРНИМ 3D-ДРУКОМ	152
4.1 Проведення експериментального дослідження для визначення сили відриву	152
4.2 Розробка устаткування для практичного дослідження сили відриву моделі від плівки	158
ВИСНОВКИ.....	183
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	185
ДОДАТОК А.....	197
ДОДАТОК Б	205
ДОДАТОК В.....	207
ДОДАТОК Г	209
ДОДАТОК Ґ.....	210

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

КГП – кульково-гвинтовою передачею;

ПЗ – програмне забезпечення;

САК – система автоматичного керування;

СКТП – системи керування технологічними процесами;

ТП – технологічний процес;

УФ – ультрафіолетове випромінювання;

УЗ – ультразвук;

ЧПУ – числове програмне управління;

3D – 3-Dimensional;

DLP – direct light processing;

EBM – electronic beam melting;

FDM – fused deposition modeling;

FFF – fused filament fabrication;

GPIO – general-purpose input/output;

LCD – liquid crystal display;

PID – proportional, integral, derivative;

SLA – stereolithography;

SLS – selective laser sintering.

ВСТУП

На сьогодні фотополімерний 3D-друк набуває широкого розповсюдження у різних сферах виробництва. Це обумовлено стрімким розвитком адитивних технологій з розширенням сфер їх застосування. Фотополімерний 3D-друк забезпечує високу точність виготовлених деталей, тим самим роблячи її використання доцільним у великій кількості різноманітних сферах використання.

Однією зі сфер використання є використання у Industry 4.0. Використання фотополімерного 3D-друку забезпечується його здатністю до інтеграції у цифрові виробничі екосистеми, що забезпечують новий рівень гнучкості та автоматизації[1-5].

Використання фотополімерного друку неможливе без визначення концепції цифрового проектування та кіберфізичних систем, які є основою Industry 4.0. Таким чином фотополімерний друк дозволяє реалізувати повний цикл розробки виробу від створення моделі до виготовлення деталі без використання традиційних етапів виробництва.

Висока точність та повторюваність результатів з можливою гнучкістю виробництва дозволила запровадити цю технологію на різних етапах виробництва деталей та компонентів. А широка номенклатура матеріалів, що мають різноманітні фізичні властивості забезпечило використання цієї технології в нетрадиційних виробництвах, що раніше потребували складного та довгого шляху до виробництва деталі.

Одним із важливих завдань, що допоможуть вдосконалити технологію є процес її автоматизації та контролю для збереження встановлених якісних показників.

Стандартні 3D-принтери не мають системи зворотного зв'язку і вимагають оптичного контролю з боку оператора. Але багато технологій 3D-друку через свої особливості не дають змоги візуального контролю процесу виготовлення. Наприклад: SLA, DLP, LCD, SLA, SLM, PolyJet, MJ та багато інших. Таким

чином розробка системи автоматизації процесу фотополімерного 3D-друку та забезпечення якісних показників є вкрай важливою задачею[6-7].

Метою роботи є забезпечення якісних показників фотополімерного 3D-друку за рахунок розробки методів та моделей контролю фотополімерного друку, тим самим підвищуючи продуктивність та автоматизацію виробництва зі зменшенням кількості дефектів технології фотополімерного 3D-друку.

Для досягнення потрібної мети необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати технології фотополімерного 3D-друку та їх особливості;
- визначити види дефектів, що виникають в процесі фотополімерного 3D-друку та технологічні параметри, що впливають на їх появу;
- проаналізувати фотополімерний 3D-друк як об'єкт керування в рамках теорії автоматичного управління;
- розробити модель впливу технологічних параметрів на параметри якості фотополімерного 3D-друку, а саме на відхилення розмірів від заданих за допомоги багатфакторного регресійного аналізу;
- розробити структурну та математичну модель системи керування процесом фотополімерного 3D-друку в рамках теорії автоматичного управління;
- розробити метод автоматизованого керування фотополімерним 3D-друком в реальному часу за силою відриву експанованого фотополімера від плівки на основі математичної моделі;
- розробити програмне забезпечення для комп'ютерного моделювання процесу відриву виробу від плівки на основі математичної моделі;
- розробити узагальнену модель системи автоматизованого керування процесом фотополімерного 3D-друку та провести її експериментальну верифікацію з використанням методів теорії автоматичного керування;
- розробити комплекс математичних моделей, що описують вплив температури на процес відриву виробу від плівки, динаміку системи керування переміщенням платформи та кінетику полімеризації під дією ультрафіолетового випромінювання.

- здійснити верифікацію та оцінку адекватності запропонованих моделей шляхом проведення багатофакторного експерименту з ідентифікацією параметрів математичної моделі для подальшої реалізації системи керування;
- розробка програмного забезпечення та макету для контролю фотополімерного 3D-друку у реальному часі, що використовуватиме метод порівняння теоретичних (прогнозованих) зусиль відриву кожного шару виробу з даними, що отримані з датчиків, що дозволяє перевірити відповідність площини кожного шару на наявність браку у виробі.

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ФОТОПОЛІМЕРНОГО 3D-ДРУКУ

1.1 Огляд технологій фотополімерного 3D-друку

У сьогоденні 3D-друк використовується у багатьох галузях науки, промисловості, медицини та будівництва. Використання 3D-друку дозволяє оминати дорогівартісні операції прототипування, через що підвищується продуктивність процесу розробки та виробництва на ранніх етапах, тим самим зменшуючи витрати на розробку продукції. Адитивні технології, до яких відноситься і 3D-друк, дозволяють створювати повноцінні вироби, використовуючи велику кількість матеріалів з різними фізичними властивостями, розширюючи сферу їх можливого застосування.

На сьогодні є багато різновидів технологій 3D-друку та 3D-принтерів, які побудовані на їх основі. Кожна технологія може мати різноманітні цілі використання в різних галузях промисловості, використовуючи переваги власної технології перед іншими технологіями, такими як ціна матеріалу, швидкість друку, висока точність, та ін. Найбільш поширеними технологіями 3D-друку в наш час є наступні:

– FDM – технологія, яка використовує пошарове нанесення розігрітого термопластичного полімеру на робочий стіл згідно комп'ютерної моделі. Ця технологія дозволяє друкувати різні за розміром моделі, які залежать від робочої області. Зазвичай принтери мають робочу область від 180x180 мм до 1500x1500мм. Швидкість друку таких принтерів залежить від сопла, через який проходить пластик(діаметр сопла від 0.1 до 1.5 мм), чим більший діаметр сопла, тим більша швидкість екструзії та ширина лінії. Також швидкість залежить від кінематики принтера. На сьогодні є багато різних кінематик, які відрізняються способом побудови та швидкостями, на яких може переміщуватися екструдер. Основною кінематикою на сьогодні є CoreXY. Ця технологія набула широкого розповсюдження через низьку ціну матеріалу, самих принтерів та відсутність високих вимог до кваліфікації персоналу. Недоліками цієї технології є велика

шорсткість поверхні та невелика роздільна здатність по осі Z, яка становить мінімум 50 мкм і обмежена властивостями філамента (рис. 1.1);[8-9]

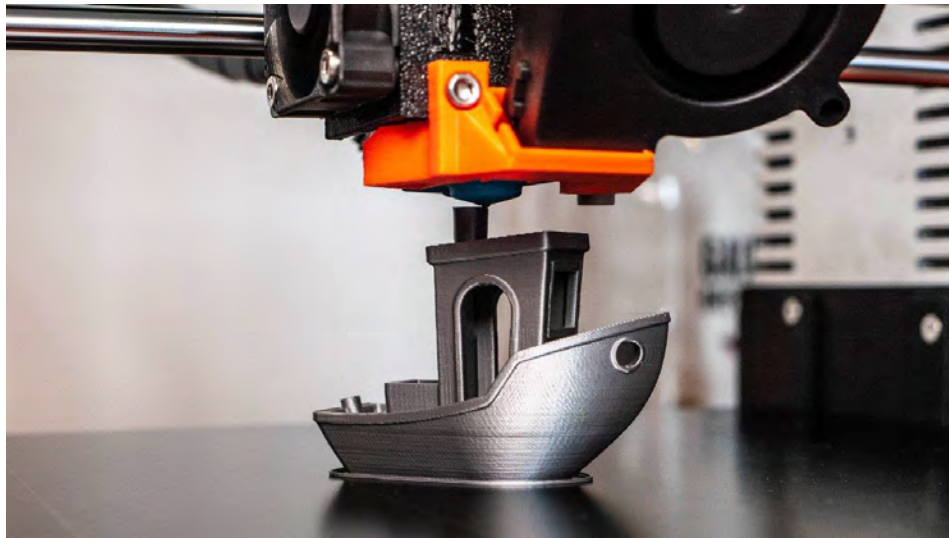


Рисунок 1.1 – FDM технологія 3D-друку

– SLS – технологія, яка використовує спікання спеціального металевого порошку за допомоги лазера, згідно 3D-моделі, перевагами цієї технології є можливість друку металевим порошком в результаті чого деталі є повністю металевими, недоліками цієї технології є висока ціна металевого порошку, висока ціна самого устаткування, складність роботи з цією технологією, що потребує високої кваліфікації персоналу(рис. 1.2);[10]

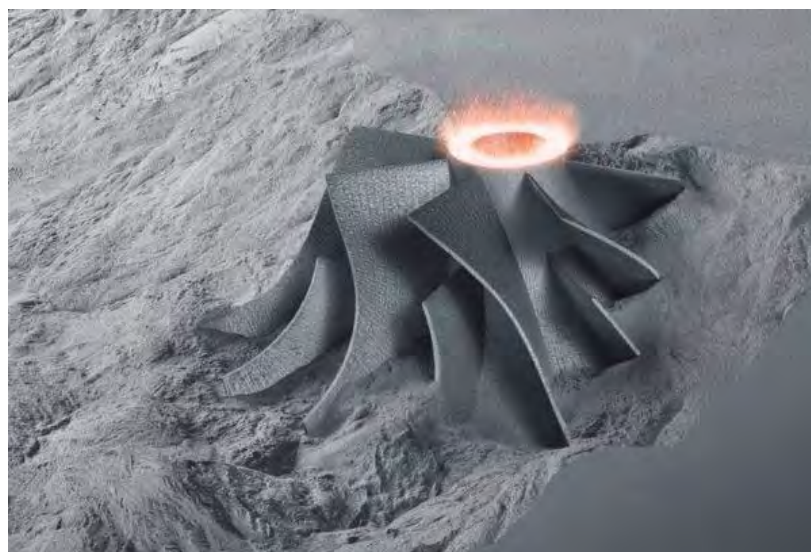


Рисунок 1.2 – Технологія 3D-друку SLS

– EBM – технологія, яка побудована на електронно променевій плавці металів. Ця технологія використовує вакуумну камеру, до якої подається порошок, видаляє надлишок за допомоги механізму розгладжування, після чого за допомоги керованого потоку електронів окремі ділянки порошку сплавляються між собою по контуру, відповідному до першого шару моделі. Після закінчення виготовлення першого шару, робоча платформа опускається на висоту, яка відповідає висоті наступного шару і все знов повторюється до кінцевого виготовлення моделі, переваги та недоліки схожі до технології SLS(рис. 1.3);[11]

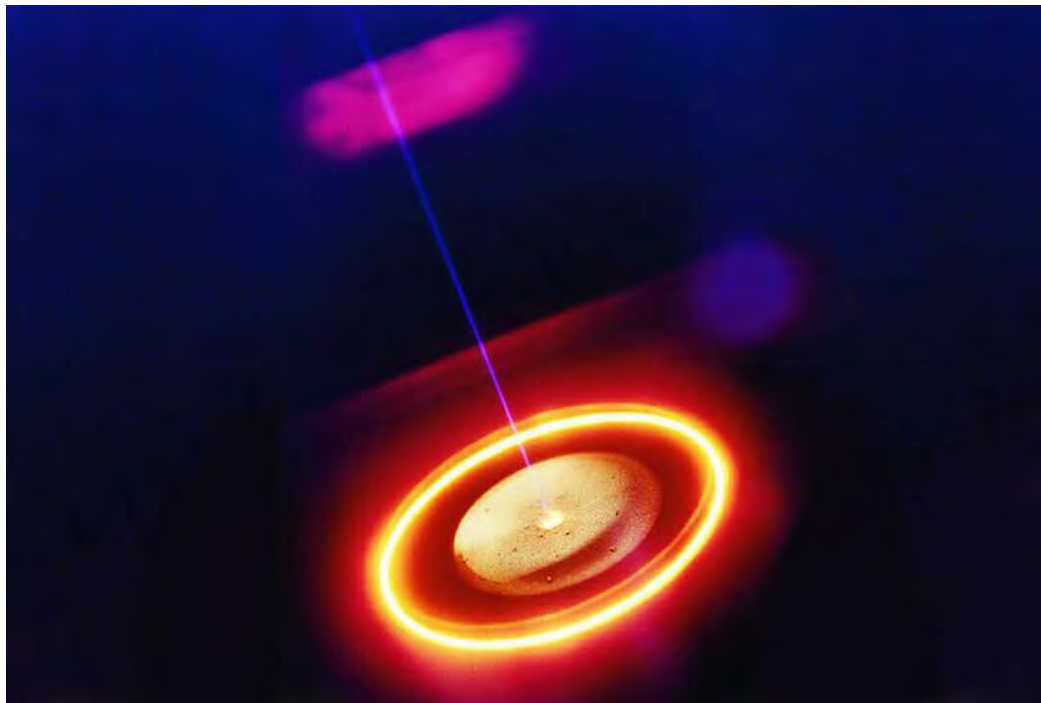


Рисунок 1.3 – Технологія 3D-друку EBM

– Фотополімерна технологія – технології адитивного виробництва 3D-моделей із рідкого фотополімера, що під дією ультрафіолетового випромінювання (УФ) переходить із рідкого стану олігомера в твердий стан полімера. Дана технологія поділяється на декілька підтехнологій, які мають спільний принцип формоутворення виробів, але джерело світла и метод утворення форми шарів в них різний.[12-13]

Першою підтехнологією є SLA технологія, яка використовує лазер, промінь якого проходить через сканаторну систему, попадає на поверхню рідкого фотополімера та полімеризує його. Шар будується променем, який послідовно проходить траєкторію за допомогою системи сканаторів, шириною в діаметр точки променя лазера, що побудована по горизонтальному перерізу моделі.[14]

DLP технологія використовує для засвічування фотополімера DLP проектор, який відображає одразу весь горизонтальний переріз шару моделі та одночасно полімеризує його. Точність цієї технології обмежена роздільною здатністю самого проектора.[15]

LCD технологія, використовує LCD матрицю, яка формує шар моделі за допомоги темних та світлих пікселів та світлодіодної матриці, що випромінює ультрафіолетове джерело світла. УФ випромінювання проходячи через білі пікселі, які є прозорими для нього, полімеризує фотополімерну смолу тим самим будуючи шар моделі.[16]

Таким чином можливо проаналізувати фотополімерні технології та їх особливості.

Технологія SLA (stereolithography) є найстарішою технологією фотополімерного друку, яка була розроблена в восьмидесятих роках двадцятого століття. Ця технологія базується на нашаруванні фотополімера, що під дією УФ випромінювання, джерелом якого є лазер, переходить у твердий стан і поєднується з попередніми шарами. Таким чином засвітлюючи шар поперечного перерізу 3D-моделі, використовуючи переміщення точки лазера по робочій поверхні за допомоги сканатора на невеликі відстані, створюються великі друковані вироби.[17]

Лазерний промінь служить джерелом УФ випромінювання, що за допомогою сканаторної системи змінює положення лазерної точки на платформі, полімеризує рідкий фотополімер. Це обумовлено впливом ультрафіолету на короткі молекулярні ланцюжки, які об'єднуються, в результаті чого мономері або олігомери полімеризуються, створюючи жорсткі або гнучкі тверді моделі.

Далі платформа змінює своє положення по осі Z і все починається спочатку до повної побудови моделі.

Точність друку, яка має відображення у фізичній відповідності отриманих розмірів до встановлених в програмах проектування, залежить від діаметру плями лазерного променя, який в середньому має розміри від 30 мкм до 200 мкм. Пляма може відрізнятися в залежності від типу лазера та системи фокусування. Для вирівнювання фотополімерної смоли на поверхні використовується механічний перемішувач. Перемішувач є необхідним елементом конструкції без якого друк неможливий, так як на поверхні може бути утворений шар піни фотополімера або бульбашки повітря, що будуть заважати та викривляти проходженню лазерного випромінювання. Виникнення на поверхні фотополімеру оптичних завад приведе до дефектів на поверхні виробу.

Конструкції даних принтерів можуть бути різними. Першою основною конструкційною особливістю є метод побудови моделі, яка може бути як «згори-вниз» або інакше «Right-Side Up» (рис. 1.4) так і «знизу-вгору» – «Upside-Down». Таким чином модель, яка будується на «Upside-Down» принтері, де платформа підіймається вгору з розміщеною в нижній частині принтера системою засвітлення. [18]

Проектування цих конструкцій має принципово різні умови та завдання. Розміщення системи засвітлення знизу принтера потребує ванни з прозорим до УФ випромінювання дном, яке повинне мати антиадгезійне покриття, що на великих розмірах друку є одним з найважливіших факторів, необхідних для нормальної роботи всієї конструкції. Розміщення лазерної системи вгорі, зменшує вірогідність поломки, яка може призвести до потрапляння фотополімеру на лазерну систему, що може вивести її з ладу і призвести до необхідності дороговартісного ремонту принтера в подальшому.

Принцип роботи даної технології з будуванням моделі згори-вниз можливо побачити на рисунку 1.4.

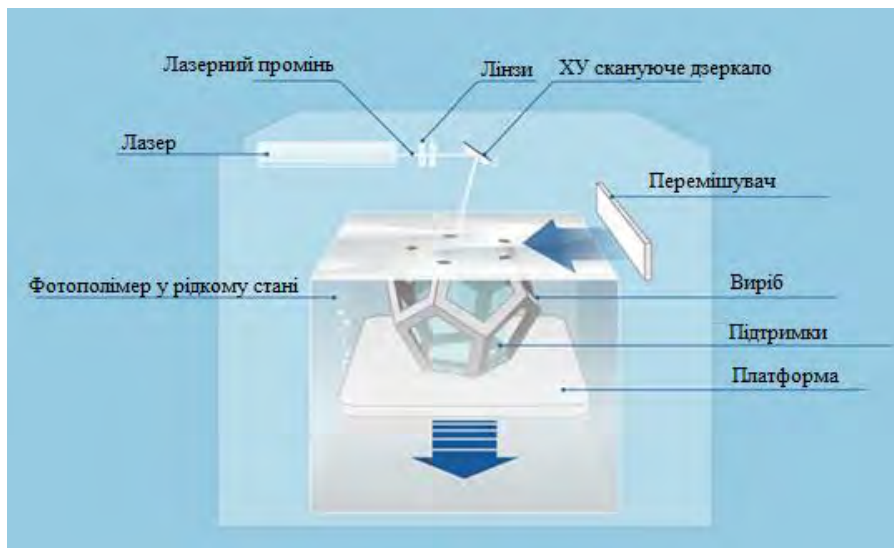


Рисунок 1.4 – Принцип роботи технології SLA

Недоліком технології з будовою моделі згори-вниз є використання великої кількості фотополімера для друку, що потрібно підтримувати на сталому рівні весь процес друку, так як нашарування відбувається в одній конкретній точці ванни, що знаходиться на поверхні фотополімера. Для одного процесу друку на принтері моделі SLA 5000, компанії Stratasys необхідно залити не менше ста літрів фотополімеру та додатково підтримувати рівень фотополімера в процесі друку, рівного об'єму друкованої моделі, що є економічно не вигідно (рис. 1.5).[19]

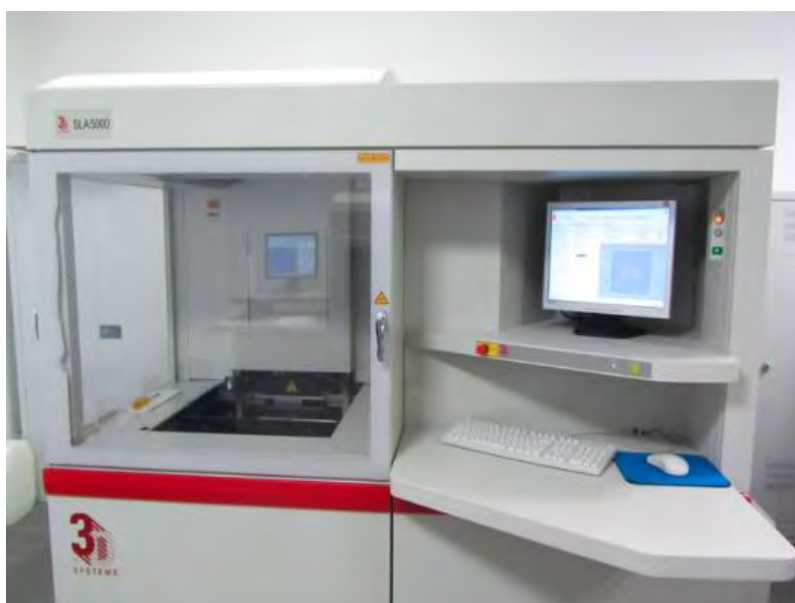


Рисунок 1.5 – Фотополімерний принтер SLA 5000

Також є ще один фактор, який може призвести до великих економічних втрат, це забруднення фотополімера у ванній, який необхідно постійно очищати від залишків полімеризованого пластика. Іншим недоліком є використання перемішувача, що ускладнює конструкцію, постійно потребує очищення від залишків фотополімера, що наліплюється на поверхню, яка може зачіпати модель та привести також до дефектів та браку.

Конструкція знизу-вгору будує модель безпосередньо на дні ванни. Ця особливість технології потребує прозорого для ультрафіолету матеріалу з антиадгезійним покриттям, що не дозволить фотополімеру приєднуватися до дна. Варіантами рішення проблеми високої адгезії до дна ванни є використання спеціальних силіконів або плівок. Перевагами конструкції є зменшення розміру ванни по висоті, що зменшує необхідну кількість фотополімеру на один друк, полегшує обслуговування принтера та ванни, дає можливість зменшити загальні розміри установки, та зменшити її масо-габаритні розміри. Недоліком конструкції є складність побудови великих розмірів ванни, так як створюється велике навантаження на дно ванни через так званий ефект прилипання що може призвести до руйнування дна та протікання фотополімеру з попаданням на системи відображення шару(проектор, лазер або екран). Також є залежність між площею друкованої поверхні до сили, що необхідно використати для відлипання від дна ванни.[20]

Конструкцію принтера з побудовою знизу-вгору зображено на рисунку 1.6.

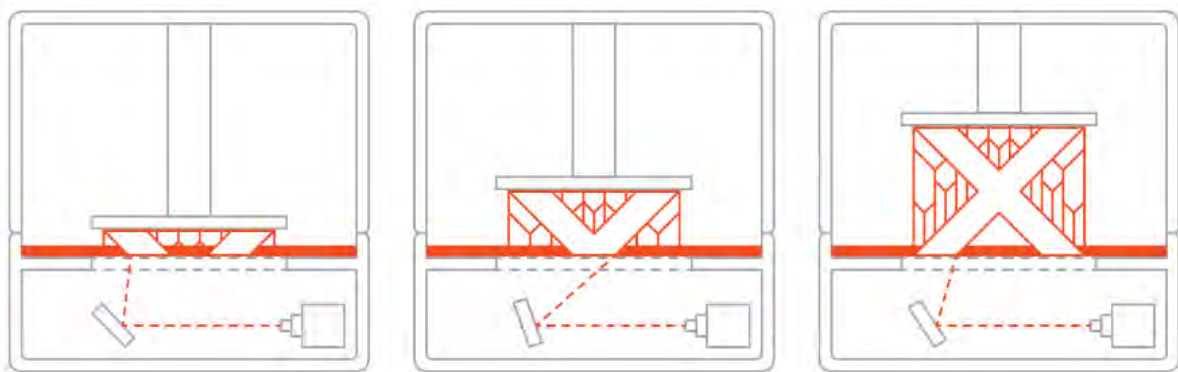


Рисунок 1.6 – Конструкція принтера SLA знизу-вгору

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

За рахунок менших розмірів шарів, отримувана деталь стає більш монолітною та міцною (рисунок 1.7).

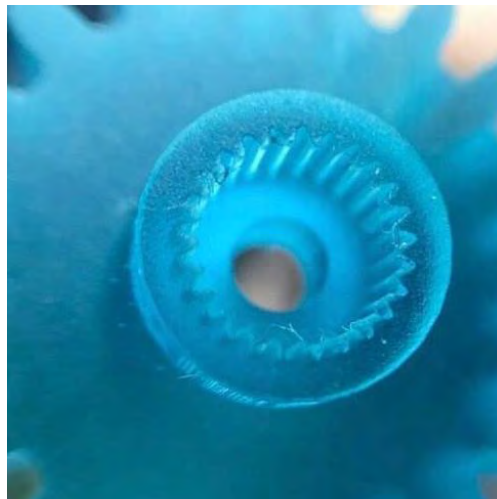


Рисунок 1.7 – Надрукована деталь

Недоліками технології є ціна установки, складність обслуговування лазерного модуля, його невеликий ресурс, який після закінчення підлягає заміні. При цьому сам лазерний модуль є дорогим, ціна якого може становити значний відсоток від вартості принтера.

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

Перевагами технології є висока точність друку, що досягається розмірами лазерної плями з мінімальною величиною 30 мкм, висока швидкість друку, що

залежить в основному від швидкості полімеризації смоли, велика кількість матеріалів, що можуть принципово відрізнятися за властивостями, будучи як гнучкими так і твердими, міцними або тими, що виплавляються.

SLA технологія використовується більшою мірою для прототипування деталей та в одиночному виробництві, що не потребують значних механічних властивостей. З розвитком технології, сфера використання стає більшою і використовується вже для дрібносерійного та середньосерійного виробництва за рахунок великої площі друкованої платформи і використання долива фотополімера. Сферами виробництва, що потребують використання фотополімерного 3D-принтера є автомобільна промисловість, робототехніка, приладобудування, медична та ювелірна промисловості (рисунок 1.8).[21]



Рисунок 1.8 – Друковані моделі щелепи

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

Надруковані майстер-моделі ювелірних виробів, що в подальшому виливаються з металів зображені на рисунку 1.9.

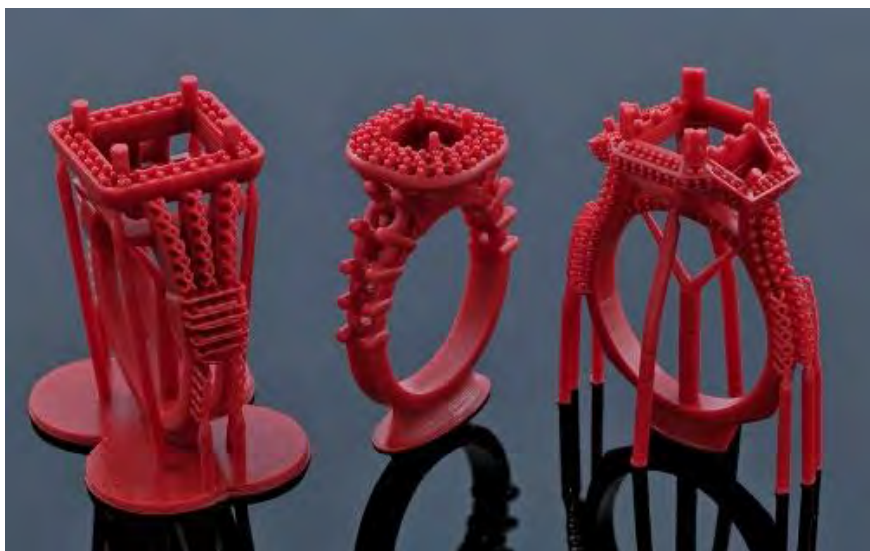


Рисунок 1.9 – Майстер-моделі надруковані на фотополімерному принтері

Технологія Direct Light Processing – це більш дешева альтернатива технології SLA, що використовує проектор з технологією DLP, він дає можливість значно знизити ціну принтера при незначному зменшенні роздільної здатності. Порівнюючи технології DLP та SLA, роздільна здатність DLP принтера залежить від роздільної здатності проектора та відстані на якому проектор знаходиться. При збільшенні відстані від ванни, збільшуються розміри друкованої області але і збільшуються розміри пікселя, що відображаються на якості поверхні. Таким чином можна отримати як точність, що буде відповідати SLA принтеру, але з розмірами друкованої області, що будуть набагато меншими ніж у SLA при значно нижчій вартості.[22]

Принцип роботи принтера є аналогічними до технології SLA. За конструкцією, системи також є дуже схожими, але на відміну від SLA технології може бути відсутня система долива та перемішувач, замість цього в DLP принтерах перемішування виконується підйомом однієї сторони ванни, для зменшення площі відриву від дна. Такі конструкції зазвичай використовуються коли розмір ванни не перевищує 200x200 мм. Фотополімерний DLP принтер зображений на рисунку 1.10.



Рисунок 1.10 – Фотополімерний DLP принтер компанії Carima

Принцип побудови конструкції принтера може бути як згори-вниз так і знизу-вгору.

Принцип знизу-вгору має один великий та значний недолік, що зменшив його популярність на початку розвитку технології, це малий ресурс дна ванни та використання специфічних матеріалів – спеціальних силіконів, що значно зменшували б адгезію матеріалу до дна. Проблема надмірної адгезії матеріалів між собою робить неможливим використання звичайних прозорих пластиків або скла в якості дна ванни. Навіть при невеликій площі полімеризованого матеріалу виникає руйнування пластику або скла, через велику силу відриву, що унеможлиблює його подальше використання та може призвести до попадання фотополімеру на проектор. Цю проблему було вирішено в технології LCD, що використовує плівку із прозорого фторопласту товщиною 50 – 200 мкм.[23]

Принцип роботи технології DLP з побудовою моделі знизу-вгору зображено на рисунку 1.11.

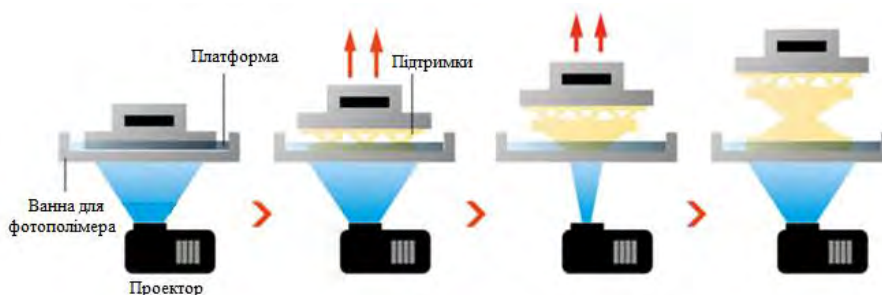


Рисунок 1.11 – Принцип роботи технології DLP

Ця технологія є альтернативним варіантом для малої промисловості, що при меншій продуктивності ніж SLA, дає можливість отримувати деталі високої якості. Сфери застосування такі ж як і для SLA.

LCD технологія є розвитком технології DLP та SLA, що має якість, подібно до SLA, а з подальшим розвитком технології виробництва LCD екранів ще краще ніж у SLA, так як має ще більшу роздільну здатність та меншу вартість екранів і відповідно принтерів, у порівнянні з іншими фотополімерними технологіями. Тобто, якщо брати технічні характеристики, то на початку розвитку LCD технології розмір друкованої області був 120x60 мм з роздільною здатністю 100 мкм по осям XY. Ці параметри задовольняли потреби ювелірної та медичної сфер. Ювеліри друкували майстер-моделі, які потім випалювалися у формах, що значно спрощувало виробництво продукції та зменшувало собівартість виробів. Після появи на ринку принтерів, що мають екрани з високою роздільністю від 4K до 16K з монохромною передачею кольорів та зі створенням фотополімерних смол спеціально розроблених для ювелірів, які при випалюванні у формі зовсім не утворювали сажі, дана сфера набула всебічного розвитку по всьому світі.[24]

Медична сфера застосування фотополімерної технології полягає у виготовленні протезів для стоматології. Для цього були розроблені фотополімери, що є біологічно сумісними та нешкідливими, в результаті чого з'явилася можливість виготовлення тривимірних протезів, імплантів та зубних коронок (рисунок 1.12).



Рисунок 1.12 – Надруковані на 3D-принтері зубні протези

Дана технологія дала можливість легко друкувати різні моделі з різними розмірами під необхідні задачі з великою точністю. Це дало можливість зменшити час перебування пацієнтів в стоматологічному кабінеті, збільшити комфорт пацієнтів, яким за рахунок високої точності виготовлення можливо швидко підігнати під конкретного пацієнта з мінімальною кількістю зусиль.

На сьогодні технологія стала найбільш розвинутою порівняно з іншими технологіями фотополімерного друку. Розміри друкованої області збільшуються зі збереженням роздільної здатності як і швидкість полімеризації кожного шару.

Технологія стала можливою тоді, коли було запропоновано використовувати LCD екрани, в якості світлопропускної маски. Використання таких екранів стало можливим у фотополімерному друку тільки після того, як були прибрані елементи, що заважають проходженню УФ випромінювання. Такими елементами є підсвітка, поляризаційна плівка та ін. Всі елементи екрану зображені на рисунку 1.13. Залишається шар, який безпосередньо відповідає за формування зображення. В результаті видалення зайвих елементів стає можливим проходження УФ випромінювання через екран з мінімальними втратами. Для формування шару використовуються білі то чорні пікселі. Білі пікселі мають максимальне пропускання ультрафіолету, чорні ж навпаки, блокують його проходження. Таким чином розмістивши під LCD екраном джерело ультрафіолетового випромінювання, можливо утворювати своєрідну оптичну маску та регулювати подавання УФ світла на область друку.[25]

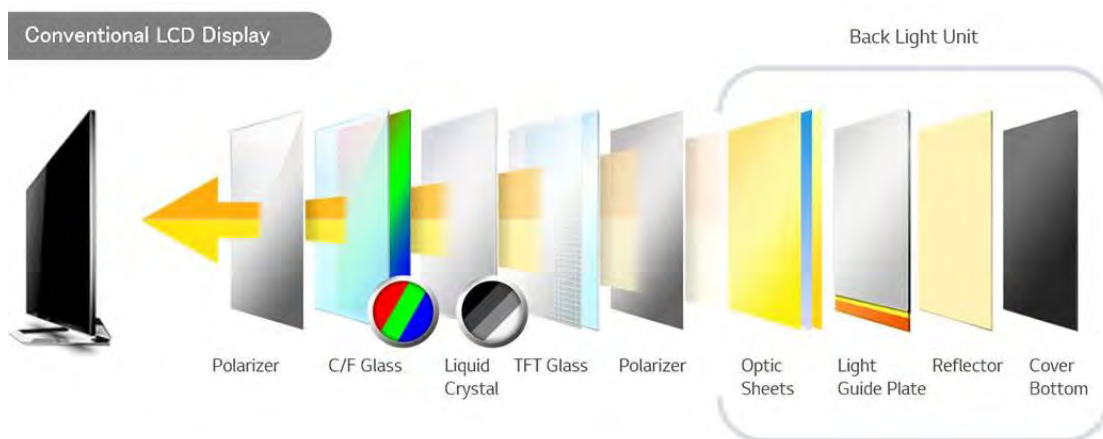


Рисунок 1.13 – Склад шарів екранів LCD

Друк моделі та її роздільна здатність по осям ХУ безпосередньо залежить від розмірів та роздільної здатності екрану LCD. Для LCD екранів з розмірами 120х60 мм та з роздільною здатністю 2К, роздільна здатність друку становить 50 мкм по осям ХУ через розмір пікселя 50 мкм. А якщо взяти екран 8К з тими ж самими розмірами 120х60 мм, тоді буде отримана роздільна здатність, піксель якої буде становити 20 мкм, що буде мати більшу деталізацію моделі порівняно з SLA технологією (рисунок 1.14). Використання екранів з монохромною побудовою пікселей дозволило прискорити процес друку за рахунок більшої пропускної здатності та подовжити термін експлуатації екрану.[26]



Рисунок 1.14 – Порівняння надрукованих деталей з використанням екранів з розміром пікселя 100 мкм і 45 мкм

Таким чином можна визначити основні принципи побудови конструкції принтера з LCD матрицею. Конструкція принтера будується лише по системі знизу-вгору, так як основне джерело зображення та УФ випромінювання знаходяться знизу принтера (LCD екран та UV світлодіод або світлодіодна матриця). Типова конструкція принтера по технології LCD зображена на рисунку 1.15.

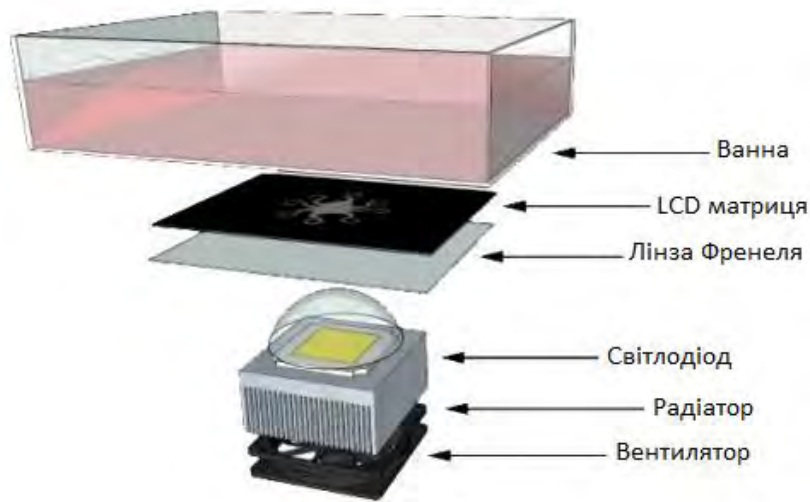


Рисунок 1.15 – Типова конструкція принтера по технології LCD

В якості джерела УФ випромінювання зазвичай використовується світлодіод або світлодіодна матриця (рисунок 1.16), УФ випромінювання якої проходить через екран на дно ванни. Особливість УФ світлодіодної матриці або діода полягає в його спектрі УФ випромінювання, що становить від 390 нм до 415 нм. Даний діапазон вибраний через властивості фотополімерів, які найефективніше полімеризуються на цих довжинах хвилі ультрафіолету. Всі інші діапазони не будуть давати тієї швидкості та якості засвітлення. Відхилення довжини хвилі засвітлення призведе до недостатньої полімеризації моделі, що може стати джерелом браку.[27]



Рисунок 1.16 – Світлодіодна матриця в складі принтера

Іншою особливістю світлодіодної матриці є використання випрямляючої системи лінз, що робить УФ випромінення рівномірним по всій площі робочої області. На початку розвитку використовувалися відбивачі світла, що складалися з дзеркальної поверхні (рисунок 1.17), але вони мали вагомий недолік в порівнянні з світлодіодною матрицею з системою лінз Френеля, що також має назву ParaLED. Цей недолік проявляється в тому, що в принтерах з відбивачем, найбільше засвітлення сконцентроване в центрі робочої області через кут відбиття а по краям є недостатнє засвітлення, що призводить до браку в моделях, які знаходяться саме в тих зонах де є недостатнє засвітлення. Також нерівномірність засвітлення чуттєво впливає на геометричні розміри моделі, що будується в процесі друку.

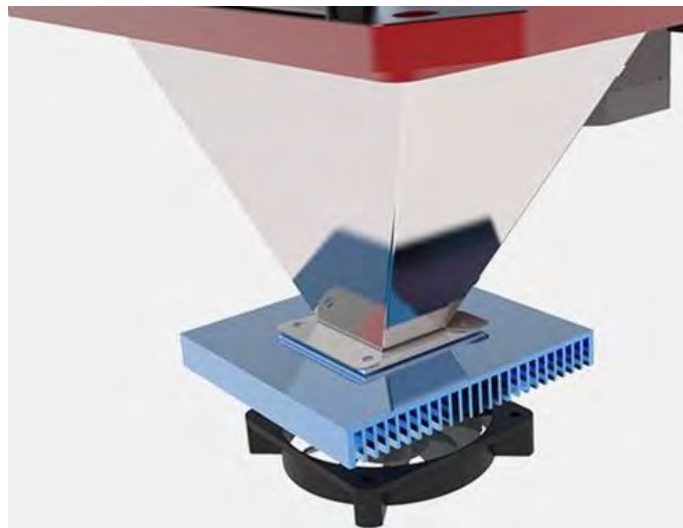


Рисунок 1.17 – Система засвітлення з використанням конуса-дефлектора

Цей недолік намагалися виправити за допомоги програмного засобу, який в центрі друкованої області частково змінював стан пікселей з темного до світлого, регулюючи проникність УФ випромінювання. Але швидкість такого принтера суттєво падала та потребувала великої кількості часу та експериментів, щоб правильно підібрати області, які необхідно відредагувати. Маска неоднорідності екрану, що створена після проведення практичних вимірювань, зображена на рисунку 1.18.

Рисунок 1.18 – Маска неоднорідності матриці

Система ParaLED, яка є більш досконалою порівняно з попередньою системою і прибирає недоліки нерівномірного розподілення УФ випромінювання, складається з самої світлодіодної матриці та системи лінз (рисунок 1.19).[28]

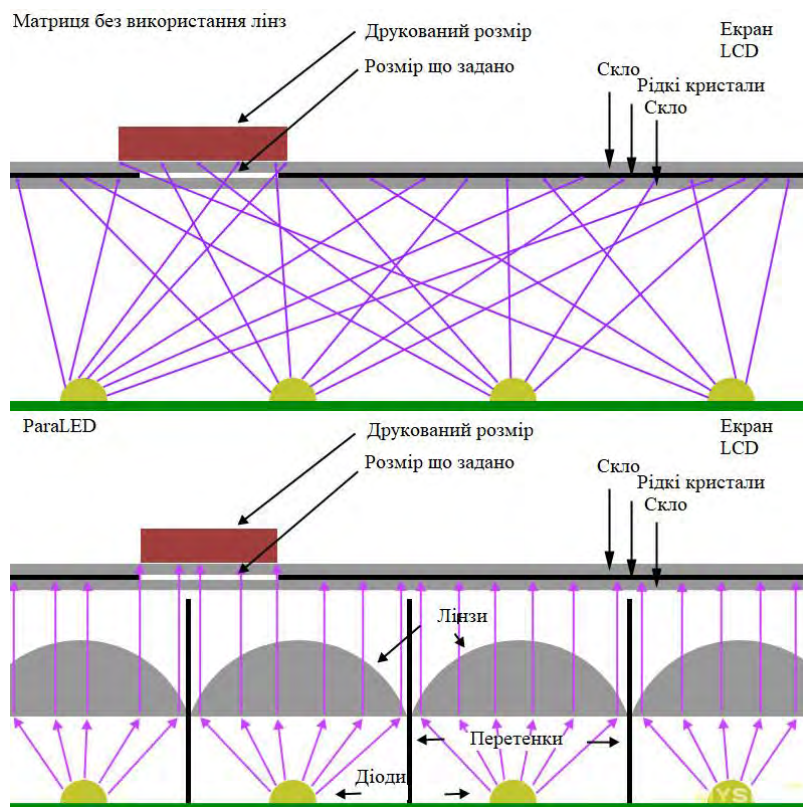


Рисунок 1.19 – Порівняння системи засвітлення з конусним відбивачем та ParaLED

Ця система в порівнянні з попередньою має декілька переваг. Першою з цих переваг є більш рівномірне засвітлення всієї друкованої площі. Іншою перевагою є підвищення потужності світлодіодної матриці, через збільшення площі світлодіодної матриці зі збільшенням кількості УФ світлодіодів, що дає можливість швидше полімеризувати шар фотополімеру, скоротити час друку та зберегти задані розміри.

Розвиток технології не лише вдосконалив системи полімеризації принтерів а й системи відображення шарів, тобто LCD екранів. На початку розвитку технології, екрани мали малу роздільну здатність та погану проникність УФ випромінювання, що зменшувало швидкість друку. На сьогодні екрани отримали можливість зберігати високу роздільну здатність зі збільшенням розмірів самого екрану, в результаті чого розмір пікселя може становити менше 30 мкм.

Наступним етапом розвитку екранів є перехід на монохромну структуру дисплея. В стандартному екрані існує масив пікселів, які мають червоні, зелені та сині субпікселі, за рахунок чого і формується зображення(рисунок 1.20). В конструкції таких екранів існують фільтри, що перешкоджають проходженню УФ світла.[29]

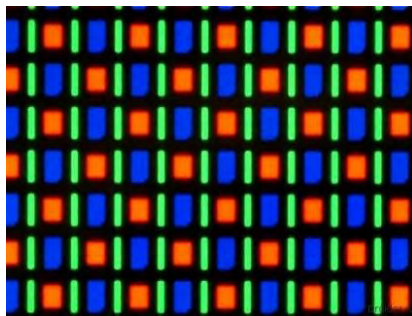


Рисунок 1.20 – Будова пікселей LCD екрану

В результаті вдосконалення конструкції екранів, створено матрицю з монохромною системою, яка збільшила пропускну здатність УФ випромінювання, що дало можливість при збереженні роздільної здатності, значно підвищити швидкість друку. Таким чином максимальна швидкість друку на монохромному екрані на принтері Elegoo Saturn 3 Ultra становить 400 мм/год

в порівнянні з 22 мм/год на звичайному екрані, тобто один шар на моноекрані друкується з мінімальним часом 0.5 секунди. Також перевагою монохромного дисплея є більший ресурс експлуатації в порівнянні зі звичайним екраном.

Іншою важливою частиною фотополімерного 3D принтера є вісь Z. Вона забезпечує поступове нарощення моделі, що складається з переміщення на дуже малі відстані (0.05 мм).

Для переміщення робочої платформи вздовж осі Z використовуються крокові двигуни, що з'єднані з кульково-гвинтовою передачею (КГП) або гвинт-гайкою.

В порівнянні з гвинт-гайкою, КГП за рахунок мінімального тертя та високої точності переміщення дозволяє переміщувати робочу платформу на менші відстані в порівнянні з гвинт-гайкою. КГП дозволяє отримати переміщення на 0.03мм в порівнянні з гвинт-гайкою, яка дозволяє переміщення на 0.05мм) та отримувати моделі з мінімальною шорсткістю поверхні. КГП показана на рисунку 1.21.[30]



Рисунок 1.21 – Кульково-гвинтова передача

Наступним компонентом від якого залежить шорсткість поверхні і мінімальний шар друку є лінійні напрямні. Вони забезпечують точне лінійне переміщення без зміщення платформи по осям XY за рахунок низького коефіцієнта тертя. Є декілька видів лінійних напрямних – рейкові лінійні направляючі та направляючі вали з лінійними підшипниками. Рейкова лінійна направляюча та лінійний підшипник на валу зображений на рисунку 1.22.

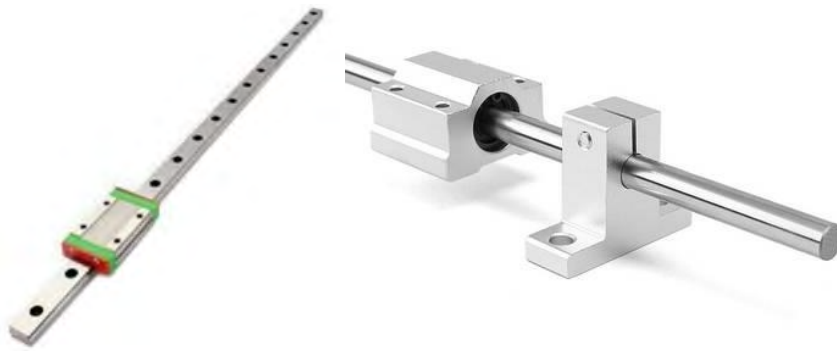


Рисунок 1.22 – Зовнішній вигляд лінійних напрямних на підшипниках

Рейкові лінійні направляючі у порівнянні із валами мають відсутність люфту переміщення та низький коефіцієнт тертя. Таким чином, ось Z з використанням КГП та рейкових лінійних направляючих за рахунок відсутності люфтів переміщення, буде мати кращу роздільну здатність отримуваних деталей по осі Z .

Наступною складовою частиною фотополімерного принтера є електричні компоненти, що використовуються для контролю переміщення, відображення горизонтального перерізу на екран та автоматизовану систему друку.

Для управління всіма складовими принтера, такими як крокові двигуни, кінцеві вимикачі, подача живлення на матрицю використовуються плати, що в своєму складі мають керуючий модуль Arduino або його аналоги. Вони мають спеціально розроблену прошивку, яка включає в себе перетворення команд G-code на електричні імпульси та загальні налаштування принтера, такі як висоту друку та роздільну здатність переміщення (steps per mm).

Основним елементом, що керує LCD матрицею та видає на неї зображення шару моделі в високій роздільній здатності та одночасно виконує керування Arduino є мікрокомп'ютер Raspberry або аналогічні системи з операційною системою Linux. Мікрокомп'ютер за рахунок високої продуктивності здатен одночасно керувати екраном, мікроконтролером Arduino та використовуватися для автоматизації виробничого процесу.[31]

Приклад такої плати, яка використовується у фотополімерному принтері, зображена на рисунку 1.23.



Рисунок 1.23 – Плата керування, яка є аналогом мікрокомп'ютера Raspberry

Зазвичай розробники принтерів комбінують мікрокомп'ютер з виконавчою платою Arduino на одній друкованій платі з одним загальним живленням. Ця плата включає в себе виходи для підключення кінцевих вимикачів для контролю переміщення, системи охолодження та для підключення керуючого екрану.

Таким чином, аналізуючи загальну будову фотополімерного 3D-принтера за сучасною технологією LCD можливо визначити основні компоненти, такі як:

1. Система переміщення осі Z, що складається з КГП або гвинт-гайки, в поєднанні з лінійними направляючими у вигляді лінійних підшипників або рельсових направляючих. Для виконання переміщення використовується кроковий двигун а обмеження переміщення забезпечує кінцевий вимикач;

2. Система полімеризації шарів, яка включає в себе LCD екран на який виводиться саме зображення шару та УФ світлодіодна матриця з лінзою Фрінеля для рівномірного засвітлення;

3. Система керування принтером, що включає в себе загальну плату або плати, якщо використовується окремо мікрокомп'ютер та виконавча плата на основі Arduino;

4. Блок живлення для живлення всієї системи.

Загальна структурна схема фотополімерного принтера за технологією LCD зображена на рисунку 1.24.

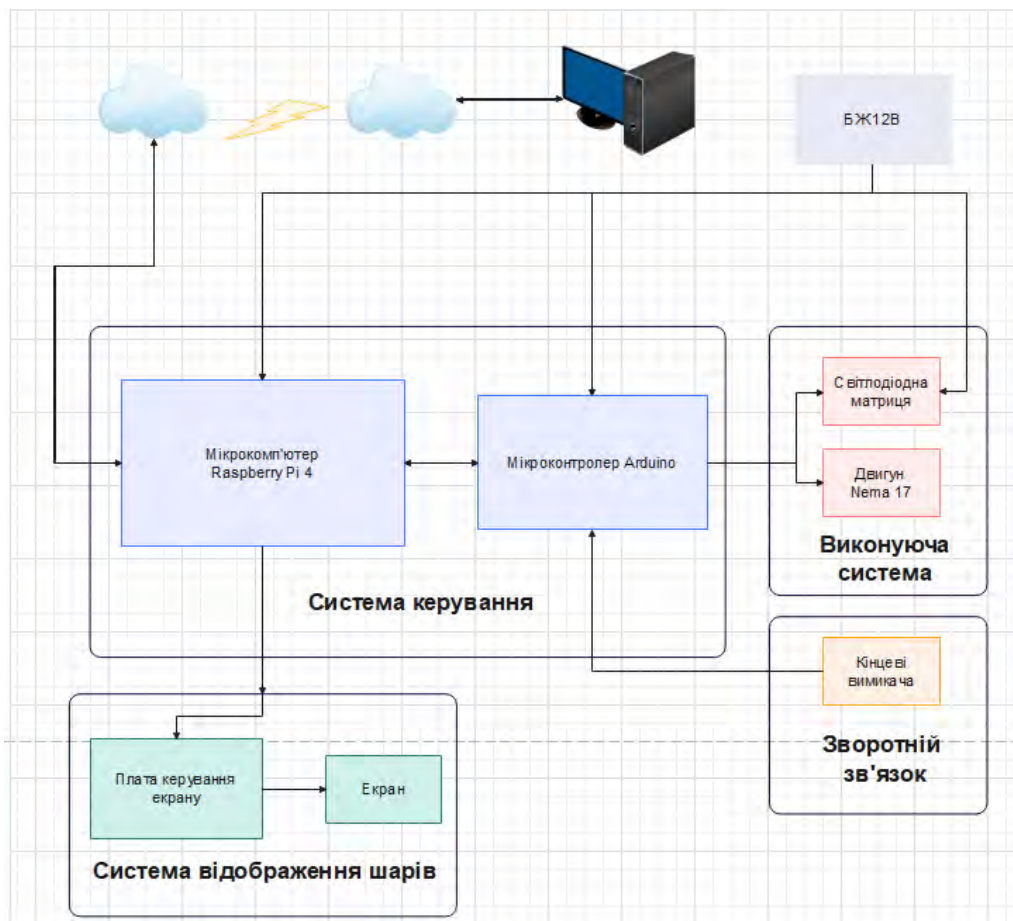


Рисунок 1.24 – Структурна схема фотополімерного принтера за технологією LCD

Прикладом таких принтерів є принтери від компаній Anycubic, Creality (рисунок 1.25).



Рисунок 1.25 – Принтери Anycubic Mono та Creality Halot

1.2 Фотополімерні смоли, які використовуються у фотополімерному 3D-друці та особливості їх полімеризації

Фотополімери – це олігомери або низькомолекулярні полімери в рідкому стані, що переходять в твердий стан під дією УФ випромінювання.

Хімічний процес полімеризації зображений на рисунку 1.26.[32]

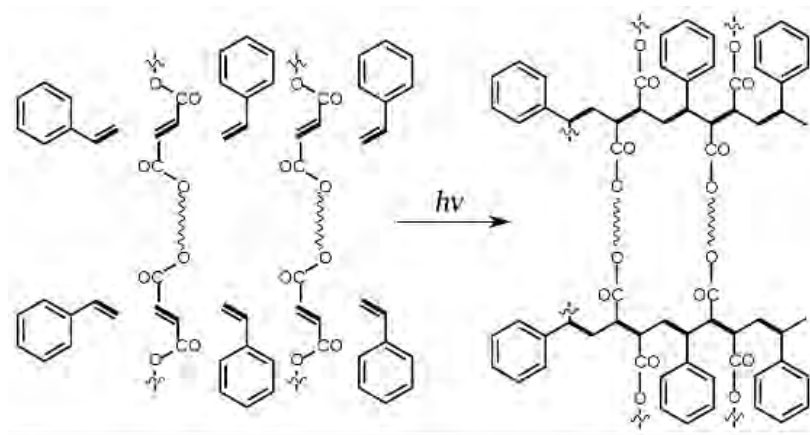


Рисунок 1.26– Хімічний процес полімеризації фотополімерів

Через швидкий розвиток технологій фотополімерного друку створюються нові і більш вдосконалені фотополімери, що мають великий набір фізичних та хімічних властивостей, дозволяючи застосовувати такий 3D-друк для різноманітних завдань. На сьогодні є фотополімери, що мають властивості, подібні до гуми або стійкість до навантажень подібно до інженерних пластиків в інших технологіях.

Намагання до широкого використання у ливарстві спонукало розробників розробити фотополімери для виготовлення майстер-моделей, що використовуються в литті по моделях що ллють. Таким чином такий фотополімер в процесі нагрівання до визначених температур повністю вигоряє без створення сажі, зберігаючи поверхню чистою та без додаткових дефектів. Це дало можливість отримати майстер моделі для створення форм і подальшого лиття виробів з золота, срібла та ін. з більш чистою та гладкою поверхнею.

Підвищена точність отриманих деталей за рахунок використання переваг фотополімерної технології, дала змогу використовувати лиття високоточних деталей для подальшого їх використання.

Фотополімери в рідкому стані характеризуються щільністю, в'язкістю, діапазоном засвітлення УФ випромінюванням та усадкою, яка виникає при полімеризації. Із технологічних параметрів, які впливають на процес друку та задаються в спеціальній програмі для підготовки деталей – слайсері, основними, які мають найбільший вплив на результат друку є час засвітлення, мінімально можлива товщина шару, точність друку та рекомендоване дозасвітлення після друку.[33]

До надрукованої моделі висуваються ті ж самі вимоги що і до деталей виготовленими за іншими технологіями, а саме за такими характеристиками як твердість, міцність на розрив, подовження при розриві, рекомендована температура застосування.

Всі вищевказані параметри характеризують фотополімер як в рідкому стані, так і в стані полімеризованому, окреслюючи його сферу застосування.

На сьогодні основними типами фотополімерів, що розповсюджені в світі є:

- стандартні фотополімери;
- оптично прозорі фотополімери;
- жорсткі фотополімери;
- міцні фотополімери;
- термостійкі фотополімери;
- еластичні фотополімери;
- керамічні фотополімери;
- біосумісні фотополімери;
- есо-фотополімери;
- ливарні фотополімери.

Така класифікація фотополімерів є умовною та більшою частиною залежить від основних заявлених характеристик. Всі фотополімерні смоли

можна також поділити на конструкційні, спеціальні та звичайні смоли, що не мають особливих властивостей та можуть мати універсальне використання. Так як смоли можуть мати різні властивості і об'єднувати високу гнучкість з високою термостійкістю, поділення на категорії є умовними. Загалом кожна компанія, що виробляє пластик може мати власну класифікацію.

Стандартні фотополімери при полімеризації мають високу жорсткість, якісну деталізацію та низьку ціну порівняно з іншими матеріалами.[34]

Стандартні фотополімери мають такі властивості:

- твердість може становити в середньому 80D одиниць по Шору;
- міцність на розрив становить від 40МПа до 80МПа;
- коефіцієнт усадки становить від 3,74% до 4,24%

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

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

Прозорі фотополімери після друку мають високий коефіцієнт прозорості. Фізичні властивості відповідають стандартним фотополімерам, однак процес друку ускладняються формуванням бульбашок в структурі моделі. Недоліками таких фотополімерів є зміна кольору під дією тривалого УФ випромінювання, гігроскопічність. Прозорі фотополімери мають наступні фізичні властивості:

- твердість може становити в середньому 75-85 одиниць по Шору;[35]
- міцність на розрив становить від 35МПа до 55МПа;
- коефіцієнт усадки становить від 4% до 6%

Надрукований зубний протез з прозорого фотополімера зображений на рисунку 1.27.



Рисунок 1.27 – Надрукована деталь з прозорого фотополімеру

Жорсткі фотополімери мають властивості подібні до властивостей найжорсткіших пластиків, що використовуються при литті. Такі пластики витримують великі навантаження. Вони мають стійкість до руйнування й витримують високі ударні навантаження. Мають гарні характеристики міцності при вигині подібно до поліуретану, що ллється. Мінімальний шар для друку такими пластиками становить від 30 мкм, усадка становить менше 3%. Очищення від залишків фотополімера виконується спиртовими розчинами. [36]

Недоліком таких пластиків є руйнування під дією високих температур.

Жорсткі фотополімери мають наступні фізичні властивості:

- твердість може становити в середньому 80-90 одиниць по Шору;
- міцність на вигин становить від 45МПа до 75МПа;
- коефіцієнт усадки становить до 2.2%.

До міцних фотополімерів, відносяться фотополімери, які мають низький модуль пружності, великий коефіцієнт подовження та велику ударну в'язкість.

Матеріал має високі зносостійкі характеристики, в результаті яких цей матеріал можливо використовувати для друку підшипників, втулок та шестерень.[37]

Даний матеріал потребує обов'язкового дозасвітлення після друку, мінімальний шар, яким можна друкувати становить 50 мкм. Під дією розчинників даний матеріал руйнується.

Недоліком таких фотополімерів є низька температура руйнування, низька межа міцності на вигин.

Міцні фотополімери мають наступні фізичні властивості:

- твердість може становити в середньому 71-92 одиниць по Шору;
- висока ударна в'язкість, що становить від 41 до 48 Дж/м;
- коефіцієнт усадки становить до 5%.

Термостійкі фотополімери мають високі термічні характеристики, вони можуть витримувати температури до 300°C без деформації. Основні характеристики фотополімеру подібні до стандартних смол.[38]

Цей специфічний фотополімер використовується для друку прототипів ливарних форм, корпусів термостійких приладів, та ін.

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

- твердість може становити в середньому 50-80 одиниць по Шору;
- коефіцієнт усадки становить до 3%.[39]

Надрукована деталь з гнучкого фотополімеру зображена на рисунку 1.28.

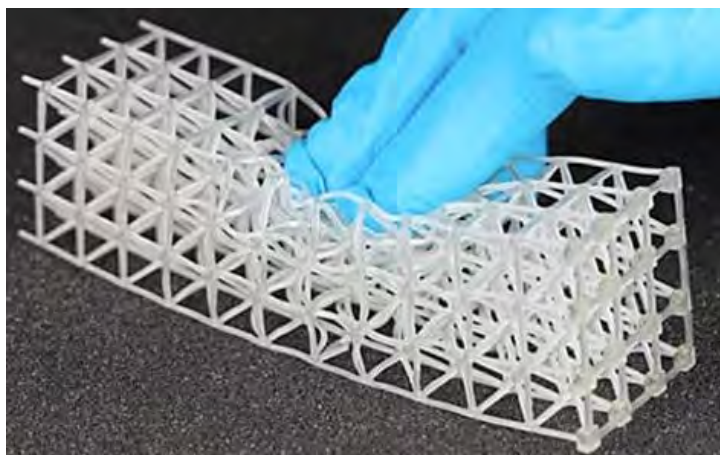


Рисунок 1.28 – Деталь надрукована з гнучкого фотополімеру

Наступною інженерною смолою є керамічні фотополімери, яка забезпечує друковану модель високою жорсткістю. Надрукована модель має глянцеvu поверхню, яка не потребує подальшого полірування. Керамічний фотополімер стійкий до деформацій. Використовується такий фотополімер для друку прес-форм, фіксаторів, корпусів та ін. Деталі набувають властивостей кераміки після термічної обробки в пічках. Виготовлені деталі з армуванням керамікою зображено на рисунку 1.29.[40]

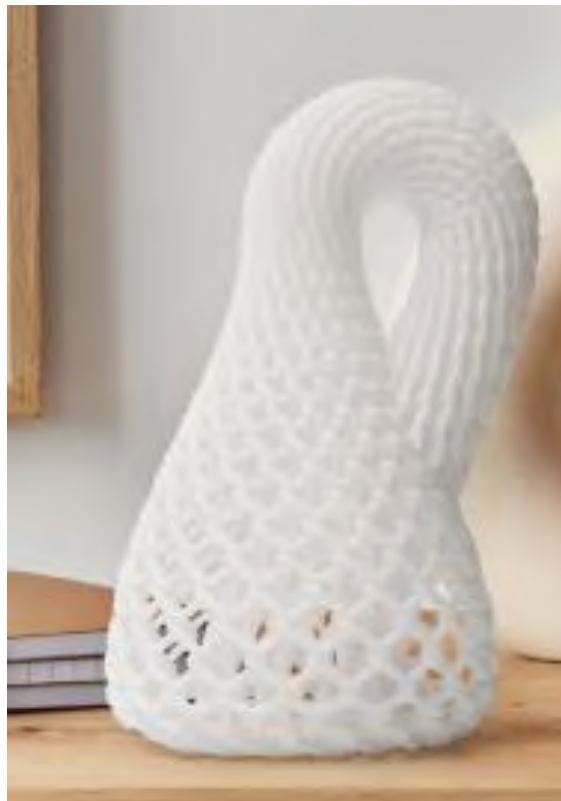


Рисунок 1.29 – Деталь надрукована з керамічного фотополімеру

Недоліком такого фотополімеру є велика крихкість деталей.

Біосумісні фотополімери можуть використовуватися для виготовлення медичного приладдя та протезів, надруковані деталі можуть бути стерилізовані паром в автоклаві. Такі фотополімери мають високу точність, гладку поверхню, фотополімер мають високу стійкість до руйнування та зносу.[41]

Усадка такого фотополімера становить менше 3%.

Недоліком такого фотополімера є висока ціна. Деталь виготовлена з біосумісного фотополімера зображено на рисунку 1.30.



Рисунок 1.30 – Деталь виготовлена з біосумісного фотополімера

Есо-фотополімери – це клас фотополімерів, які в своєму складі містять біорозкладні компоненти, які на відміну від звичайних фотополімерів в своєму складі використовують сою. Постобробка таких фотополімерів виконується водою. Фізичні характеристики таких фотополімерів мають аналогічні до звичайних.[42]

Есо-фотополімери мають такі фізичні властивості:

- твердість може становити в середньому 80D одиниць по Шору;
- міцність на розрив становить від 40МПа до 80МПа;
- коефіцієнт усадки становить від 3% до 4%.

Ливарні фотополімери створюються з використанням воску. Під впливом температури такий фотополімер згорає без виділення попелу та інших залишків. Смола дозволяє друкувати з високою деталізацією. Фізичні характеристики надрукованих деталей є низькими в порівнянні зі звичайною смолою.[43]

Через велику кількості факторів, що впливають безпосередньо на якісні показники надрукованої моделі та процес друку, таких як час засвітлення, густина фотополімеру, мінімальне переміщення, розмір пікселя, різні системи

засвітлення всі вищевказані типи фотополімерів потребують визначення технологічних параметрів та вплив їх на кінцеві якісні показники моделі.

Таким чином під час друку моделі через вищевказані фактори можуть виникати збої в процесі друку, що призводять до утворення браку та дефектів.

Ливарні фотополімери мають такі фізичні властивості:

- твердість може становити в середньому 73 одиниць по Шору;
- в'язкість такої смоли становить 85мПас;
- коефіцієнт усадки становить до 0.5%.

Деталі надруковані для подальшого лиття зображені на рисунку 1.31.

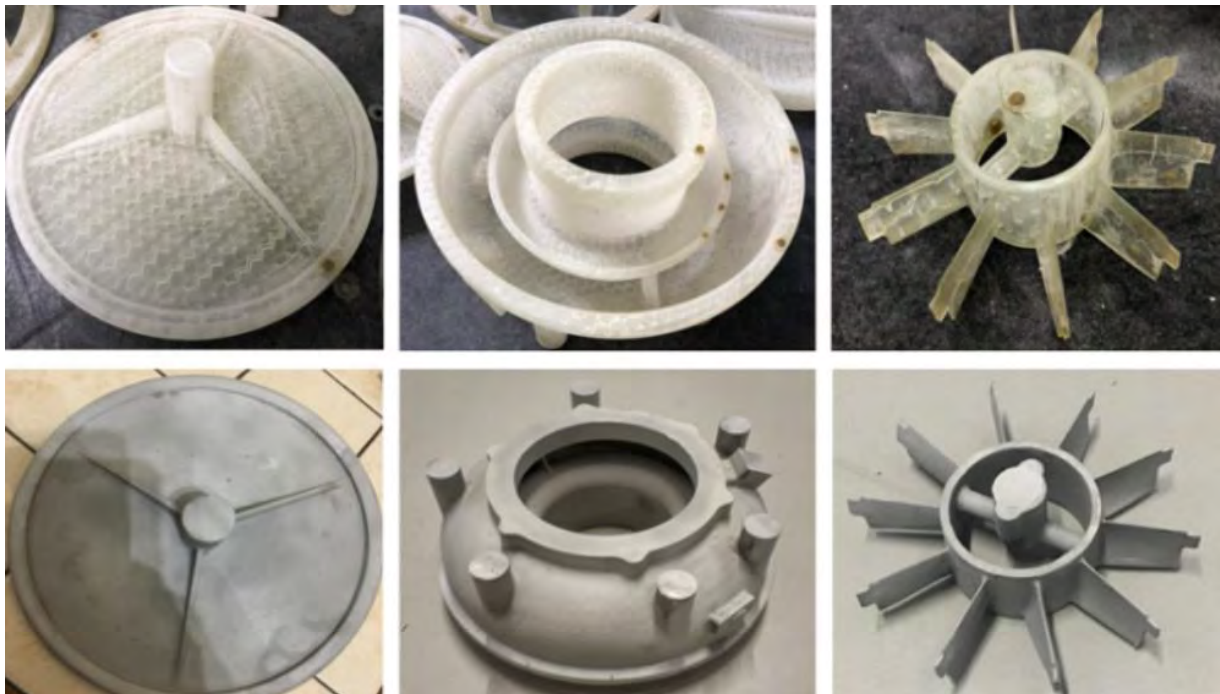


Рисунок 1.31 – Деталі виготовлені для лиття

На сьогодні є багато виробників фотополімера але з ним можливо виділити декілька що мають виробництва великої кількості різних фотополімерів, з різними фізичними властивостями і одним з них є Anycubic. Вони виробляють як стандартні фотополімери, що можуть відрізнятися по швидкості експонування та по роздільній здатності самого фотополімера так і технічні фотополімери зокрема гнучкі фотополімери та подібні до АБС по властивостям, тобто жорсткі та міцні.

У Anycubic в їх фотополімерах є декілька поколінь, які між собою відрізняються фізичними властивостями. Покоління є у стандартній смолі, АБС-подібному фотополімері, water-wash фотополімер, еко-фотополімер. Даний фотополімер зображений на рисунку 1.32.[44]



Рисунок 1.32 – Фотополімерна смола Anycubic Standart V2

Порівнюючи ці покоління на прикладі стандартного фотополімеру можна визначити наступні характеристики, що змінювалися в поколіннях.

Густина фотополімера:

- Anycubic Standart – 1.13 г/см^3 ;
- Anycubic Standart V2 – від 1.05 до 1.25 г/см^3 .

Подовження на розрив звичайного фотополімера:

- Anycubic Standart – 12-16%;
- Anycubic Standart V2 – 25-30%.

Модуль пружності:

- Anycubic Standart – 1400-1600 МПа;
- Anycubic Standart V2 – 1500-2100 МПа.

Міцність на згин:

- Anycubic Standart – 50-60 МПа;
- Anycubic Standart V2 – 40-50 МПа.

Таким чином фотополімери Anycubic зі зміною покоління змінюються і фізичні характеристики покращуючи фотополімери від покоління до покоління.

Наступним виробником фотополімерів є Elegoo. Вони виготовляють фотополімери подібні до фотополімерів Anycubic.[45]

Фотополімери Elegoo можливо проаналізувати на прикладі ABS подібних фотополімерів. У Elegoo також є фотополімери, що відрізняються за поколінням:

- ABS Like;
- ABS Like +;
- ABS Like 2.0;
- ABS Like 3.0;
- ABS Like 3.0 8K;

ABS Like має наступні характеристики:

- твердість – 75D;
- в'язкість – 150-250МПа*с;
- подовження при розриві – 20-30%;
- міцність на розтягування – 35-55 МПа;
- усадка – 3.72-4.24%.

ABS Like + має наступні характеристики:

- твердість – 85D;
- в'язкість – 200-300МПа*с;
- подовження при розриві – 25-35%;
- міцність на розтягування – 40-60 МПа;
- усадка – 3-4%.

ABS Like 2.0 має такі характеристики:

- твердість – 85D;
- в'язкість – 180-200 МПа*с;
- подовження при розриві – 25-35%;
- міцність на розтягування – 45-85МПа;
- усадка – 4.3-5.6%.

ABS Like 3.0 має такі характеристики:

- твердість – 85D;
- в'язкість – 180-200 МПА*с;
- подовження при розриві – 25-35%;
- міцність на розтягування – 30-52 МПа;
- усадка – 4.3-5.6%.

ABS Like 3.0 8K має такі характеристики:

- твердість – 88D;
- в'язкість – 137-200 МПА*с;
- подовження при розриві – 25-35%;
- міцність на розтягування – 60-81МПа;
- усадка – 4.3-5.6%.

Таким чином, фотополімери від Elegoo не дуже відрізняються від покоління до покоління, згідно фізичним характеристикам найбільше змінюється в'язкість фотополімера.

Фотополімер від Elegoo зображений на рисунку 1.33.



Рисунок 1.33 – Фотополімер Elegoo ABS Like

1.3 Фотополімерна технологія 3D-друку у виробництві робототехнічних систем та радіоелектроніки

Сьогодні фотополімерна технологія широко використовується у виробництві електронних пристроях та робототехнічних системах. Переваги технології, а саме висока точність, різноманітність механічних та фізичних властивостей матеріалів, що можуть використовуватися для виготовлення деталей з мінімальними витратами на побудову середньосерійного гнучкого виробництва забезпечили її використання у робототехніці.

Робототехніка, як сфера що постійно розвивається, потребує швидкого виробництва деталей, які можуть потребувати різні фізичні властивості окремих деталей, таких як висока міцність, гнучкість, оптична прозорість, та ін. у поєднанні з необхідністю дотримуватися точних геометричних розмірів деталей.

У виробництві робототехнічних систем з використанням стандартних методів виробництва пластикових деталей, таких як лиття під тиском необхідно розробляти достатньо довгий, дороговартнісний та складний процес виготовлення деталей включно з виготовленням форм для лиття, які дорого коштують і навіть маленька помилка в проєктуванні призводить до великих фінансових витрат, а так як робототехніка постійно розвивається ці форми необхідно постійно оновлювати і перероблювати, що також додає кінцевої вартості виробництва. Фотополімерна технологія дозволяє оминати весь цей процес та скоротити витрати за рахунок власної гнучкості.

На прикладі робота-маніпулятора, що є представником складної робототехнічної системи, що містить різноманітні елементи такі як кінематичні пари, механіки руху, принципи побудови маніпуляторів, що можуть відрізнятися за призначенням можливо проаналізувати доцільність використання фотополімерного друку в процесі виробництва таких роботів. А саме механічної частини та корпусних елементів.[46-48]

Робот маніпулятор зображений на рисунку 1.34.



Рисунок 1.34 – Робот-маніпулятор

Стандартна конструкція промислового робота включає в себе корпусні елементи, які можуть мати складні форми та повинні забезпечувати захист внутрішніх приводів від зовнішніх впливів, таких як температура та забруднень.

Для друку цих елементів можливо використовувати стандартні фотополімери, що при відсутності особливих властивостей мають високу жорсткість, міцність та низьку ціну. Така корпусна деталь зображена на рисунку 1.35.



Рисунок 1.35 – Корпусна деталь принтера

Наступним елементом що доцільно друкувати на фотополімерному 3D-принтері є шестерні, які широко використовуються в актуаторах та редукторах. До шестерен висуваються вимоги до точності геометричної форми, твердості та зносостійкості робочих поверхонь, однорідності матеріалу. Фотополімерний друк цих деталей можливий за рахунок наявності інженерних фотополімерів, що задовольняють задані вимоги до шестерен. Використання фотополімерного друку дозволяє швидко змінити передатне число що впливає на швидкісні характеристики робота, в редукторах фотополімерний друк дозволяє швидко змінювати передатне число з мінімальним люфтом, що є критичним для точного переміщення. Редуктор зображений на рисунку 1.36.[49]

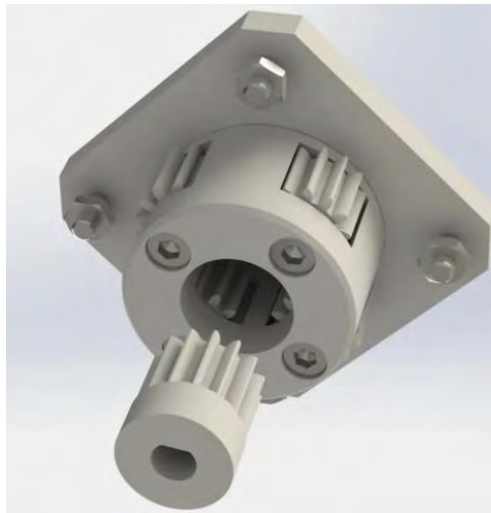


Рисунок 1.36 – Планетарний редуктор для крокового двигуна Nema 17

Наступним елементом в якому доцільно використовувати фотополімерний друк є захват. Захвати бувають різних форм, розмірів та конструкцій, основні елементи які можуть бути як гнучкими так і потребувати високої міцності. Тому фотополімер необхідно вибирати згідно вимог, що висуваються до маніпулятора та конструкції. Захват маніпулятора зображений на рисунку 1.37.[50]



Рисунок 1.37 – Захват робота маніпулятора

Таких елементів як в промисловому роботі є дуже багато і в інших робототехнічних системах, тому друк для робототехіки за фотополімерною технологією є актуальним.

Виробництво друкованих плат за допомоги фотополімерного друку на сьогодні є актуальним методом виготовлення одношаровних друкованих плат а саме етап фотолітографії, який забезпечує перенесення топології на фольгований текстоліт за допомоги фотополімера і подальше його експонування. У порівнянні з іншими технологіями адитивного або субтрактивного створення доріжок на платі, фотополімерна технологія забезпечує достатню точність (відхилення 15 мкм) для того щоб ця технологія стала одним з основних технологій формування рисунку трасування плати.[51]

Процес формування топології плати на фольгованому текстоліті ділиться на наступні етапи:

- Перенесення топології з CAD програми у слайсер для фотополімерного принтера.

Після створення топології у CAD програмі, її необхідно експортувати у формат, який дозволить її перетворення у файл .stl з максимальним розширенням. Приклад топології зображений на рисунку 1.38.[52]

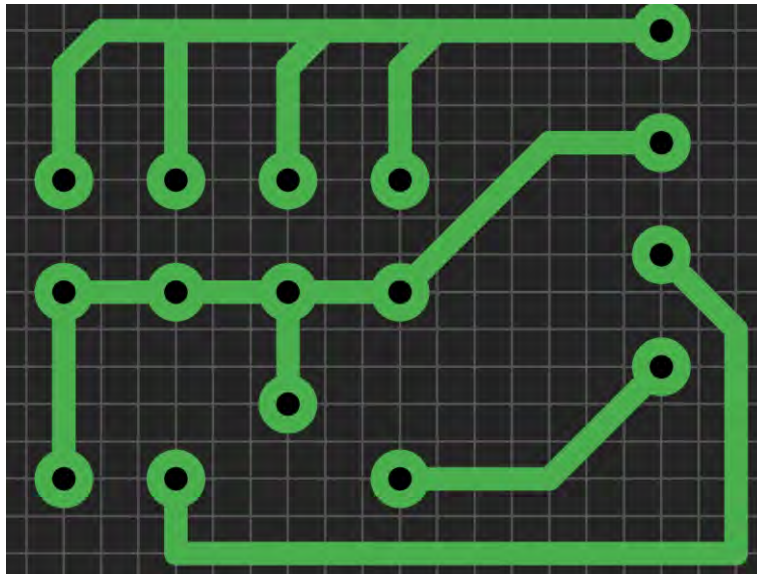


Рисунок 1.38 – Приклад топології у CAD програмі

Після створення топології та її експорту отримуємо зображення топології у форматі або PDF або PNG. Експортована топологія зображена на рисунку 1.39.

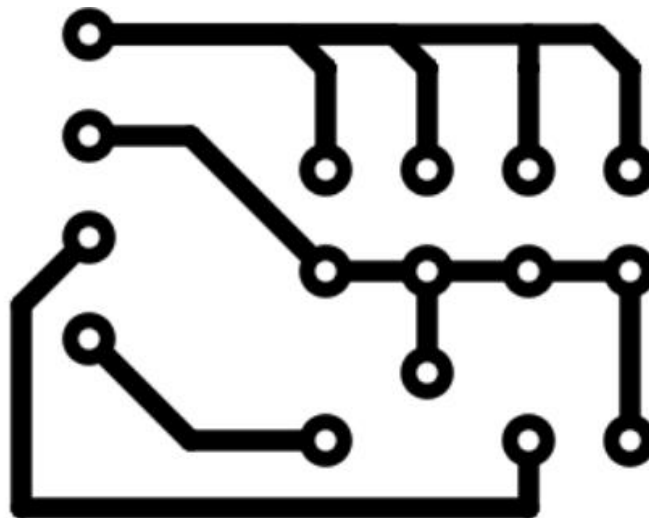


Рисунок 1.39 – Експортована топологія плати

Далі для коректного перенесення за допомогою фотополімерного принтера необхідно зробити її віддзеркаленою і далі вже перенести її у програму принтера. Це можна зробити у ПЗ NanoDLP, таким чином перенесена топологія зображена на рисунку 1.40.[53]

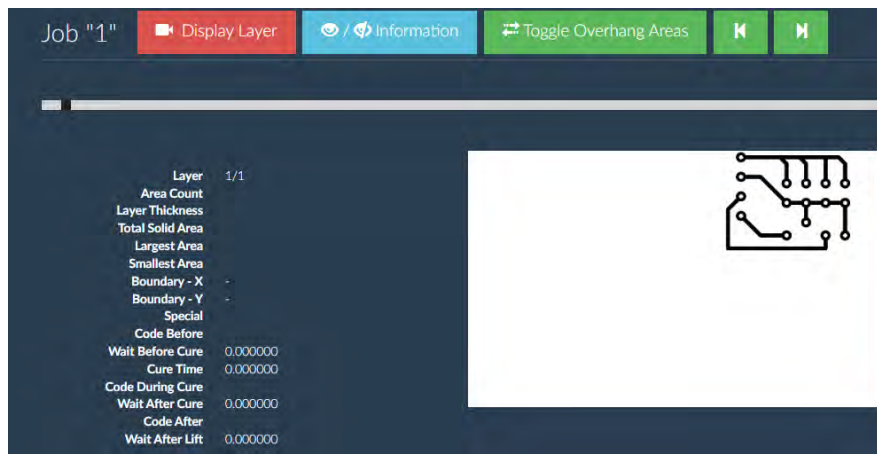


Рисунок 1.40 – Топологія плати в NanoDLP

Після процесу слайсингу топології, на екрані принтера можливо її відобразити, топологія на екрані принтера зображена на рисунку 1.41.



Рисунок 1.41 – Топологія на екрані принтера

Таким чином після відображення шару топології, можливо встановити ванну з фотополімером і перейти до етапу перенесення топології на друкований стеклотекстоліт, в результаті чого отримуємо плату з шаром фотополімера, який повторює топологію на платі. Ця плата зображена на рисунку 1.42.[54]

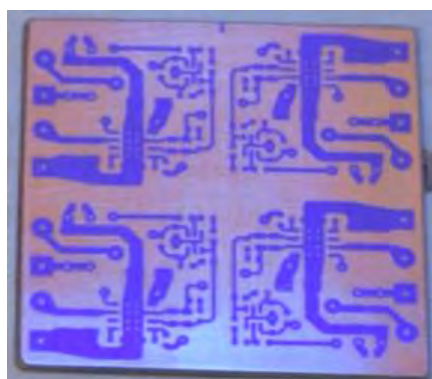


Рисунок 1.42 – Плата з готовою топологією

Після промивки в розчині хлорного заліза отримуємо плату з готовою топологією. Плата з готовою топологією зображена на рисунку 1.43.

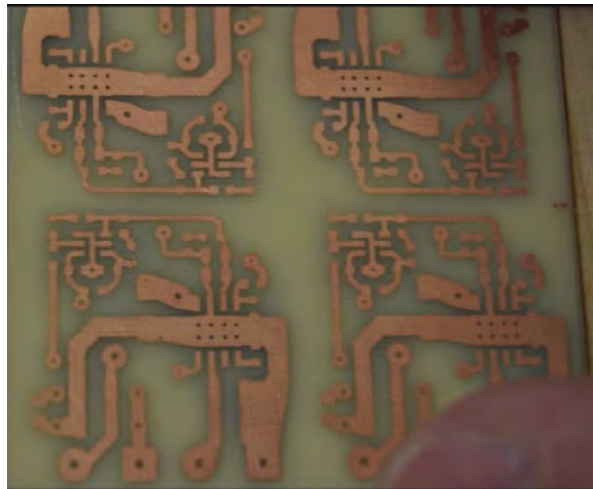


Рисунок 1.43 – Витравлена плата з топологією

Таким чином фотополімерний 3D-друк може використовуватися і у виробництві плат, займаючи собою відповідальний етап перенесення топології на друковану плату з високою точністю.

1.4 Автоматизована система керування фотополімерного друку

У сучасних умовах автоматизації виробництва особливого значення набувають системи керування технологічними процесами (СКТП). Ефективність їх функціонування безпосередньо впливає на якість продукції, енергоефективність, економічність виробництва та безпеку експлуатації обладнання. Оцінка якості СКТП є складовою частиною технічного і економічного аналізу виробництва, а її результати слугують основою для вдосконалення систем автоматизації.[55]

Системи керування технологічними процесами – це сукупність технічних засобів, програмного забезпечення і алгоритмів, що забезпечують автоматичне чи автоматизоване керування перебігом технологічних процесів. До основних функцій СКТП належать: збирання і обробка інформації, аналіз поточного стану

об'єкта керування, прийняття керуючих рішень, формування та передача керуючих впливів.[56]

Системи можуть бути централізованими, децентралізованими або розподіленими. У сучасному виробництві найпоширенішими є розподілені СКТП, які поєднують у собі переваги інших типів та забезпечують високу гнучкість і надійність.

Якісні показники СКТП поділяють на кілька основних груп, першою з яких є технічні показники, до них належать:

- надійність – здатність системи зберігати працездатність у заданих умовах експлуатації. Основними характеристиками є напрацювання на відмову, середній час відновлення, коефіцієнт готовності;
- точність – відображає здатність СКТП забезпечити мінімальне відхилення фактичних параметрів процесу від заданих;
- швидкодія – характеризується часом реакції системи на зміни керованого параметра або зовнішні збурення;
- стійкість – здатність системи зберігати контроль над процесом при наявності внутрішніх або зовнішніх збурень.

Наступною групою є економічні показники, до них належать:

- економічна ефективність – оцінюється за такими критеріями, як зниження витрат на виробництво, скорочення втрат сировини, енергоносіїв, підвищення продуктивності;
- вартість системи – охоплює витрати на проектування, встановлення, експлуатацію, технічне обслуговування.

Функціональні показники є наступною групою. Ці показники пов'язані з можливостями системи реалізувати задані функції керування:

- гнучкість – здатність системи адаптуватися до зміни режимів роботи чи типу продукції;
- масштабованість – можливість розширення функціоналу без повної модернізації системи;

– інтегрованість – здатність взаємодіяти з іншими інформаційними чи автоматизованими системами.

Останньою групою є ергономічні та експлуатаційні показники:

– зручність в обслуговуванні – простота і доступність процедур налагодження, технічного обслуговування, діагностики;

– інтерфейс користувача – зручність взаємодії оператора з системою, зрозуміле графічне відображення процесу, попереджувальні повідомлення.

Вкрай важливим питанням є методи оцінювання якісних показників. Існує кілька підходів до оцінювання якості СКТП:

– математичне моделювання – дозволяє на етапі проектування оцінити основні динамічні властивості системи;

– інструментальні методи – застосовуються для вимірювання параметрів у реальних умовах експлуатації;

– експертна оцінка – здійснюється на основі опитування фахівців і є доцільною при неможливості прямого вимірювання;

– імітаційне моделювання – використовується для дослідження поведінки системи в умовах, наближених до реальних.

Критично важливо також використовувати стандартизовані методики, наприклад ISO 9001 для оцінювання якості процесів, або методики оцінки функціональної безпеки згідно з IEC 61508.[57-60]

Якісні показники СКТП тісно пов'язані між собою. Наприклад, підвищення точності часто потребує збільшення витрат на апаратуру, що впливає на економічну ефективність. Підвищення швидкодії може знижувати надійність через перевантаження обладнання. Тому для оптимізації системи необхідно здійснювати компроміс між окремими показниками з урахуванням специфіки виробництва.

Якісні показники фотополімерного 3D-друку визначаються рядом критеріїв, таких як точність позиціонування, стабільність температурного режиму, ефективність контролю експозиції, швидкість друку та здатність до повторюваного відтворення моделей. Для подальшої роботи необхідно

розглянути кожен із цих аспектів, наведемо приклади з досліджень та висвітлимо підходи до оптимізації системи керування.

Точність позиціонування. Одним із ключових показників системи керування є її здатність забезпечувати точне та стабільне позиціонування платформи друку з виробом, що друкується, та оптичної системи. У фотополімерному друці навіть незначне відхилення по координатах може спричинити розмиття шарів, деформації геометрії та втрату дрібних деталей [61].

Сучасні принтери зазвичай оснащуються лінійними направляючими з високою точністю та кроковими двигунами, які керуються мікроконтролером. Забезпечення точності до 5-10 мікронів є критично важливим, особливо для моделей з великою кількістю дрібних елементів.

Важливо також враховувати зворотний зв'язок системи – наявність датчиків положення дозволяє контролювати рух платформи та своєчасно реагувати на механічні або програмні відхилення.

Також до проблем позиціонування можна віднести занадто сильне прилипання виробу, що друкується до прозорого матеріалу дна ванни, що може призвести до пропуску шарів та подальшого відривання виробу від платформи.

З точки зору теорії автоматичного управління цей параметр описується як статична похибка системи. Вона виникає при перехідних процесах або в усталеному режимі, коли вихід не точно відповідає заданому значенню. Типовою моделлю є система з керуванням положенням (наприклад, положення платформи по осі Z). Передаточна функція включає пропорційне, інтегральне або ПД-регулювання для зменшення похибки. Ціллю оптимізації є мінімізація усталеної похибки до нуля ($\epsilon \rightarrow 0$) або зменшити її до допустимого рівня. Для практичної реалізації можливе застосування датчиків положення та ПД-регулятора дозволяє точно тримати координати, навіть при змінному навантаженні та зміні швидкості руху.[62]

Стабільність температурного режиму. Температура фотополімерної смоли має незначний вплив на її в'язкість, швидкість полімеризації та якість затвердіння шарів. Надмірне охолодження уповільнює реакцію та спричиняє

неповне затвердіння, тоді як перегрів – до передчасної полімеризації, розширення смоли, утворення бульбашок та інших дефектів. Всі ці явища є незначними але висока температура досить сильно впливає на плівкові матеріали дна ванни. При підвищенні температури збільшується адгезія між плівкою дна ванни та виробом, що друкується. Це також може збільшити вірогідність відриву виробу від платформи.

З точки зору теорії автоматичного управління це класичне завдання регулювання температури як керованого параметра. Математична модель може бути представлена як диференційне рівняння теплопередачі, яке описується передаточною функцією низькопропускнуго фільтра. Система керування це ПІ або ПІД-регулятор з використанням датчиків (наприклад, термістора) для вимірювання температури. Критеріями керування є мала перерегуляція, короткий час перехідного процесу, висока стійкість. Реалізація контролера зворотного зв'язку дозволяє підтримувати температуру смоли в межах $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, незважаючи на зовнішні збурення.[63]

Контроль експозиції включає в себе як тривалість, так і інтенсивність УФ-випромінювання. Неправильно підібрані параметри можуть призвести до недополімеризованих шарів (що знижує механічну міцність виробу) або до «пересвічування» (викликає розтікання полімеру за межі потрібного контуру).

Система керування повинна мати можливість точно задавати час експозиції для кожного шару, а також інтенсивність світла – зазвичай це реалізується через широтно-імпульсну модуляцію (PWM) світлодіодів або цифрове керування драйверами. Деякі системи додатково реалізують зворотний зв'язок від фотодатчиків, що дозволяє автоматично коригувати світловий потік при зміні зовнішніх умов або старінні світлодіодів.

З точки зору теорії автоматичного управління це керування інтенсивністю впливу на об'єкт (енергетичним параметром), часто моделюється як система з інтегруючим елементом. Модель можна представити як реакцію світлочутливої смоли на енергію світла – інтегральна залежність (кумулятивний ефект). Реалізація виконується формуванням широтно-імпульсної модуляції сигналу

(ШИМ) з фіксованою або змінною частотою. Метою є дозування подачі енергії, яка відповідає необхідному ступеню полімеризації (контроль за часом інтеграції). Контролер задає точний час експозиції, а фотодатчики контролюють яскравість світла, утворюючи контур зворотного зв'язку.[64]

Швидкість друку. Швидкість друку визначає продуктивність пристрою, проте не повинна досягатися за рахунок погіршення якості. Система керування дозволяє налаштувати індивідуальні параметри для різних типів моделей: висота шару, швидкість підйому платформи, паузи між шарами тощо.

Додатково впроваджується динамічна адаптація швидкості в залежності від площі експонованої області – якщо шар містить велику суцільну поверхню, необхідно дати більше часу для її затвердіння.

З точки зору теорії автоматичного управління це показник динаміки системи, що характеризує швидкість досягнення нового стану. Критеріями якості є час перехідного процесу (t_p), перерегулювання (σ), аперіодичність. Оптимізація являє собою компроміс між швидкістю та стабільністю; надто швидка система може втрачати стабільність. Для реалізації застосовуються адаптивні алгоритми, які корегують швидкість друку в реальному часі залежно від площі шару або складності геометрії.[65]

Відтворюваність результатів. Якість 3D-друку визначається не лише окремими вдалим результатами, а й здатністю стабільно повторювати їх. Для цього система керування повинна включати в себе збереження параметрів сеансів, автоматичну діагностику та відновлення процесу після збою. Наявність інтерфейсів для збереження логів, підключення до мережі та моніторингу в реальному часі дозволяє не лише виявляти проблеми, а й навчати систему на основі попередніх результатів.

З точки зору теорії автоматичного управління даний показник описується через робастність – здатність системи зберігати стійкість і точність при зміні параметрів або збуреннях. Модель є нечітко визначеною системою з параметричною невизначеністю. Для реалізації використовується підхід з побудовою адаптивних систем управління або застосуванням стійких

регуляторів (робастне ПДД-керування). Практична реалізація забезпечується автоматичним калібруванням, логуванням параметрів, виявленням збоїв, самодіагностикою – все це підвищує робастність системи друку.[66]

Якісна система керування є критичним елементом для досягнення високої точності, стабільності та надійності у фотополімерному LCD-друці. Інтеграція апаратних і програмних рішень, включаючи системи зворотного зв'язку, температурний контроль, гнучкі налаштування експозиції та адаптивну швидкість друку, значно покращує результати. Тільки завдяки детальному аналізу всіх складових можна створити систему, яка забезпечить конкурентоспроможну якість друку.[67]

1.5 Технологічний процес перемішування фотополімерного друку

Одним з основних процесів на рівні з процесом полімеризації шару, що забезпечує нашарування фотополімеру є процес «перемішування». В технології LCD перемішування використовується для відриву експонованого фотополімеру від плівки та для затікання фотополімера в область друку з перемішуванням твердих часток, що виникли в процесі паразитного експонування.

Прозора плівка є складовою частиною ванни принтера, з будовою моделі знизу-вгору. Сама по собі плівка є еластичною і може тягнутися на відстань, яка буде залежати від стану її натягіння, товщини, матеріалу та розмірів ванни. В стандартному випадку добре натягнена плівка може розтягуватись до 3-4 мм. Також плівка компенсує дію адгезії по всій площі, шляхом поступового відриву площини полімеризованого шару від плівки. Процес перемішування зображений на рисунку 1.44.[68]



Рисунок 1.44 – Процес перемішування

Використання інших матеріалів в якості дна ванни, таких як акрил, силікон та ін. через високі адгезійні властивості, що виникають через високу спорідненість матеріалів та через низьку пружність та вигин поверхні призводять до одночасного відриву всієї площини горизонтального перерізу шару, що створює велике навантаження на поверхню дна ванни в місці відриву і призводить до її руйнування.[69]

Такий відрив моделі з подальшим руйнуванням поверхні дна ванни зображений на рисунку 1.45.

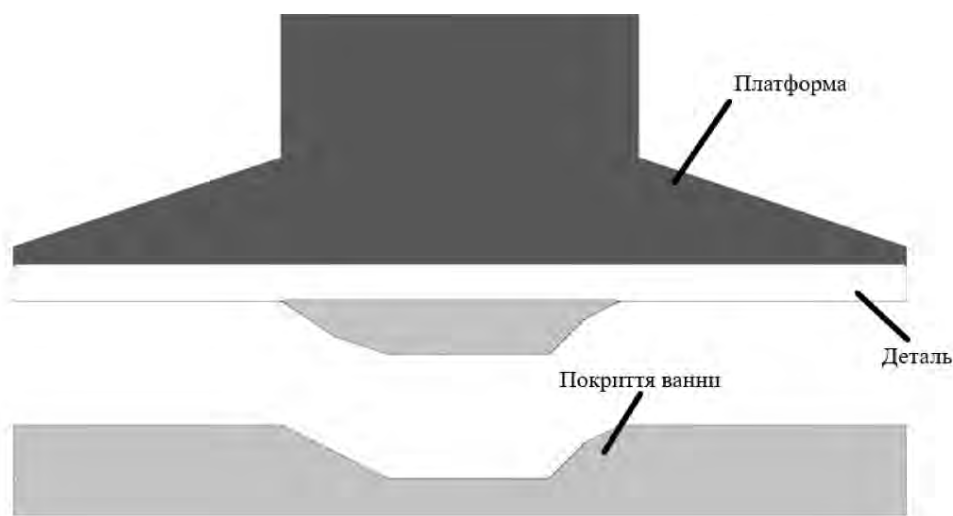


Рисунок 1.45 –Результат відриву платформи від силіконової основи ванни

Для такої системи використовуються механізми, що змінюють положення ванни відносно платформи. Тобто в даному випадку використовуються ванни, які мають великі бортики, що перевищують товщину шару фотополімеру мінімум в два рази, для компенсації висоти при нахилі ванни. Дно такої ванни будується із прозорого до УФ пластику, такого як акрил або полікарбонат, поверхня якого вкрита шаром силікону, який забезпечує низьку адгезію фотополімеру до поверхні.[70]

Таким чином після полімеризації, коли шар одночасно поєднаний з платформою і ванною, за допомоги ПЗ, що керує принтером, одна сторона ванни починає рухатись вгору, тим самим створюючи кут нахилу і поступово відриваючи шар від платформи, тим самим зменшуючи навантаження на

силіконову основу і зменшуючи її зношення в десятки разів. У випадку відсутності механізму зміни кута нахилу платформи покриття руйнується після десятків шарів. В другому випадку руйнування відбувається після десятків годин друку, що дорівнюють тисячам шарів друку.[71-73]

Ванни з плівкою не потребують встановлення додаткових механізмів та використання ванн з високими бортами. Це є першою перевагою такого методу друку. Другою перевагою є більша швидкість, яка зумовлена меншою кількістю операцій:

- після закінчення шару необхідно підняти одночасно одну сторону ванни та платформу на висоту, що визначається розмірами друкованої платформи. Після проведення експериментальних досліджень, визначено що для платформи розмірами 120x68 мм, висота підйому становить 6 мм, через розтягнення плівки;

- наступним кроком є опускання платформи в початкове положення. Після опускання необхідний час в декілька секунд для стабілізації фотополімеру і покриття ним всієї поверхні. Час може відрізнятися в залежності від густини фотополімеру;

- останнім кроком є перехід платформи до висоти наступного шару.

У випадку з плівкою процес скорочується до підйому платформи на величину розтягнення плівки та переходу до наступного шару зі стабілізацією фотополімера, що займає від 1 до 2-х секунд. Весь цикл перемішування з використанням плівки займає від 6 до 12 секунд. Для твердої основи ванни час циклу перемішування збільшується більше ніж в два рази.[74]

Розвиток технології призвів до створення нових видів плівок. Використання фторопластової плівки яка є сополімером гексафторопропілена та тетрафторителена хімічно-стійкої, прозорої, з низькою адгезією, яка повільно мутніє в процесі полімеризації фотополімера, забезпечило її використання у фотополімерній технології.

Після фторопластової прозорої плівки, яка забезпечувала високу прозорість і низьку адгезію було розроблено плівку nFEP. nFEP це плівка на основі фторированого термопласта, яка своїми властивостями подібна до

фторопласта, але має більш високу міцність на розтяг, межа на розтяг якої становить 21-31 МПа в порівнянні з 14.5-28 МПа для FER. Тобто вона є більш жорстка в порівнянні з FER. Таким чином така плівка менше розтягується і від'єднання деталі відбувається на меншій висоті. Також її перевагою є більший термін експлуатації за рахунок її хімічної структури та властивостей, до 10 разів в порівнянні з FER. Однак недоліком даної плівки є те, що через більшу жорсткість плівки, деталі з тонкими елементами складніше надрукувати ніж на звичайній FER.[75]

Наступною плівкою, розробленою для фотополімерної технології є ACF, яка є композитним матеріалом, що складається з двох частин:

- глянцева антиадгезійна частина, яка знаходиться з внутрішньої частини ванни;

- буферна частина, яка знаходиться зі сторони екрана та має матову напівпрозору поверхню.

ACF плівка зображена на рисунку 1.46.



Рисунок 1.46 – ACF плівка

Товщина такої плівки становить 300 мкм, що є більшою ніж зазвичай використовується у FER та nFER, товщина яких досягає 200 мкм. Антиадгезійна частина спеціально розроблена для зменшення адгезії до фотополімера.[76]

Її перевагою є більш низька адгезія до фотополімеру, що прискорює друк і дає можливість зменшити висоту перемішування. За рахунок буферного шару, який має властивість самовідновлюватися, дана плівка більш зносостійка і має захист від протікання фотополімера на екран.

Недоліком даної плівки є її більш висока ціна в порівнянні з іншими плівками.

Було отримано результати відриву моделей з різною площею, які в подальшому були зведені в графік, що зображений на рисунку 1.47.[77]

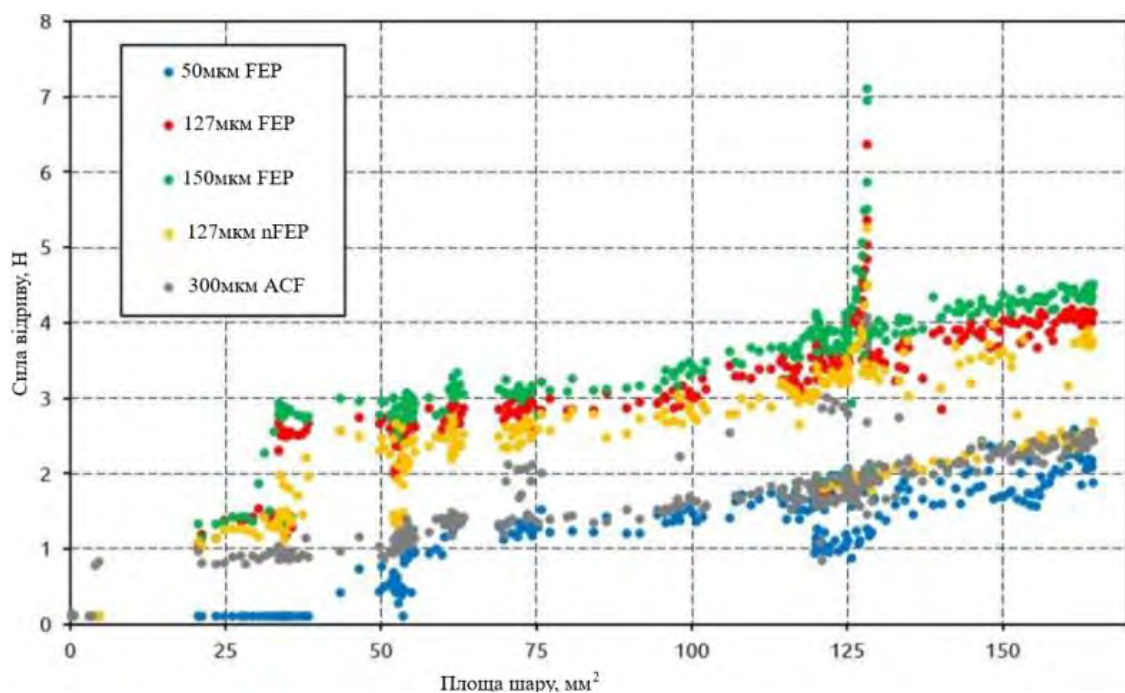


Рисунок 1.47 – Графік залежності сили відриву від товщини плівки і площі шару

На графіку можливо побачити залежності сили відриву від площі і товщини плівок, найбільші сили відриву відповідають базовим шарам, так як час експонування таких шарів є більші ніж звичайні в десятки разів.

Компанія AmerLabs, яка є розробником фотополімерів, провела власні дослідження, надрукувавши власні тестові моделі, які містять в собі різні тестові елементи, по яким можливо зробити висновок про якісні характеристики друку. Зміна геометричних розмірів елементів дає можливість побачити різницю між

різними типами плівок. Отримані в результаті досліджень надруковані моделі зображені на рисунку 1.48.[78]

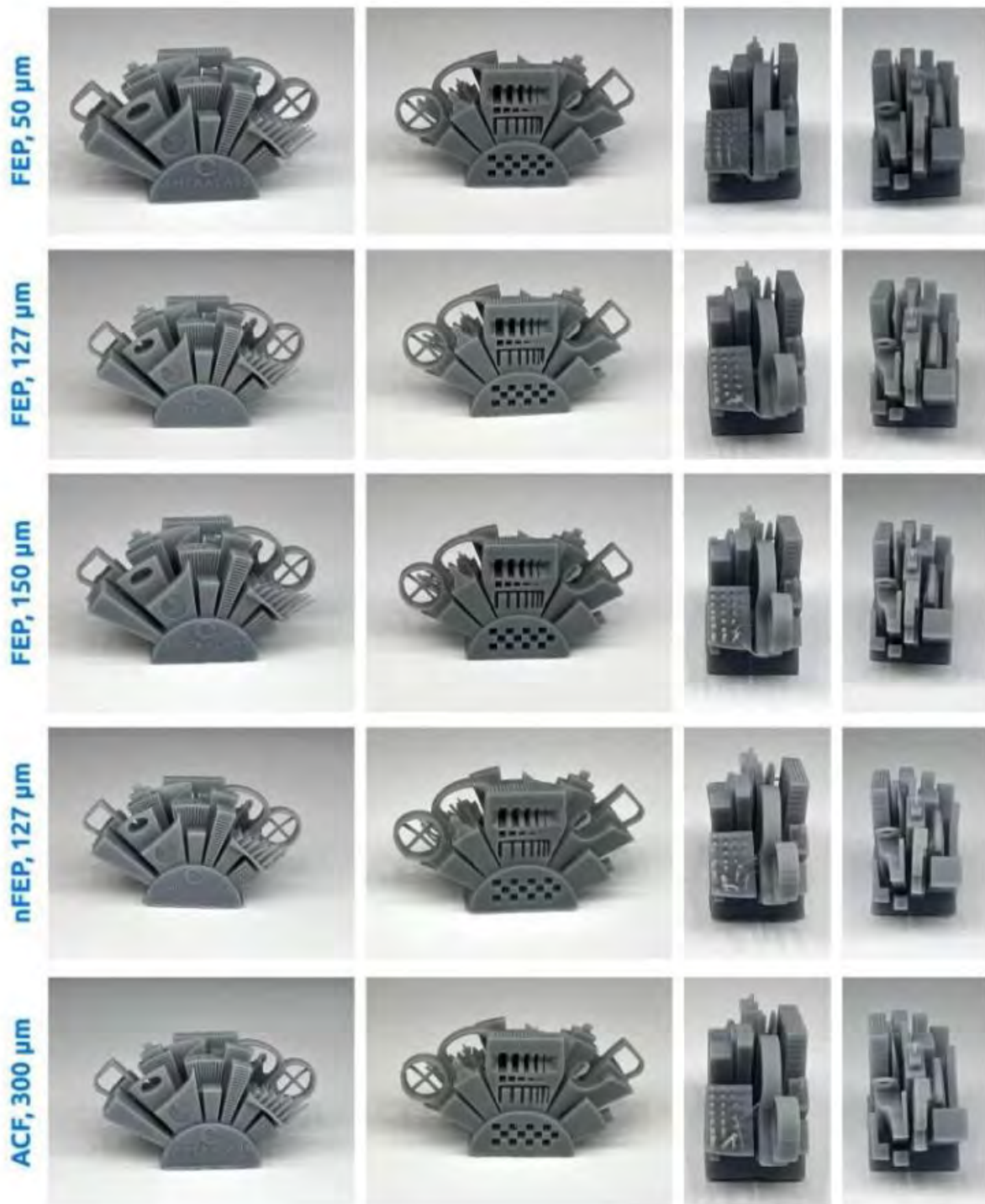


Рисунок 1.48 – Результати друку тестових моделей на різних плівках

Таким чином аналізуючи зображення можливо зробити висновок, що найкращий результат був отриманий з використанням нової плівки ACF з

товщиною 300 мкм, хоча деформація елементів і присутня але розміри цієї деформації значно менші ніж у інших типів плівок при збереженні всіх інших технологічних параметрів, фіксуючи зміни лише через властивості плівки, яка має значно нижчу адгезію експонованого фотополімера до плівки.

1.6 Аналіз основних технологічних параметрів слайсерів для фотополімерного друку

Слайсери – програмне забезпечення, що перетворює тривимірну модель деталі на велику кількість картинок горизонтального перерізу моделі, яка будується в залежності від розміру шару та виводиться на LCD екран для подальшої побудови моделі. У своєму складі має файл G-code, який використовуючи команди для керування ЧПК верстатами, здійснює технологічні операції принтера, такі як ввімкнення світлодіодної матриці, перехід від однієї картинки шару до іншої, контролює процес переміщення.[79]

Вікно роботи з моделлю дозволяє змінювати її положення, орієнтацію, розміри, масштабування тощо. Ці всі операції зображені на рисунку 1.49.

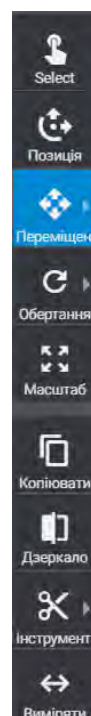


Рисунок 1.49 – Операції з моделями зі слайсера Lychee Slicer

Також слайсери підтримують обмежене редагування моделі, тобто додавання на поверхню тексту, примітивів, що можуть як додаватися до моделі так і відніматися, тим самим створюючи отвори необхідної форми. Доданий на модель текст зображений на рисунку 1.50.[80]

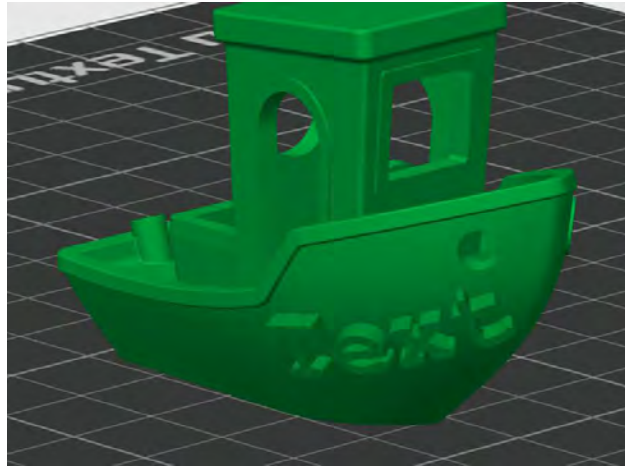


Рисунок 1.50 – Модель з доданим текстом на поверхні

Для огляду параметрів взято три найпоширеніших слайсера: NanoDLP, ChituBox, Lychee Slicer, Voxeldance Tango. Ці слайсери зображені на рисунку 1.51.



Рисунок 1.49 – Слайсери для фотополімерного 3D-друку

NanoDLP – це відкритий слайсер, що розробляється для використання у фотополімерних принтерах з різними будовами та методами відображення шарів, тобто його можливо використати як для SLA принтера з системою лазера та сканаторів так і для LCD принтера, що в своєму складі має екран та світлодіодну матрицю. Також NanoDLP виступає як керуючий елемент для таких

принтерів. Тобто він керує принтером через мікрокомп'ютер Raspberry Pi. Сам слайсер зображений на рисунку 1.52.[81]

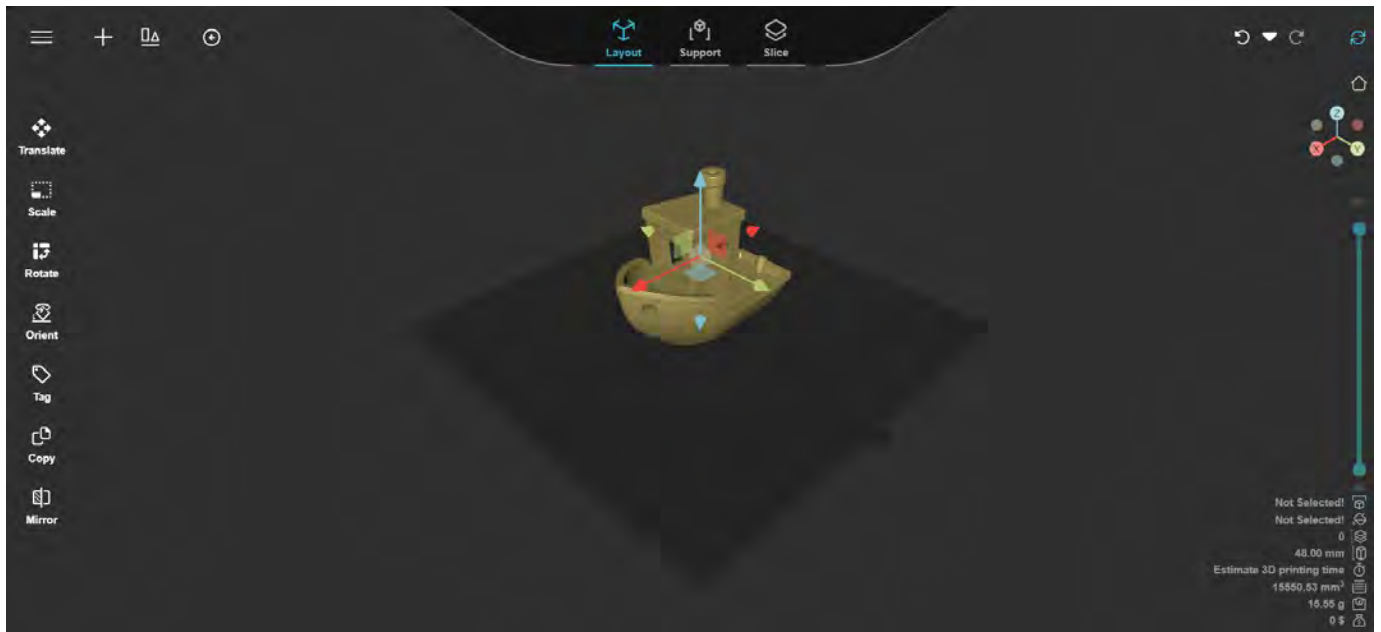


Рисунок 1.52 – Слайсер NanoDLP

Слайсер забезпечує повний цикл підготовки моделі до друку від положення моделі до додавання підтримок. Модель з доданими підтримками зображена на рисунку 1.53.

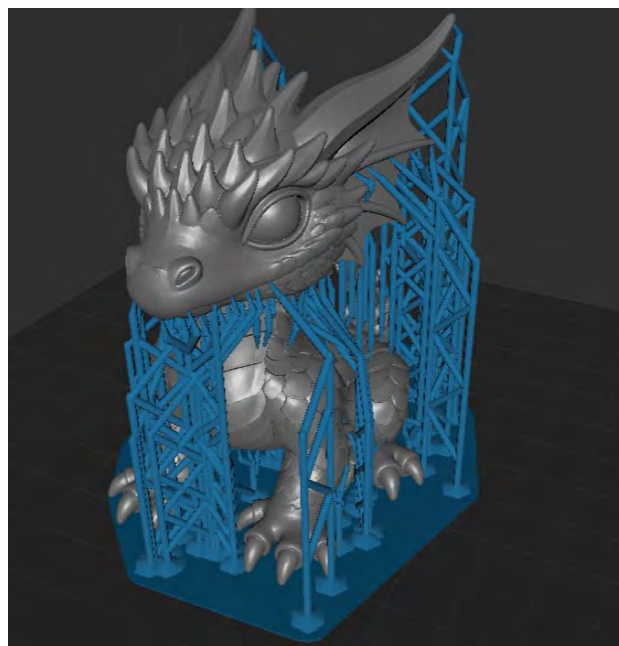


Рисунок 1.53 – Модель з підтримками у NanoDLP

У вікні редагування підтримок дозволяє редагувати як ширину підтримок, їх кількість, їх додавання автоматичне, тобто слайсер за допомоги алгоритму, який аналізує нависаючі частини, які мають більше ніж 45° і в тих місцях додає підтримки. Після чого модель нарізається на шари та відправляється на друк.

ChiTuBox – слайсер що підтримує тільки LCD принтери, що виготовляються великими розробниками, такими як Anycubic, Elegoo та ін. Підтримує всі стандартні можливості щодо моделі. Інтерфейс ChiTuBox зображений на рисунку 1.54.[82]

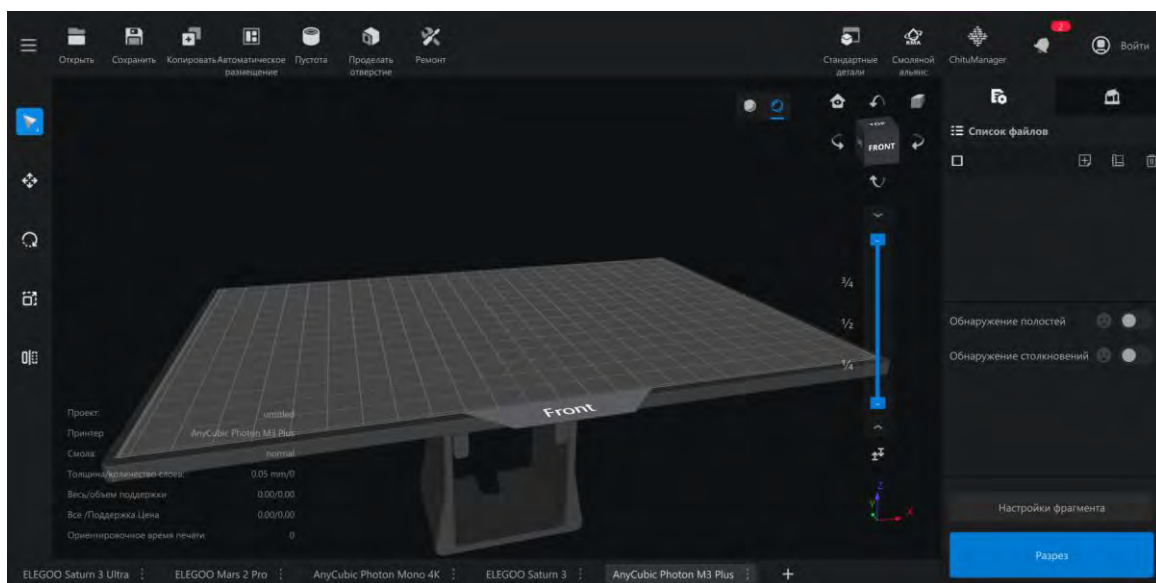


Рисунок 1.54 – Слайсер ChiTuBox

У вікні підтримок ChiTuBox дає можливість встановлення підтримок як в ручному так і автоматичному режимі.

Слайсер Lyshee підтримує всіх виробників принтерів, із особливостей у порівнянні з іншими слайсерами має підтримку профілей смоли зі зворотнім відгуком, що дозволяє підлаштовувати профілі смоли під конкретний принтер.[83]

Вікно слайсера зображено на рисунку 1.55. Налаштування підтримок схоже до попередніх слайсерів. Із особливостей даного слайсера підтримка точок контакта у вигляді хреста та куба.

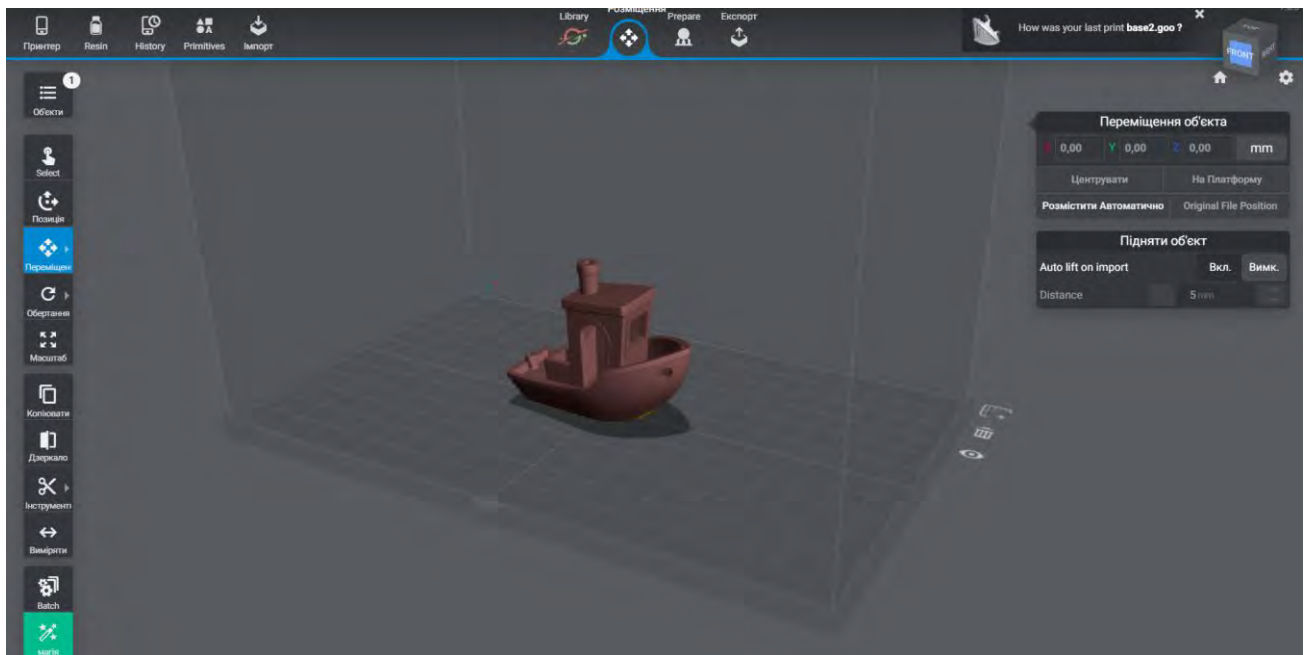


Рисунок 1.55 – Слайсер Lychee

Також особливістю цього слайсера є можливість моделювання процесу друку. Цей процес зображений на рисунку 1.56.

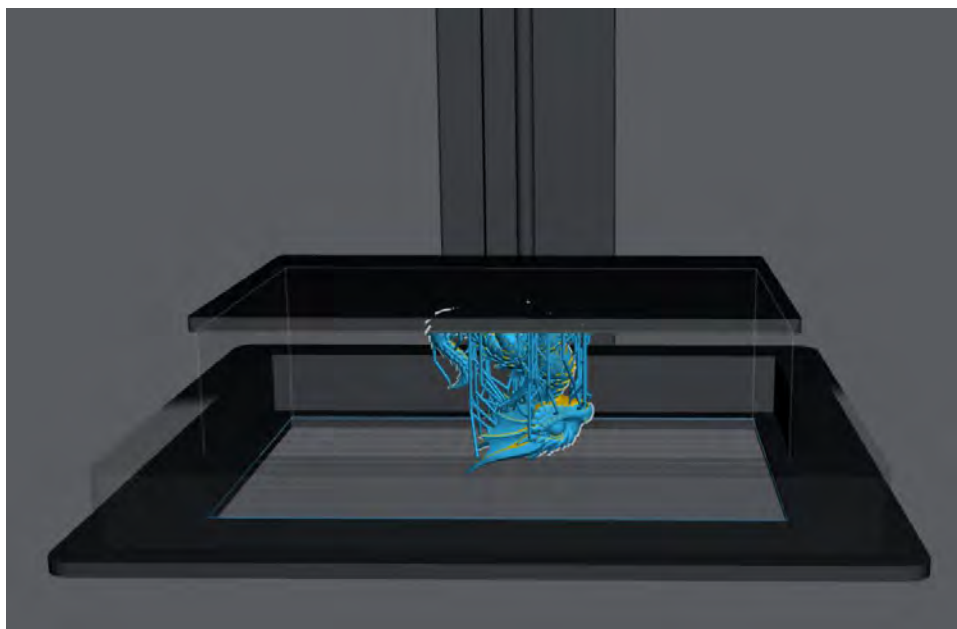


Рисунок 1.56 – Моделювання процесу друку

Слайсер Voxeldance Tango також як і інші слайсери підтримують всіх виробників принтерів, із особливостей цього слайсера можливо виділити можливість модифікації моделі у вигляді пустотілої, що використовується для

економії фотополімеру і зменшення ваги. Його вікно зображене на рисунку 1.57.[84]

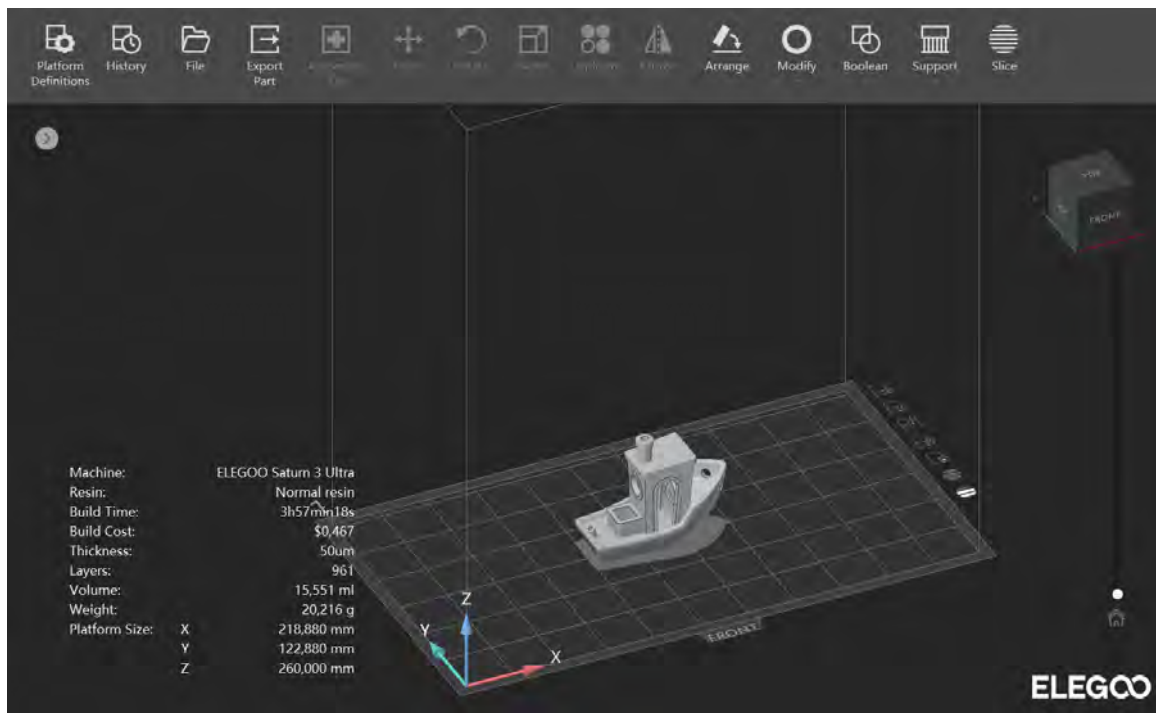


Рисунок 1.57 – Слайсер Voxeldance Tango

Слайсер має розгалужене налаштування підтримок, зміну точки контакту та рафту, на якому розміщається модель.

Модель з підтримками зображена на рисунку 1.58.

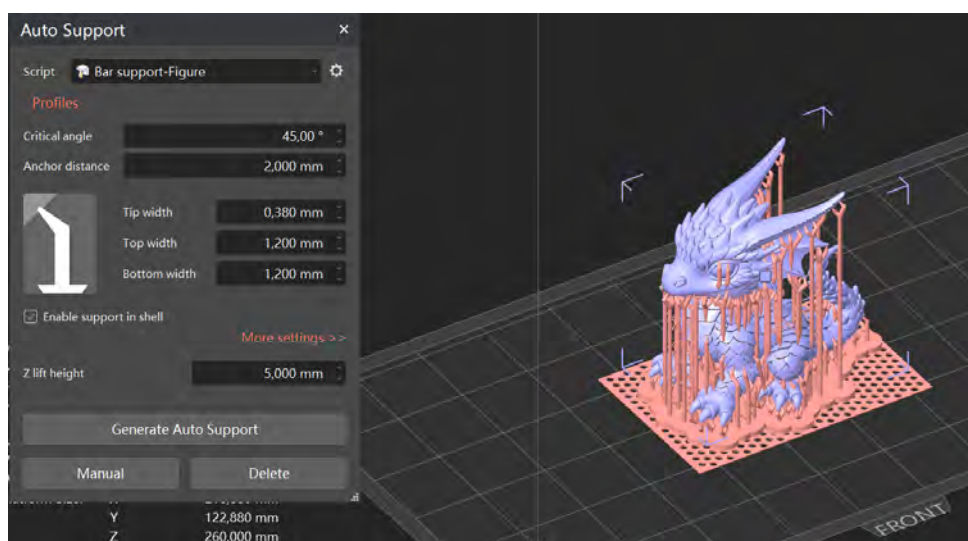


Рисунок 1.58 – Модель з підтримками у слайсері Voxeldance Tango

Стандартний варіант G-code зображено на рисунку 1.59. В першій секції міститься технічна інформація, яка може виводитися на екрані принтера, така як очікуваний час друку, загальна вага, загальна кількість шарів та ін.[85]

```
;fileName:C:/Users/Roman/Desktop/makerook_small
;machineType:default
;estimatedPrintTime:6407
;volume:1.29826
;resin:normal
;weight:1.42809
;price:0.0428426
;layerHeight:0.05
;resolutionX:3840
;resolutionY:2400
;machineX:192
;machineY:120
;machineZ:200
;projectType:LCD_mirror
;transitionLayerCount:0
;transitionLayerType:0
;normalExposureTime:6
;bottomLayerExposureTime:50
;normalDropSpeed:150
;normalLayerLiftHeight:5
;zSlowUpDistance:0
;normalLayerLiftSpeed:65
;bottomLayerCount:8
;shrinkageX:100
;shrinkageY:100
;shrinkageZ:100
;mirror:1
;totalLayer:480
;bottomLayerLiftHeight:5
;bottomLayerLiftSpeed:65
;bottomLightOffTime:0
;lightOffTime:0
;bottomLayerDropSpeed:150
;edgeExposureMM:0
;edgeExposureTimeS:4
;bottomEdgeExposureMM:0
;bottomEdgeExposureTimeS:4
;START_GCODE_BEGIN
G21;
G90;
M106 S0;
G28 Z0;
```

Рисунок 1.59 – Інформаційна секція G-code для фотополімерного 3D принтера

Наступними командами є ті, що виконуються при старті друку, такі як G28 Z0, тобто відправити платформу в нульову точку осі Z, для визначення точного місцезнаходження, або M21, що визначає систему координат в мм. G90

встановлює абсолютну систему координат, що виконує переміщення по координатам такого формату: G0 Z190, тобто переміщення в позицію 190 мм від домашнього положення. Далі вже йдуть команди, які безпосередньо виконуються для побудови моделі, це переміщення осі та подача матеріалу. Основні секції G-code зображені на рисунку 1.60.[86]

```
;START_GCODE_END

;LAYER_START:0
;currPos:0.05
M6054 "1.png";show Image
G0 Z0.100000 F5.000000;
G0 Z0.050000 F150.000000;
G4 P0.000000;
M106 S255.000000;light on
G4 P50.000000;
M106 S0; light off

;LAYER_END

;LAYER_START:1
;currPos:0.1
M6054 "2.png";show Image
G0 Z0.150000 F5.000000;
G0 Z0.100000 F150.000000;
G4 P0.000000;
M106 S255.000000;light on
G4 P50.000000;
M106 S0; light off
```

Рисунок 1.60 – Основні секції G-code

Відмінністю стандартного G-code, що використовується на ЧПК верстатах та на принтерах по технології FDM/FFF від фотополімерного друку полягає в додаванні до G-code команди M6054, яка означає трансляцію на екран принтера горизонтального перерізу моделі. Тобто принтер одночасно показує зображення шару та виконує команди G-code, вмикаючи та вимикаючи світлодіодну матрицю, переміщуючи ось Z та ін.

Тому для роботи з фотополімерними принтерами використовуються специфічні слайсери, які роблять не тільки команди для друку а й роблять розріз моделі на шари, які потім відображаються на екрані.

ChiTuBox з вже нарізаною моделлю зображений на рисунку 1.61.

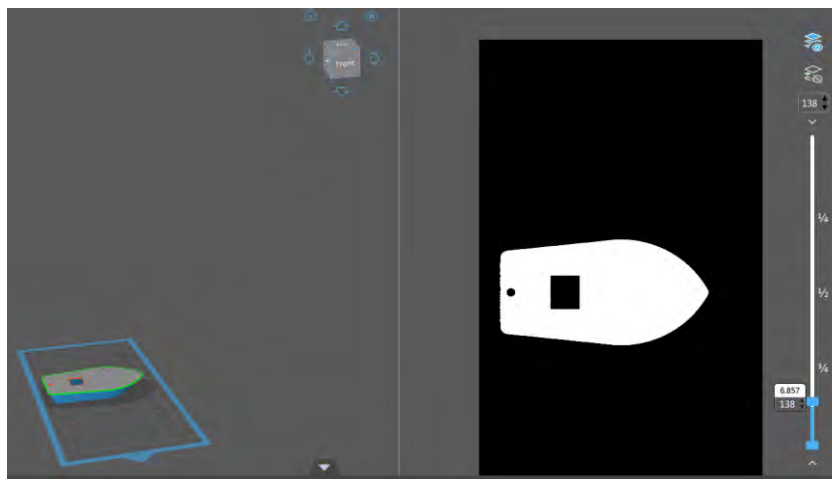


Рисунок 1.61 – Слайсер для фотополімерного друку ChiTuBox

Слайсери будують G-code для різних типів принтерів, які можуть використовувати в своєму складі лазер, DLP проектор, тощо. Також вони підходять і для різних систем керування електронікою принтера. Перша система, використовує в якості керуючої плати мікрокомп'ютер, який через власні виводи GPIO керує системами принтера, тоді файл з G-code буде виглядати як на зображенні 1.62.[87]

```
;fileName:3DBenchy.stl #0
;machinetype:default
;estimatedPrintTime:20089.3
;volume:15.5535
;resin:normal
;weight:17.1088
;price:0.513264
;layerHeight:0.05
;resolutionX:1440
;resolutionY:2560
;machineX:68.04
;machineY:120.96
;machineZ:180
;projectType:LCD_mirror
;normalExposureTime:8
;bottomLayerExposureTime:85
;bottomLayerExposureTime:85
;normalDropSpeed:150
;normalLayerLiftHeight:6
;zSlowUpDistance:0
;normalLayerLiftSpeed:35
;bottomLayerCount:3
;bottomLayerCount:3
;mirror:1
;totalLayer:960
;bottomLayerLiftHeight:6
;bottomLayerLiftSpeed:35
;bottomLightOffTime:0
;lightOffTime:0
;START_GCODE_BEGIN
;START_GCODE_END
;LAYER_START:0
;currPos:0.05
;LAYER_END
;LAYER_START:1
;currPos:0.1
;LAYER_END
;LAYER_START:2
```

Рисунок 1.62 – G-code для прямого керування периферією принтера за допомоги мікрокомп'ютера

Цей файл лише задає параметри з якими буде друкуватися модель, все інше покладається на вбудоване програмне забезпечення принтера, яке буде зчитувати ці параметри та перетворювати їх на конкретні команди для переміщення, тощо.

На рисунку 1.50 можна побачити загальні параметри, такі як назва файлу, тип принтера, очікуваний час друку та параметри, які відповідають за висоту шару як параметр `layerHeight`, час друку звичайних шарів як параметр `normalExposureTime`.

Також цей G-code містить додаткові команди початку друку, перед шаром, після шару, дії, які виконуються при паузі, дії що виконуються в кінці друку окрім стандартних. Всі ці параметри та команди налаштовуються в меню слайсера.

Загальний вигляд меню налаштувань зображений на рисунку 1.63.

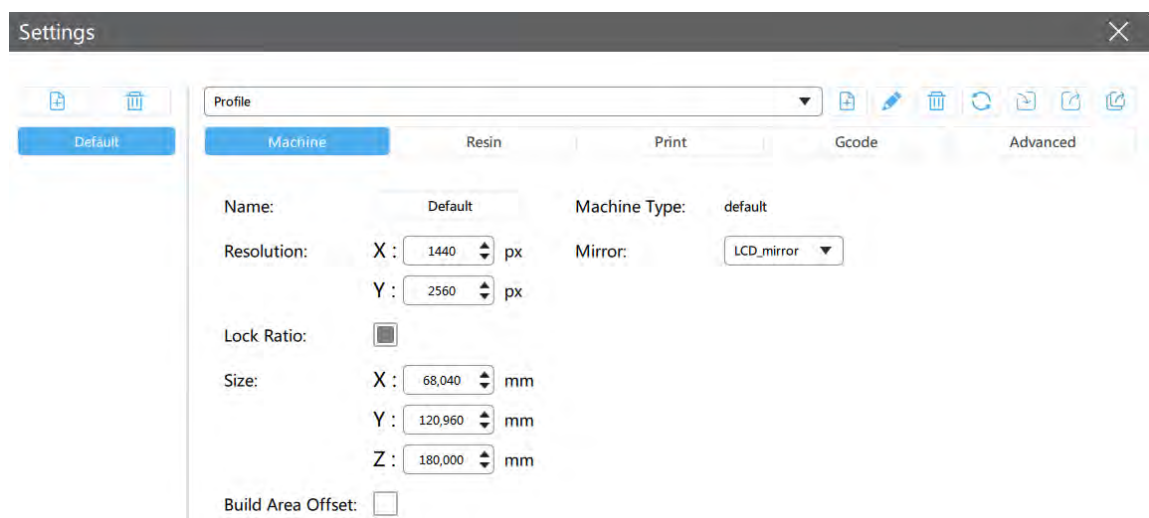


Рисунок 1.63 – Меню налаштувань принтера в слайсері ChiTuBox

В цій вкладці налаштовується параметри принтера, його роздільну здатність, розміри екрану, висоту друку, поворот екрану та тип принтера, який може бути як LCD так і DLP, тощо.

Наступною вкладкою налаштувань є налаштування фотополімера, вікно налаштувань зображено на рисунку 1.64.

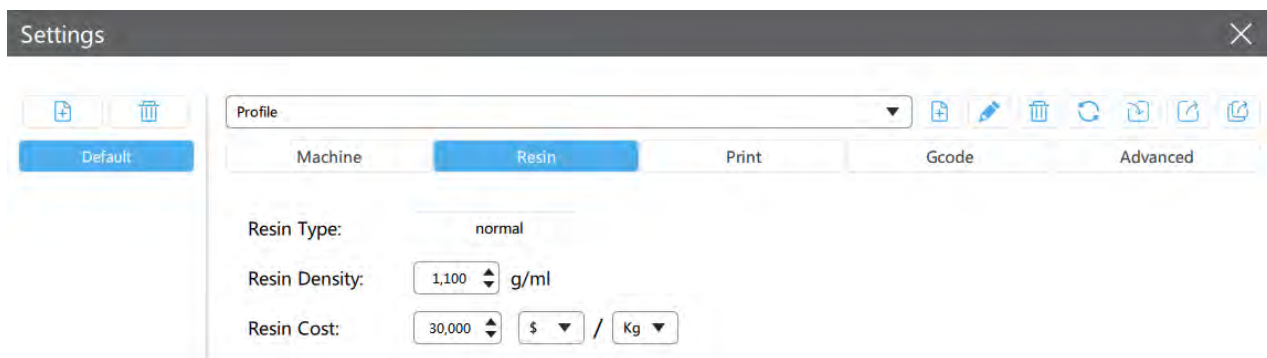


Рисунок 1.64 – Налаштування параметрів фотополімеру

В цій вкладці задається назва фотополімера для використання в подальшому у підготовці моделі та збереження унікальних параметрів, властивих даному фотополімеру. Також задається щільність, яка допомагає аналізувати витрати фотополімера на друк та ціна фотополімера для можливості вираховувати автоматично собівартість надрукованого виробу.

Вкладка Print відповідає безпосередньо за технологічні параметри друку. Ця вкладка показана на рисунку 1.65.

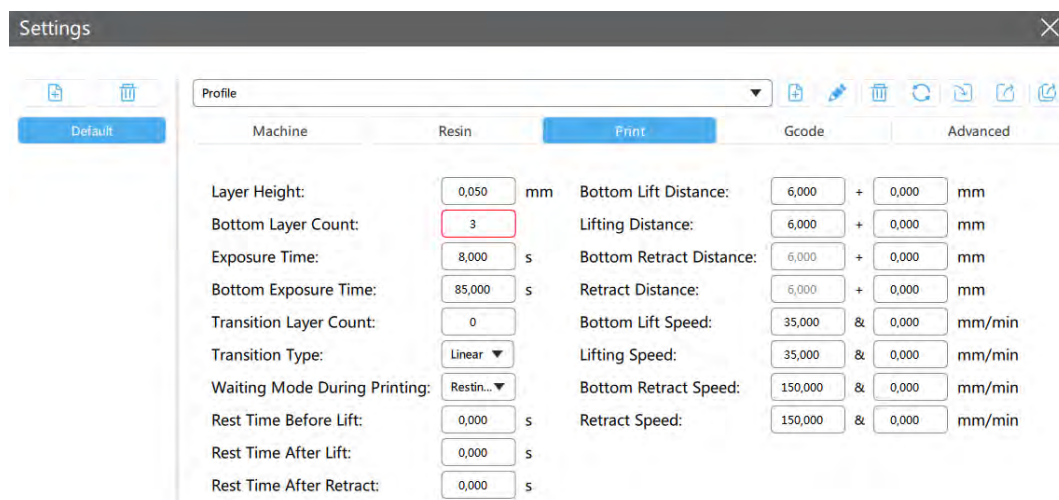


Рисунок 1.65 – Технологічні параметри друку у ChiTuBox

В цій вкладці є такі параметри як висота шару, кількість базових шарів, час експонування базових та звичайних шарів, налаштування пауз перед перемішуванням, після підняття платформи та після повернення платформи на

висоту шару, налаштування висоти підйому перемішування для базових та звичайних шарів та швидкості підйому, опускання та перемішування.

Для додавання власних команд використовується вкладка Gcode, яка зображена на рисунку 1.66.

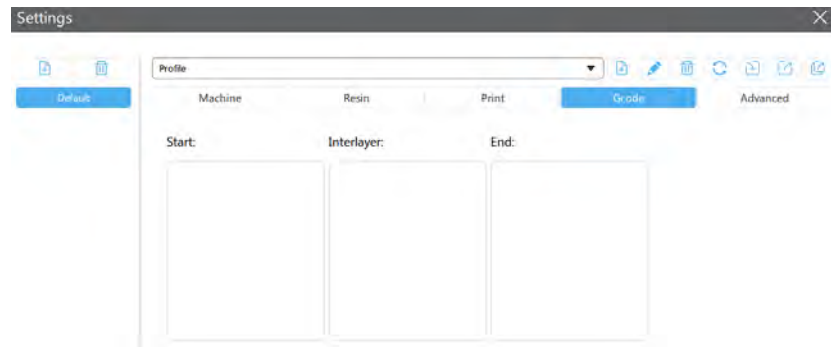


Рисунок 1.66 – Налаштування власного G-code у ChiTuBox

В цій вкладці є можливість додавання власного G-code для початку друку, після кожного шару та для кінця друку.

Вкладка Advanced, зображена на рисунку 1.67, налаштовує додаткові можливості, такі як потужність засвітлення базових та звичайних шарів, Anti-Aliasing та його налаштування, що згладжує круглі отвори, компенсацію відхилення розмірів базових шарів, відхилення розмірів та параметр компенсації часу друку.

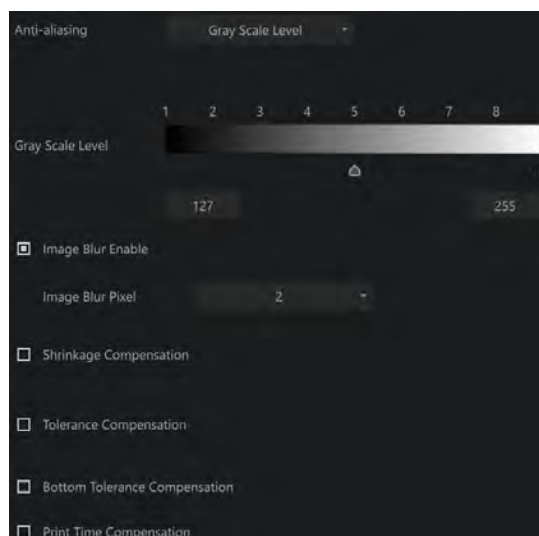


Рисунок 1.67 – Додаткові налаштування ChiTuBox

Загальний вигляд програми ChiTuBox зображений на рисунку 1.68.

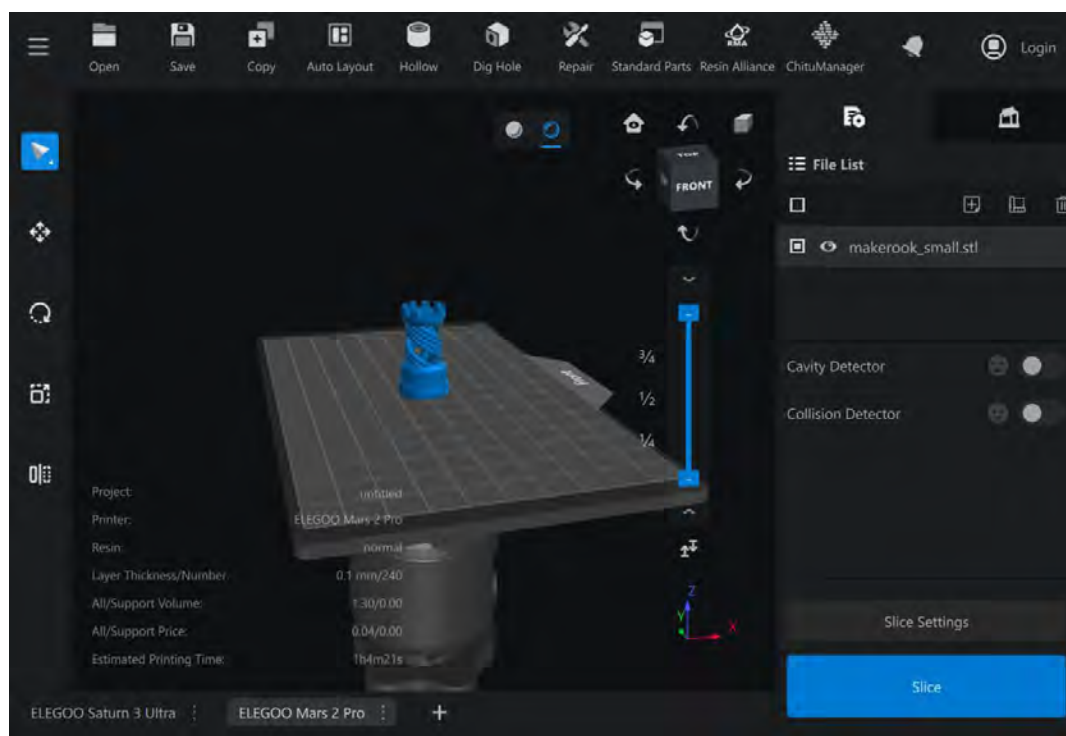


Рисунок 1.68 – Загальне вікно слайсера ChiTuBox

В основному вікні виконується розташування моделі та зміна розмірів, додаються підтримки, вікно налаштувань підтримок зображено на рисунку 1.69.



Рисунок 1.69 – Вікно налаштувань підтримок

В цьому вікні налаштовується форма контакту який може бути у формі сфери, піраміди, діаметру контакту, та його довжини. Форма підтримки може бути конічною, пірамідальною, налаштовується діаметр підтримки та довжина. Існує режим автоматичних підтримок, який самостійно виставляє підтримки згідно алгоритму, який включає в себе такі параметри як кут нахилу моделі або її частини, відстань від однієї підтримки до іншої, їх густина, та висота від якої вони починаються.

Всі параметри, що зображені на рисунках вище потім додаються в G-code та враховуються при друці.

Іншим способом побудови електричної частини принтера які потребують окремого налаштування в слайсері і встановлення відповідних технологічних параметрів є використання окремої плати керування периферією та загальної плати керування, що відправляє команди на плату керування та на екран. Така плата керування периферією зображена на рисунку 1.70.[88]



Рисунок 1.70 – Плата керування периферією NanoDLP

Загальною платою керування є мікрокомп'ютер, так як тільки він може виводити зображення з високою роздільною здатністю на екран. Тоді до попереднього файлу G-code додаються команди, які виконують керування посередньо через іншу плату. Мікрокомп'ютер відправляє команди G-code на

плату і водночас з цим відправляє зображення на екран, таким чином синхронізуючи роботу частин принтера.[89]

Таким програмним забезпеченням, яке одночасно керує устаткуванням як вже було зазначено раніше, є NanoDLP і дає можливість перетворювати моделі на G-code, що встановлюється на мікрокомп'ютер Raspberry, який знаходиться в принтері. Це ПЗ виконує управління принтером та слайсить моделі для друку. В загальному вигляді друк за допомоги NanoDLP припускає використання інших слайсерів для налаштування підтримок на моделі.

Перевагою такого типу ПЗ є те, що NanoDLP є універсальним ПЗ, яке підходить для всіх типів фотополімерного друку і має дуже гнучкі налаштування, що дозволяють редагувати всі можливі параметри, які відносяться до фотополімерної технології, від типу джерела УФ до методу побудови моделі, чи то згори-вниз, чи навпаки. Також перевагою є те, що керування відбувається віддалено через протокол http, що дозволяє зробити повне керування системою незважаючи на відстань та тип пристрою, з допомоги якого буде відбуватися керування. Налаштування відображення NanoDLP зображено на рисунку 1.71.

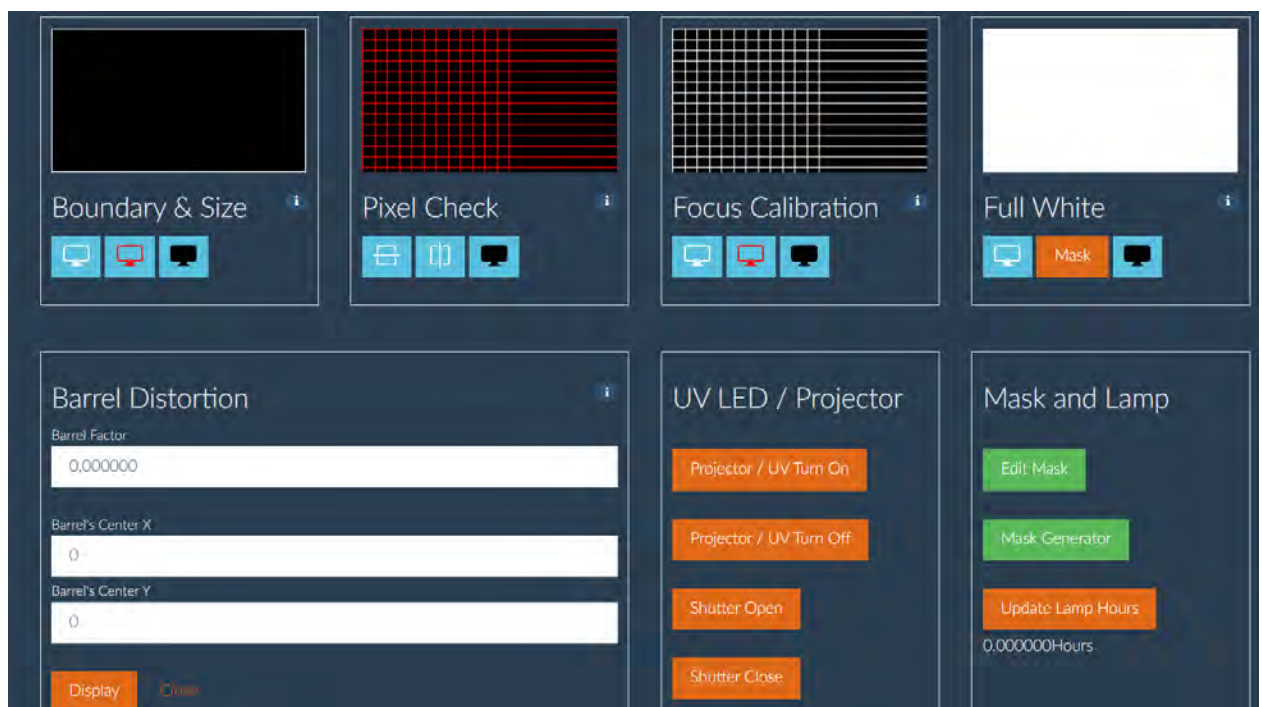


Рисунок 1.71 – Вікно налаштувань відображення у NanoDLP

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФОТОПОЛІМЕРНОГО 3D-ДРУКУ

2.1 Дослідження впливу технологічних параметрів фотополімерного друку якісні показники друкованої деталі

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

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

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

Першим основним параметром, на який впливає як конструкція принтера так і властивості фотополімера є час експонування. Він ділиться на два параметра, першим із яких є час експонування базових шарів, другим є експонування основних шарів.[90]

Параметр базових шарів відповідає за адгезію моделі до платформи принтера.

Адгезія це процес зчеплення різнорідних або однорідних матеріалів між собою. В процесі адгезії рідкий фотополімер утворює між поверхнею та пластиком міжмолекулярні зв'язки, виникає дифузія макромолекул з пластика в поверхню та затікання пластику у макротріщини або у мікропори поверхні. Міцність зчеплення залежить від властивостей матеріалу, форми контакту, рельєфу та шорсткості поверхонь та таких параметрів як тиск, температура та ін.[91]

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

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

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

Дефекти, що характерні для параметру часу базових шарів:

– так звана «слоняча нога», коли існує відхилення від встановлених розмірів лише в базових шарах(рис. 2.1), виникає при перебільшенні часу експонування фотополімеру;



Рисунок 2.1 – Відхилення базових шарів від звичайних

– деламінація між базовими та основними шарами, коли адгезія між фотополімером, що полімеризувався на базових шарах та звичайних є недостатньою і модель в подальшому не прилипає до базових шарів, виникає із-за значно більшого часу експонування базових шарів ніж основних(рисунок 2.2);



Рисунок 2.2 – Розшарування між базовими та звичайними шарами

– деламінація від платформи, коли адгезія між базовими шарами та платформою є недостатньою. В подальшому модель залишається у ванній. Виникає із-за недостатнього часу експонування базових шарів(рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Відшарування базових шарів від платформи

– сильна адгезія моделі до платформи після друку, що є також дефектом, що призводить до руйнування поверхні моделі під час зняття її з робочої

платформи, частина моделі що знаходиться в контакті з платформою, має більш сильні міжповерхневі зв'язки, які виникають через значне перебільшення часу експонування базових шарів, в результаті чого модель дуже сильно приєднується до платформи і відділення відбувається з механічними пошкодженнями.[92-94]

Дефекти, на які впливає час експонування основних шарів:

– розшарування моделі, виникає через велику вагу моделі та сили відриву від плівки і замалого часу експонування основних шарів(рисунок 2.4);



Рисунок 2.4 – Розшарування моделі

– відрив підтримок від моделі, руйнування поверхні моделі, виникає тоді коли існують занадто тонкі елементи та параметр часу експонування основних шарів є недостатнім (рисунок 2.5);

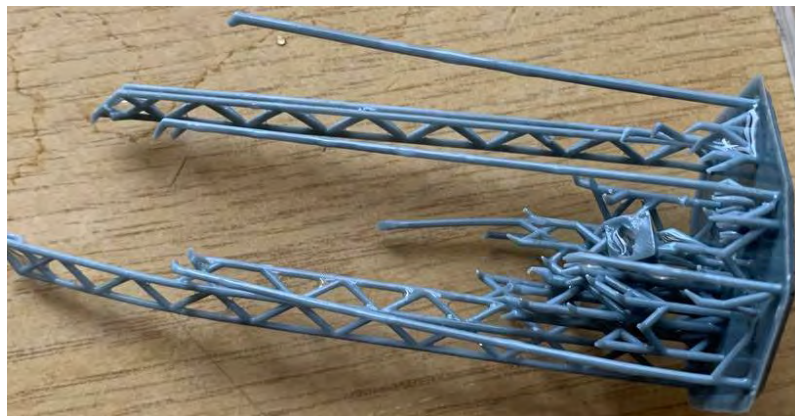


Рисунок 2.5 – Відрив моделі від підтримок

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

За допомоги експериментальних досліджень, визначено залежність відхилення встановлених розмірів від часу експонування, що зведено в таблицю 2.1 та 2.2.

Таблиця 2.1 – Залежність відхилення розмірів від часу експонування

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

Для підтвердження результатів проведено повторене дослідження з меншим шаром друку в 50 мкм і зведено в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Залежність відхилення розмірів від часу експонування

Відхилення розмірів, мкм	Товщина мінімального шару, мкм	Час експонування стандартних шарів, с
-100	50	7
0	50	8
30	50	9
50	50	10
60	50	11
80	50	12
100	50	13

Наступним технологічним параметром є кількість базових шарів, цей параметр одночасно з часом експонування базових шарів використовується для покращення адгезії з робочою платформою. Через відсутність базових шарів і хімічних властивостей фотополімера, який має меншу адгезію до металевої платформи ніж до плівки ванни, модель буде залишатись у ванні. Велика

кількість базових шарів через більшу ступінь полімеризації, яка змінює фізико-хімічну структуру фотополімеру, приведе до зменшення адгезії базових шарів до звичайних.[95]

Так як в фотополімерні принтери за технологією LCD мають в своїй конструкції плівку в якості дна ванни, яка може розтягуватися, та не має механізму перемішувача фотополімера в процесі друку після засвітлення кожного шару, платформа підіймається на деяку відстань, після чого опускається на наступне положення. Це слугує одночасно для перемішування фотополімеру, заповнення ним всього простору ванни після полімеризації попереднього шару та для відриву деталі що друкується від плівки. Так як адгезія виникає не тільки між шарами полімеризованого фотополімеру та платформою а ще й між дном ємності та моделлю.

Основною причиною неможливості використання великого розміру ванни в технології LCD одночасно зі складністю виготовлення великих розмірів LCD екранів з великою роздільною здатністю є наявність прозорого дна ванни, яке повинно мати дуже низьку адгезію з фотополімером. Використання матеріалів, що не відповідають вимогам призводять до руйнування дна ванни та неможливістю друку моделей взагалі. Використання ж плівки великих розмірів призводить до збільшення навантаження на екран, що може призвести до його руйнування та розтягування плівки на велику відстань, з можливим подальшим її руйнуванням.[96]

Таким чином переміщення виконується за допомоги двигунів і керується ПЗ, яке регулює висоту перемішування та його швидкість, що залежить від ступеня натягнення плівки та площі поперечного перерізу шару. При висоті перемішування, яка менше висоти, на яку розтягується плівка, друкована деталь в процесі друку перестає будуватися та залишається на платформі, що можна побачити на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Залишки моделі на плівці

Швидкість перемішування визначається густиною фотополімеру. Занадто швидке переміщення може призвести до відриву тонких елементів від моделі та потрапляння їх у рідкий фотополімер, що призведе до дефектів на поверхні моделі або навіть до руйнування екрану з плівкою.[97]

Товщина шару – технологічний параметр, що визначає шорсткість поверхні моделі та її вертикальну роздільну здатність. Чим менше розмір шару моделі, тим гладкіша поверхня моделі і тим краще будуть відтворені елементи на вертикальних поверхнях.[98]

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

При зменшенні висоти шару друку відбувається збільшення кількості шарів, що пропорційно впливає на час виготовлення деталі і становить 70% часу загального друку моделі. Інші 30% займають собою переміщення платформи, перемішування та технологічні паузи, що слугують для охолодження світлодіодної матриці та екрану. Зменшення розмірів шару призводить до

збільшення кількості робочих циклів, що включають в себе перемішування та паузи, тим самим друк деталі зі шаром 50 мкм буде в два рази довше ніж друк моделі з шаром 100 мкм. Одночасно з цим менша товщина шару потребує зменшення часу експонування, щоб не допустити переекспонування кожного шару і збільшення відхилення вихідних розмірів.[99]

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

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

Для нівелювання дефекту в сучасних слайсерах є додаткова функція, яка має назву Tolerance Compensation(рисунок 2.7).[100]

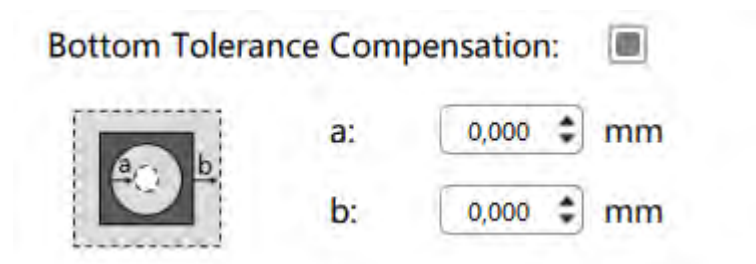


Рисунок 2.7 – Налаштування Bottom Tolerance Compensation

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

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

2.2 Дослідження впливу технологічних параметрів фотополімерного 3D-друку на параметри якості виробів з використанням тестових моделей

Для визначення впливу технологічних параметрів на вихідні якісні показники друкованої моделі, у фотополімерному 3D-друці використовуються тестові моделі, які дають можливість точно визначити параметри, для друку різними фотополімерами та визначити видів дефектів, що можуть бути отриманими під час друку.[101]

Зазвичай всі тестові моделі мають в собі такі компоненти:

- тонкі елементи;
- конуси;
- квадрати;
- піраміди;
- нависання;
- тексти;
- отвори;
- різні рельєфні елементи.

Розробники тестових моделей намагаються врахувати вплив всіх можливих дефектів, щоб створити модель, яка буде очікувано змінюватися при зміні технологічних параметрів друку. В одній моделі зазвичай містяться декілька окремих тестів, які показують окремі дефекти та відхилення технологічних параметрів. Перша модель зображена на рисунку 2.8.

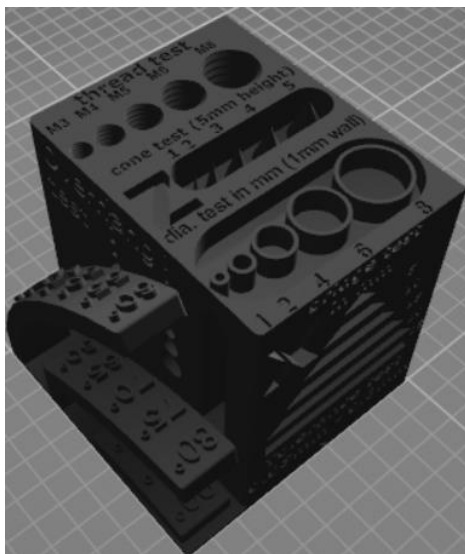


Рисунок 2.8 – Модель для тесту роздільної здатності фотополімерного принтера

Розмір даного тестового куба становить 40x40x40 мм. Першим фактором, що перевіряється є відхилення розмірів. На розміри може впливати декілька параметрів, першим є налаштування роздільної здатності принтера, яка залежить від роздільної здатності екрану.

Наступним тестом є перевірка нахилу, даний тест зображений на рисунку. Цей тест перевіряє міжшарову адгезію фотополімеру та роздільну здатність по осі Z за рахунок виникнення ступінчатої структури лінії нахилу. В цьому тесті будується похила поверхня, з відмітками градусу нахилу від 0° до 90. Окрім осі Z також перевіряється час експонування шару, при перебільшенні часу експонування проміжок між дном моделі та площиною з 90° нахилом може бути зміщений або навіть він зникне через полімеризацію смоли в даному проміжку. При недостатньому експонуванні виникне розшарування або частина моделі залишиться на дні ванни. Якщо час експонування підібраний правильно і немає інших дефектів тоді товщина похилого елемента залишиться незмінною. Такий тест зображений на рисунку 2.9.[102]

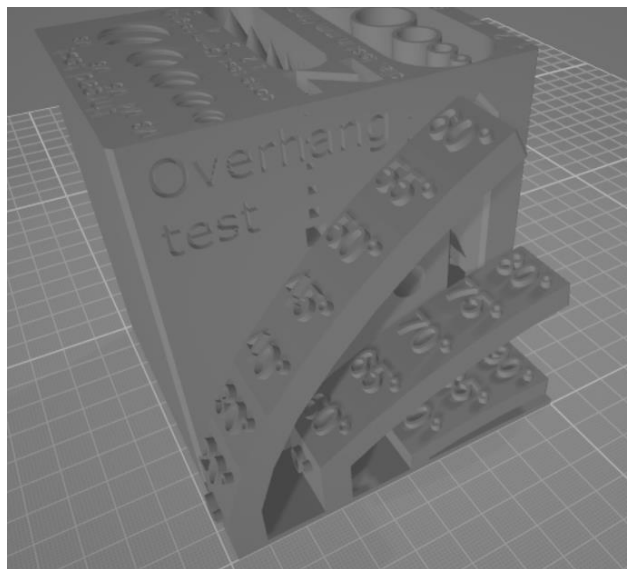


Рисунок 2.9 – Тест нахилу

На верхній площині куба міститься декілька тестів. Першим тестом є тест, який містить отвори з різьбою. Даний тест зображений на рисунку 2.10.



Рисунок 2.10 – Тест з різьбою

В даному тесті використовується стандартна різьба M3, M4, M5, M6 та M8. Цей тест допомагає визначити необхідну роздільну здатність шару, для друку інженерних деталей, які потребують використання різьбових з'єднань. Зменшення товщини друку покращить роздільну здатність моделі, що зробить різьбу більш точною та міцнішою ніж з більшою товщиною шару.

Наступним тестом є побудова конусів різного діаметра, що зображено на рисунку 2.11.



Рисунок 2.11 – Тест конусами

Даний тест перевіряє час експонування, при недостатньому часі експонування конуси з номером 1 та 2 будуть відсутні, при перебільшенні часу експонування порушиться геометрія конуса і цей дефект буде чітко видно без використання додаткових вимірювань. При нормальному часі експонування всі написи та конуси будуть на місці і будуть мати чітку геометрію.

Наступний тест на верхній грані перевіряє відповідність розмірів заданим та час експонування. Цей тест зображений на рисунку 2.12.



Рисунок 2.12 – Тест з використанням циліндрів

Цей тест містить 5 циліндри з фіксованими розмірами товщини стінки та різними внутрішніми діаметрами від 1 до 8 мм. На конусах можна буде чітко визначити, якщо одна з сторін не правильно визначена в налаштуванні принтера, тоді циліндри стануть овальної форми. Далі використовуючи вимірювальні прилади та виміряючи товщину стінки з внутрішнім діаметром визначається розміри та їх відхилення від заданих розмірів.

Наступним тестом є тест мостів, він зображений на рисунку 2.13.

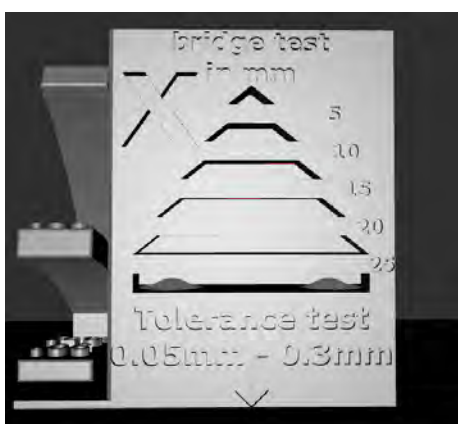


Рисунок 2.13 – Тест мостів

Цей тест перевіряє спроможність принтера друкувати довгі поверхні без підтримок. Якщо час експонування недостатній, тоді поверхні з довжиною 25мм, 20мм, та 15мм будуть мати провисаючі елементи або взагалі залишаться на плівці.

На тій же самій поверхні є тест відхилення базових шарів, при перебільшенні часу виникатиме зміна розмірів. При недостатньому часі

експонування адгезія зменшиться між платформою і моделлю і модель частково або повністю відстане від платформи.

На наступній грані міститься тест отворів. Він складається зі шкали та 9 отворів різного діаметру від 0.2 мм до 4 мм. На цьому тесті досить точно визначається час експонування так як при збільшенні часу отвори будуть зменшуватися та зникати від самого маленького до великих отворів. Також тест перевіряє роздільну здатність по осі Z. Даний тест наведений на рисунку 2.14. На цьому ж рисунку також можна побачити такий же тест, тільки з квадратами. При відхиленні розмірів або геометрії необхідно зменшувати або додавати час експонування.

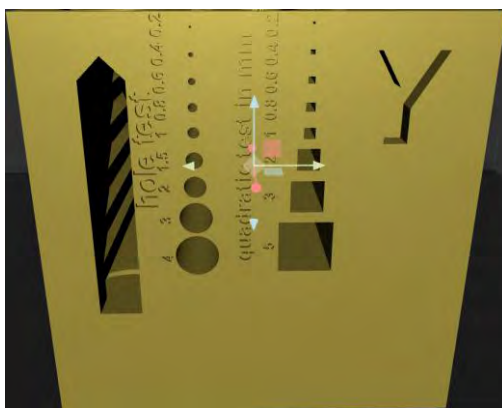


Рисунок 2.14 – Тест отворів

Недоліком такої тестової моделі є її розміри, що становлять 40x30x40 мм. Що при друці з великою роздільною здатністю, наприклад в 50 мкм, займає 8 годин часу. Якщо час експонування базових шарів був підібраний неправильно є можливість відлипання моделі від платформи на початку друку де її неможливо проконтролювати і таким чином буде витрачено час непродуктивно.

Після друку моделі можливо проаналізувати отриманий результат. Друк відбувся на розробленому принтері з роздільною здатністю по XY 2560x1440 та 50 мкм по осі Z.

Тести, що знаходяться на верхній грані куба, а саме тест різьби, тест з конусами та тест з циліндрами показали, що внутрішній діаметр різьби менше

ніж діаметр, який є на моделі на 100 мкм, що може свідчити про те, що або фотополімер має усадку, або фізичні розміри по осям ХУ мають відхилення на 100 мкм. Після вимірювання розмірів циліндрів з'ясувалося, що діаметр більшого циліндра становить 8 мм, що відповідає діаметру моделі. Тому можна зробити висновок, що фотополімерна смола, яка використовується для друку цієї моделі має усадку 0.25%, дане значення відповідає властивостям фотополімера.

Надрукована модель показана на рисунку 2.15.

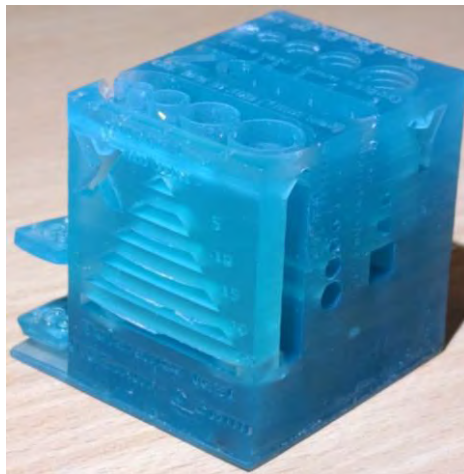


Рисунок 2.15 – Надрукована тестова модель

Тест конусів показав, що час експонування є достатнім для того, щоб всі конуси, в тому числі і самі маленькі були на моделі а не залишилися на плівці (рисунок 2.16).



Рисунок 2.16 – Надрукований тест конусів

Наступною гранню моделі є грань з тестами мостів, що зображено на рисунку 2.17, де видні провисання та скруглення отворів, що може свідчити про високу швидкість відриву.

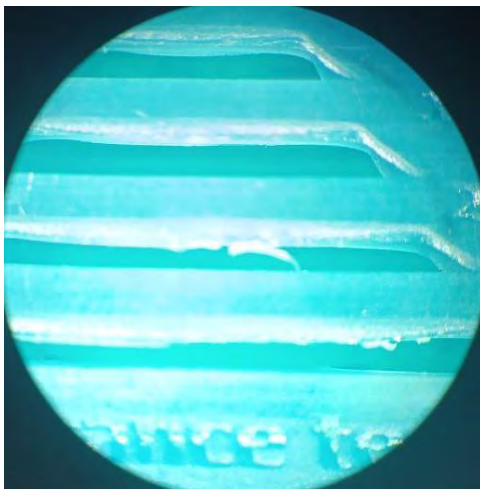


Рисунок 2.17 – Отримані результати тесту мостів

На даній грані можна побачити, що самий менший міст має змінену геометрію зі зменшенням розмірів, це свідчить про те, що час експонування є більшим за необхідний. Звисання більш довгих мостів свідчить про те, що смола має високу густину і при перемішуванні ці площини вигинаються в протилежну плівці сторону.

На перших шарах можна побачити відхилення розмірів, що створює так звану слонову ногу, яка утворюється коли розміри базових шарів більші ніж розміри звичайних, тому можна зробити висновок, що час експонування базових шарів необхідно зменшити (рисунок 2.18).

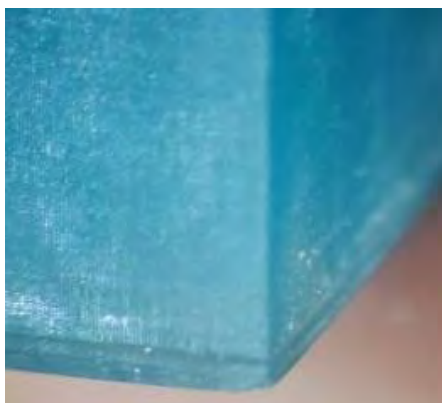


Рисунок 2.18 – Відхилення базових шарів

Наступна поверхня, яка має тести отворів та квадратів показує, що всі поверхні відповідають заданим, окрім самих маленьких, в результаті друку стають залитими фотополімером. Це можна побачити на рисунку 2.19. Залиті поверхні свідчать про великий час експонування та низьку точність фотополімеру.



Рисунок 2.19 – Тест отворів

Останнім тестом, який є на даній тестовій моделі є тест нахилу, він зображений на рисунку 2.20.

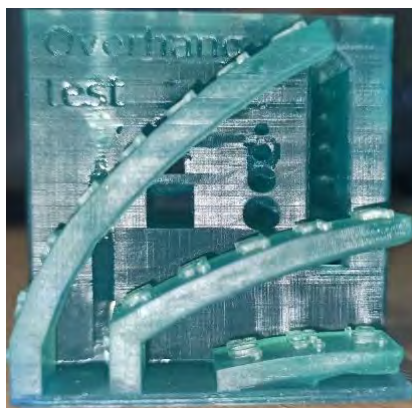


Рисунок 2.20 – Тест нахилу

На даному тесті видно, що всі нахилені поверхні окрім поверхні, нахил якої становить до 90° має залиті фотополімером проміжки. Це також свідчить про високий час експонування.

Таким чином визначено, що в даному випадку використовується фотополімер з невисокої точністю та який має усадку. Час експонування при даному друці є занадто великим і потребує зменшення. Також необхідно зменшити швидкість перемішування для зменшення вигину на тесті мостів. Зменшення часу експонування базових шарів необхідно для зменшення розмірів слонової ноги. Також по полосам, що присутні на всій поверхні моделі, принтер, на якому виконується друк потребує технічного обслуговування, а саме осі Z, так як биття створюється на проміжках, що відповідають кроку КГП.

Наступна тестова модель має менші розміри по осі Z та витрачає менше фотополімеру, вона розрахована на швидке визначення основних технологічних параметрів, але недоліком даної тестової моделі є неможливість визначення всіх ймовірних дефектів друку. Друк такої моделі займає до 30 хвилин, що залежить від потужності та системи експонування принтера [81].

Даний тест зображений на рисунку 2.21.

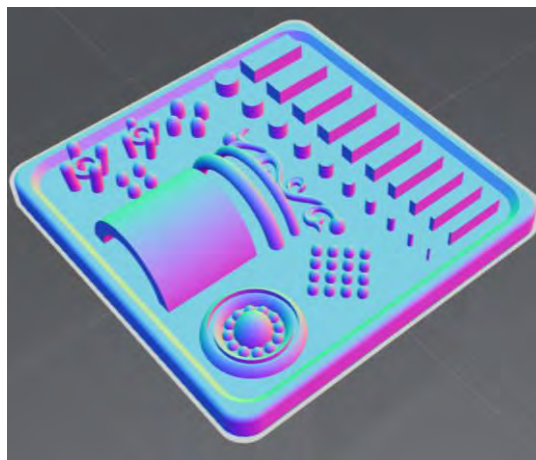


Рисунок 2.21 – Друга тестова модель

Розміри тестової моделі становить 15x15x2.9 мм, об'єм моделі становить 0.23 грами фотополімеру.

На моделі розміщуються наступні елементи:

– набір прямокутників, які мають ширину від 0.1 мм до 1.0 мм. Дані елементи зображені на рисунку 2.22;



Рисунок 2.22 – Тест прямокутників

– набір циліндрів, що мають діаметр від 0.1 мм до 1.0 мм, даний елемент зображений на рисунку 2.23;



Рисунок 2.23 – Тест циліндрами

– набір напівсфер, що мають розмір 0.4 мм, розташовані сіткою 4x4 з кроком 0.2 мм, що зображено на рисунку 2.24;

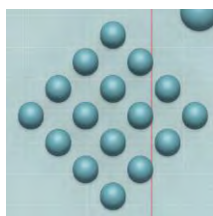


Рисунок 2.24 – Тест з набором напівсфер

– «кріплення для коштовного каміння». Так як фотополімерний друк має широке розповсюдження серед ювелірного виробництва, в тестову модель додали елементи, які використовуються в процесі створення ювелірних прикрас,

таких як тримачі каменів або інакше трапанові касти, всі ці елементи відповідають вимогам, що висуваються до виробників ювелірних виробів [82]. Діаметр таких елементів становить 0.40 мм та 0.48 мм, висота навісного елемента становить 0.2 мм та 0.24 мм. Дані елементи зображені на рисунку 2.25;

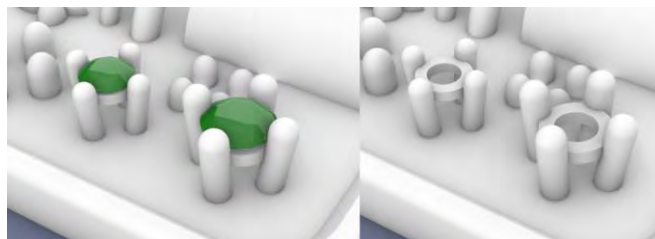


Рисунок 2.25 – Ювелірний тест

– узор, що зображений на рисунку 2.26, перевіряє горизонтальну роздільну здатність;

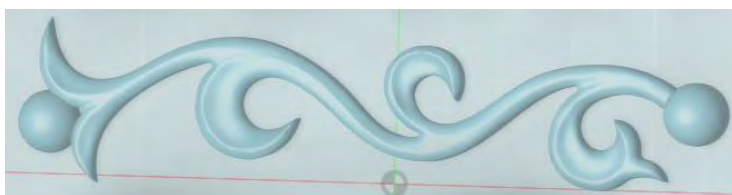


Рисунок 2.26 – Тест на горизонтальну роздільну здатність

– нависаючі елементи, що мають товщину 0.4 мм та 0.6 мм, зображені на рисунку 2.27;

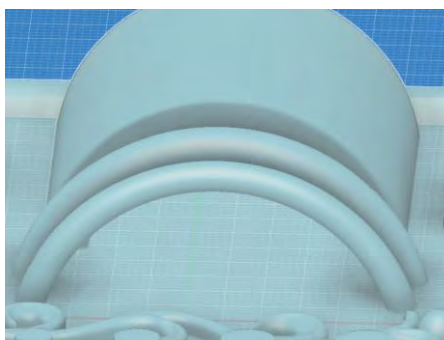


Рисунок 2.27 – Тест з використанням нависаючих елементів

– елемент, що складається з напівсфер, одна полусфера 0.4 мм. Даний елемент зображений на рисунку 2.28;

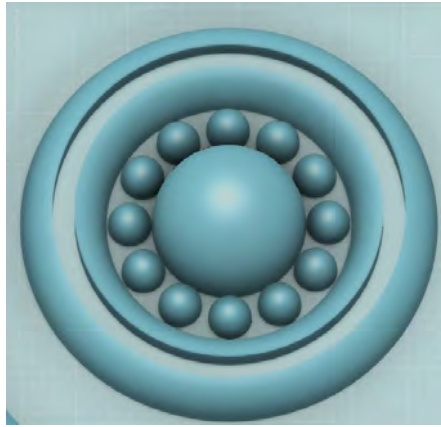


Рисунок 2.28 – Тестовий елемент з напівсферами

– нависаючий елемент, висотою 1.4 мм, зображений на рисунку 2.29.

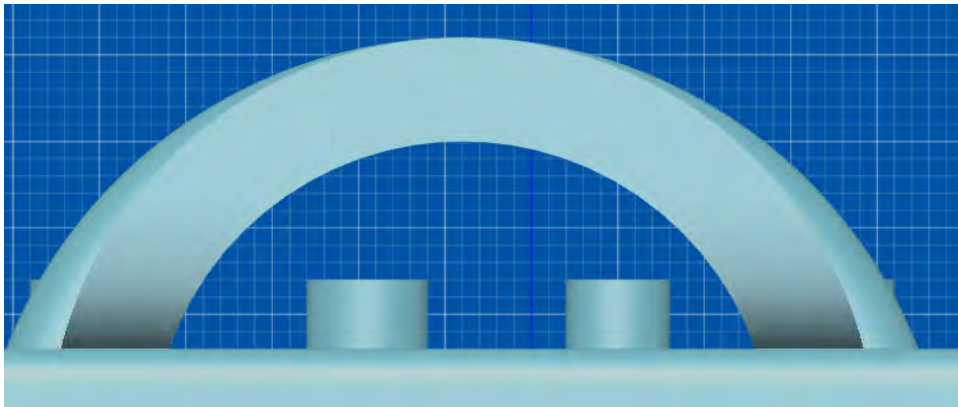


Рисунок 2.29 – Нависаючий тестовий елемент

В результаті експериментальних досліджень, в яких було надруковано 5 тестових моделей з різним часом експонування, можна проаналізувати вплив часу експонування на елементи тестової моделі.

Тестові моделі друкувалися з інтервалом 0.5 секунди при шарі 50 мкм, що дає змогу прослідити зміни тестових елементів в надрукованій моделі. Було обрано дві моделі з мінімальним часом експонування в 1.5 секунди та з часом 3.5

секунди і вони зображені на рисунку 2.30 в порядку зростання часу експонування.

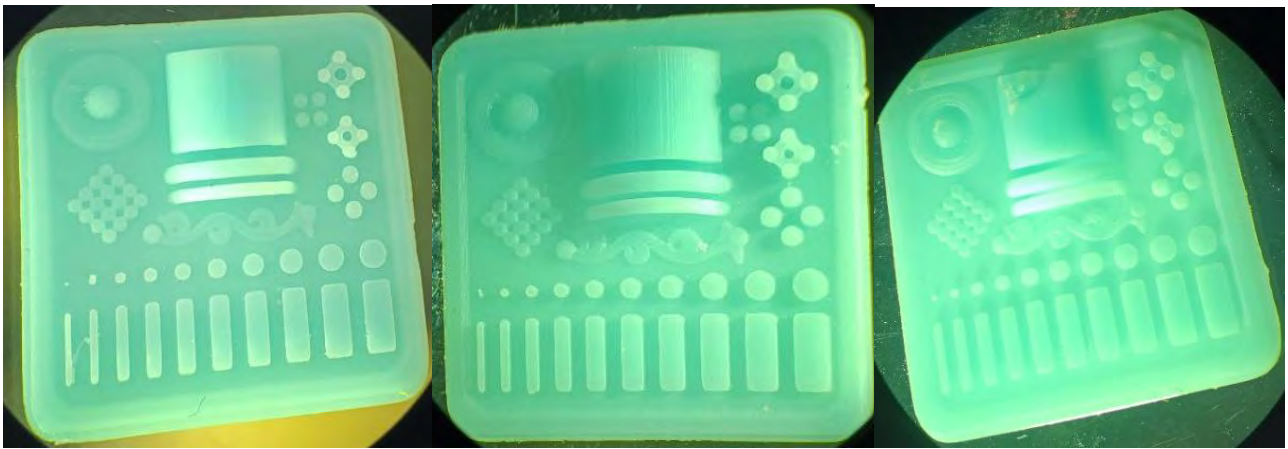


Рисунок 2.30 – Тестові моделі з часом експонування 1.5, 2 та 3.5 секунди

Аналізуючи результати друку, які наведені на рисунку вище можна відмітити, що модель з часом експонування 1.5 с має всі продруковані елементи, але на прямокутниках видно, що на найменшому прямокутнику є відшарований елемент, що свідчить про те, що часу в даному випадку недостатньо.

Порівнюючи розміри цих елементів можливо вказати що у моделі, яка друкувалася 1.5 секунди розмір найменшого прямокутника становить 0.21 мм, з часом експонування 2 секунди найменший прямокутник 0.25 мм, а розмір прямокутника у моделі з часом 3.5 секунди становить 0.32 мм. Для порівняння отриманих результатів та виключення похибки було ще порівняно розміри найбільших прямокутників що становлять для 1.5 секунди – 1.11 мм, для 2 секунд 1.34 мм а для 3.5 секунди – 1.42 мм.

Таким чином, виходячи з результатів друку можна зробити висновок, що зміна часу експонування має відображення як візуально, через дефекти, такі як відшарування, що можна побачити на прикладі моделі з часом експонування 1.5 секунди або збільшена крихкість як на зображенні моделі, яка друкувалася з часом експонування 3.5 секунди. Іншим відображенням часу експонування є також зміна фізичних розмірів моделей, на 310 мкм від 1.5 до 3.5 секунд.

Для підтвердження результатів дослідження було взято іншу тестову модель від Syraa Tech, було надруковано тестові зразки з різними технологічними параметрами після чого побудована математична модель залежності зміни геометричних розмірів від технологічних параметрів.[103]

Тестова модель від Syraa Tech зображено на рисунку 2.32.

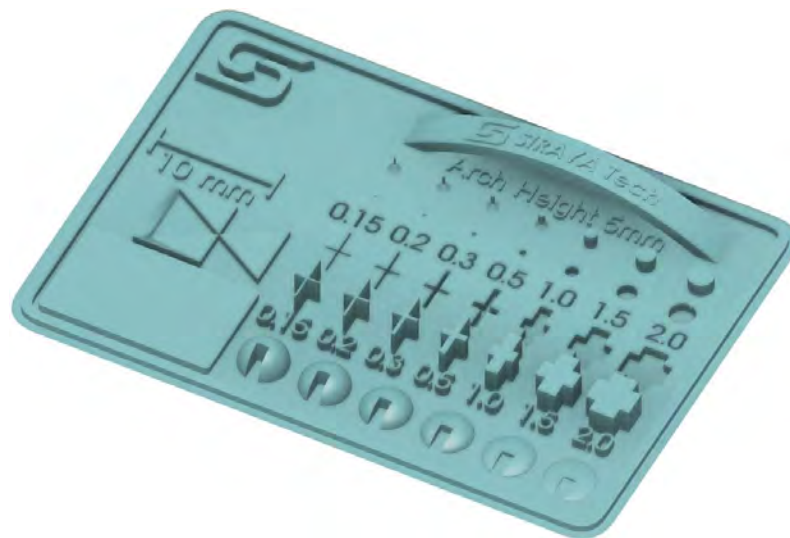


Рисунок 2.32 – Тестова модель від Syraa Tech

Дана модель містить п'ять тестових елементів, які змінюються через задану відстань.

Тестова модель з розмірами 48,72x34,41x5,24 має в своєму складі 7 циліндрів та 7 отворів, що змінюють свої розміри від 0.15 до 2 мм. Наступним елементом є набір 7 хрестоподібних елементів з товщиною стінок від 0.15 мм до 2 мм та набір сфер з висотою від 0.15 мм до 2 мм. Додатковими елементами є арка з висотою 5 мм.

Використовуючи цю модель, можливо точно визначити такі технологічні параметри:

- час експонування базових шарів;
- час експонування звичайних шарів;
- товщину базових шарів;
- товщину звичайних шарів;
- висоту перемішування;

– швидкість переміщення осі Z.

Для побудови математичної моделі було надруковано 7 тестових моделей з різним часом експонування(рис. 2.33).



Рисунок 2.33 – Надрукована тестова модель

Час експонування шарів змінюється з кроком 0.25 секунди, від 1.5 секунди до 3 секунд. Час базових шарів сталий та складає 33 секунди. Підйом перемішування складає 5 мм, швидкість перемішування – 80 мм/хв(рис. 2.34).

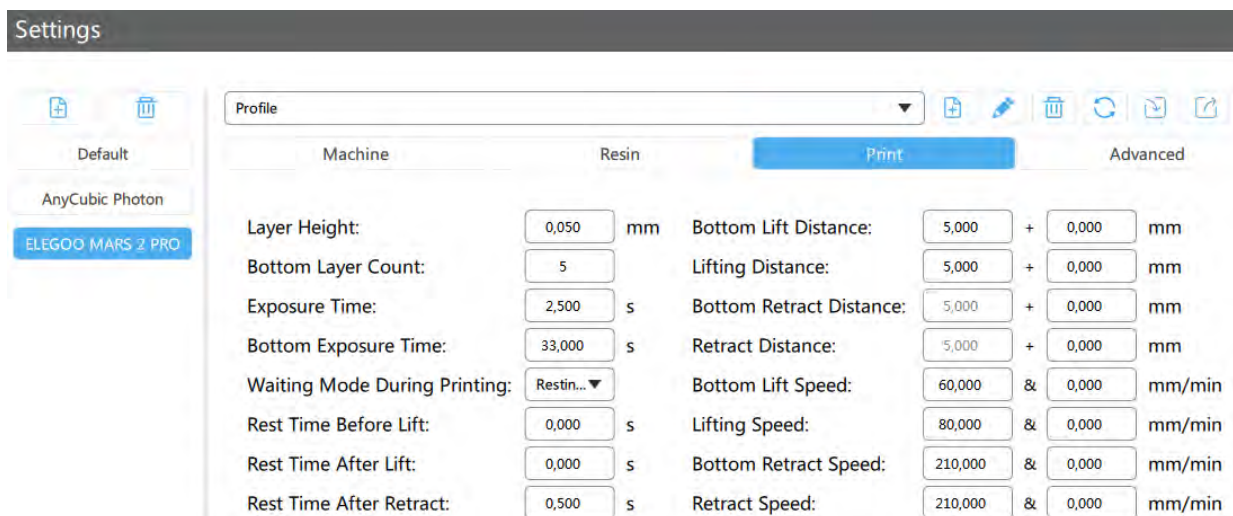


Рисунок 2.34 – Технологічні параметри для друку тестової деталі

Тестові зразки друкувалися на модифікованому принтері Anycubic Photon, на який встановили монохромний екран та який має системою засвітлення з однією світлодіодною матрицею та розтрубом(рис. 2.35).



Рисунок 2.35 – Фотополімерний принтер Anycubic Photon

В результаті друку було отримано 7 тестових моделей з різним часом експонування. Для визначення результатів використовується штангенциркуль з точністю ± 30 мкм, всі отримані результати наведені в табл. 1. В подальшому, під час проведення дослідження, було встановлено, що визначити точний розмір менших елементів неможливо, тому для уточнення даних із 7 тестових елементів(циліндрів, отворів) було взято два найбільших по розміру тестових елемента – 2 мм та 1,5 мм елементи.

Таблиця 2.1 Результати експериментальних досліджень

Тестовий зразок	Час експонування шарів, секунди	Тестовий елемент: циліндри, мм		Тестовий елемент: хрестоподібні елементи, мм		Тестовий елемент: циліндричні отвори, мм		Тестовий елемент: хрестоподібні отвори, мм	
		2 мм	1.5 мм	2 мм	1.5 мм	2 мм	1.5 мм	2 мм	1.5 мм
1	1,50	1,87	1,40	1,84	1,41	1,73	1,55	2,12	1,67
2	1,75	1,95	1,45	1,90	1,47	1,80	1,53	1,95	1,54
3	2,00	2,00	1,48	2,07	1,55	1,81	1,54	1,98	1,55
4	2,25	2,10	1,61	2,23	1,63	1,70	1,31	1,93	1,44
5	2,50	2,19	1,63	2,20	1,78	1,26	0,50	1,85	1,30
6	2,75	2,11	1,66	2,18	1,80	1,47	0,69	1,87	1,41
7	3,00	2,30	1,73	2,39	1,77	1,61	1,16	1,72	1,35

Виходячи з даних таблиці можна встановити, що при зміні часу експонування змінюються геометричні розміри моделі. В тестових моделях з найменшим часом експонування візуально можливо побачити дефекти на моделі, які мають вигляд відсутності найменших елементів(рис. 2.36).



Рисунок 2.36 – Тестова модель з дефектом

Для підтвердження візуальних спостережень необхідно провести математичний аналіз у вигляді лінійного однофакторного регресійного аналізу, для визначення залежності між часом експонування та розмірами елементів. Рівняння лінійної регресії має наступний вигляд:

$$Y = b_1 \cdot X + c \quad (2.1)$$

Розрахунок моделі регресійного аналізу було проведено в ПЗ EXCEL за допомогою інструментів аналізу, в результаті чого було отримано наступні результати для тестових циліндрів з діаметрами 2 мм та 1.5 мм, що зведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Результат регресійного аналізу залежності розміру тестових циліндрів від часу експонування

SUMMARY OUTPUT		RESIDUAL OUTPUT						
Regression Statistics		Observation	Predicted Y	Residuals				
Multiple R	0,98186815	1	1,530753	-0,03075				
R Square	0,96406506	2	1,751107	-0,00111				
Adjusted R Square	0,94609758	3	1,883683	0,116317				
Standard Error	0,12538556	4	2,43696	-0,18696				
Observations	7	5	2,535651	-0,03565				
		6	2,644582	0,105418				
ANOVA		7	2,967265	0,032735				
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	2	1,687113849	0,843557	53,65613	0,00129132			
Residual	4	0,062886151	0,015722					
Total	6	1,75						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	-4,5718651	0,741585605	-6,16499	0,003514	-6,630836798	-2,512893	-6,6308368	-2,5128934
X Variable 1(тестовий циліндр 2.0 мм)	0,18188817	1,261614613	0,144171	0,892337	-3,320915544	3,6846919	-3,3209155	3,68469189
X Variable 2(тестовий циліндр 1.5 мм)	4,11606198	1,508825415	2,727991	0,052552	-0,07310896	8,3052329	-0,073109	8,30523291

Згідно отриманих результатів регресійного аналізу, коефіцієнт детермінації становить 96%, що підтверджує залежність отриманих розмірів від часу експонування. Коефіцієнт X Variable1 відповідає тестовому циліндру з діаметром 2 мм, X Variable 2 відповідає тестовому циліндру з діаметром 1,5 мм. Також були отримані графіки підбору та графіки залишків(рис. 2.37).

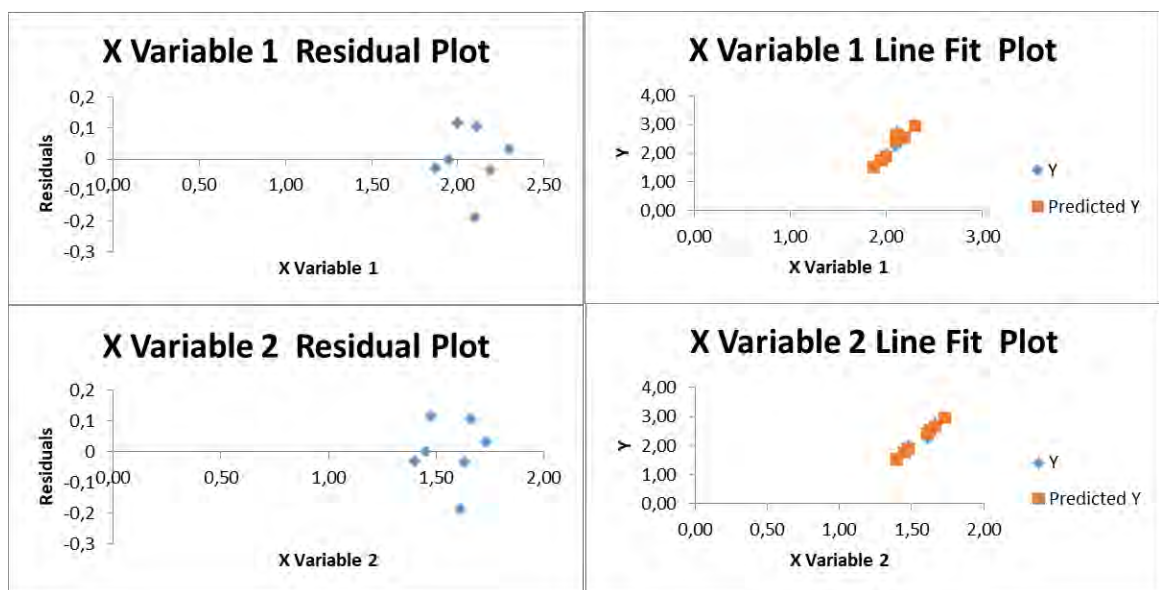


Рисунок 2.37 – Графіки підбору та графіки залишків

Далі було проаналізовано залежність між часом експонування та хрестоподібними елементами з товщиною стінки 2 мм та 1.5 мм та зведені у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Результат регресійного аналізу залежності розміру хрестоподібних елементів з товщиною стінки 2 мм та 1.5 мм від часу експонування

SUMMARY OUTPUT		RESIDUAL OUTPUT						
<i>Regression Statistics</i>		<i>Observation</i>	<i>Predicted Y</i>	<i>Residuals</i>				
Multiple R	0,9780182	1	1,485568	0,0144317				
R Square	0,9565196	2	1,676426	0,0735741				
Adjusted R Square	0,9347795	3	2,03529	-0,03529				
Standard Error	0,1379226	4	2,382555	-0,132555				
Observations	7	5	2,650925	-0,150925				
		6	2,66815	0,0818499				
ANOVA		7	2,851086	0,1489138				
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	2	1,673909384	0,836955	43,997788	0,001890541			
Residual	4	0,076090616	0,019023					
Total	6	1,75						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	-3,4983227	0,623878319	-5,60738	0,0049684	-5,23048665	-1,766159	-5,23048665	-1,7661588
X Variable 1(хрестоподібний елемент 2.0 мм)	1,1598539	0,596917767	1,943072	0,1239393	-0,49745547	2,817163	-0,49745547	2,8171634
X Variable 2(хрестоподібний елемент 1.5 мм)	2,0211062	0,726342904	2,782579	0,0496873	0,004455049	4,037757	0,00445505	4,0377574

В результаті аналізу були отримані дані, що також підтверджують залежність розмірів від часу експонування, коефіцієнт детермінації становить 95,6 %, що повторює результат попереднього регресійного аналізу.

В даному моделюванні коефіцієнт X Variable1 відповідає хрестоподібному елементу з товщиною стінки 2 мм, X Variable 2 відповідає хрестоподібному елементу з товщиною стінки 1,5 мм Також були отримані графіки залишків та підбору(рис. 2.38).

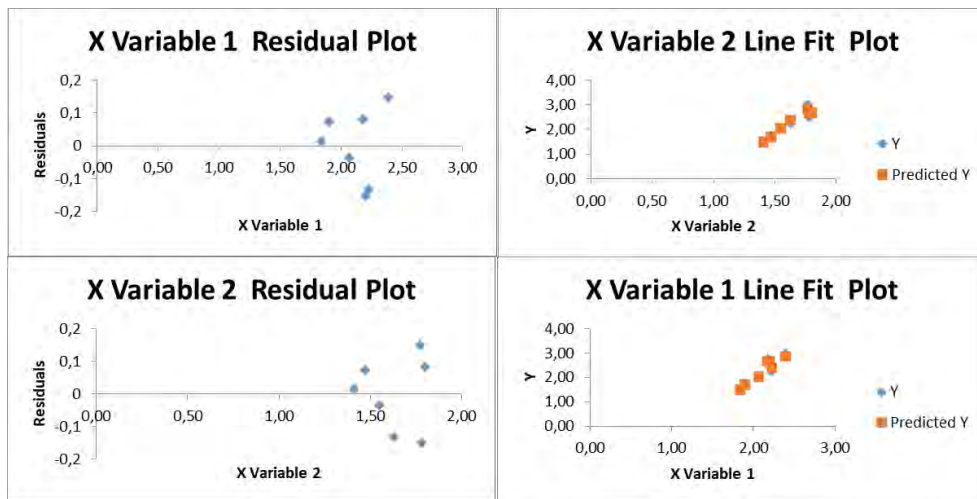


Рисунок 2.38 – Графіки підбору та графіки залишків для хрестоподібних елементів

В результаті проведення експериментальних досліджень було встановлено та підтверджено, що час експонування у фотополімерному друці є головним технологічним параметром, що впливає на основні показники якості отриманої моделі, тобто на геометричні розміри. Зі зменшення часу, необхідного на експонування шару, геометричні розміри зменшуються, створюються дефекти, при яких тонкі елементи відсутні. При збільшенні часу експонування, елементи збільшуються, що також може призводити до дефектів, коли отвори, які є в моделі запливають фотополімерною смолою та зникають.

В результаті друку 7 тестових елементів, з часом від 1,5 секунди до 3 секунд було визначено час експонування, що забезпечує найбільше збереження встановлених геометричних розмірів, у 2 секунди, де відхилення від розмірів становить до 50 мкм, що є найбільш гарним результатом у порівнянні з іншими тестовими зразками.

Таким чином, використовуючи математичне моделювання в поєднанні з друком тестових моделей на фотополімерному 3D – принтері можливо отримати прогнозовані геометричні розміри з мінімальним відхиленням від заданих, що дозволить отримувати в кінці друку найбільш точний результат та мінімізувати виникнення різноманітних дефектів, на які впливає встановлений час експонування шарів.

2.3 Розробка математичної моделі залежності відхилення розмірів від технологічних параметрів

Для забезпечення якісних показників деталей необхідно визначити вплив основних технологічних параметрів на кількісні показники відхилень дефектів. Таким чином, для першого досліді було взято відхилення розмірів базових шарів від заданих у моделі в залежності від трьох параметрів, які найбільше можуть впливати на отриманий результат: товщина базових шарів, час експонування базових шарів та кількість базових шарів.

Для проведення експерименту виготовлено просту 3D-модель, яка має форму куба з розмірами 20x20x5 мм з товщиною стінки 4 мм. Розміри даної моделі були вибрані враховуючи простоту виміру відхилень розмірів та невеликі затрати фотополімеру на дослід. Розмір вимірюваних шарів по вертикалі складаються від 0.1 до 0.9 мм, так як для дослідження взято кількість базових шарів від 2 до 6 з товщиною від 50 мкм до 150 мкм. Час експонування взято враховуючи властивості фотополімерного принтера, зокрема наявність в ньому монохромного екрану, що зменшує час експонування в 3-5 разів у порівнянні зі повнокольоровими екранами а також досвіду друку, що визначило мінімально можливий час експонування для конкретної смоли та принтера та при якому модель залишається на платформі.

Модель для проведення дослідження зображена на рисунку 2.32.

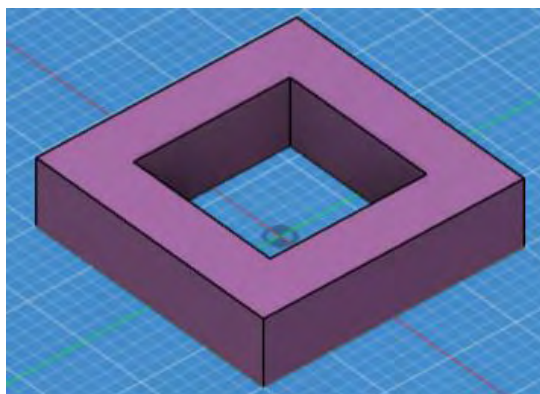


Рисунок 2.32 – Тестова модель для дослідження відхилення базових шарів від звичайних

Таким чином для проведення багатофакторного регресійного аналізу [85] було взято три фактори: час експонування базових шарів, товщина базових шарів та їх кількість. В результаті проведення експериментальних досліджень у вигляді друку тестових моделей було отримано значення відхилення базових шарів, які були виміряні за допомоги цифрового штангенциркуля, що має перший клас точності (рисунок 2.33).



Рисунок 2.33 – Вимірювання розмірів відхилення базових шарів

В результаті друку тестової моделі з різними параметрами було отримано 27 моделей (рисунок 2.34).

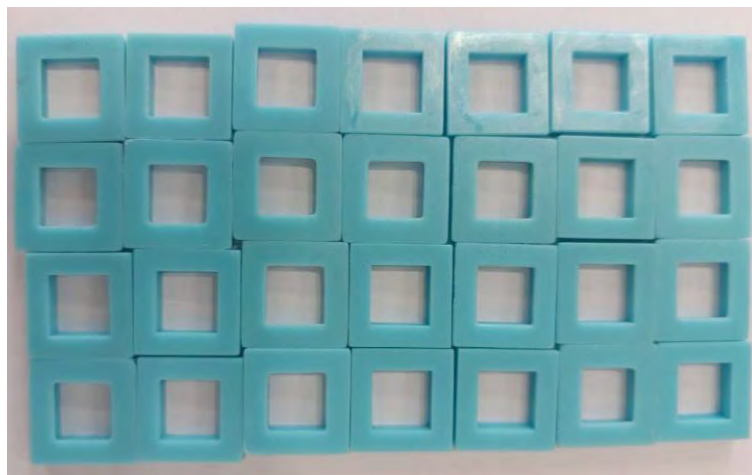


Рисунок 2.34 – Отримані моделі в результаті друку

Числові значення факторів та отриманих результатів було зведено в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати друку тестових моделей в залежності від технологічних параметрів

№	Час експонування базових шарів, сек	Товщина базового шару, мкм	Кількість базових шарів, шт	Середнє арифметичне відхилення розмірів базових шарів,мм
1	16,00	50,00	2,00	0,42
2	23,00	50,00	2,00	0,76
3	30,00	50,00	2,00	0,88
4	16,00	100,00	2,00	0,50
5	23,00	100,00	2,00	0,84
6	30,00	100,00	2,00	0,87
7	16,00	150,00	2,00	0,54
8	23,00	150,00	2,00	0,72
9	30,00	150,00	2,00	0,86
10	16,00	50,00	4,00	0,60
11	23,00	50,00	4,00	0,78
12	30,00	50,00	4,00	0,93
13	16,00	100,00	4,00	0,65
14	23,00	100,00	4,00	0,84
15	30,00	100,00	4,00	1,00
16	16,00	150,00	4,00	0,60
17	23,00	150,00	4,00	0,76
18	30,00	150,00	4,00	1,00
19	16,00	50,00	6,00	0,55
20	23,00	50,00	6,00	0,61
21	30,00	50,00	6,00	0,84
22	16,00	100,00	6,00	0,73
23	23,00	100,00	6,00	0,90
24	30,00	100,00	6,00	0,93
25	16,00	150,00	6,00	0,75
26	23,00	150,00	6,00	0,96
27	30,00	150,00	6,00	1,20

Як видно з таблиці 2.1 в якості значень для фактору час експонування було взято три значення від мінімального 16 секунд, 23 середнє значення та 30 секунд максимальне. Мінімальний, середній та максимальний час було взято на основі даних отриманих експериментально. Для товщини шару було взято мінімальну

товщину шару 50 мкм, середнє значення 100 мкм, та максимальне 150 мкм. Мінімальна, середня та максимальна товщина шару була взята виходячи з мінімальних характеристик фотополімера.

Для кількості базових шарів було взято 2, 4 та 6 шарів, що також відповідають заявленим характеристикам фотополімера.

В подальшому ці фактори отримали позначення час експонування – а, товщина базового шару – b та кількість шарів – с. Розміри відхилення отримали позначення d. Всі значення було зведено в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Прийняті позначення

Фактори	Час експонування базових шарів, сек	Товщина базових шарів, мкм	Кількість базових шарів, шт	Відхилення від заданих розмірів, мм
Позначення	a	b	c	d
Позначення МФЕ	x ₁	x ₂	x ₃	y
Верхній ліміт(1)	30	150	6	-
Основний рівень(0)	23	100	4	-
Нижній ліміт(-1)	16	50	2	-

Матриця проведення багатфакторного регресійного аналізу відображена в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Матриця проведення багатфакторного регресійного аналізу

Номер експеримента	a	b	c	x1	x2	x3	x1*x2	x1*x3	x2*x3	x1*x2*x3	x1*x1	x2*x2	x3*x3	y
1	16	50,00	2,00	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	0,42
2	23	50,00	2,00	0	-1	-1	0	0	1	0	0	1	1	0,76
3	30	50,00	2,00	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	0,88
4	16	100,00	2,00	-1	0	-1	0	1	0	0	1	0	1	0,50
5	23	100,00	2,00	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	0,84
6	30	100,00	2,00	1	0	-1	0	-1	0	0	1	0	1	0,87
7	16	150,00	2,00	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	0,54
8	23	150,00	2,00	0	1	-1	0	0	-1	0	0	1	1	0,72
9	30	150,00	2,00	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	0,86
10	16	50,00	4,00	-1	-1	0	1	0	0	0	1	1	0	0,60
11	23	50,00	4,00	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0,78
12	30	50,00	4,00	1	-1	0	-1	0	0	0	1	1	0	0,93
13	16	100,00	4,00	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,65
14	23	100,00	4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,84
15	30	100,00	4,00	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1,00
16	16	150,00	4,00	-1	1	0	-1	0	0	0	1	1	0	0,60
17	23	150,00	4,00	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0,76
18	30	150,00	4,00	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1,00
19	16	50,00	6,00	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	0,55
20	23	50,00	6,00	0	-1	1	0	0	-1	0	0	1	1	0,61
21	30	50,00	6,00	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	0,84
22	16	100,00	6,00	-1	0	1	0	-1	0	0	1	0	1	0,73
23	23	100,00	6,00	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0,90
24	30	100,00	6,00	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0,93
25	16	150,00	6,00	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	0,75
26	23	150,00	6,00	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0,96
27	30	150,00	6,00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,20

Основне рівняння багатфакторної регресії має наступний вигляд:

$$y_i = a_1x_{1i} + a_2x_{2i} + \dots + a_mx_{mi} + b_i \quad (2.1)$$

Для визначення коефіцієнта регресії використовується формула (2.2):

$$b_i = \frac{\sum_1^n (y_i * x_i)}{n} \quad (2.2)$$

де b_i – коефіцієнт регресії;

n – кількість проведених дослідів;

y_i – значення функції y ;

x_i – значення фактору.

Таким чином, виходячи з матриці проведення експерименту було отримано 10 коефіцієнтів регресії, що зведені до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Коефіцієнти регресії

Коефіцієнт регресії	Значення
b_1	0,117407407
b_2	0,037777778
b_3	0,04
b_4	0,003333333
b_5	-0,007777778
b_6	0,095185185
b_7	0,011111111
b_8	0,512962963
b_9	0,50962963
b_{10}	0,513333333
b_0	0,78

Перші три коефіцієнта відповідають за лінійну частину регресійного аналізу, b_4 - b_7 відповідають за парну взаємодію між факторами, b_8 - b_{10} відповідають за квадратичні ефекти взаємодії між факторами, b_0 – нульовий коефіцієнт регресії.

Загальне рівняння регресії має наступний вигляд:

$$y = 0.78 + 0.11x_1 + 0.037x_2 + 0.04x_3 + 0.0033x_1x_2 - 0.0077x_1x_3 + 0.095x_2x_3 + 0.011x_1x_2x_3 + 0.51x_1^2 + 0.509x_2^2 + 0.51x_3^2 \quad (2.3)$$

Далі необхідно перевірити коефіцієнти регресії за критерієм Стюдента. Для цього було визначено дисперсію залишків, яка становить 0.05.

Після визначення дисперсії була виконана перевірка значущості коефіцієнтів за допомогою t-тесту за критерієм Стюденту. Формула t-тесту має наступну форму:

$$t_i = \frac{b_i}{SE(b_i)}, \quad (2.4)$$

де $SE(b_i)$ – стандартна помилка коефіцієнта, яка розраховується з дисперсії залишків.

В результаті було отримано таблицю 2.5 з результатами розрахунку Т-тесту для кожного коефіцієнту:

Таблиця 2.5 – Результат розрахунку t-тесту для кожного коефіцієнта регресії

Номер t-тесту	Значення
t_0	3,857404884
t_1	1,497988576
t_2	0,849726096
t_3	0,874360939
t_4	0,252406262
t_5	-0,016582278
t_6	1,348793399
t_7	0,460828678
t_8	3,131149161
t_9	3,120959171
t_{10}	3,132279336

Для подальшої перевірки отриманих тестів для кожного коефіцієнта було взято табличне значення коефіцієнта Стюдента з використанням довірчої ймовірності 0.95 та з числом ступенів свободи 26, що становить 2.055.

В результаті лише три коефіцієнта відповідають умовам та більше за табличний коефіцієнт. Ці коефіцієнти зведені в таблицю 2.6.

Таблиця 2.6 – Коефіцієнти Стюдента, що більші за табличний коефіцієнт 2.055.

Коефіцієнти Стюдента	Значення
t_0	3,857
t_8	3,131
t_9	3,12
t_{10}	3,132

Ці коефіцієнти Стюдента відповідають коефіцієнтам регресії, які також зведені в таблицю 2.7.

Таблиця 2.7 – Значущі коефіцієнти регресії

Значущі коефіцієнти	Значення
b_0	0.78
b_8	0.513
b_9	0.509
b_{10}	0.513

Тоді загальне рівняння регресії з урахуванням значущих коефіцієнтів буде мати наступний вигляд:

$$y = 0.78 + 0.513x_1^2 + 0.509x_2^2 + 0.513x_3^2 \quad (2.5)$$

В подальшому розрахунки були виконані в спеціальному ПЗ Statistica. Було отримано коефіцієнти детермінації та кореляції (таблиця 2.8), які свідчать про те, що зв'язок між множинами в рівнянні регресії має лінійний зв'язок.

Таблиця 2.8 – Результат розрахунків коефіцієнтів кореляції та уточненого коефіцієнта кореляції

Statistic	Summary Statistics; DV:
	Value
Multiple R	0,908904741
Multiple R ²	0,826107827
Adjusted R ²	0,794491069
F(4,22)	26,1287957
p	0,0000000443455868
Std.Err. of Estimate	0,0813444478

Виходячи з таблиці квадрат коефіцієнта множинної кореляції становить 0.908, що є більшим за 0.7, яке відповідає критерію Фішера, тобто можна вважати, що варіація обумовлена впливом факторів.

Далі можливо проаналізувати залишки, які були отримані в ПЗ Statistica. Для перевірки залишків на наявність автокореляції було розраховано статистику Дарбіна-Уотсона, що зображено на рисунку 2.35

Durbin-Watson d (Архив3 in 1) and serial correlation of residuals		
	Durbin-Watson d	Serial Corr.
Estimate	1,425372	0,233044

Рисунок 2.35 – Розраховане значення статистики Дарбіна-Уотсона

Таким чином значення становить 1.425 при $n=27$ та $k=3$, тоді табличне значення значущих точок для 5% рівня значущості $d_l=1.16$ а $d_u=1.65$. Таким чином, значення 1.425, отримане в результаті розрахунків є меншим ніж значення d_u , яке становить 1.65, тоді можливо зазначити, що в моделі є автокореляція залишків. В подальшому було отримано декілька графіків залишків.

Для оцінки адекватності моделі побудували нормальний вірогідний графік залишків, що зображений на рисунку 2.36.

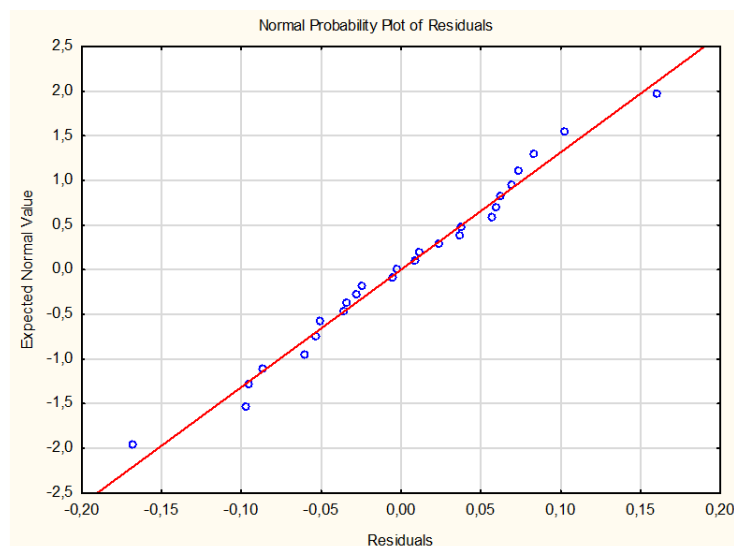


Рисунок 2.36 – Нормальний вірогідний графік залишків

Із графіка видно, що залишки добре інтерполюються лінійною залежністю, що відповідає нормальному закону розподілення залишків.

Далі були отриманий графік залежності регресійних залишків від передбачуваного значення залежної змінної для визначення нестабільності дисперсії похибки рівняння. Цей графік зображений на рисунку 2.37.

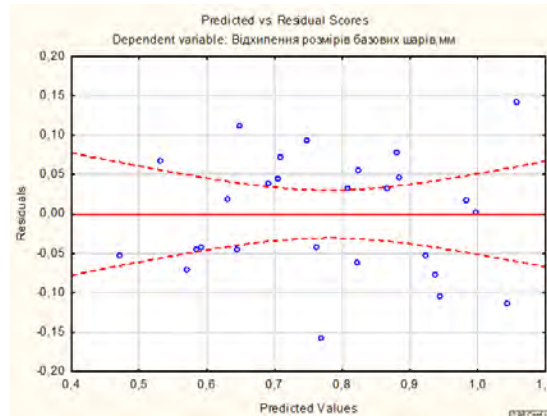


Рисунок 2.37 – Графік залежності регресійних залишків від передбачуваного значення

На графіку можна побачити межу довірчого інтервалу та середнє значення залишків. Також можливо відзначити, що залишки не залежать від передбачених по рівнянню регресії значень відгуків та розкидані хаотично відносно прямої та між ними немає закономірності розподілу, таким чином модель адекватно описує вхідні дані.

Загальна гістограма залишків зображена на рисунку 2.38. В результаті аналізу цієї гістограми необхідно визначити те, що вона є відносно симетричною, що свідчить про те, що залишки нормально розподілені.

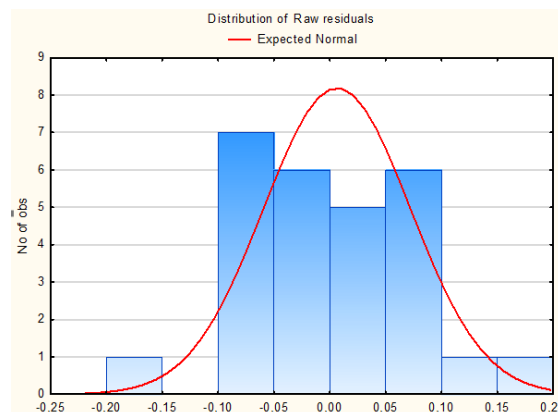


Рисунок 2.38 – Загальна гістограма залишків

В результаті для визначення відносного впливу таких факторів як час експонування a , товщина базових шарів b та кількість базових шарів c на розміри відхилення базових шарів було розраховано за формулами:

$$r_a^2 = \frac{t_a^2 * R^2}{t_a^2 + t_b^2 + t_c^2}, \quad (2.6)$$

де t_a – отримане раніше значення t-критерію для фактора часу експонування;
 t_b – отримане раніше значення t-критерію для фактора товщини базових шарів;

t_c – отримане раніше значення t-критерію для фактора кількість базових шарів;

R^2 – коефіцієнт детермінації, який має значення 0.82.

Таким чином було розраховано вплив по вищевказаній формулі і для інших факторів. В подальшому результат розрахунків були зведені в таблицю 2.9.

Таблиця 2.9 – Значення відносного впливу факторів на розміри відхилення базових шарів

r^2	Значення
r_a^2	0,71543
r_b^2	0,074071
r_c^2	0,083042

В подальшому було розраховано коефіцієнт еластичності, що показує на скільки відсотків зростає показник у при зростанні окремих факторів на 1%.

Формула для розрахунку коефіцієнта еластичності:

$$KE_n = a_n * \frac{x_n}{y} \quad (2.7)$$

В подальшому отримані значення коефіцієнтів еластичності були зведені до таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Коефіцієнти еластичності

Фактор	КЕ, %
Час експонування базових шарів	3,456565
Товщина базових шарів	4,752617
Кількість базових шарів	0,205519

В подальшому, підстановкою значень факторів в отримане рівняння регресії було розраховано теоретичні значення та зведено в таблицю 2.11.

Таблиця 2.11 – Зведена таблиця значень факторів впливу на отриману та теоретичну величину відхилення розмірів базових шарів

Час експонування базових шарів, сек	Товщина базового шару, мкм	Кількість базових шарів, шт	Відхилення розмірів базових шарів, мм	Теоретичне відхилення розмірів базових шарів, мм
16,00	50,00	2,00	0,42	0,485740741
23,00	50,00	2,00	0,76	0,661851852
30,00	50,00	2,00	0,88	0,837962963
16,00	100,00	2,00	0,50	0,542407407
23,00	100,00	2,00	0,84	0,718518519
30,00	100,00	2,00	0,87	0,89462963
16,00	150,00	2,00	0,54	0,599074074
23,00	150,00	2,00	0,72	0,775185185
30,00	150,00	2,00	0,86	0,951296296
16,00	50,00	4,00	0,60	0,545740741
23,00	50,00	4,00	0,78	0,721851852
30,00	50,00	4,00	0,93	0,897962963
16,00	100,00	4,00	0,65	0,602407407
23,00	100,00	4,00	0,84	0,778518519
30,00	100,00	4,00	1,00	0,95462963
16,00	150,00	4,00	0,60	0,659074074
23,00	150,00	4,00	0,76	0,835185185
30,00	150,00	4,00	1,00	1,011296296
16,00	50,00	6,00	0,55	0,605740741
23,00	50,00	6,00	0,61	0,781851852
30,00	50,00	6,00	0,84	0,957962963
16,00	100,00	6,00	0,73	0,662407407
23,00	100,00	6,00	0,90	0,838518519
30,00	100,00	6,00	0,93	1,01462963
16,00	150,00	6,00	0,75	0,719074074
23,00	150,00	6,00	0,96	0,895185185
30,00	150,00	6,00	1,20	1,071296296

Отримана діаграма зображена на рисунку 2.39. Вона показує відхилення прогнозованих значень вихідної величини від фактичних, що були отримані в результаті проведення експерименту – друку тестових моделей. Відхилення значень становлять від 40 до 130 мкм.

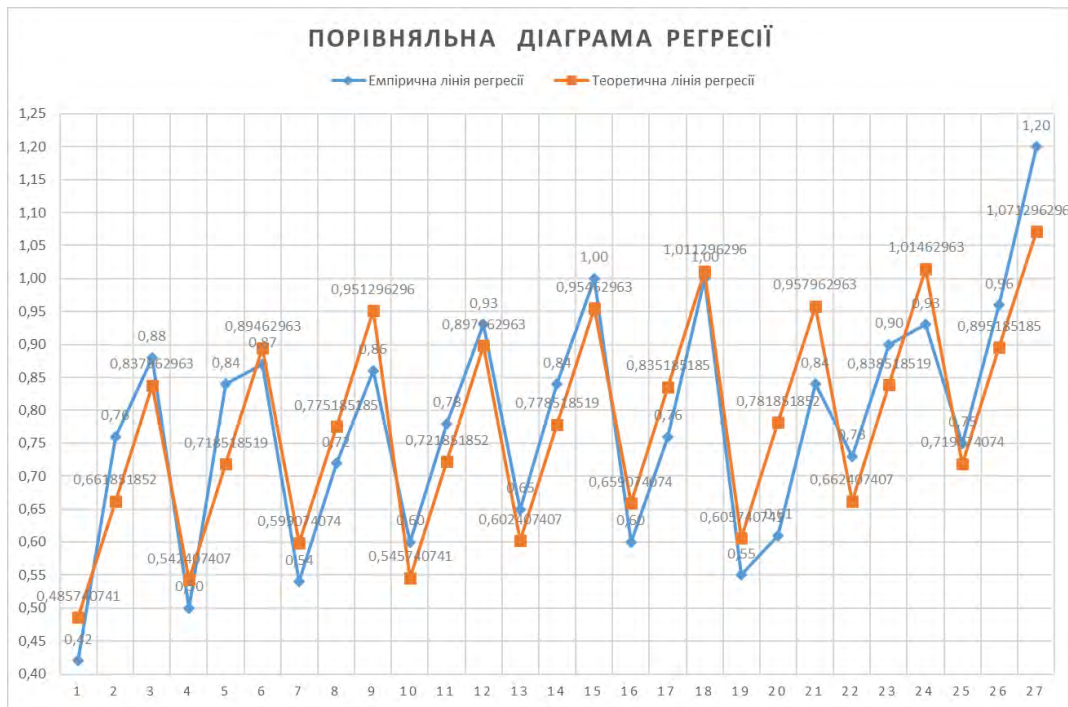


Рисунок 2.39 – Порівняльна діаграма регресії

Таким чином, в результаті проведення регресійного аналізу було встановлено, що найбільше на відхилення розмірів базових шарів впливають лише 2 фактори, такі як час експонування та кількість базових шарів, натомість товщина шару має найменший вплив на відхилення розмірів.

3 РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ФОТОПОЛІМЕРНИМ 3D-ДРУКОМ

3.1 Загальний процес керування фотополімерним 3D-друком

Для розробки системи автоматизованого керування процесом фотополімерного друку необхідно визначити основні складові елементи цієї системи керування. Для цього необхідно розробити схему системи керування технологічним процесом фотополімерного друку.

Загальна структура автоматизованої системи керування передбачає забезпечення контролю та стабільності основних показників якості надрукованих деталей, зокрема шорсткості поверхні та відповідності геометричних розмірів заданим.

Загальна схема автоматизованого керування процесом фотополімерного 3D- друку зображено на рисунку 3.1.

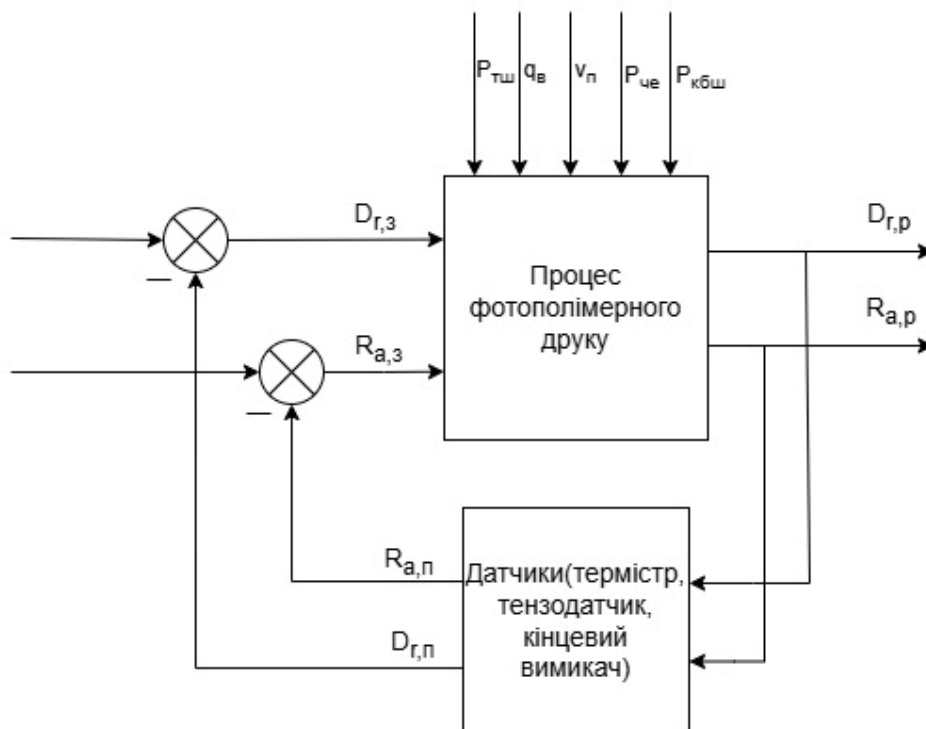


Рисунок 3.1 – Загальна схема керування процесом фотополімерного друку

Загальна схема автоматизованого керування передбачає порівняння за допомоги датчиків зворотнього зв'язку (термістор, тензорезистор, кінцевий вимикач) заданих показників якості друку (шорсткості поверхні R_a , точності збереження заданих розмірів D_r) з вихідними та подальшим їх корегуванням. На систему керування впливають технологічні параметри, які задаються у слайсері, такими параметрами є кількість базових шарів, товщина шару, час експонування, швидкість руху платформи та інші характеристики.

Математично структура моделі має наступний вигляд:

$$D_{r,p}, R_{a,p} = F(D_{r,z}, R_{a,z}, P_{тш}, q_v, v_{п}, P_{че}, P_{кбш}), \quad (3.1)$$

де $D_{r,p}$ – отримані розміри деталі;
 $R_{a,p}$ – отримана шорсткість деталі;
 $D_{r,z}$ – задані розміри деталі;
 $R_{a,z}$ – задана шорсткість деталі;
 $P_{тш}$ – параметри товщини шару;
 q_v – інтенсивність експонування УФ світлодіода;
 $v_{п}$ – параметри швидкості переміщення платформи;
 $P_{че}$ – параметри часу експонування;
 $P_{кбш}$ – параметри кількості базових шарів.

Виходячи із загальної структури САК ТП фотополімерного друку можливо визначити основні складові АСК ТП фотополімерного друку.

До складу АСК ТП входять наступні забезпечення:

- функціональне забезпечення, яке відповідає за формування УФ випромінювання, формування зображення на екрані(маски), перемішування та визначення розташування платформи по осі Z.
- інформаційне забезпечення, відповідає за технологічні параметри, що задаються в слайсері перед друком і впливають на технологічний процес, такими

параметрами є час експонування, швидкість переміщення, товщина шару, кількість базових шарів та ін.

– математичне забезпечення охоплює математичні моделі процесу друку, в результаті аналізу та моделювання у першому та другому розділі було визначено, що для покращення характеристик процесу друку необхідно врахувати розроблену регресійну модель відхилень розмірів від технологічних параметрів, модель керування за силою відриву та САК процесу відриву від температури.

– алгоритмічне забезпечення містить алгоритм перемішування, алгоритм визначення сили відриву від площі в процесі друку, алгоритм експонування шару, алгоритм визначення початкового положення платформи;

– технічне забезпечення містить модуль експонування, що включає в себе світлодіодну матрицю, модуль відображення, що включає в себе екран (маску), модуль переміщення, що включає в себе двигун, драйвер, модуль контролю за силою відрива, що включає в себе тензодатчик та модуль контролю за температурою що включає в себе термістор і плату керування.

Основними елементами, що визначають збереження якісних показників та необхідні для покращення системи керування є елементи, що відповідають за контроль сили відриву та контроль температури фотополімера, яка впливає на швидкість полімеризації і тим самим на силу відрива від плівки.

На основі проведеного регресійного аналізу для покращення показників якості керування, в САК фотополімерним 3D-друком пропонується в якості математичного забезпечення модель керування за силою відрива від площі та САК модель процесу відрива за температурою.

В алгоритмічному забезпеченні пропонується алгоритм визначення сили відриву від площі на основі алгоритму перемішування.

Таким чином загальна структурна схема автоматизованої системи керування фотополімерним 3D-друком зображена на рисунку 3.2.

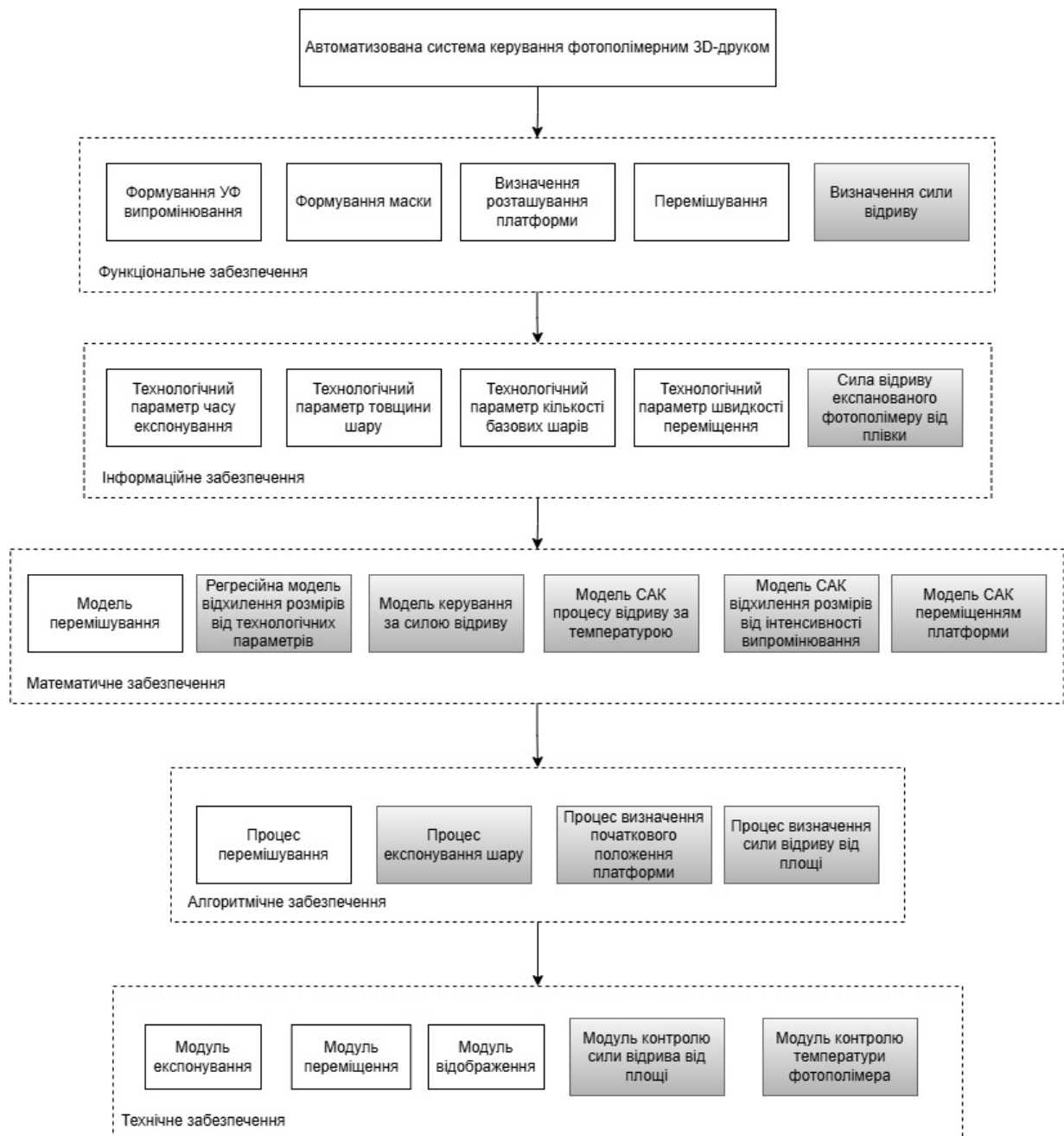


Рисунок 3.2 – Узагальнена структурна схема автоматизованої системи керування фотополімерним 3D-друком

Для забезпечення вищевказаних алгоритмічного та математичного забезпечення необхідно створити програмний комплекс на основі Arduino з використанням технічних засобів для забезпечення цілей автоматизованої системи керування фотополімерним 3D-друком.

Для досягнення поставленої мети необхідно побудувати функціональну схему автоматизованого керування фотополімерним 3D-друком. Ця схема містить наступні елементи:

- плата керування, яка надсилає сигнали на кроковий двигун, екран та світлодіодну матрицю;
- світлодіодна матриця, яка потоком УФ випромінювання ініціює процес полімеризації;
- екран (маска), який виводить зображення шару;
- кроковий двигун, який відповідає за систему переміщення;
- в якості зворотнього зв'язку по якому здійснюється контроль міститься тензодатчик, кінцевий вимикач та термістор;
- в якості об'єкта керування – процес керування фотополімерним 3D-друком.

Функціональна схема процесу фотополімерного 3D-друку зображена на рисунку 3.3.

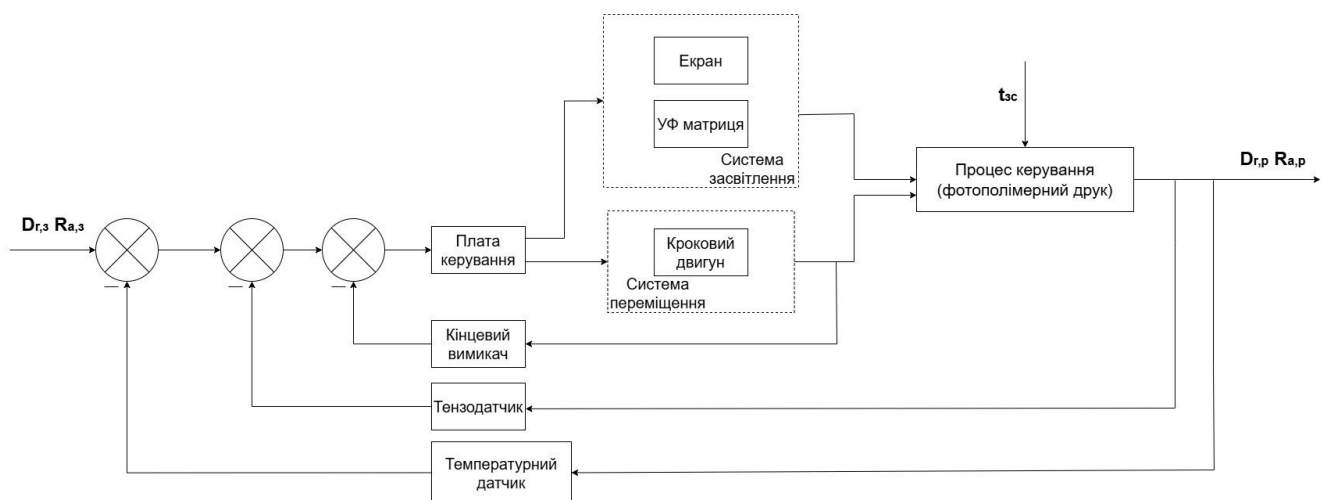


Рисунок 3.3 – Функціональна схема системи керування процесом фотополімерного 3D-друку

Визначення вхідних та вихідних параметрів є ті ж самі параметри, що і на узагальненій схемі САК ТП фотополімерного друку: вхідними параметрами є

задані розміри та шорсткість, вихідними параметрами є розраховані значення шорсткості та відхилення розмірів.

Для структурної схеми системи керування було визначено передатні функції її елементів, експериментально підібрано коефіцієнти та постійні часу. Структурна схема системи з визначеними передатними функціями зображена на рисунку 3.4.

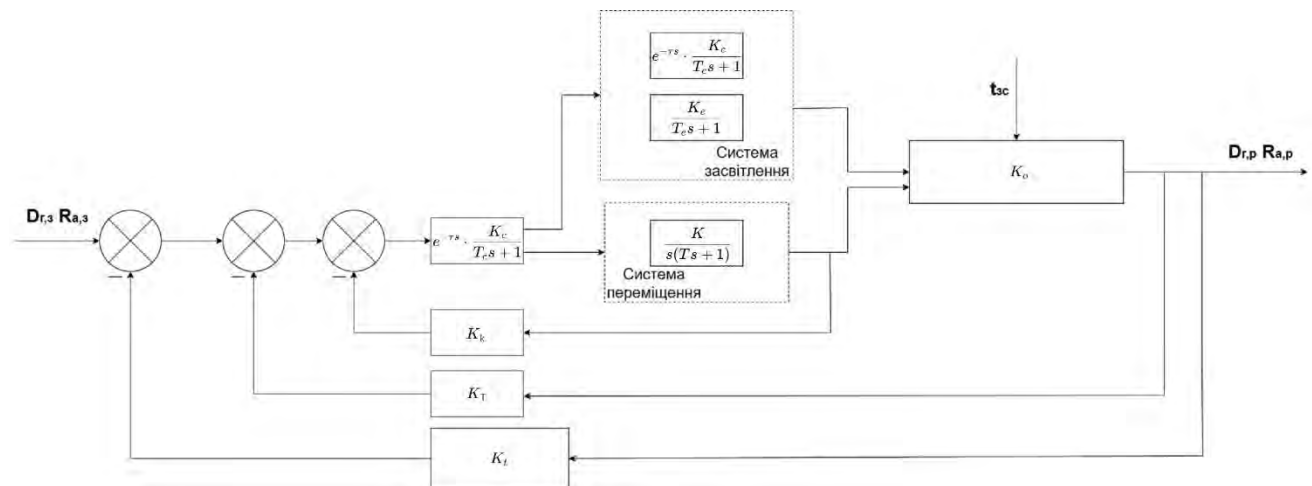


Рисунок 3.4 – Структурна схема системи керування процесом фотополімерного друку

Таким чином було побудовано схему для моделювання показників якості системи керування в ПЗ MatLab Simulink, яка зображена на рисунку 3.5.

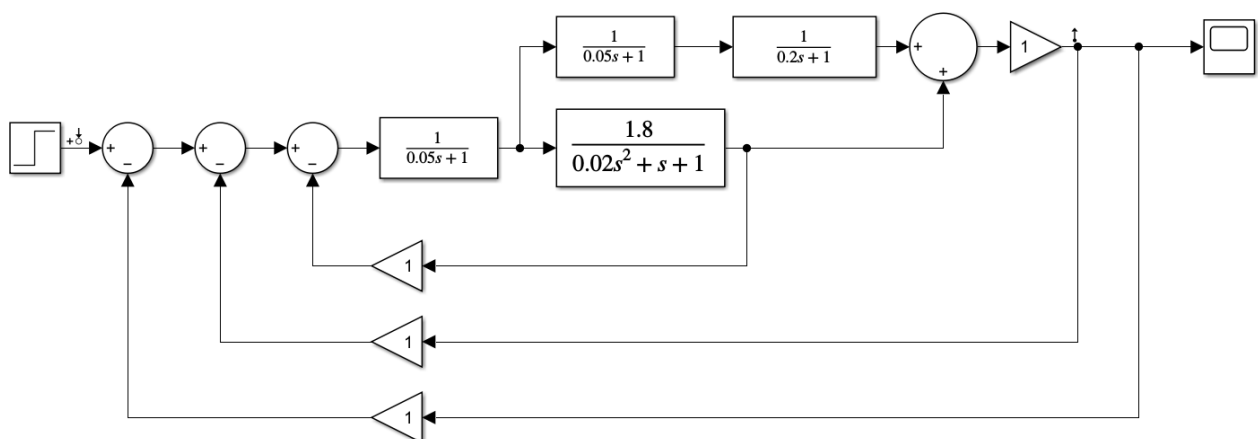


Рисунок 3.5 – Схема для моделювання фотополімерного друку у ПЗ MatLab Simulink

В подальшому використовуючи загальну схему MatLab Simulink, що зображена на рисунку 3.6, було проведено перетворення схеми для знаходження загальної передатної функції системи керування.

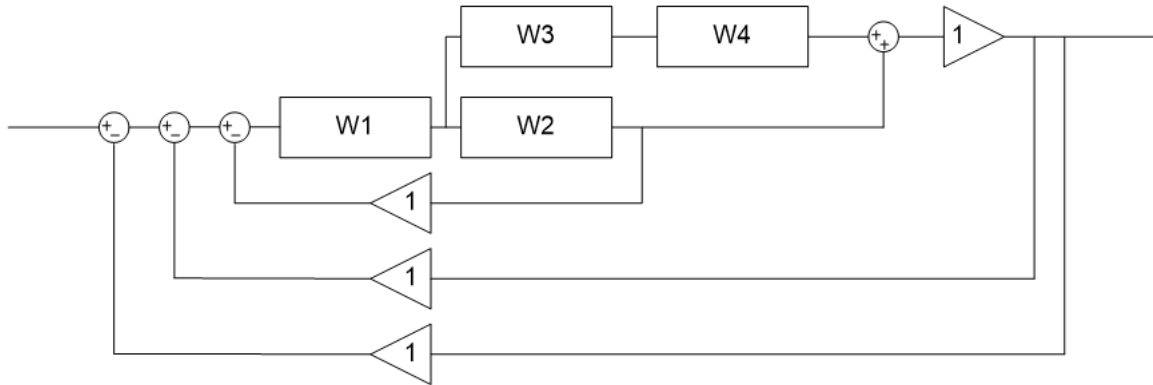


Рисунок 3.6 – Загальна схема для знаходження передавальної функції системи керування

Загальна передатна функція для екрону та матриці W_{34} має наступний вигляд:

$$W_{34} = W_3 * W_4, \quad (3.2)$$

Загальна передатна функція для двигуна W_2 , та отримана передатна функція для екрона та світлодіодної матриці W_{34} має наступний вигляд:

$$W_{342} = W_{34} + W_2, \quad (3.3)$$

Передатна функція плати керування W_1 та крокового двигуна W_2 має наступний вигляд:

$$W_{12} = \frac{W_1}{1+W_1*W_2*1}, \quad (3.4)$$

Таким чином загальна схема після попередніх перетворень зображена на рисунку 3.7.

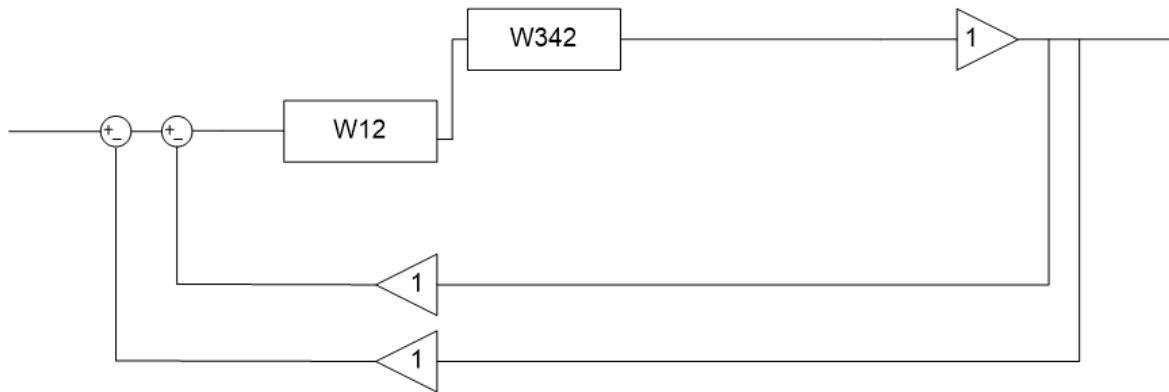


Рисунок 3.7 – Схема після проведених перетворень

Передатна функція W_{12342} має наступний вигляд:

$$W_{12342} = W_{12} * W_{342} * 1, \quad (3.5)$$

Після чого схема має вигляд, що зображений на рисунку 3.8.

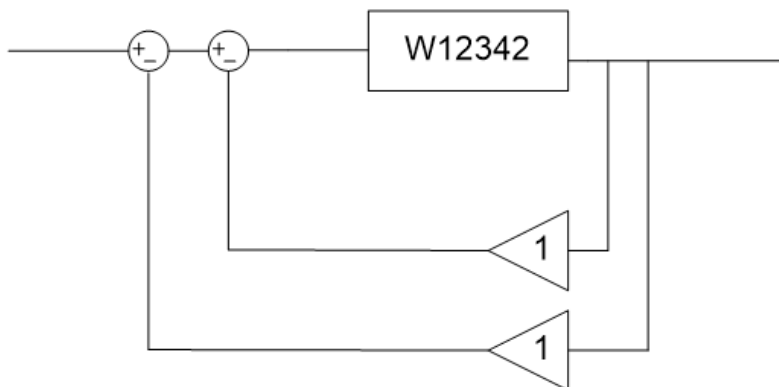


Рисунок 3.8 – Схема з передавальної функцією W_{12342}

Передатна функція зі зворотнім зв'язком у вигляді тензодатчика W_{12342}' має наступний вигляд:

$$W_{12342}' = \frac{W_{12342}}{1 + W_{12342}}, \quad (3.6)$$

Останнє перетворення за результатом отримане загальна передатна функція системи має наступний вигляд:

$$W_{\text{кінц}} = \frac{W_{12342'}}{1+W_{12342'}}, \quad (3.7)$$

Таким чином використовуючи ПЗ Matlab за допомогою наступних команд була порахована загальна передатна функція з використанням коефіцієнтів та визначені полюса та нулі командою `pole(wend)`, виконання команд зображено на рисунку 3.9.

```
>> W1=tf([1],[0.05 1]);
>> W2=tf([1.8],[0.02 1 1]);
>> W3=tf([1],[0.05 1]);
>> W4=tf([1],[0.2 1]);
>> W34 = series(W3,W4);
>> W342 = parallel(W34,W2);
>> W12 = feedback(W1,W2);
>> W12342=W12*W342*1;
>> W12342s=feedback(W12342,1);
>> Wend=feedback(W12342s,1);
>> pole(Wend)

ans =

-52.4887 + 0.0000i
-48.9792 + 0.0000i
-28.9644 + 0.0000i
-5.6742 +14.8024i
-5.6742 -14.8024i
-2.1986 + 0.0000i
-1.0208 + 0.0000i
```

Рисунок 3.9 – Знаходження загальної передавальної функції з коефіцієнтами та визначення полюсів та нулів

Таким чином загальна передатна функція має наступний вигляд:

$$W_{\text{кінц}} = \frac{0.00076s^4+0.067s^3+1.544s^2+4.25s+2.8}{2e^{-0.7}s^7+2.9e^{-0.5}s^6+0.00154s^5+0.03868s^4+0.5585s^3+5.255s^2+13.05s+8.4}, \quad (3.8)$$

В результаті використовуючи команду `rzmar(Wкінц)` було отримано графік, що зображений на рисунку 3.10.

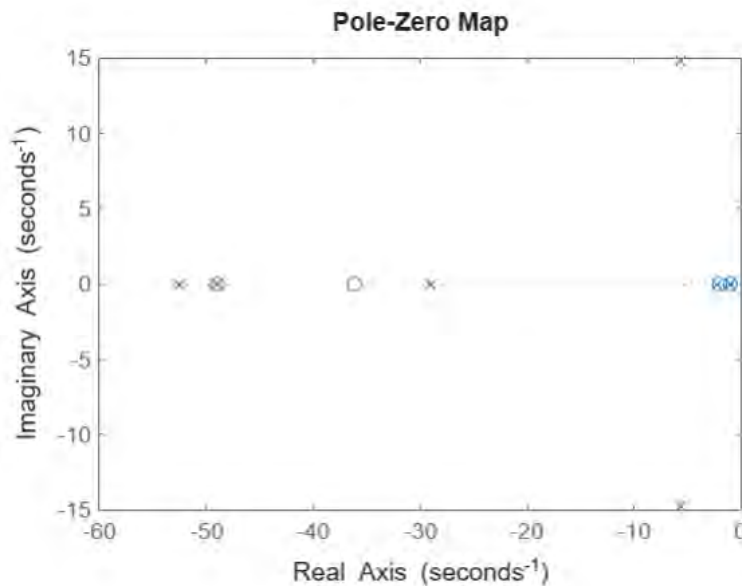


Рисунок 3.10 – Діаграма нулів та полюсів моделі керування

Згідно діаграми можливо зробити висновок, що система є стійкою.

Також використовуючи для системи пакет лінеаризації було отримано годограф Найквіста, що зображений на рисунку 3.11.

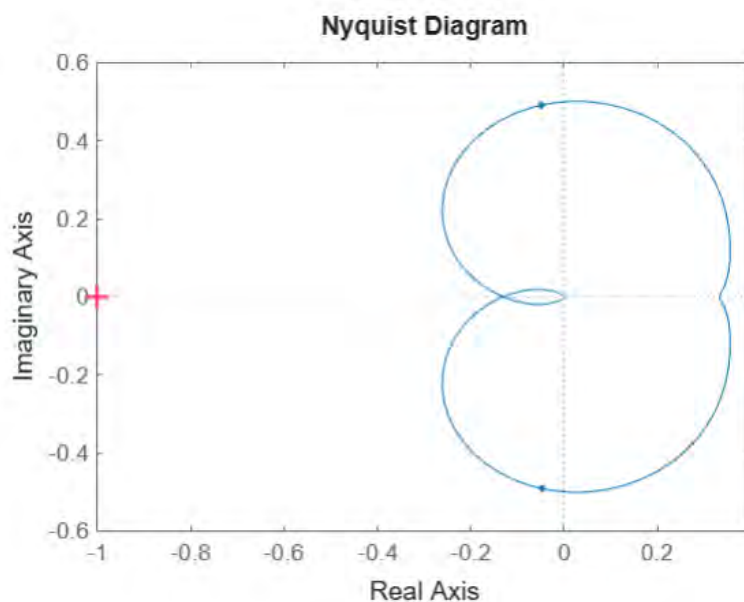


Рисунок 3.11 – Годограф Найквіста

Виходячи з отриманого годографа та критерія стійкості Найквіста можливо зробити висновок що система є стійкою.

Отримана перехідна характеристика системи зображена на рисунку 3.12.

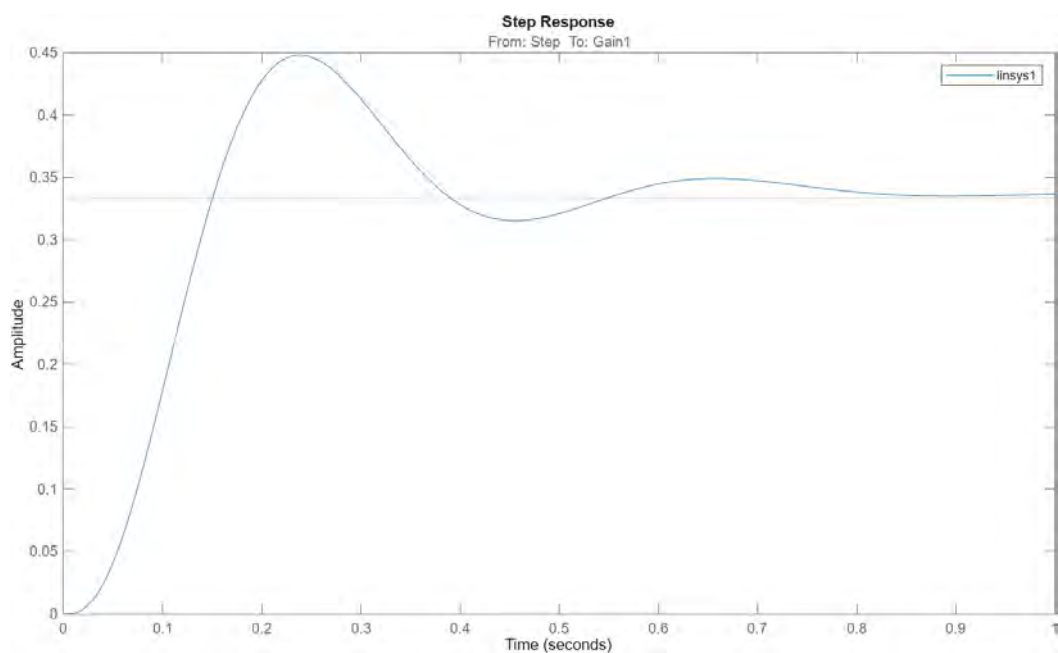


Рисунок 3.12 – Перехідна характеристика системи

Також було отримано частотні характеристики системи, що зображені на рисунку 3.13.

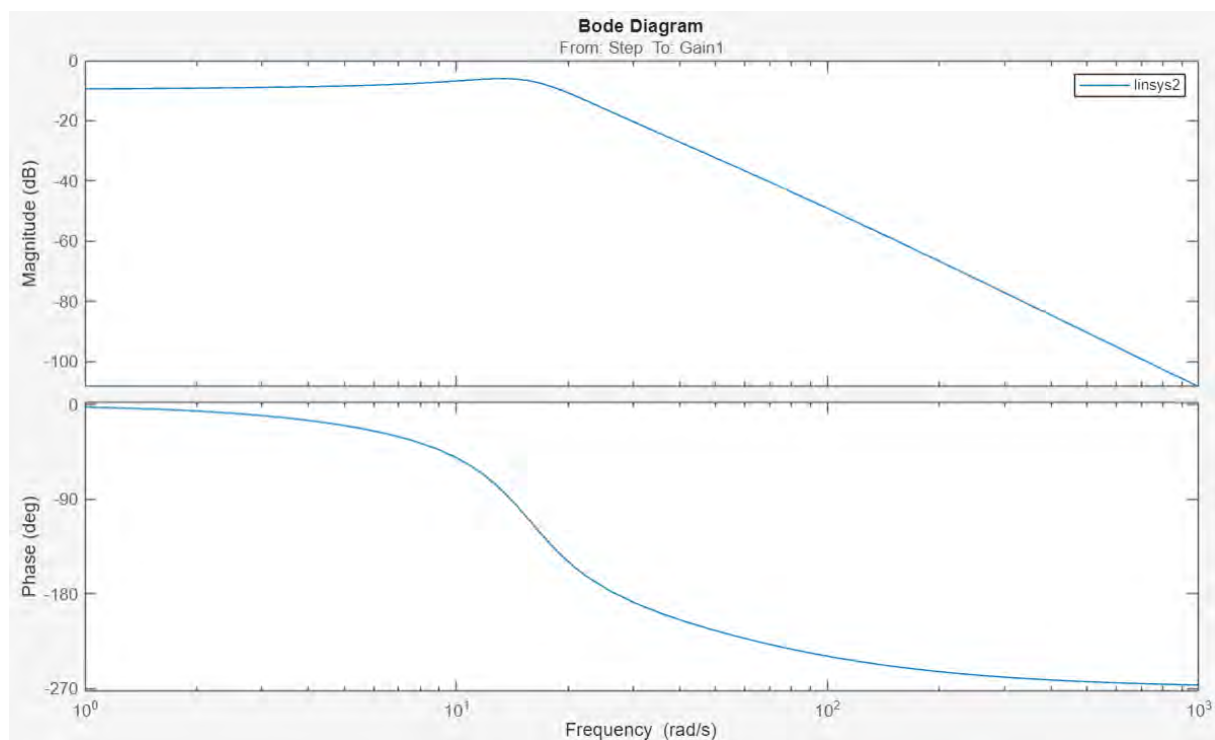


Рисунок 3.13 – Частотні характеристики системи

Імпульсна характеристика процесу зображена на рисунку 3.14.

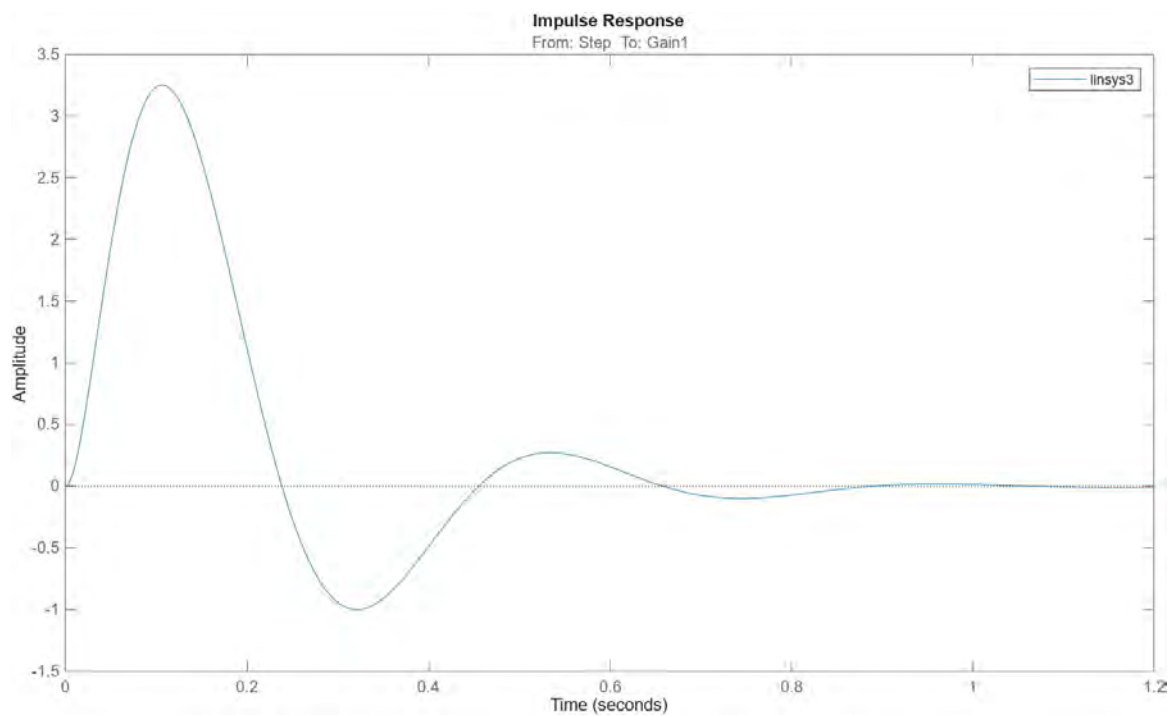


Рисунок 3.14 – Імпульсна характеристика системи

Також було отримано графік Ніколса, що зображений на рисунку 3.15.

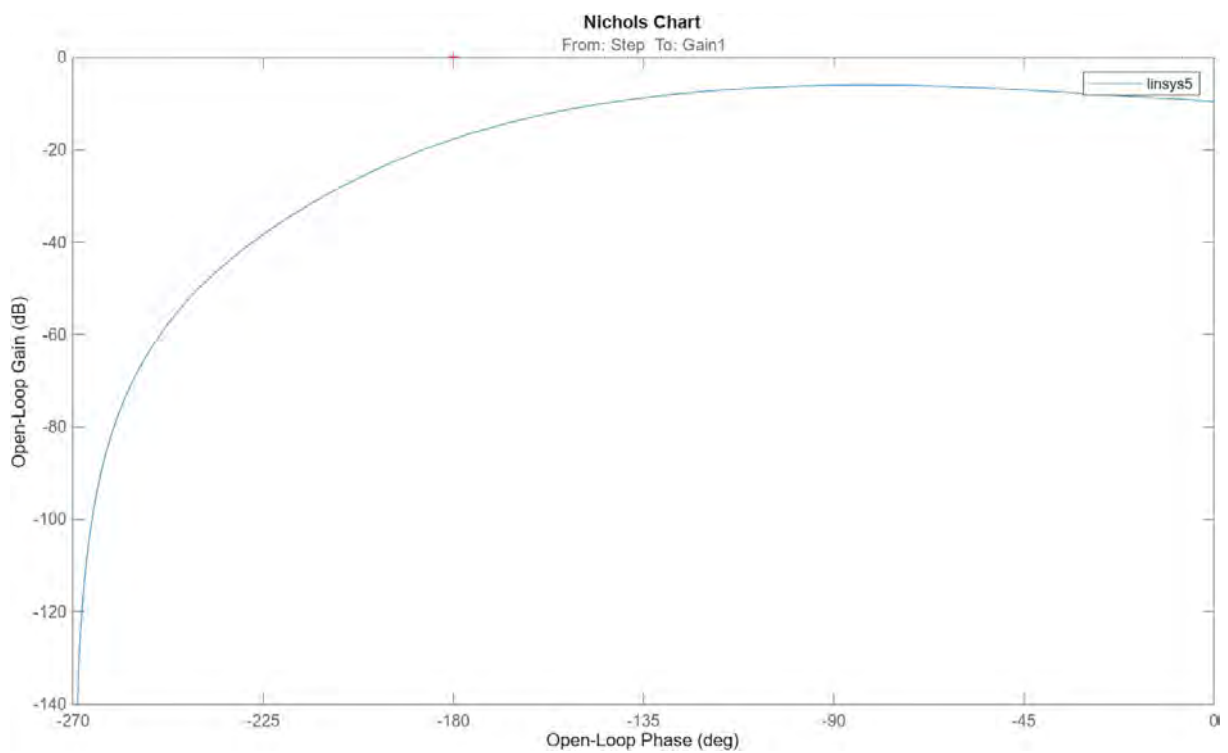


Рисунок 3.15 – Графік Ніколса

В результаті дослідження системи керування фотополімерним 3D-друком можливо зробити висновок, що з додаванням в систему керування зворотнього зв'язку у вигляді тензодатчика та термістора система є стійкою.

3.2 Математична модель автоматизованого керування процесом фотополімерного 3D-друку за силою відриву фотополімеру від плівки

Для управління процесом фотополімерного друку важливою задачею є контроль друку перших шарів. Початковий етап є самим важливим в процесі друку і основні види дефектів та браку виникають саме на цьому етапі. Одним з видів браку на перших шарах є відлипання моделі від платформи або частково, або повністю, що призводить до унеможливлення друку окремих деталей взагалі або частково з самого початку друку та до пошкодження плівки [90].

Для забезпечення контролю друку перших шарів необхідно визначити чи з'явилося зчеплення між експонованим фотополімером та платформою. Так як цей процес неможливо візуально оцінити, необхідно виконувати контроль через непрямі методи. Одним із таких методів може стати контроль навантаження ванни за допомогою тензодатчиків.

В конструкції принтера ванна зазвичай жорстко закріплена через те, що зчеплення, яке утворюється між плівкою, експонованим фотополімером та платформою настільки велике, що може підіймати ванну з фотополімером на значну висоту.

Таким чином можливо припустити, що вимірюючи силу з якою ванна, що підіймається буде давити на тензодатчик, який встановлений в місцях кріплення, можливо буде встановити наявність деталей на столі та визначити наявність дефектів, які полягають у різкому зменшенні сили відриву на окремих проміжках часу.

Таким чином можна контролювати також дефекти, що показані на рис. 3.16.

Деламінація шарів, деламінація між шарами та платформою, все це впливає на силу відриву експонованого фотополімера від плівки та може бути визначено за допомогою тензорезистивного датчика.



Рисунок 3.16 – Дефект деламінації моделі від платформи

Основними факторами від яких буде залежати сила відриву від плівки є:

- час експонування базових шарів, через те, що чим більший час, тим більша ступінь полімеризації фотополімера і відповідно більша сила з'єднання з платформою;
- площа горизонтального перерізу шару, яка зі збільшенням буде збільшувати силу навантаження при відриві фотополімера;
- температура фотополімеру, впливає на швидкість полімеризації, при збільшенні температури, полімеризація прискорюється, тим самим при тому ж часі експонування, ступінь полімеризації буде більша;
- кількість фотополімеру у ванній та вага ванни є протидіючою силою, яка зменшує силу навантаження на значення, яке складається з ваги фотополімера та ванни;
- товщина плівки, від товщини плівки залежить ступінь пружності плівки та її можливість розтягуватися на визначену відстань;
- швидкість відриву моделі від плівки впливає на силу відриву, так як при високій швидкості відриву модель починає відлипати від плівки не поступово а одночасно, що впливає на площу відриву та збільшує навантаження.

Контролюючи всі вищевказані фактори можливо спрогнозувати значення сили відриву моделі від плівки на базових шарах та на звичайних.

При утворенні дефектів, таких як відлипання моделей на перших шарах або розшарування моделі в процесі друку можливо відслідковувати всі процеси друку та їх зміни через зміну площі відриву моделі від плівки.

Для перевірки можливості такого контролю процесом фотополімерного друку розроблено ПЗ, яке виконує комп'ютерне моделювання процесу з урахуванням основних факторів. Ціллю такого моделювання є перевірка того, що сила відриву від плівки є значною і перевищує вагу фотополімера з ванною, що в результаті призводить до підйому самої ванни з платформою в процесі друку.

Для того щоб провести комп'ютерне моделювання, необхідно визначити основні змінні, що можуть впливати на кінцевий результат моделювання, тому необхідно побудувати математичну модель відриву фотополімера від плівки.

Визначення змінних залежить від того яким чином буде проводитися комп'ютерне моделювання.

В якості основи використовується закон адгезії в полімерній механіці.[104]
В математичному вигляді загальний закон адгезії має наступний вигляд:

$$F_a = W_a * A, \quad (3.9)$$

де F_a – сила адгезії, Н;

W_a – робота адгезії на одиницю площі, Дж/м²;

A – ефективна площа контакту, м².

Роботу адгезії можливо розрахувати через поверхневі енергії. Таким чином, формула роботи адгезії має наступний вигляд:

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}, \quad (3.10)$$

де γ_1 – поверхнева енергія фотополімера, Дж/м²;

γ_2 – поверхнева енергія плівки, Дж/м²;

γ_{12} – міжфазна енергія взаємодії, Дж/м².

Поверхнева енергія фотополімеру є сталою величиною і має значення 50 МН/м, поверхнева енергія фторопластової плівки є табличним значенням і становить 20 МН/м.[105]

Міжфазна енергія взаємодії визначає силу взаємодії між фотополімером та плівкою.[106]

Для її розрахунку використовується метод вимірювання контактного кута. Він використовує вимірювання контактний кут каплі рідини на поверхні плівки з використанням поверхневих енергій. [107] Формула розрахунку міжфазної енергії з використанням рівняння Юнга-Лапласа:

$$\gamma_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - 2 * \sqrt{\gamma_1 * \gamma_2} * \cos(\theta), \quad (3.11)$$

де θ – контактний кут для FEP плівки, рад.

Контактний кут для FEP плівки є табличним значенням та має кут 110° або 1.919 рад.[108]

Таким чином виконуючи розрахунок отримуємо значення міжфазної енергії $\gamma_{12} = 35$ МН/м. Тоді підставляючи значення для розрахунку роботи відриву отримуємо значення роботи відриву $W_a = 35$ МН/м

Закон адгезії з врахуванням механічних властивостей має наступний вигляд:

$$F_a = k * A * W_a * (1 + \frac{E}{\vartheta}), \quad (3.12)$$

де k – коефіцієнт адгезії;

E – модуль пружності, МПа;

ϑ – швидкість відлипання, мм/хв.

Коефіцієнт адгезії, враховує хімічну та фізичну сумісність матеріалів – фотополімеру та фторопластової плівки, залежить від хімічного складу фотополімера.[109]

Швидкість відриву, параметр, що є технологічним фактором і задається в слайсері при підготовці моделі.

Таким чином, формула для розрахунку сили відриву з врахуванням додаткових факторів має наступний вигляд:

$$F_a(t) = \int_{A(t)} W_a * (1 + \alpha(t, \vartheta)) dA, \quad (3.13)$$

де $F_a(t)$ – сила відриву в момент часу, Н;

$A(t)$ – поточна площа контакту, м²;

$\alpha(t, \vartheta)$ – коефіцієнт, що залежить від температури t та швидкості відлипання ϑ ;

dA – елемент площини контакту.

Площа контакту відриву можливо визначити наступною формулою:

$$A(t) = A_0 - \vartheta * t * \omega, \quad (3.14)$$

де A_0 – початкова площа контакту, мм²;

ϑ – швидкість переміщення платформи, мм/хв;

ω – ширина зони відриву, мм.

Коефіцієнт що залежить від температури T та швидкості відлипання ϑ розраховується наступною формулою:

$$\alpha(t, \vartheta) = k * \frac{E}{\vartheta}, \quad (3.15)$$

де k – емпіричний коефіцієнт;

E – модуль пружності фотополімера;

v – швидкість відриву, мм/хв.

Для аналізу деформації плівки під час відриву експонованого фотополімеру можливо застосувати закон Гука, через те, що при відриву експонованого фотополімеру фторопластова плівка зазнає пружного розтягування та вигину під дією відривної сили.[110] Таким чином формула закону Гука для деформації плівки з врахуванням температурного впливу має наступний вигляд:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \Delta T, \quad (3.16)$$

де ε – відносна деформація фторопластової плівки (безрозмірна);

σ – механічна напруга, що виникає при відриві, Па;

E – модуль Юнга фторопластової плівки, Па;

α – коефіцієнт термічного розширення фторопласту, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

ΔT – зміна температури під час процесу, $^{\circ}\text{C}$;

Механічна напруга, що виникає при відриві з урахуванням сили відриву визначається наступною формулою:

$$\sigma = \frac{F_{\text{відриву}}}{A}, \quad (3.17)$$

де $F_{\text{відриву}}$ – сила відриву, Н;

A – площа контакту фотополімеру та плівки, м^2 .

З урахуванням сили відриву та температурного впливу, загальна формула деформації набуде наступного вигляду:

$$\sigma = \frac{F_{\text{відриву}}}{A} + \alpha \Delta T, \quad (3.18)$$

Модуль Юнга має сталу величину. Для фторопластової плівки модуль Юнга становить 0.5 – 0.7 ГПа.[111]

3.3 Імітаційне дослідження математичної моделі керування технологічним процесом фотополімерного друку за силою відриву фотополімеру від плівки

Використовуючи вищевказані формули розроблено ПЗ на мові програмування Python для моделювання процесу друку, в результаті якого стане можливим перевірити емпіричні спостереження щодо збільшення сили навантаження при відриві експонованого фотополімера.

Основними вхідними параметрами за якими здійснюється розрахунок є:

- площа контакту, мм^2 ;
- швидкість відриву, мм/хв ;
- робота адгезії, Н/мм .
- температура, $^{\circ}\text{C}$;
- модуль пружності, Па ;
- коефіцієнт адгезії;
- ширина зони відриву, мм ;
- час експонування, с ;
- товщина плівки, мм ;
- ширина то довжина плівки, мм ;
- робота відриву, $\text{Н}\cdot\text{м}$.

Всі вхідні параметри були отримані в результаті розрахунку по вищевказаним формулам та виходячи з властивостей фотополімера та фторопластової плівки. Код програмного засобу для моделювання має наступний вигляд:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# вхідні параметрів
A0 = area = 35 # Initial contact area in  $\text{мм}^2$ 
v = detachment_speed = 50 # Detachment speed in  $\text{мм/мин}$ 
W_a = 0.3 # Work of adhesion in  $\text{J/мм}^2$ 
T = temperature = 45 # Temperature in Celsius
E = elasticity_modulus = 480 # Modulus of elasticity in  $\text{Па}$ 
k = adhesion_coefficient = 0.00001 # coefficient
w = 10 # Width of the detachment zone in  $\text{мм}$ 
```

```

exposure_time = 2 # секунд
film_thickness = 0.1 # mm
film_width = 80 # mm
film_length = 160 # mm
t_max = A0 / (v * w)
dt = 0.01
work_of_separation = 0.03
time = np.arange(0, t_max, dt)
areas = []
forces = []
for t in time:
    A_t = max(A0 - v * t * w, 0)
    alpha = k * E / v
    F_a = W_a * (1 + alpha) * A_t
    areas.append(A_t)
    forces.append(F_a)
areas = np.array(areas)
forces = np.array(forces)
plt.figure(figsize=(12, 6))
# Plot detachment force vs. time
plt.subplot(1, 2, 1)
plt.plot(time, forces, label='Сила відриву', color='blue')
plt.xlabel('Час (min)')
plt.ylabel('Сила (N)')
plt.title('Сила відриву vs. Час')
plt.grid(True)
plt.legend()
# Plot contact area vs. time
plt.subplot(1, 2, 2)
plt.plot(time, areas, label='Площа контакту', color='green')
plt.xlabel('Час (min)')
plt.ylabel('Площа контакту (mm^2)')
plt.title('Площа контакту vs. Час')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()

def detachment_force(area, temperature, exposure_time, film_thickness,
film_width, film_length, detachment_speed):

    # Розрахунок сили відриву з використанням закону адгезії, роботи відриву і
закону Гука
    adhesion_force = adhesion_coefficient * area * W_a * (1 + (E/v))
    separation_work_force = work_of_separation * area / film_thickness
    elastic_force = 0.9375
    total_force = adhesion_force + separation_work_force + elastic_force
    return total_force

def simulate_detachment(area, temperature, exposure_time, film_thickness,
film_width, film_length, detachment_speed):

```

```

time_steps = np.linspace(0, 4, 100)
force_over_time = []

for t in time_steps:
    force = detachment_force(area, temperature, exposure_time,
film_thickness, film_width, film_length, detachment_speed)
    force_over_time.append(force * np.sin(np.pi * t / max(time_steps))) #
Динамічна зміна сили

return time_steps, force_over_time

def plot_results(time_steps, force_over_time):
    plt.figure(figsize=(8, 6))
    plt.plot(time_steps, force_over_time, label='Сила відриву (N)',
color='blue')
    plt.xlabel('Час (с)')
    plt.ylabel('Сила (N)')
    plt.title('Сила відриву фотополімера з часом')
    plt.legend()
    plt.grid()
    plt.show()

time_steps, force_over_time = simulate_detachment(area, temperature,
exposure_time, film_thickness, film_width, film_length, detachment_speed)
plot_results(time_steps, force_over_time)

```

В результаті виконання програми отримано графік, який показує процес відриву експонованого фотополімера у часі, даний графік зображений на рис. 3.17.

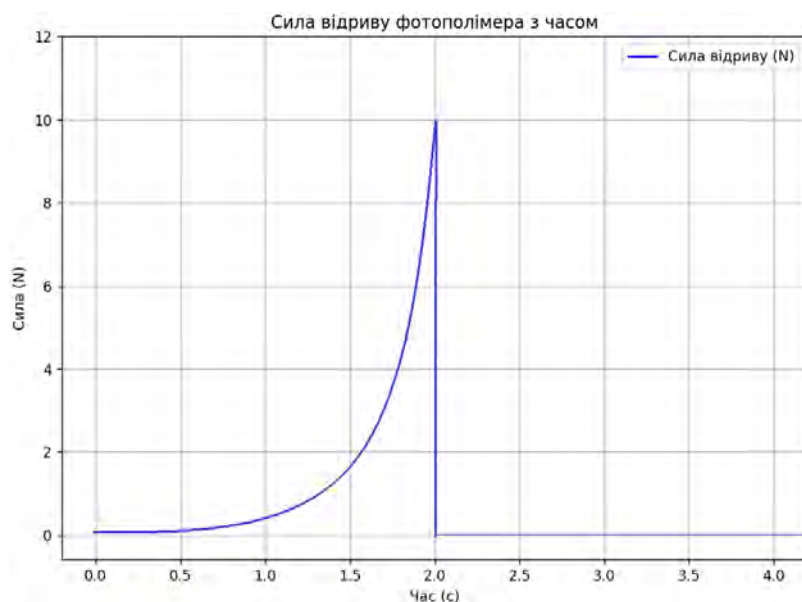


Рисунок 3.17 – Графік відриву фотополімера від плівки

Графіки, що показують процес відриву у часі, в залежності від площі відриву та сили відриву, зображені на рисунку 3.18.

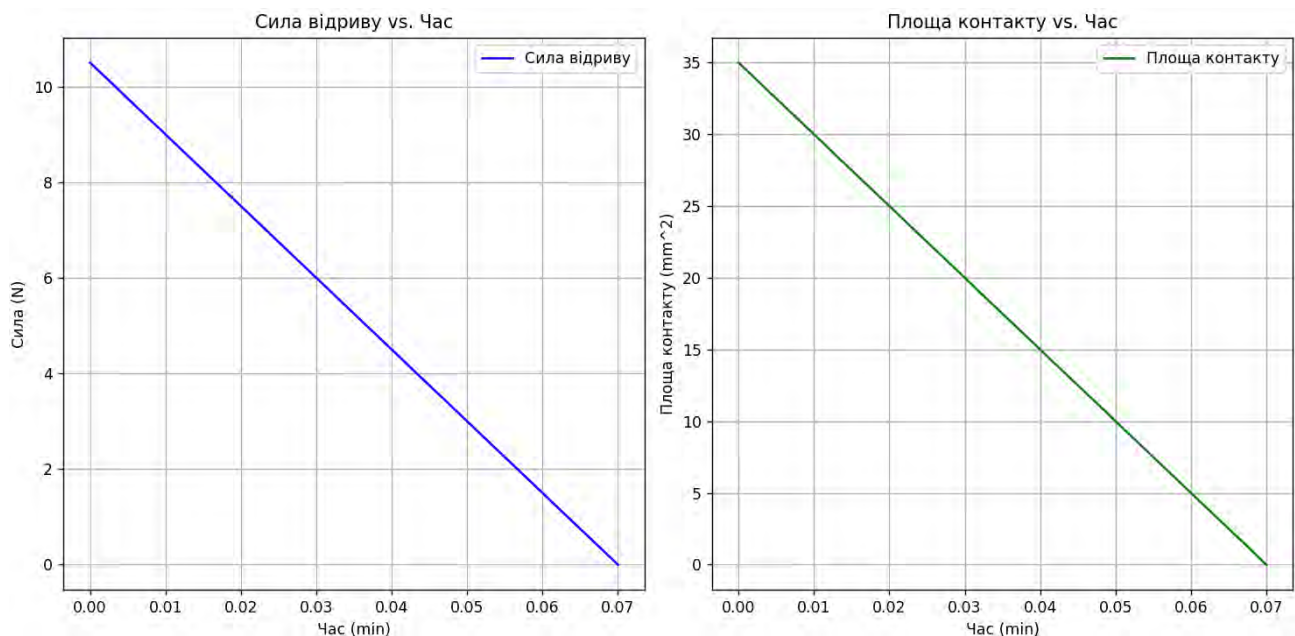


Рисунок 3.18 – Графіки сили відриву та площі контакту у часі

Таким чином в результаті розрахунків та аналізу графіків, отриманих в результаті роботи розробленого ПЗ можливо зробити висновок, що сили відриву експонованого фотополімеру достатньо для підняття незакріпленої ванни під час відриву моделі.

Для підтвердження результатів роботи програми процес відриву було також змодельоване у ПЗ MatLab Simulink з додатковим впливом температури на процес полімеризації.

3.4 Моделювання автоматизованої системи керування процесом фотополімерного 3D-друку

Технологічний процес фотополімерного 3D-друку можливо умовно розділити на три окремі складові елементи:

- формування шару;
- відрив моделі від дна ванни;

– переміщення на висоту наступного шару;

Таким чином, використовуючи загальну систему керування процесом фотополімерного друку можливо побудувати систему керування кожного з трьох основних елементів технологічного процесу.

Першим елементом технологічного процесу фотополімерного 3D-друку є модель відриву експанованого фотополімера від плівки.

Для реалізації моделі відриву експанованого фотополімера від фторопластової плівки в програмному середовищі MatLab Simulink [87], необхідно розглянути складові, що використовуються у моделі та впливають на силу відриву.

В цілому таку модель можливо розкласти на дві складові або блоки:

– блок механічних параметрів. Всі фізичні величини за значенням яких можливо описати адгезію полімеризованих шарів моделі до дна фотополімерної ванни;

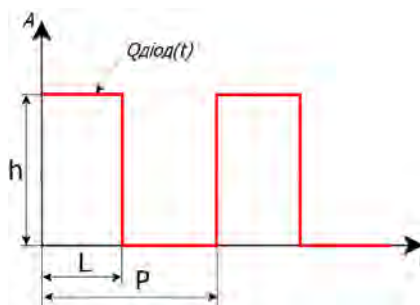
– блок температурних параметрів. До цього блоку входять всі теплові потоки, які впливають на ступінь полімеризації фотополімерної смоли, тим самим впливаючи на адгезію шарів моделі до плівки та зміну розмірів надрукованих моделей. Температура фотополімерної смоли може суттєво впливати на відхилення геометричних розмірів моделі та появу поверхневих дефектів, через прискорення процесу полімеризації.

Першим етапом для моделювання впливу теплових процесів у фотополімерній смоли та вирішення проблеми перегріву фотополімеру під час експонування шарів моделі, необхідно визначити об'єкт керування (елемент системи який безпосередньо більше всіх впливає на нагрівання фотополімерної смоли) та розробити керуючий сигнал (вплив на об'єкт керування, за допомогою якого, можливо керувати параметрами нагріву).

Відштовхуючись від технології фотополімерного 3D-друку, основним джерелом енергії для полімеризації смоли є УФ випромінювання, яке надходить від світлодіодної матриці, яка керується за допомоги контролера. УФ випромінювання зі світлодіодної матриці не тільки полімеризує фотополімер а і

здійснює його нагрів, тому саме цей елемент конструкції LCD 3D-принтера вважається об'єктом керування.

УФ-матриця складається з діодів, які працюють в ультрафіолетовому діапазоні випромінювання (395 Нм – 405 Нм). Діодна матриця вмикається лише при експонуванні шару, під час інших технологічних процесів, таких як процес перемішування і процес відриву експонованого фотополімеру від плівки матриця знаходиться у вимкненому стані. Тобто є час коли матриця випромінює УФ, цей час відповідає технологічному параметру часу експонування та час для охолодження фотополімерної смоли (час операцій відриву та перемішування). При увімкненій матриці утворюється тепловий потік $Q_{\text{діод}}(t)$, який можливо описати, як керуючий сигнал імпульсного виду, цей сигнал у вигляді графіку зображений на рисунку 3.19.



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

Рисунок 3.19 – Принцип роботи керуючого сигналу

Математично описати тепловий потік матриці $Q_{\text{діод}}(t)$ можливо за допомогою наступного виразу:

$$Q_{\text{діод}}(t) = q_{\text{випром}} \cdot S_{\text{лінза}} \cdot SGF \quad (3.19)$$

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

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

SGF – коефіцієнт підсилення.

Вищевказаний вираз можливо використовувати лише для системи експонування ParaLED, яка в своєму складі містить лінзу Фрінеля, яка вирівнює потік випромінювання.

Інтенсивність випромінювання діода $q_{\text{випром}}$ можливо визначити за формулою (3.20):

$$q_{\text{випром}} = \tau(E_{\text{пр}} + E_{\text{роз}})SGF \quad (3.20)$$

де τ – коефіцієнт передачі енергії;

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

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

Таким чином, виконуючи керування діодною матрицею можливо контролювати температуру фотополімерної смоли.

Збуджуючим впливом в системі керування, який впливає на відхилення об'єкту керування, в якості якого виступає задана температура фотополімеру є температура навколишнього середовища $Q_{\text{зовн.}}$, тобто температуру в корпусі принтера. Коливання температури в корпусі через виділення тепла з електронних компонентів та низьке відведення тепла за допомоги вентиляторів може прискорити нагрівання або охолодження фотополімерної смоли у ванній. Таким чином модель керування процесом нагріву фотополімерної смоли зображено на рисунку 3.20.

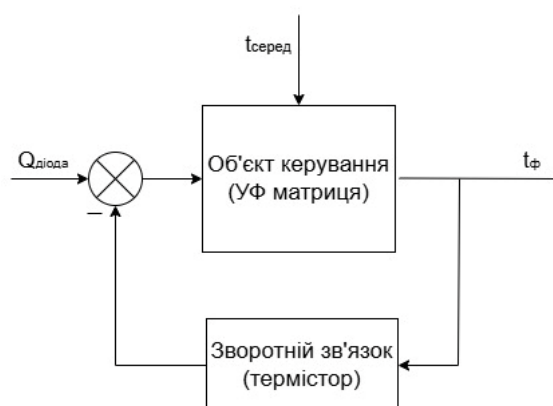


Рисунок 3.20 – Загальна схема керування нагрівом фотополімерної смоли

Для контролю температури фотополімера необхідно встановити зворотній зв'язок між вихідною температурою та керуючим сигналом УФ матриці. Для регулювання сигналів імпульсів УФ-матриці використовується PID-регулювання.

Схему контролю температури моделі у ПЗ MatLab Simulink зображений на рисунку 3.21.

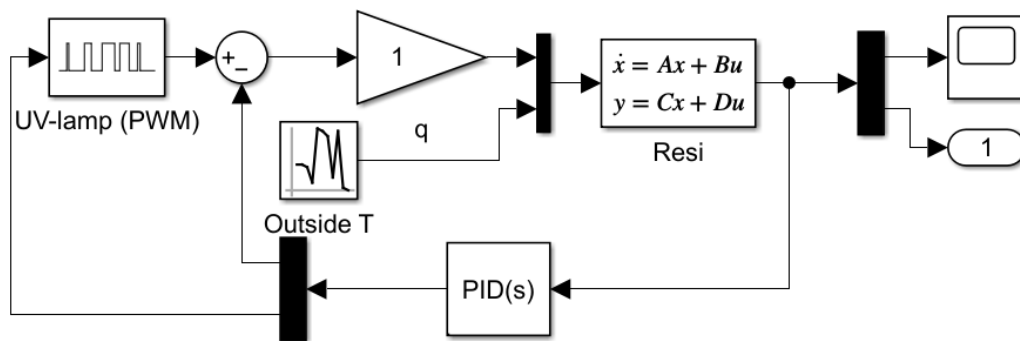


Рисунок 3.21 –Схеми контролю температури в програмному середовищі MatLab Simulink

В результаті дослідження було отримано графік перехідної функції, що зображений на рисунку 3.22.

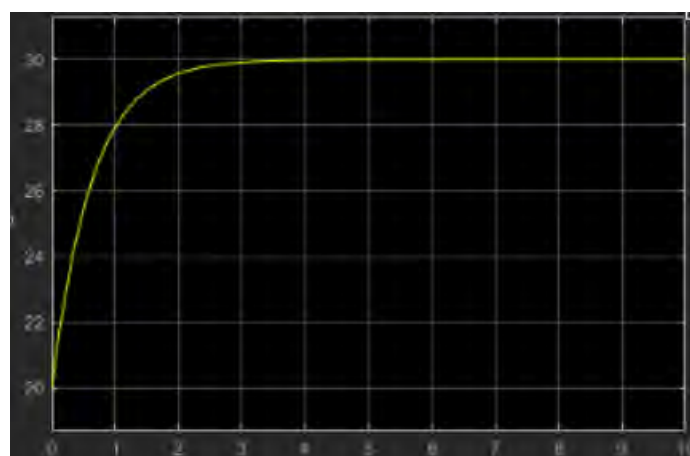


Рисунок 3.22 – Графік перехідної функції для процесу нагріву

Для дослідження сили відриву побудовано схему у ПЗ MatLab Simulink, яка зображена на рисунку 3.23.

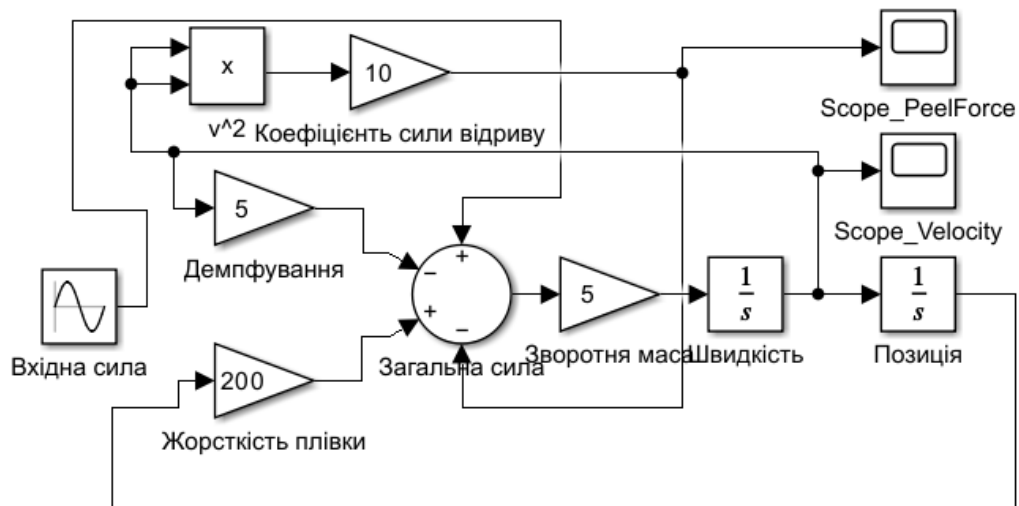


Рисунок 3.23 – Блок схеми контролю відрива моделі від плівки дна ванни в програмному середовищі MatLab Simulink

В результаті моделювання було отримано графік зміни сили відриву, що зображений на рисунку 3.24.

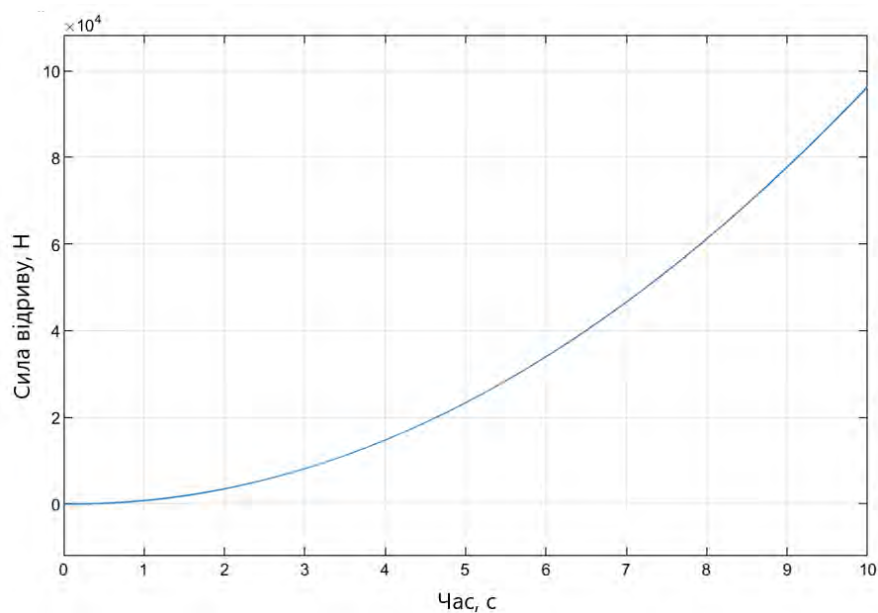


Рисунок 3.24 – Графік зміни сили відриву в часі

Також було отримано графік швидкості переміщення платформи, який зображений на рисунку 3.25.

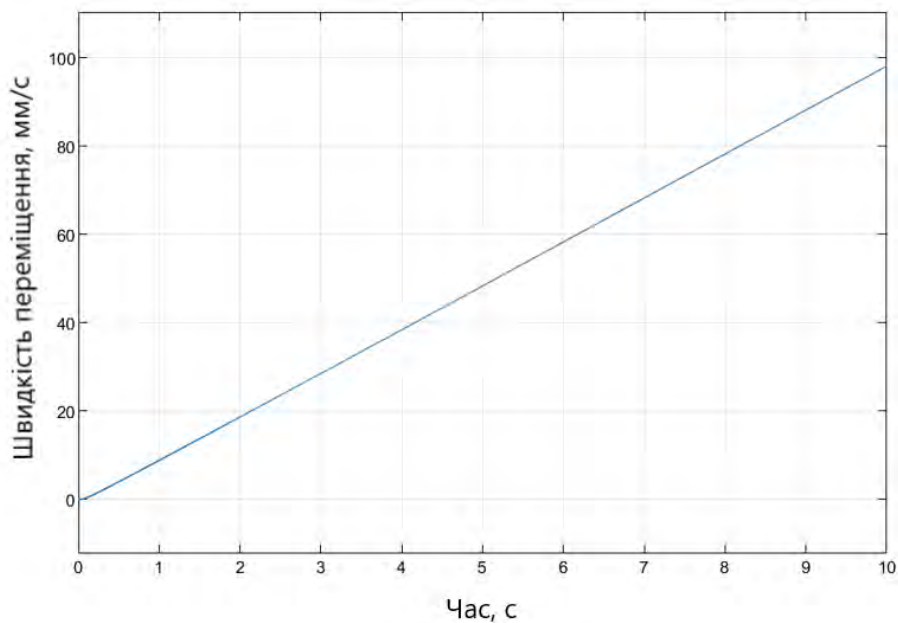


Рисунок 3.25 – Графік швидкості переміщення платформи в часі

Можливо зробити висновок, що при збільшенні швидкості, сила відриву має експоненційне зростання.

Наступною складовою технологічного процесу фотополімерного друку є формування шару. Процес формування шару як було зазначено раніше, складається з двох елементів, екрану(маски) та світлодіодної УФ матриці.

На відхилення розмірів в процесі експонування найбільше впливає два технологічних параметра, першим з яких є час експонування шару, іншим є інтенсивність випромінювання.

Таким чином можливо побудувати модель керування процесом експонування шару з використанням інтенсивності в якості параметра керування.

Для моделювання процесу експонування шару була побудована схема керування відхиленням розмірів шару за допомоги інтенсивності випромінювання у ПЗ MatLab Simulink, ця схема зображена на рисунку 3.26. В якості вхідної величини використовується мінімальні відхилення розмірів, яких необхідно досягти в процесі регулювання.

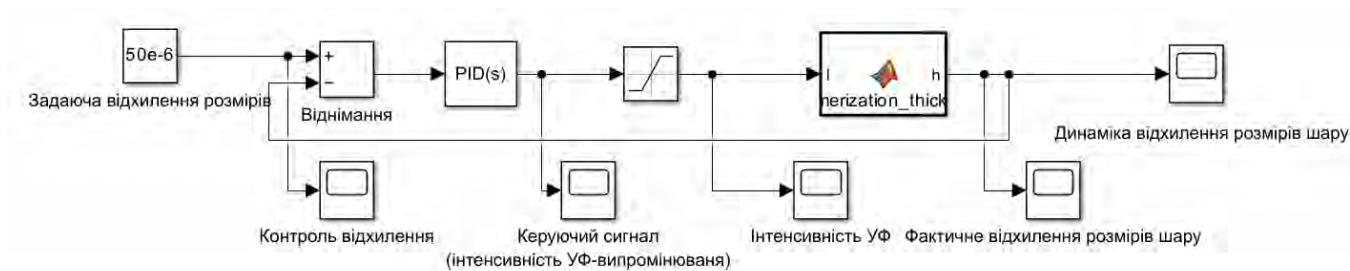


Рисунок 3.26 – Схема керування відхиленням розмірів шару за допомоги інтенсивності випромінювання

Визначення відхилення відбувається за допомоги енергії експозиції, тобто кількості енергії, що попадає на загальну площу шару і тим самим полімеризує фотополімер.

Енергію експозиції E можливо записати наступним виразом:

$$E = I * t_{\text{експ}}, \quad (3.21)$$

де I – інтенсивність випромінювання, Вт/м²;

$t_{\text{експ}}$ – час експонування шару, с.

Задаючи відхилення розмірів у схемі Simulink можливо виконати контроль інтенсивності УФ випромінювання за допомоги PID регулятора для збереження розмірів моделі що друкується.

Для моделювання було взято відхилення розмірів у 50 мкм.

Контроль інтенсивності світлодіодної матриці виконується за допомоги ШІМ контролера, що знаходиться на платі керування.

Графік керуючого сигналу після PID регулятора зображений на рисунку 3.27.

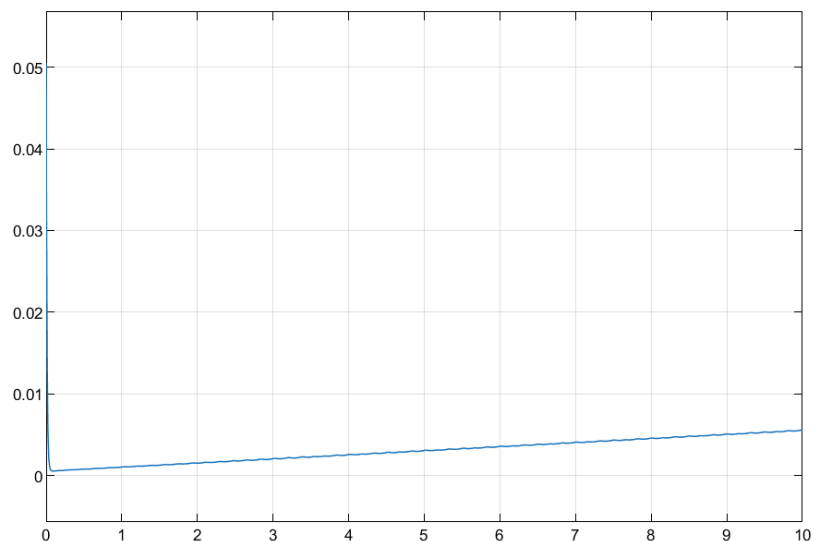


Рисунок 3.27 – Графік керуючого сигналу для регулювання інтенсивності випромінювання світлодіодної матриці

Досягається відсутність відхилення у фактичних розмірах надрукованої моделі за допомогою зміни інтенсивності випромінювання світлодіодної матриці. Графік відхилення зображений на рисунку 3.28.

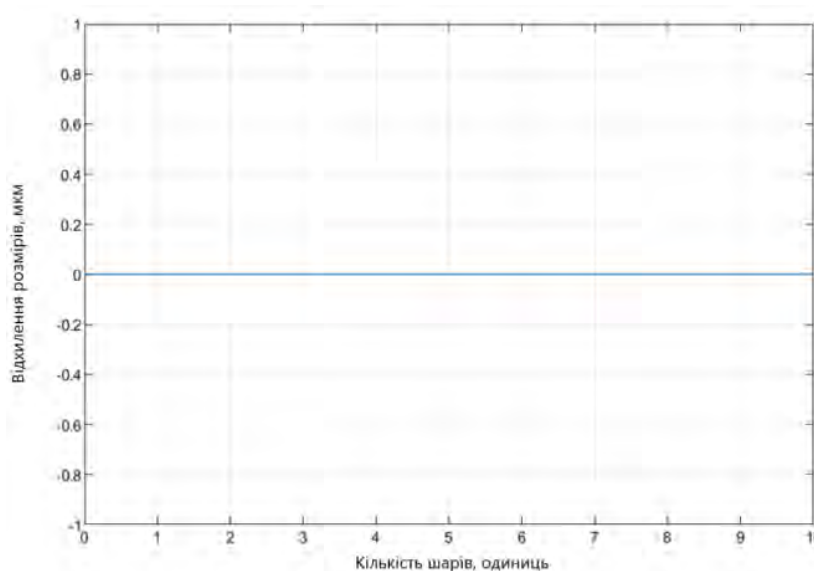


Рисунок 3.28 – Графік відхилення розмірів з використанням ПД регулятора

Наступною частиною є переміщення на висоту наступного шару, основними виконавчими елементами функціональної підсистеми є кроковий двигун, драйвер та кінцевий вимикач.

Можливо зробити модель керування використовуючи ПІД регулятори для досягнення бажаної точності переміщення.

Для моделювання системи переміщення у MatLab Simulink була створена схема, яка зображена на рисунку 3.29.

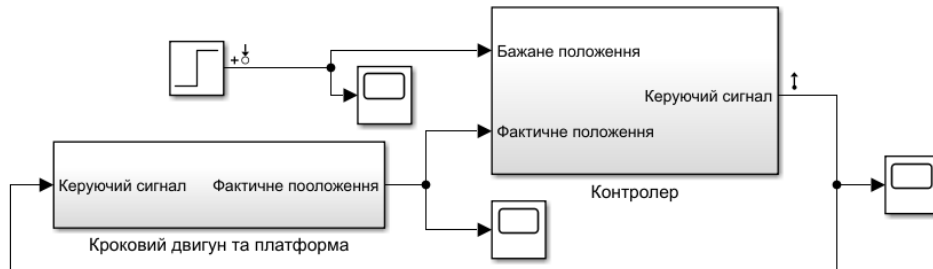


Рисунок 3.29 – Схема керування системою переміщення фотополімерним 3D- принтером

Схема складається з команди переміщення на визначене положення у вигляді блока Step та двох великих блоків, контролера та крокового двигуна, який здійснює переміщення платформи.

Блок крокового двигуна зображений на рисунку 3.30.

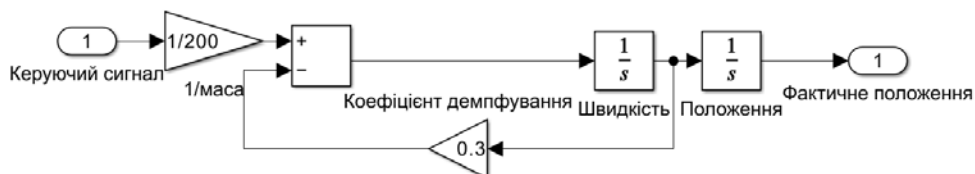


Рисунок 3.30 – Схема крокового двигуна

Блок контролера зображений на рисунку 3.31.

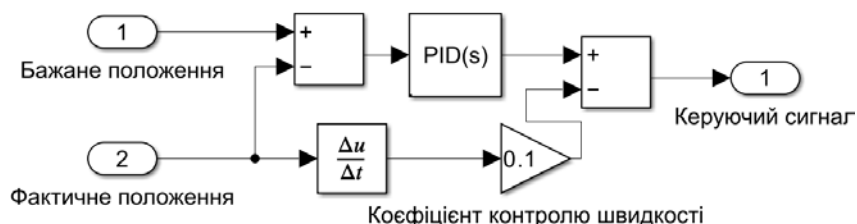


Рисунок 3.31 – Блок контролера

В результаті моделювання можливо отримати графік вхідного сигналу, який представляє собою цифрове відображення бажаного положення платформи. Задаючий сигнал отримується від G-code файлу у вигляді команди переміщення G1 Z. Графік вхідного сигналу зображений на рисунку 3.32.

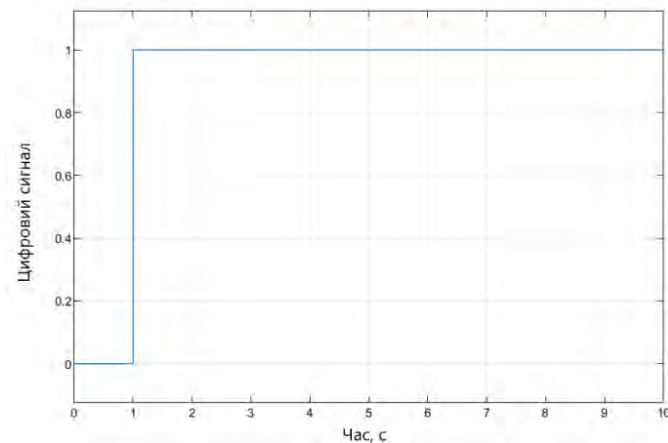


Рисунок 3.32 – Графік вхідного сигналу, що представляє собою бажане положення платформи

На основі бажаного положення контролер, використовуючи алгоритм ПД регулювання формує та видає на вхід блоку крокового двигуна та платформи керуючий сигнал, що і здійснює фактичне переміщення.

Вихідний сигнал з контролера зображений на рисунку 3.33.

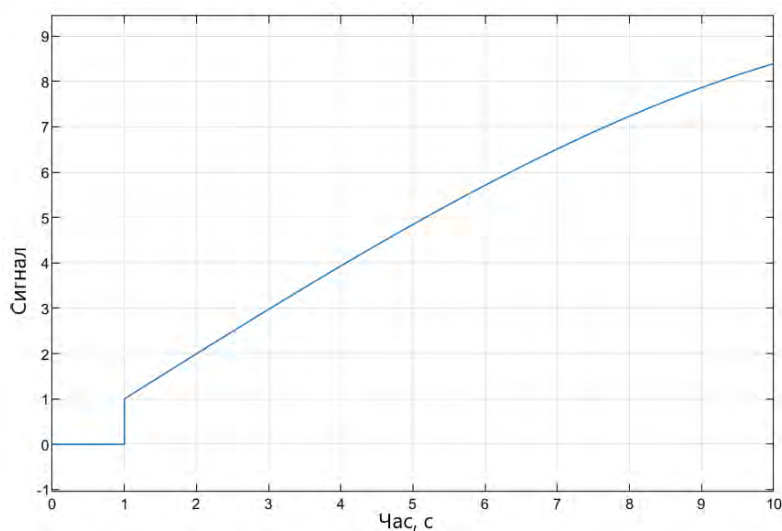


Рисунок 3.33 – Сигнал, що подається на блок крокового двигуна

На виході з блоку крокового двигуна є сигнал фактичного положення, яке змінюється у часі.

Графік зміни фактичного положення зображений на рисунку 3.34.

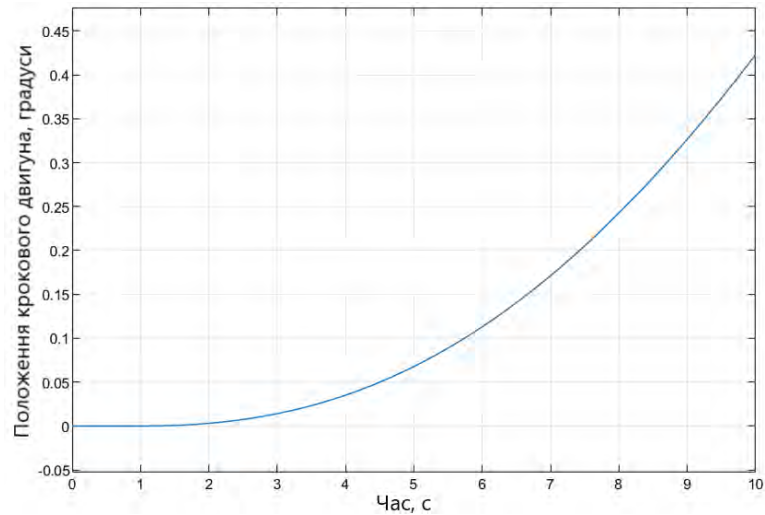


Рисунок 3.34 – Фактична зміна положення валу крокового двигуна

В залежності від зміни коефіцієнтів ПД регулятора вихідні сигнали з плати керування при значеннях ПД $P1.2$, $I0.1$, $D0$, зображені на рисунку 3.35.

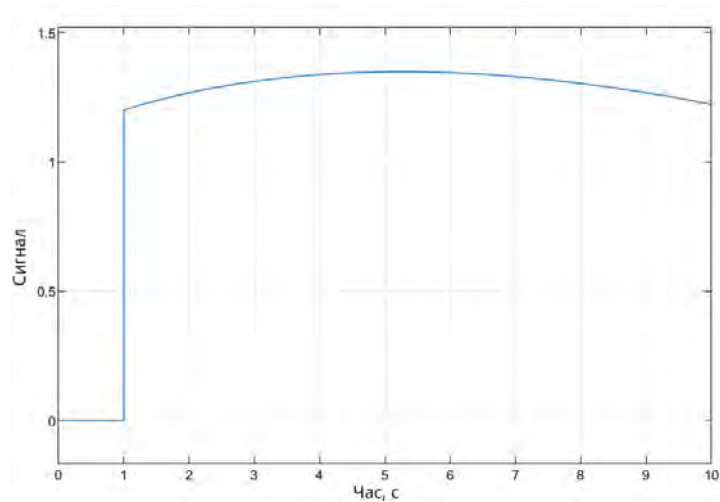


Рисунок 3.35 – Графік вихідного сигналу з контролера

Також змінюється і графік фактичного положення, що зображений на рисунку 3.36.

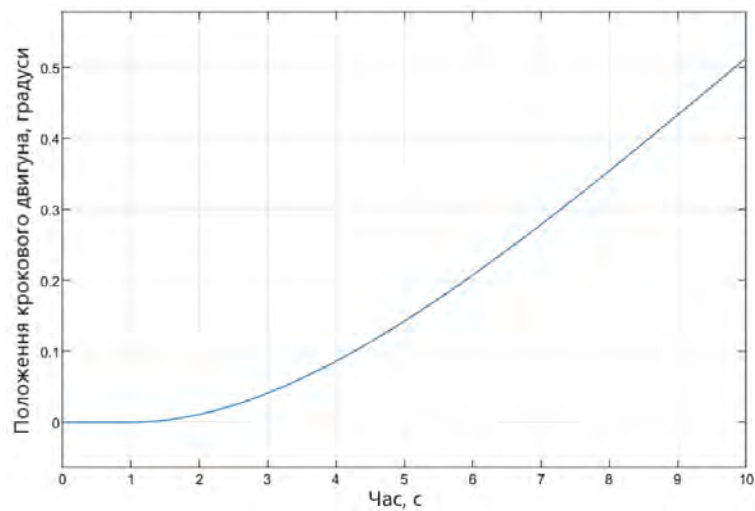


Рисунок 3.36 – Графік фактичного положення

Також було проаналізовано схему з використанням Model Linearization та отримані графіки перехідної характеристики системи, частотні характеристики, годограф Найквіста, діаграма нулів та полюсів.

Графік перехідної характеристики зображений на рисунку 3.37.

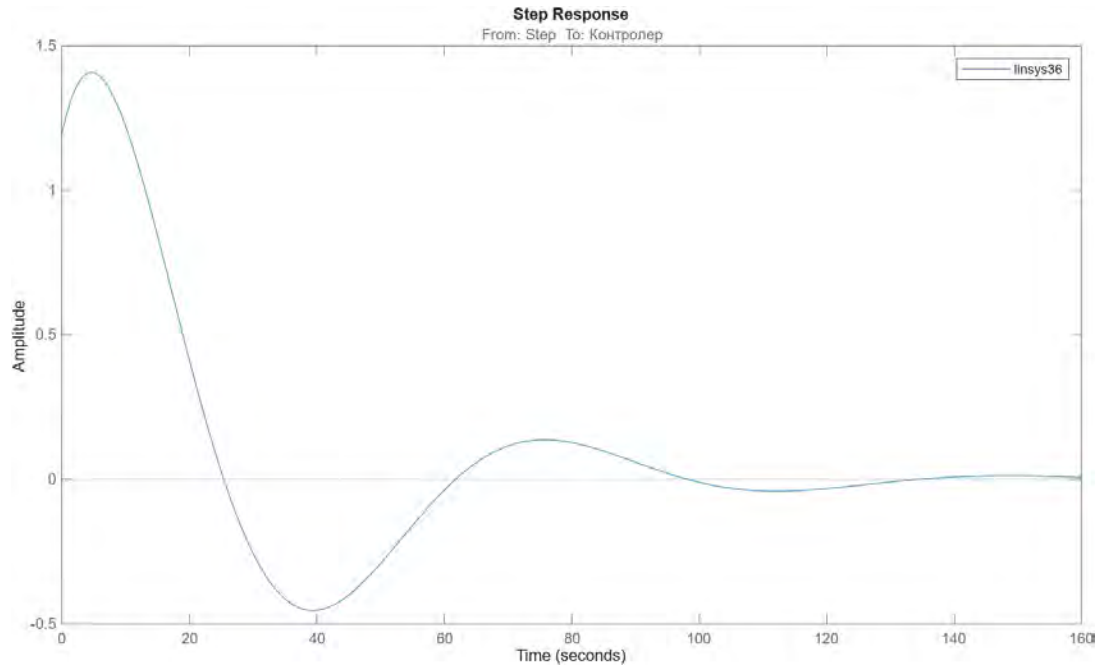


Рисунок 3.37 – Перехідна характеристика системи

Частотні характеристики системи зображені на рисунку 3.38.

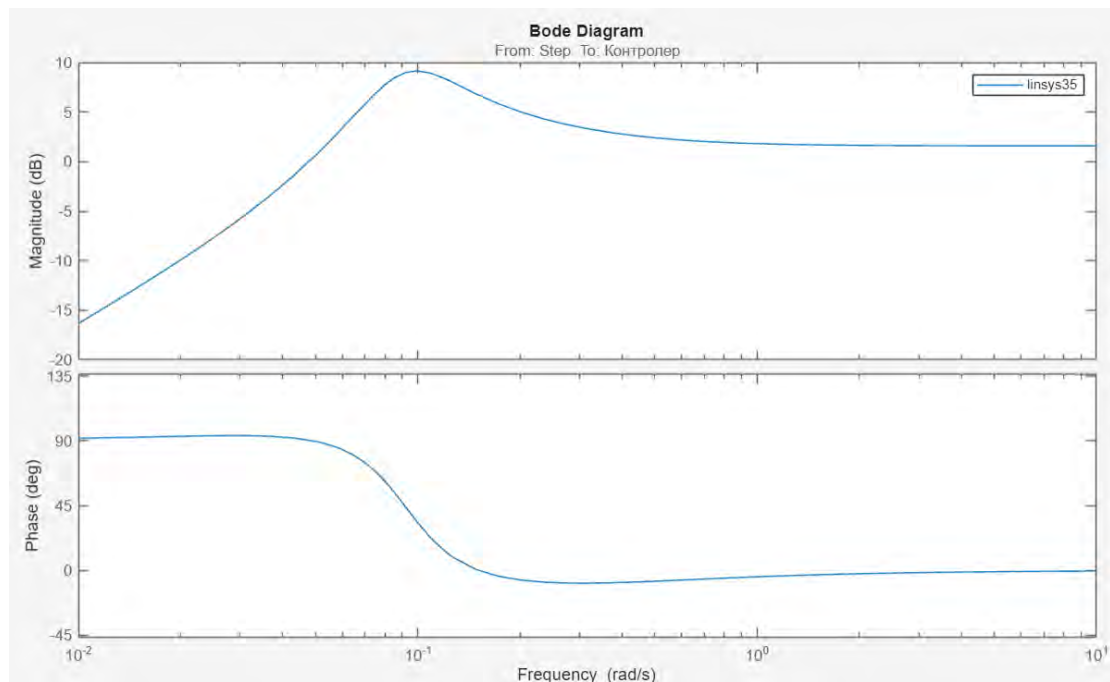


Рисунок 3.38 – Частотні характеристики системи керування

Годограф Найквіста зображений на рисунку 3.39.

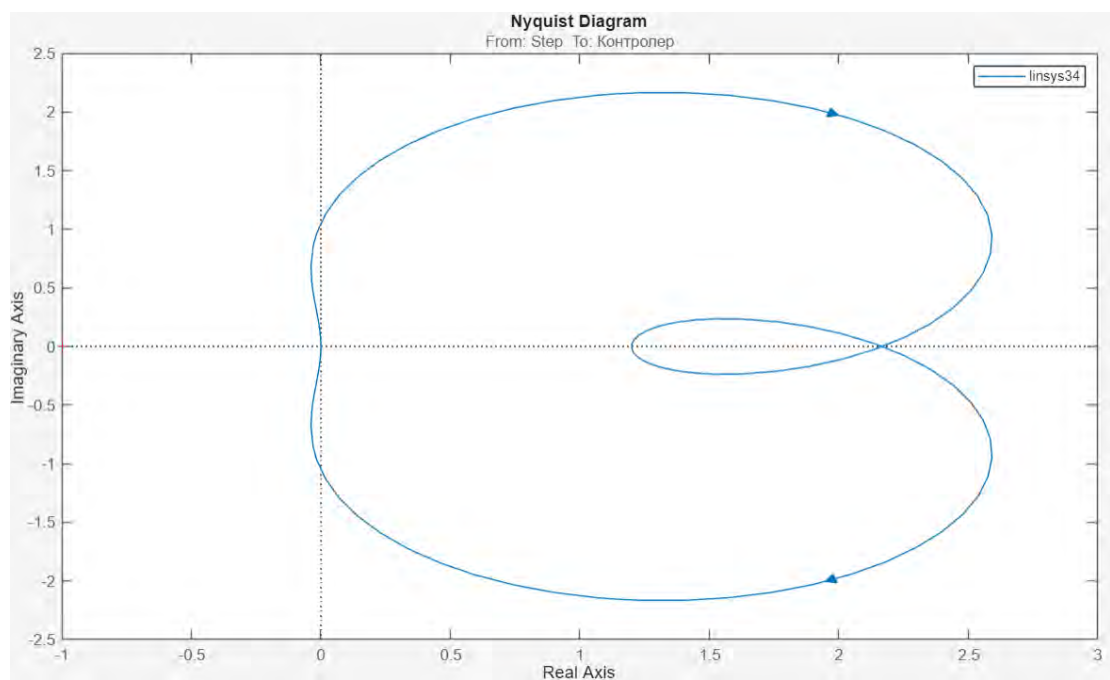


Рисунок 3.39 – Годограф Найквіста

Також була отримана діаграма нулів та полюсів моделі керування, вона зображена на рисунку 3.40.

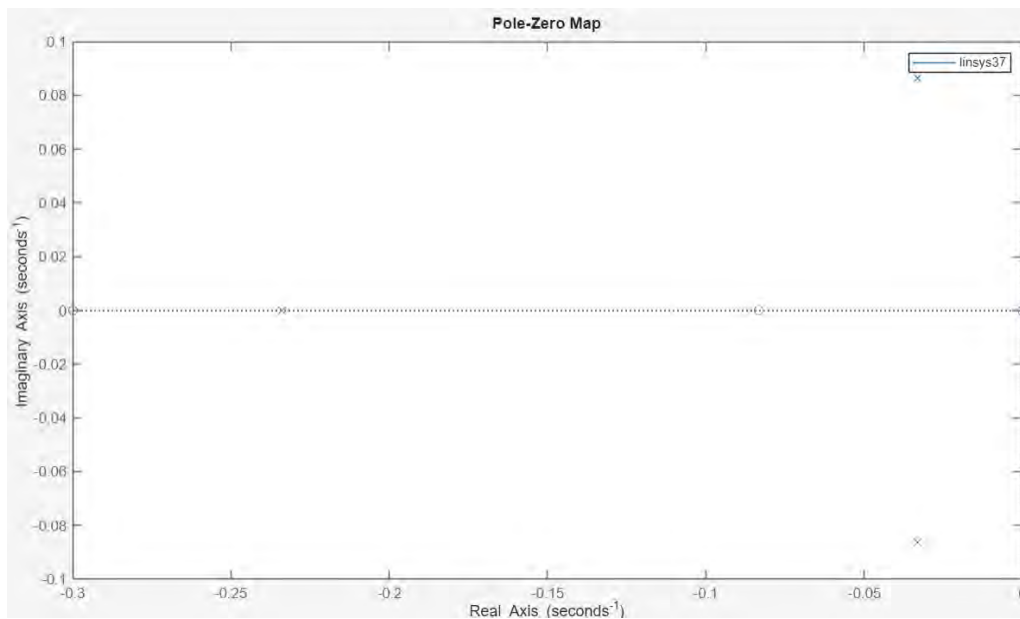


Рисунок 3.40 – Діаграма нулів та полюсів системи керування

Виходячи з отриманих графіків встановлено що система є стійкою.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ФОТОПОЛІМЕРНИМ 3D-ДРУКОМ

4.1 Проведення експериментального дослідження для визначення сили відриву

Для підтвердження результатів моделювання було проведено серію експериментів, яка дозволить порівняти експериментальні дослідження з попередніми результатами комп'ютерного моделювання.

Першим етапом проведення експерименту є розробка моделі за допомоги якої буде проводитися вимірювання сили відриву. Ця модель повинна мати кріплення для пристрою вимірювання, в якості якого використовуються ваги. Розроблена модель зображена на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1– Розроблена модель для експерименту

Вищевказана модель має основу діаметром 30 мм з кріпленням для вагів, за допомоги яких буде проводитися вимірювання сили відриву від плівки.

Другим етапом є друк вищевказаної моделі на фотополімерному принтері з використанням фотополімеру, який в подальшому буде використовуватися для проведення експерименту. Використання одного й того ж фотополімеру і для друку моделі і для проведення експерименту необхідне для виникнення адгезії

надрукованої моделі і рідкого фотополімера. Надрукована модель зображена на рисунку 4.2.



Рисунок 4.2– Надрукована модель для проведення експерименту

Для підтвердження результатів експерименту надруковано серію таких моделей.

Наступним етапом є підготовка моделі для дослідження відриву у слайсері, яка має вигляд циліндра. Підготовка моделі зображена на рисунку 4.3.

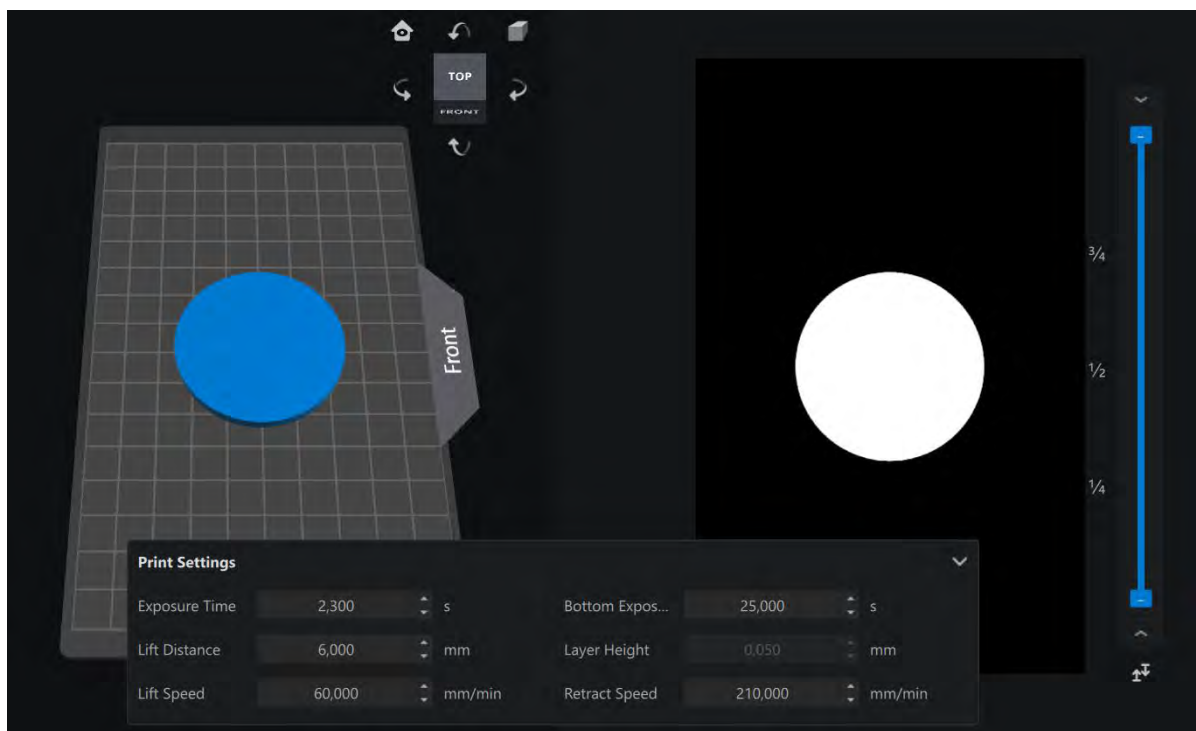


Рисунок 4.3– Підготовка горизонтального перерізу шару до проведення експерименту

Експериментальний циліндр на якому буде перевірятися адгезія між плівкою і фотополімером, має діаметр 50 мм для загального визначення результатів. Площа даного горизонтального перерізу становить 1256 мм².

Четвертим етапом проведення експерименту є підготовка устаткування, тобто фотополімерного принтера. Для проведення експерименту було знято платформу, для можливості вимірювання вагами та встановлений рівень фотополімеру, який не перебільшує основу надрукованої моделі.

В якості вимірювального пристрою для проведення експерименту було використано ваги, які зображені на рисунку 4.4. Від нуля до десяти кілограм у даного вимірювального пристрою похибка складає п'ять грам. Вони дозволяють провести вимірювання з достатньою точністю та з врахуванням складності доступу до надрукованої моделі в корпусі принтера.



Рисунок 4.4 – Ваги для вимірювання сили відриву

Наступним етапом є встановлення надрукованої деталі в місце експонування горизонтального перерізу шару після чого було запущено процес друку для виведення горизонтального перерізу шару та ввімкнення світлодіодної матриці.

За допомоги ваг визначено силу відриву, процес заміру сили відриву зображено на рисунку 4.5.



Рисунок 4.5 – Забір сили відриву експонованого шару від плівки

Була отримана надрукована деталь з експонованим шаром фотополімера, ця деталь зображена на рисунку 4.6.



Рисунок 4.6 – Отримана деталь в результаті проведення експерименту

Для підтвердження результатів експерименту було повторно проведено експерименти з різними площами горизонтального перерізу та різним часом експонування.

Площа горизонтального переріза була вибрана виходячи з розмірів робочої площини, яка становить 134x84 мм і при відриві показуватиме значення, які будуть найбільш повно відображати процес відриву. В якості форми відрива взято коло з різними діаметрами, так як у кола ширина зони відриву буде сталою величиною на відміну від прямокутника чи інших фігур. Час експонування взято виходячи з результатів дослідження відхилення базових шарів, що було проведено раніше.

Для проведення експериментів використовується принтер Anycubic Mono 4K, він має монохромний LCD екран, який має розмір пікселя 33 мкм та світлодіодну матрицю ParaLED (рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 – Anycubic Mono 4K

Отримані значення сили відриву було переведено з грам в Ньютони та зведено в таблицю 4.1 для подальшого аналізу. В результаті аналізу можливо визначити залежність сили відриву від часу експонування та площі горизонтального перерізу і використати їх у написанні ПЗ для керування процесом фотополімерного друку.

Таблиця 4.1 – Результат експериментальних досліджень сили відриву від часу експонування та площі.

Час експонування, сек	Діаметр круга, мм	Сила відриву, Н
10	30	5.345
12	30	5.933
14	30	6.129
16	30	5.198
18	30	5.982
20	30	5.099
10	40	43.15
12	40	11.77
14	40	44.33
16	40	47.07
18	40	45.6
20	40	48.84

Після отримання експериментальних значень проведено регресійний аналіз для визначення впливу зміни фактора на параметр оптимізації – силу відрива.

Результати регресійного аналізу зображені на рисунку 4.8.

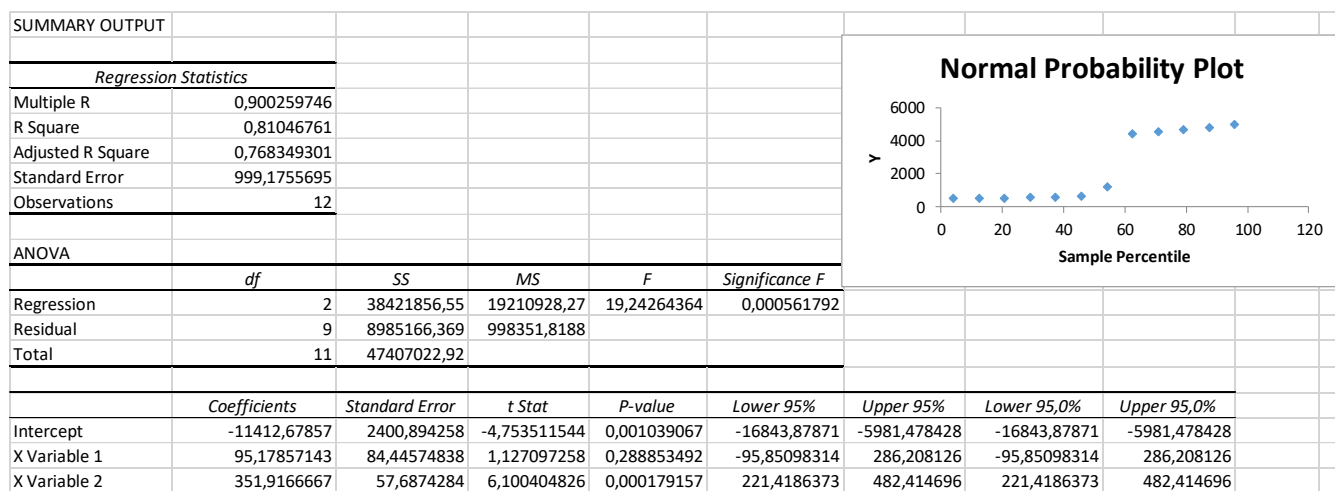


Рисунок 4.8 – Результат регресійного аналізу в ПЗ Excel

Аналізуючи результати регресійного аналізу можливо визначити основні закономірності у впливі факторів на силу відрива:

– в регресійному аналізі отримано графік, згідно якому залежність між часом експонування та навантаженням є лінійною;

– виходячи з отриманих коефіцієнтів зміна часу експонування та площі горизонтального перерізу на 1% призведе до зміни навантаження на 95,178 г для часу експонування та на 351,916 для зміни площі.

Отримані результати можливо використати для розробки ПЗ для контролю фотополімерного друку.

4.2 Розробка устаткування для практичного дослідження сили відриву моделі від плівки

Для точного вимірювання сили відриву необхідно два основних компонента – тензорезистивний датчик, який вимірює силу відриву експонованого фотополімера від плівки через силу, з якою тисне ванна на датчик та термістор, що вимірює температуру фотополімера в процесі друку.

Для вимірювання температури, необхідно встановити датчик, який буде знаходитись в середовищі рідкого фотополімеру.

Значення площі горизонтального перерізу можна отримати виходячи з файлу, який отриманий в слайсері.

Для вимірювання сили, з якою виконуватися відрив платформи з моделлю від ванни підібрано тензометричний датчик моделі HX711-10KG, він є високоточним, його помилка вимірів становить 0.2%. Максимальна вага, яка може на нього впливати є 10 кг. Має 4 дрота підключення, де 2 дрота відповідають за живлення та 2 за сигнал. Ці дроти під'єднуються до аналого-цифрового перетворювача і далі перетворювач під'єднується до Arduino. В якості АЦП слугує модуль на мікросхемі HX711, яка розроблена спеціально для роботи з високоточними тензодатчиками. Сам датчик та модуль АЦП зображені на рисунку 4.9.

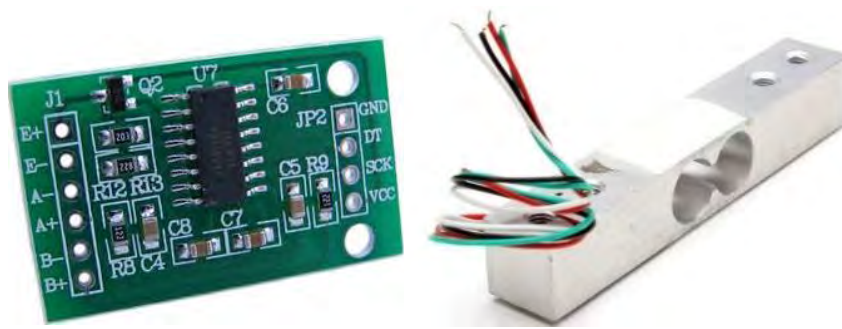


Рисунок 4.9 – Тензодатчик з АЦП перетворювачем

Для визначення температури у ванній використовується водонепроникний термістор з опором 10кОм. Він зображений на рисунку 4.10.



Рисунок 4.10 – Термістор NTC 10 кОм

В якості керуючого модуля вибрано платформу Arduino, яка забезпечує простоту підключення та програмування.

Для керування двома датчиками достатньо використовувати Arduino Uno. Arduino Uno зображене на рисунку 4.11.



Рисунок 4.11 – Arduino Uno R3

Схема виводів Arduino Uno зображено на рисунку 4.12.

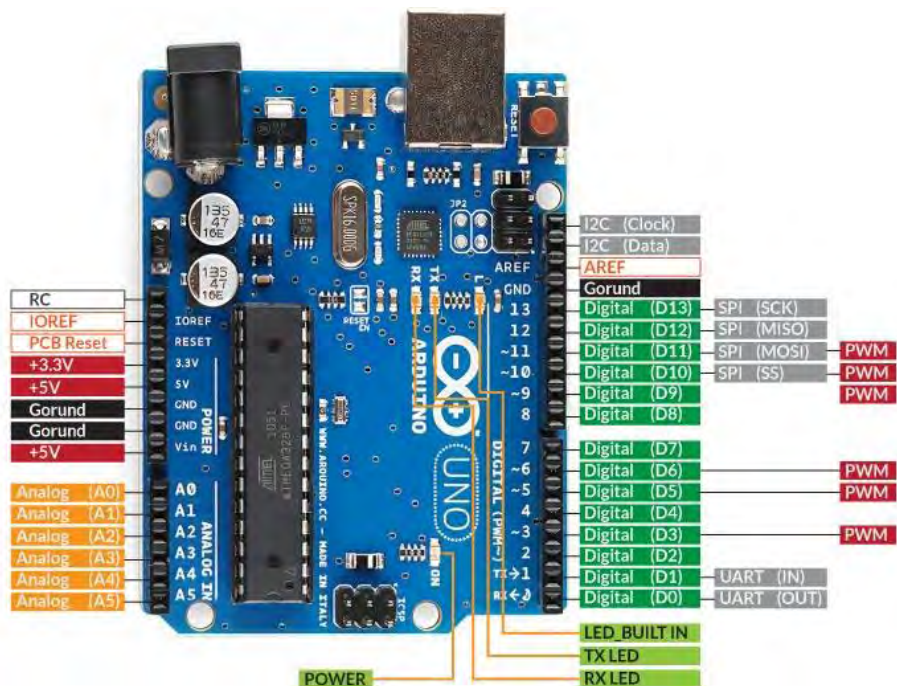


Рисунок 4.12 – Arduino Uno R3

АЦП Hx711 має 4 вивода входу для підключення до Arduino, це GND, DT, SCK, та Vcc та має 6 виходів де E+ та E- це живлення, A+ та A- це вихідний сигнал. Також є B+ та B- це вихідний сигнал для другого каналу. Перший канал A має коефіцієнт підсилення 64 або 128, другий канал B має коефіцієнт підсилення 32.

Таким чином до тензодатчика йде чотири проводи, де чорний та червоний живлення а білий та зелений дані, які йдуть по каналу A. АЦП зображений на рисунку 4.13.



Рисунок 4.13 – АЦП HX711

Схема підключення термістора та тензодатчик виконана в ПЗ Fritzing та зображена на рисунку 4.14.

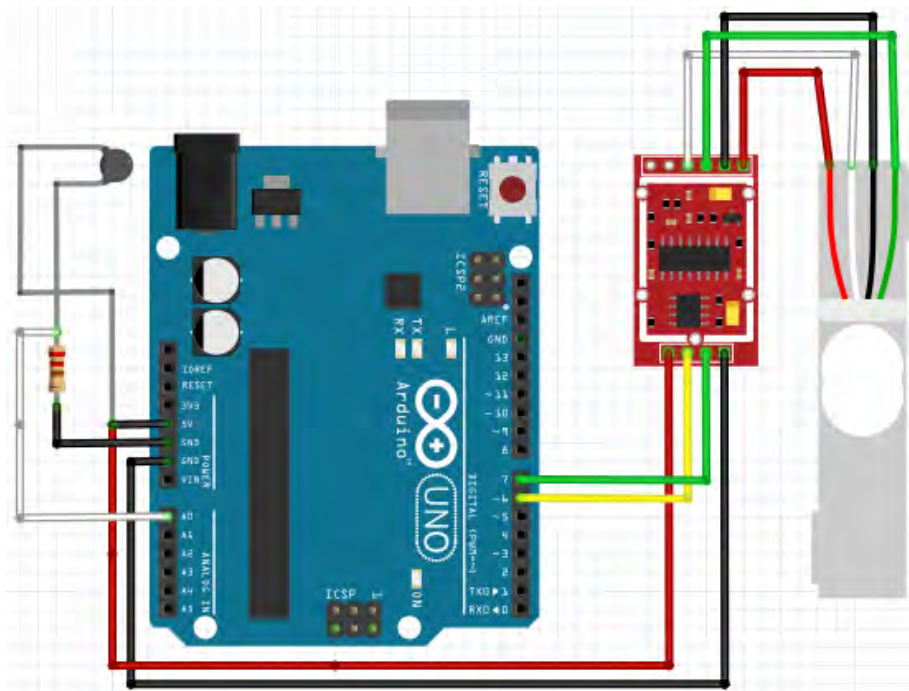


Рисунок 4.14 – Схема підключення датчика температури та тензодатчика

Після підключення датчиків написано керуючу програму, що виводить значення термістора та тензодатчика в консоль. Підключення термістора виконане на пін A2 через резистор 10 кОм. Підключення АЦП виконане DT підключено до A0 виводу, а SCK підключено до A1. Для живлення використовується 5В вивід Arduino.

```
#include "HX711.h"

#define LOADCELL_DOUT_PIN AIN1
#define LOADCELL_SCK_PIN AIN0
#define THERMISTOR_PIN A0
#define SERIES_RESISTOR 10000
#define NOMINAL_RESISTANCE 10000
#define NOMINAL_TEMPERATURE 25
#define BETA_COEFFICIENT 3950
#define ADC_MAX 1023.0

HX711 scale;

float calibration_factor = -14.15;
float units;
float ounces;

void setup() {
```

```

    Serial.begin(9600);
    scale.begin(LoadCell_DOUT_PIN, LoadCell_SCK_PIN);
    scale.set_scale();
    scale.tare();
    scale.set_scale(calibration_factor);
}

void loop() {
    for (int i = 0; i < 10; i++) {
        units = + scale.get_units(), 10;
    }
    long a = analogRead(THERMISTOR_PIN);
    float tempC = BETA_COEFFICIENT / (log((1025.0 * 10 / a - 10) / 10) +
    BETA_COEFFICIENT / 298.0) - 273.0;
    units = units / 10;
    ounces = - units * 0.035274;

    Serial.print("temp:");
    Serial.print(tempC);
    Serial.print(";");

    Serial.print("press:");
    Serial.println(ounces);
}

```

В програмі використовуються стандартні бібліотеки та методи програмування термістора та тензодатчика через АЦП.

Для подальшого використання цих даних та розрахунку навантаження на тензодатчик при відриві від плівки написана програма на мові Python, яка дає змогу відслідковувати процес друку. Ця програма базується на результатах комп'ютерного моделювання, написаного на мові Python, яка отримує значення сили відриву та температури фотополімеру, з використанням площі горизонтального перерізу шарів, визначає теоретичне значення сили відриву і виконує порівняння зі значеннями, що були отримані з тензодатчика. Порівнюючи теоретичні та практичні результати програма здійснює контроль друку. При зміні отриманих в процесі друку значень сили відриву в порівнянні з теоретичними даними, що розраховані з використанням коефіцієнтів пропорційності та температурного коефіцієнта, можливо зробити висновок, що площа контакту експонованого фотополімера з платформою змінилася, що, у свою чергу, означає виникнення дефектів друку.

Код програми наведено в додатку А.

Код програми поділяється на три файли. Перший файл, який має назву Kontrol.py відповідає за графічний інтерфейс, підключення до Arduino і вивід інформації, яка надходить з Arduino до файлу формату JSON, для подальшої обробки.

Другий файл, який має назву analyze_images відповідає лише за аналіз зображення горизонтальних перерізів, які отримуються з файла, з якого здійснюється в подальшому друк. Цей файл рахує кількість білих пікселів та конвертує їх у площу в мм², використовуючи параметри LCD екрану та розміри пікселя.

Третій файл, який має назву analyze_sensor аналізує дані, що отримуються з Arduino. Знаходить пікові значення та порівнює їх з площею горизонтального перерізу використовуючи вищевказані теоретичні методи для співвідношення площі та маси, що впливає на датчик.

Алгоритм файлу Kontrol.py має наступний вигляд:

- запуск програми, до якого входять ініціалізація графічного інтерфейсу та встановлення параметрів за замовчуванням (boud_rate, порт, час експонування базових шарів, час експонування звичайних шарів та тека, де знаходяться рисунки шарів);

- користувацьке налаштування параметрів (вибір COM-порту, швидкість передачі даних, температурний коефіцієнт, час експонування звичайних та базових шарів, вибір теки для аналізу зображень);

- запуск моніторингу, відбувається з'єднання з термістором та тензодатчиком через Serial, зчитуються дані сили (force) та температури (temperature) з використанням коефіцієнтів, що були отримані в процесі попередніх досліджень, далі отримані дані відправляються у файл analyze_sensor.py, завантажуються зображення у analyze_images.py;

- обробка отриманих даних, виконується аналіз отриманих даних на відхилення від встановленого типу даних, які надходять до програми, визначаються піки сили відриву, проводиться аналіз зображень в результаті чого

розраховується площа горизонтального перерізу шару, дані з `analyze_sensor.py` та `analyze_images.py` виводяться в графічний інтерфейс та виконується їх обробка, виконується розрахунок теоретичного значення максимумів сили та порівняння їх з отриманими даними з тензодатчика;

- відображення результатів в GUI програми, оновлення графіків сили та температури в реальному часі, візуалізація оброблених зображень, оновлення значень сили, температури, максимумів сили та виводиться попередження при відхиленнях значень від встановлених та розрахованих;

- завершення роботи, зупинка з'єднання з Arduino, зупинка моніторингу, збереження отриманих в процесі роботи програми даних у формат JSON, створення графіків сили та температури, завершення роботи самої програми.

Перший файл `Kontrol.py` містить у своєму складі 11 бібліотек:

- `sys`, бібліотека, що використовується для закривання графічного вікна і завершення виконання програми;

- `serial`, бібліотека, що використовується для обміну даними з Arduino, тобто вибір порту, встановлення `baud_rate` та ін.;

- `threading`, бібліотека, що використовується для роботи операцій в окремому потоці;

- `json`, бібліотека, що використовується для збереження даних, що надходять з Arduino у файл формату JSON;

- `time`, бібліотека, що використовується для побудови графіків у яких є залежність від часу та відправлення даних, які отримані з Arduino до файлів логування з часовими мітками;

- `os`, бібліотека, що використовується для роботи з файловою системою;

- `pyqtgraph`, бібліотека, що використовується для побудови графіків;

- бібліотека `PyQt6` для побудови графічного інтерфейсу.

`PyQt6` в програмі використовує декілька вбудованих модулів, а саме:

- `QtWidgets`, які відповідають за саме вікно програми, всі кнопки, поля вводу та вибір тек.

- `QtCore`, відповідає за таймери, сигнали, та багатопоточність програми;

– QtGui, відповідає за графіку, шрифти, зображення та ін.

Використовуючи бібліотеки PyQt6 було отримано графічний інтерфейс, який зображений на рисунку 4.15.

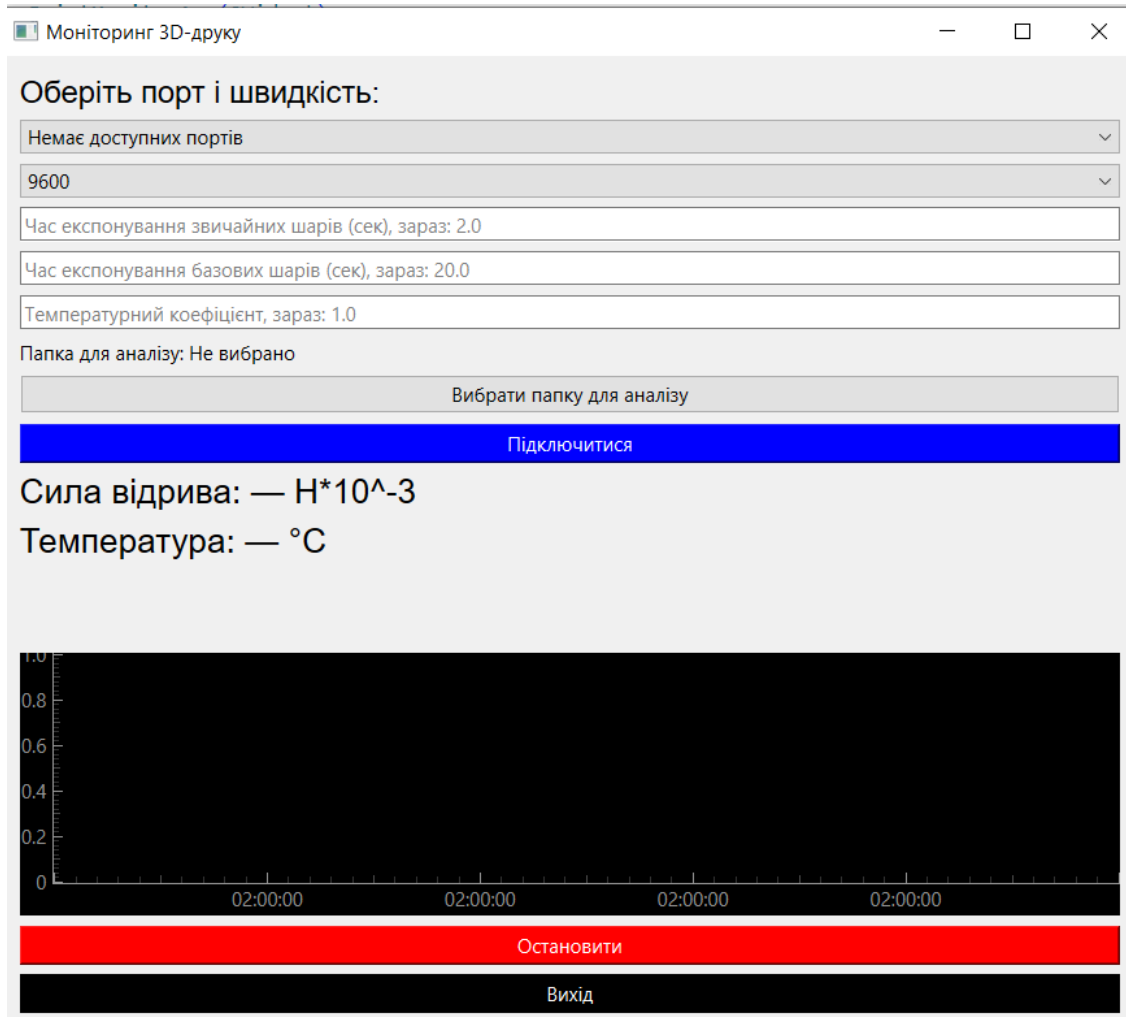


Рисунок 4.15 – Графічний інтерфейс моніторингу фотополімерного друку

В процесі вибору порту підключення Arduino, використовуючи бібліотеку `serial`, отримується доступ до портів, та знаходиться порт, до якого підключено Arduino за допомоги спеціальної функції `update_ports`, повний код цієї функції має наступний вигляд:

```
def update_ports(self):  
    """Отримання списку доступних COM-портів."""  
    ports = [port.device for port in serial.tools.list_ports.comports()]  
    if not ports:  
        ports.append("Немає доступних портів")
```

```
self.port_select.clear()
self.port_select.addItem(ports)
```

Також є вибір швидкості обміну даними – `baud_rate`. По замовченню `baud_rate` становить 9600. Це значення відповідає значенню швидкості обміну даними, що вказані у прошивці до Arduino, що наведена вище.

Для корегування даних додано ввід змінних часу експонування базових та звичайних шарів, для розширеного аналізу результатів друку з використанням цієї програми.

Для розрахунку впливу температури на швидкість полімеризації та сили відриву додано температурний коефіцієнт, що знаходиться в результаті експериментальних досліджень.

Для вибору файлів, які в подальшому друкуються на фотополімерному принтері додано вікно вибору теки, де є необхідні файли для аналізу площі горизонтального перерізу шарів.

Вибір теки виконується окремою функцією `select_folder(self)`, повний код цієї функції має наступний вигляд:

```
def select_folder(self):
    """Відкриває вікно вибору папки для аналізу зображень."""
    global IMAGE_ANALYSIS_FOLDER
    folder = QFileDialog.getExistingDirectory(self, "Вибрати папку для
аналізу зображень")
    if folder:
        IMAGE_ANALYSIS_FOLDER = folder
        self.folder_label.setText(f"Папка для аналізу:
{IMAGE_ANALYSIS_FOLDER}")
        self.image_analysis_data =
analyze_images.analyze_images_and_save_info()
```

Після вибору теки виконується аналіз зображення, через посилання на виконання функції, яка знаходиться у файлі `Analyze_images.py`.

Ця функція має наступний вигляд:

```
self.image_analysis_data = analyze_images.analyze_images_and_save_info()
```

Кнопка підключення графічного інтерфейсу запускає функцію `start_monitoring`, яка викликає наступну функцію, що відповідає безпосередньо за зчитування даних в окремому потоці. Повний код цієї функції має наступний вигляд:

```
def start_monitoring(self):
    """Запуск потоку для зчитування даних."""
    global running
    running = True
    self.serial_thread = threading.Thread(target=self.read_serial,
daemon=True)
    self.serial_thread.start()
```

Після виконання цієї функції починається зчитування даних з Arduino та їх обробка, що зведена у дві функції: `read_serial` та `process_data`. `Process_data` відповідає за отримання від Arduino інформації, через функцію `read_serial`, яку можливо в подальшому аналізувати та відправляти її у зворотньому напрямку до `read_serial`. Функція `process_data` розділяє інформацію про температуру та силу відрива на два окремих масива, які в подальшому передає у функцію `read_serial`. Повний код функції `process_data` має наступний вигляд:

```
def process_data(self, data):
    """Обробка даних від Arduino."""
    try:
        values = data.split(";")

        if len(values) == 0:
            return None, None, None

        temp_str = values[0]
        force_str = values[1]

        if temp_str is None or force_str is None:
            return None, None, None

        temperature = float(temp_str.split(":")[1])
        force = float(force_str.split(":")[1])
        timestamp = time.time()

        return force, temperature, timestamp
    except (ValueError, IndexError):
```

```
return None, None, None
```

Функція `read_serial` виконує обмін даними з Arduino в окремому потоці і передає отримані не редаговані дані у функцію `process_data`, після чого виконує її аналіз в режимі реального часу, знаходячи піки значень від тензодатчика і виводячи їх та поточні значення температури та сили відрива в графічний інтерфейс у строки: «сила відрива:» та «температура:». Також в цій функції виконується розрахунок сили з урахуванням всіх коефіцієнтів для уточнення отриманих з тензодатчика значень та з використанням коефіцієнтів пропорційності, що були отримані в результаті регресійного аналізу для знаходження теоретичного значення сили, що в подальшому використовується для порівняння фактично отриманої сили відриву від теоретичного значення а також врахування часу експонування та температурного коефіцієнту на загальну силу відрива.

Повний код функції `read_serial` має наступний вигляд:

```
def read_serial(self):
    """Читання даних з Arduino в окремому потоці."""
    global running
    start_timestamp = time.time()
    self.live_spikes.clear()

    self.serial_port = self.port_select.currentText()
    self.baud_rate = int(self.baud_select.currentText())

    spike_threshold = analyze_sensor.FORCE_THRESHOLD
    is_spike_detected = False

    try:
        ser = serial.Serial(self.serial_port, self.baud_rate, timeout=1)
        self.status_label.setText(f"Підключено до {self.serial_port} @ {self.baud_rate}")
        self.status_label.setStyleSheet("color: green;")
    except serial.SerialException as e:
        QMessageBox.critical(self, "Помилка підключення", f"Не вдалося підключитися: {e}")
        return
    while running:
        try:
            line = ser.readline().decode("utf-8").strip()
```

```

        if not line: continue

        force, temperature, timestamp = self.process_data(line)
        if not force or not temperature or not timestamp: continue

        mas_vat = 624
        mas_phot = 250

        k_value_exp = 32.05
        k_value_area = 140.4
        with open("image_analysis_data.json", "r", encoding="utf-8")
as file:
            image_data = json.load(file)

        for item in image_data:
            item["calculatedForce"] = item["objectAreaMm"] *

k_value_area

        with open("sensor_data.json", "w", encoding="utf-8") as file:
            json.dump(sensor_data, file, ensure_ascii=False,

indent=4)

        if temperature <= 23:
            TEMPERATURE_COEFFICIENT = 1

        if force >=1:
            force_s = ((force * 2) + mas_vat + mas_phot ) *

TEMPERATURE_COEFFICIENT
        else:
            force_s = force

        is_force_cross_threshold = force_s >

spike_threshold

        if not is_spike_detected and is_force_cross_threshold:
            is_spike_detected = True
            self.live_spikes.append({
                "force": [force_s],
                "temperature": [temperature]
            })
        elif is_spike_detected and is_force_cross_threshold:
            last_spike = self.live_spikes[-1]
            if last_spike:
                last_spike["force"].append(force_s)
                last_spike["temperature"].append(temperature)

        elif is_spike_detected and not is_force_cross_threshold:
            last_index = len(self.live_spikes) -

1

            last_spike = self.live_spikes[last_index]

```

```

        if last_spike: self.spike_detected(last_index,
last_spike)

        is_spike_detected = False
    elif not is_spike_detected and not is_force_cross_threshold:
        is_spike_detected = False

    self.force_label.setText(f"Сила: {force_s:.2f} г")
    self.temp_label.setText(f"Температура: {temperature:.2f} °C")

    self.time_values.append(timestamp - start_timestamp)
    self.force_values.append(force_s)
    self.temp_values.append(temperature)
    sensor_data.append({
        "timestamp": timestamp,
        "force": force_s,
        "temperature": temperature,
    })

    print("Spikes", len(self.live_spikes))
except Exception:
    pass

```

Для слідкування за процесом друку до графічного інтерфейсу додано графік, який відслідковує температуру та силу в процесі друку. Для його роботи необхідно оновлювати дані у часі. Для цього використовується функція `update_graph`, яка має наступний вигляд:

```

def update_graph(self):
    """Оновлення графіка."""
    if len(self.time_values) > 0 and len(self.force_values) > 0:
        self.force_curve.setData(self.time_values, self.force_values)
        self.temp_curve.setData(self.time_values, self.temp_values)
    self.graph_widget.repaint()

```

Для аналізу даних та співставлення їх шарам моделі всі отримані дані зберігаються у файл `sensor_data` формату JSON, до якого в подальшому звернуться інші функції для отримання значень і їх подальшого розрахунку, за допомоги функції `Save_data`, яка має наступний вигляд:

```

def save_data(self):
    """Збереження даних в JSON с позначками часу."""

```

```

        with open(os.path.join(os.path.dirname(__file__), "results",
"sensor_data.json"), "w", encoding="utf-8") as file:
            json.dump(sensor_data, file, ensure_ascii=False, indent=4)

```

Для знаходження піків отриманих значень в процесі друку, використовується функція `spike_detected`, яка виводить в графічний інтерфейс значення піків сили, відповідну картинку шару, на якому цей пік був отриманий та номер шару. Функція `spike_detected` має наступний вигляд:

```

def spike_detected(self, index, spike_data):
    if spike_data and len(self.image_analysis_data) > 0:
        analyzed_image = self.image_analysis_data[index]
        if analyzed_image:
            spike_force = max(spike_data["force"])
            actual_image =
QPixmap(analyzed_image["imagePath"]).scaled(
                200, 200,
                Qt.AspectRatioMode.KeepAspectRatio,
                Qt.TransformationMode.SmoothTransformation
            )

            self.live_layer_label.setText(f"Горизонтальний переріз:
Номер:{analyzed_image["imageNumber"]}, Площа:{analyzed_image["objectAreaMm"]}, Сила
в момент відриву:{spike_force}")
            self.live_image_label.setPixmap(actual_image)
        else:
            self.live_layer_label.setText("There is no such image. It
can be error or BAD PRINTING PROCESS")

```

Для порівняння результатів фактичної та розрахованої сили використовується функція `compare_force`, яка розраховує різницю між фактичним значенням сили та розрахунковим, яке отримане у функції `read_serial`. Функція `compare_force` має наступний вигляд:

```

def compare_force(calculated_force: float, actual_force: float, tolerance:
float = 5.0) -> str:
    difference = abs(calculated_force - actual_force)
    percent_difference = (difference / calculated_force) * 100 if
calculated_force != 0 else 0
    if percent_difference <= tolerance:
        return self.result_label.setText(f"Значення співпадають
(Відхилення {percent_difference:.2f}%)")

```

```
else:  
    return self.result_label.setText(f"⚠ Значення не співпадають!  
Відхилення {percent_difference:.2f}%, різниця {difference:.2f} г")
```

Повний код файлу control.py міститься в додатку А.

Алгоритм коду файлу analyze_images.py має наступний вигляд:

- завантаження даних, ініціалізуються параметри аналізу, виконується читання файлу image_analysis_data.json та завантаження теки з файлу kontrol.py для аналізу зображень;
- обробка зображень та аналіз геометричних характеристик, визначення кількості білих пікселей (objectPixels) та перетворення пікселей у площу в мм² (objectAreaMm).
- порівняння результатів аналізу, виконується співвідношення площі об'єкту та сили відриву, перевірка відхилень;
- запис даних у файл формату JSON та створення аналітичних графіків площі шару та кількості пікселей з подальшою передачею значень (objectAreaMm, objectPixels) у файл control.py;

Другий файл analyze_images.py містить в своєму складі п'ять бібліотек:

- cv2, модуль що використовується для аналізу зображень за допомоги якого аналізується кількість білих пікселей для подальшого розрахунку;
- numpy – бібліотека, що використовується для роботи з масивами та матрицями і подальшими математичними розрахунками;
- matplotlib – бібліотека, що використовується для побудови графіків
- json – бібліотека, що використовується для збереження значень у файли формату JSON.

Також у цьому файлі є 5 функцій, які відповідають за знаходження файлів для аналізу, розрахунок площі, підрахунок загальної кількості шарів, створення графіків площі та збереження проаналізованих значень у файл формату JSON.

getImageData – функція яка підраховує кількість білих пікселей та переводить їх у значення площі шару за допомоги бібліотеки cv2. Код цієї функції має наступний вигляд:

```
def getImageData(imageName):
    imagePath = os.path.join(IMAGES_FOLDER, imageName)
    image = cv2.imread(imagePath, cv2.IMREAD_GRAYSCALE)

    if image is None:
        raise ValueError("Помилка завантаження картинки.")

    white_pixel_count = int(np.sum(image == 255))
    object_size = (white_pixel_count * PX_TO_MKM_SIZE) / 1000

    return {"objectPixels": white_pixel_count, "objectAreaMm": object_size}
```

getImagePaths – функція, що відповідає за читання файлів у папці з шарами моделі. Має наступний вигляд:

```
def getImagePaths():
    image_paths = sorted(os.listdir(IMAGES_FOLDER), key=lambda x:
int(os.path.splitext(x)[0]))
    return image_paths
```

Функція analyze_image_layers відповідає за створення списку з номеру шару, кількість пікселів, площі та шляху до теки, де знаходяться файли. Функція має наступний вигляд:

```
def analyze_image_layers():
    image_analysis = []
    images_paths = getImagePaths()

    print("=== Буде проаналізовано", len(images_paths), "зображень ===")

    for image_path in images_paths:
        image_data = getImageData(image_path)

        image_data = {
            "imageNumber": int(os.path.splitext(image_path)[0]),
            "objectPixels": image_data["objectPixels"],
            "objectAreaMm": image_data["objectAreaMm"],
            "imagePath": os.path.join(IMAGES_FOLDER, image_path)
        }

        image_analysis.append(image_data)

    return image_analysis
```

Функція `save_plot_as_image` створює графіки площі, пікселей. Повний код функції наведений далі:

```
def save_plot_as_image(data, output_path, plotName):
    plt.figure(figsize=(6, 4))
    plt.plot(data, marker='o', linestyle='-')
    plt.xlabel("X-axis")
    plt.ylabel("Y-axis")
    plt.title(plotName)
    plt.savefig(output_path, dpi=300, bbox_inches='tight')
    plt.close()
```

Функція `analyze_images_and_save_info` зберігає отримані значення пікселей та площі у файл JSON і відправляє ці змінні у функцію побудови графіків. Повний код функції наведений далі:

```
def analyze_images_and_save_info():
    image_data = analyze_image_layers()

    with open(IMAGE_ANALYSIS_FILE_PATH, "w", encoding="utf-8") as file:
        json.dump(image_data, file, ensure_ascii=False, indent=4)

    object_area_list = [item["objectAreaMm"] for item in image_data]
    object_pixels_list = [item["objectPixels"] for item in image_data]

    save_plot_as_image(object_area_list, os.path.join(RESULTS_FOLDER,
"area_plot_mm.png"), "Area layer plot")
    save_plot_as_image(object_pixels_list, os.path.join(RESULTS_FOLDER,
"pixel_plot.png"), "Pixel plot")
    return image_data
```

Функція `load_image_data` створює файл формату JSON для результатів аналізу зображень. Повний код цієї функції наведено далі:

```
def load_image_data():
    data = []

    try:
        with open(IMAGE_ANALYSIS_FILE_PATH, "r", encoding="utf-8") as file:
            data = json.load(file)
    except Exception as e:
        print(f"Error reading image data: {e}")
```

```
return data
```

Повний код цього файлу наведений у додатку Б.

Останнім файлом, від якого залежить аналіз отриманих з Arduino даних і знаходження піків сили при відриві від шару є файл `analyze_sensor.py`. Алгоритм коду має наступний вигляд:

- завантаження вхідних даних, зчитування `sensor_data.json` та `image_analysis_data.json`, при відсутності даних програма завершує роботу;
- пошук пікових значень з використанням функції `find_peaks()` та запис отриманих значень у масив `peaks`;
- побудова графіків сили, температури та загального графіка;
- перевірка кількості максимумів сили та кількості шарів.

У файлі використовується чотири бібліотеки:

- `os`;
- `json`;
- `matplotlib.pyplot as plt`;
- `from scipy.signal import find_peaks`, функція, яка шукає піки – локальні максимуми в даних.

Також у файлі є 5 функцій, які відповідають за читання файлу з даними отриманими з тензодатчика та термістора, знаходження максимумів значень, побудова графіків з відзначеними максимумами, аналіз та співвідношення отриманих максимумів з шарами моделі.

Першою функцією є `load_json_data`, яка отримує файл формату JSON для подальшого аналізу, код функції наведено нижче:

```
def load_json_data(file_path):  
    try:  
        if os.path.exists(file_path):  
            with open(file_path, "r", encoding="utf-8") as f:  
                data = json.load(f)  
  
        if not isinstance(data, list):  
            print("Data is not array")  
            return None
```

```

        return data
    else:
        return None
except:
    return None

```

Наступною функцією є `find_peaks_data` шукає скачки сили відриву, рахує їх та заносить до масиву `spike_data`. Повний код функції наведено нижче:

```

def find_peaks_data(peaks_list):
    peaks, _ = find_peaks(peaks_list, height=FORCE_THRESHOLD)
    spike_data = []

    for peak in peaks:
        spike_data.append({
            "index": peak,
            "value": peaks_list[peak],
        })
    return spike_data

```

Функція `pload_with_peaks` будує графіки сили в залежності від часу та відмічає максимуми скачків. Повний код функції наведено нижче:

```

def pload_with_peaks(x_values, y_values, peaks, save_file):
    plt.plot(x_values, y_values, label="Data")
    if peaks is not None:
        plt.plot([x_values[i] for i in peaks], [y_values[i] for i in peaks],
            "ro", label="Detected Spikes")

    plt.xlabel("Time")
    plt.ylabel("Y-Value")
    plt.savefig(save_file, dpi=300, bbox_inches='tight')
    plt.close()

```

Функція `pload_all` створює загальний графік сили, температури та часу. Повний код функції наведено нижче:

```

def pload_all(timestamps, forces, peaks, temperatures, save_file):
    plt.plot(timestamps, forces, label="Force Data")

    if peaks is not None:

```

```

plt.plot([timestamps[i] for i in peaks], [forces[i] for i in peaks],
"ro", label="Detected Spikes")

plt.plot(timestamps, temperatures, label="Temperature Data")

plt.xlabel("Time")
plt.ylabel("Y-Values")
plt.savefig(save_file, dpi=300, bbox_inches='tight')
plt.close()

```

Функція `analyze_sensor_data` отримує файли JSON зі значеннями отриманими в процесі аналізу зображень `image_analysis_data` та `sensor_data` та будує графіки сили, температури та загальний графік з використанням піків сили. Повний код функції наведено далі:

```

def analyze_sensor_data():
    images_data = load_json_data(analyze_images.IMAGE_ANALYSIS_FILE_PATH)
    sensor_data = load_json_data(SENSOR_DATA_FILE_PATH)

    if images_data is None:
        print("NO IMAGES DATA")
        return

    if sensor_data is None:
        print("NO SENSOR DATA")
        return

    temperatures = [item["temperature"] for item in sensor_data]
    timestamps = [item["timestamp"] for item in sensor_data]

    forces = [item["force"] for item in sensor_data]
    forces_peaks = find_peaks_data(forces)
    peaks = [item["index"] for item in forces_peaks]

    ploat_with_peaks(timestamps, forces, peaks,
os.path.join(analyze_images.RESULTS_FOLDER, "forces_plot.png"))
    ploat_with_peaks(timestamps, temperatures, None,
os.path.join(analyze_images.RESULTS_FOLDER, "temperature_plot.png"))
    ploat_all(timestamps, forces, peaks, temperatures,
os.path.join(analyze_images.RESULTS_FOLDER, "all_plot.png"))

    print("кількість скачків", len(peaks), "повинна співпадати з",
len(images_data))

```

Повний код файлу `analyze_sensor.py` наведено у додатку В.

В результаті взаємодії Kontrol.py, analyze_images.py та analyze_sensor.py створюється п'ять графіків які дозволяють провести повний аналіз процесу фотополімерного друку. Такими графіками є графік сили з піками, температури, площі шарів, кількості пікселів шарів та загальний графік.

Графік площі шарів зображено на рисунку 4.16. Графік показує зміну площі шарів в процесі побудови моделі і відповідає значенням які містяться у файлі image_analysis_data.JSON.

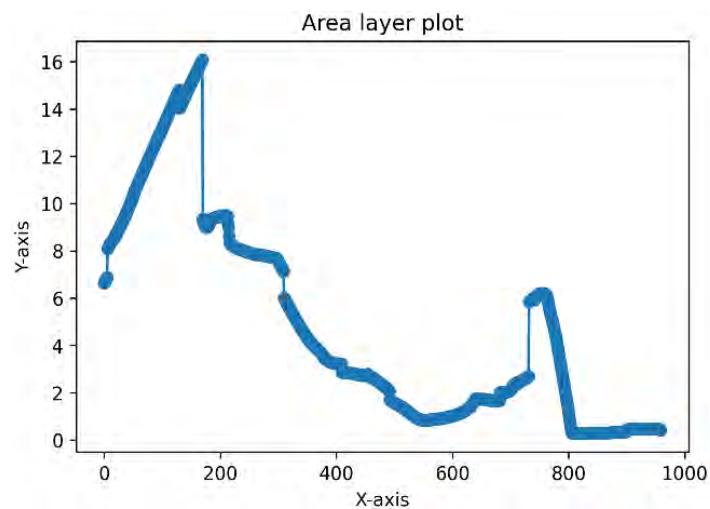


Рисунок 4.16 – Графік площі горизонтальних перерізів моделі від кількості шарів

Файл image_analysis_data.JSON містить значення, приклад яких зображено на рисунку 4.17.

```
[
  {
    "imageNumber": 1,
    "objectPixels": 201288,
    "objectAreaMm": 6.642504,
    "imagePath": "c:\\Users\\Roman\\Desktop\\1\\content\\3DBenchy\\1.png"
  },
  {
    "imageNumber": 2,
    "objectPixels": 202787,
    "objectAreaMm": 6.691971000000001,
    "imagePath": "c:\\Users\\Roman\\Desktop\\1\\content\\3DBenchy\\2.png"
  },
  {
    "imageNumber": 3,
    "objectPixels": 204299,
    "objectAreaMm": 6.741867,
    "imagePath": "c:\\Users\\Roman\\Desktop\\1\\content\\3DBenchy\\3.png"
  }
]
```

Рисунок 4.17 – Приклад заповнення файлу image_analysis_data.JSON

Використовуючи значення, що зображені на рисунку 4.17 будується графік кількості пікселів шарів, який зображений на рисунку 4.18.

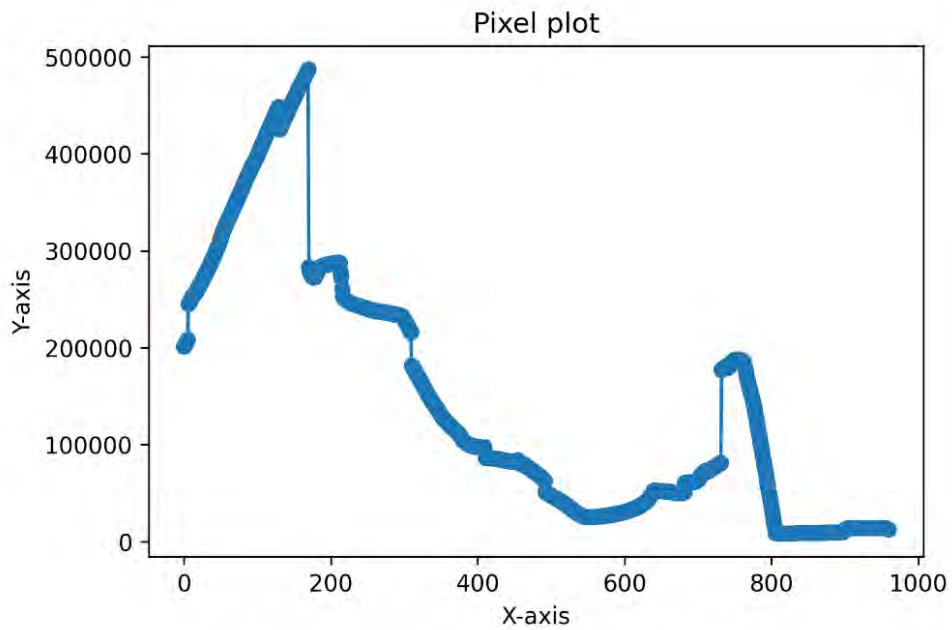


Рисунок 4.18 – Графік кількості пікселів моделі

Графік коливань температури зображено на рисунку 4.19.

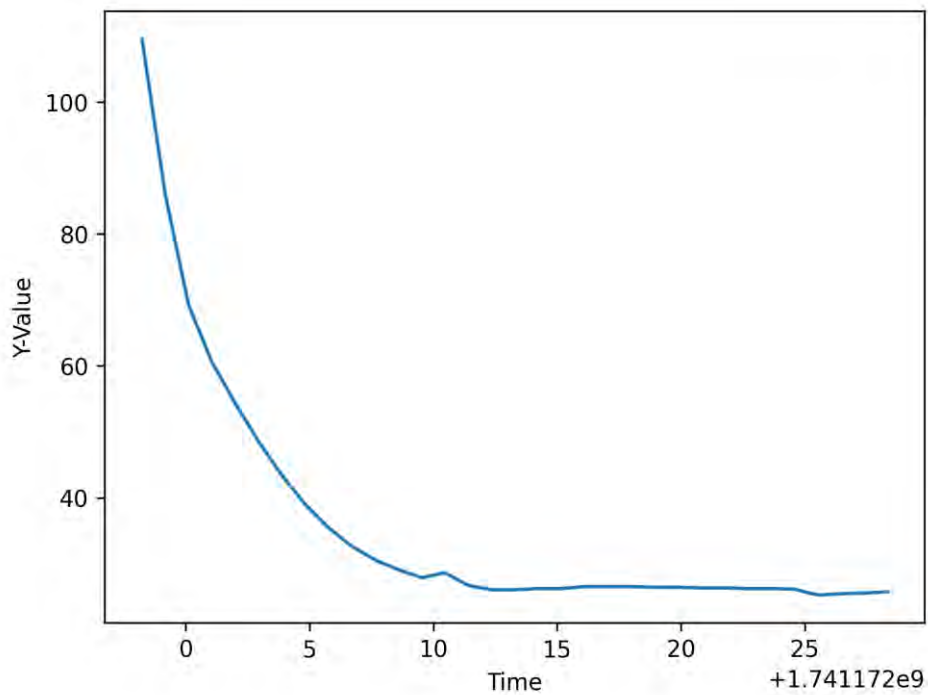


Рисунок 4.19 – Графік коливань температури

Дані для побудови графіка знаходяться у файлі sensor_data.JSON, що зображено на рисунку 4.20.

```
{
  "timestamp": 1740663048.051185,
  "force": 0,
  "temperature": 23.3
},
{
  "timestamp": 1740663048.992838,
  "force": 0,
  "temperature": 23.5
},
{
  "timestamp": 1740663049.931266,
  "force": 880.62,
  "temperature": 23.7
},
{
  "timestamp": 1740663050.8731432,
  "force": 880.58,
  "temperature": 24.4
},
{
  "timestamp": 1740663051.8147612,
  "force": 0,
  "temperature": 24.5
},
}
```

Рисунок 4.20 – Приклад заповнення файлу sensor_data.JSON

Використовуючи вищенаведені дані будується графік сили відриву, що зображений на рисунку 4.21.

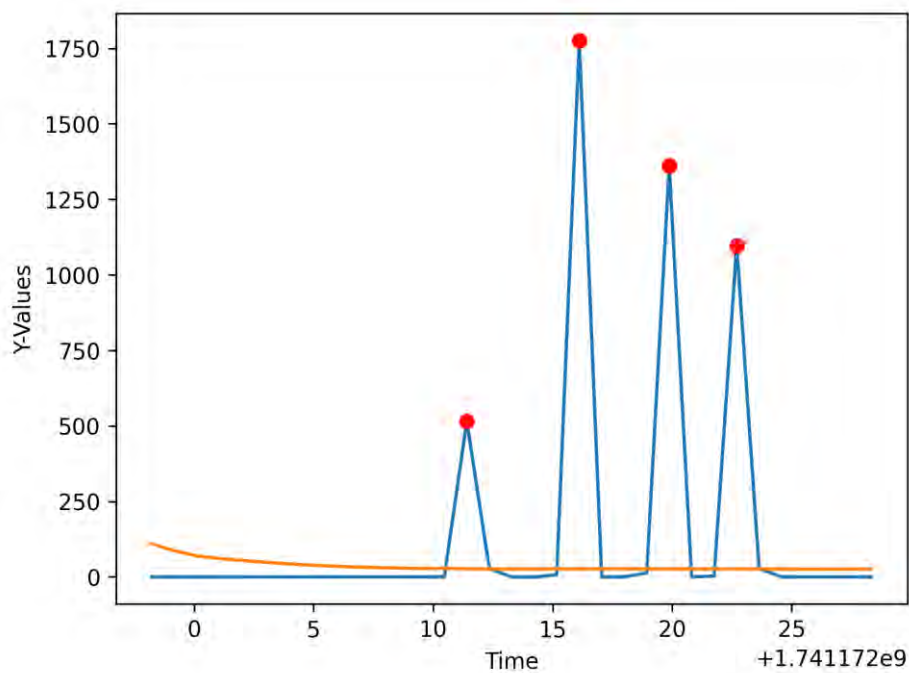


Рисунок 4.21 – Графік сили відриву моделі від плівки

Також в процесі роботи програми створюється два файли формату JSON: `image_analysis_data.json` та `sensor_data.json`. Отримані значення площі та кількості пікселів файлу `image_analysis_data.json` наведені у додатку Г. Отримані значення з тензодатчика та термістора, які містяться у файлі `sensor_data.json` наведено у додатку Д.

Графік сили відриву, що відображається у графічному інтерфейсі програми зображено на рисунку 4.22.

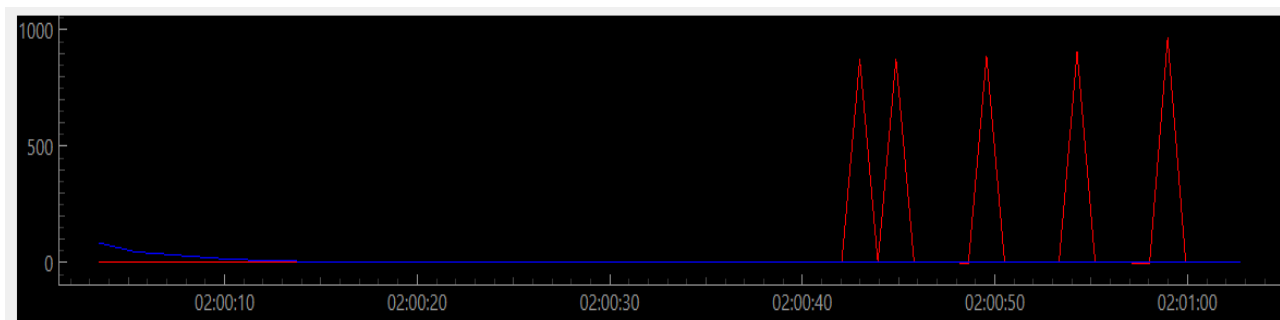


Рисунок 4.22 – Графік отриманий в графічному інтерфейсі програми

Виведення значень сили в графічному інтерфейсі зображено на рисунку 4.23.

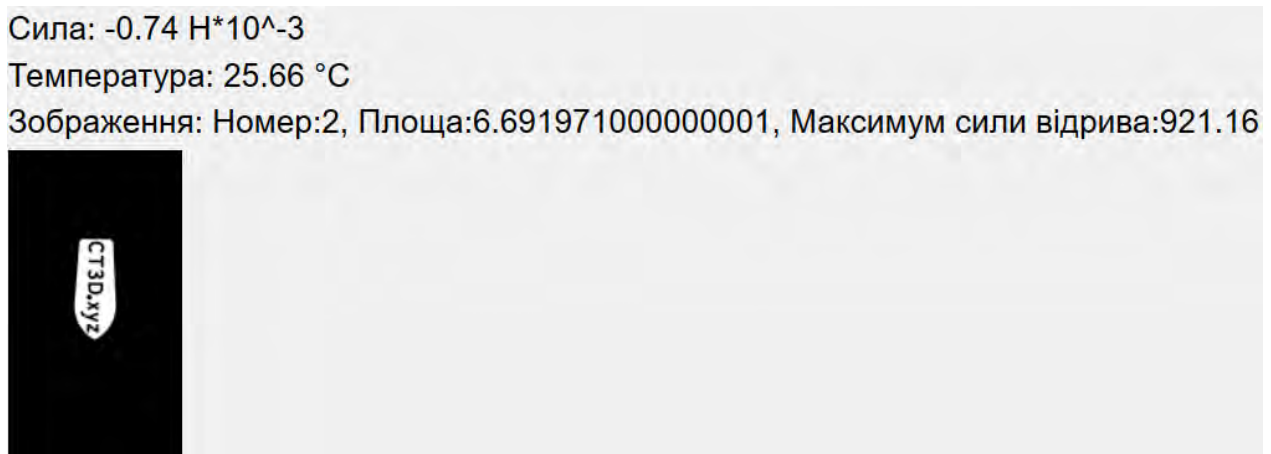


Рисунок 4.23 – Виведення значень у графічний інтерфейс програми

Таким чином метод контролю показників якості фотополімерного друку полягає у відслідковуванні різниці у більшу або меншу сторону отриманих в

процесі друку значень від тих значень, що отримані в результаті теоретичних розрахунків з використанням площі шару, часу експонування та температурного коефіцієнта.

При зменшенні практичних значень навантаження можливо зробити висновок про зменшення площі відриву експонованого полімеру, що свідчить про утворення браку в процесі друку.

ВИСНОВКИ

У монографії вирішено актуальну науково-прикладну задачу, що полягає у розробці методів і засобів забезпечення якісних показників автоматизованих систем керування адитивною технологією фотополімерного 3D-друку. Для досягнення поставленої мети розроблено комплекс математичних, імітаційних та фізичних моделей процесу автоматизованого керування фотополімерним 3D-друком як об'єкта дослідження.

У ході виконання дослідження:

- проведено аналіз технологічних параметрів процесу фотополімерного 3D-друку та встановлено їх вплив на якісні показники, що дозволило виявити функціональні залежності між основними видами дефектів і керуючими параметрами процесу та побудувати експериментальну нелінійну регресійну модель;

- здійснено дослідження тестових моделей та їх типів, що дало змогу систематизувати підходи до оцінювання впливу технологічних факторів і узагальнити класифікацію дефектів фотополімерного друку;

- виконано математичний аналіз впливу ключових факторів на формування дефектів, зокрема відхилення розмірів базових шарів, що забезпечило підвищення продуктивності процесу фотополімерного друку на 13% за рахунок оптимізації підбору технологічних параметрів;

- реалізовано факторний аналіз експериментальних даних з метою визначення взаємодії між параметрами процесу та ідентифікації домінуючих факторів, що впливають на точність формування базових шарів, що створює передумови для побудови системи автоматизованого контролю на основі вимірювання сили відриву моделі від плівки;

- розроблено узагальнену структуру системи автоматизованого керування процесом фотополімерного 3D-друку, яка забезпечує можливість підвищення якісних показників шляхом удосконалення її функціональних підсистем, зокрема керування переміщенням платформи, процесами експонування та полімеризації

шару з урахуванням температурних факторів, а також залежності геометричних відхилень виробу від інтенсивності ультрафіолетового випромінювання;

- здійснено математичне моделювання процесу відриву виробу від плівки, що дозволило розробити програмно-апаратний комплекс моніторингу процесу друку в реальному часі з метою запобігання дефектоутворенню та порушенню адгезії виробу до платформи;

- проведено імітаційне моделювання процесу відриву експонованого фотополімеру з використанням мови програмування Python, що забезпечило верифікацію та уточнення розроблених математичних моделей;

- виконано моделювання елементів системи автоматизованого керування із застосуванням середовища MATLAB Simulink, що дозволило вдосконалити загальну модель системи керування та оцінити показники якості її окремих підсистем;

- проведено експериментальні дослідження сили відриву з подальшою параметричною ідентифікацією моделей на основі факторного аналізу, що забезпечило формування бази для розробки програмного засобу керування процесом друку в реальному часі;

- розроблено конструкцію та програмне забезпечення експериментального устаткування із застосуванням тензометричних та температурних сенсорів;

- створено програмне забезпечення для моніторингу та керування процесом фотополімерного 3D-друку в реальному часі, що дозволило підвищити продуктивність технологічного процесу та зменшити кількість дефектів на 17%.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні програмно-технічного комплексу, який на основі розроблених математичних моделей, методів та засобів керування процесом фотополімерного 3D-друку забезпечує підвищення продуктивності та зниження рівня дефектоутворення при виготовленні тривимірних виробів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Невлюдов І.Ш., Нікітін Д.О., Близнюк Д. С., Гурін Д. В., Разумов-Фризюк Є.А., Стрілець Р.Є. Виготовлення друкованих плат за допомогою технологій 3D друку // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. № 4 (482), 2020. с. 79–86. [https://doi.org/10.15589/znp2020.4\(482\).9](https://doi.org/10.15589/znp2020.4(482).9)

2. Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є., Близнюк Д.С. Порівняльний аналіз технологій 3D прототипування SLA, DLP та LCD. Розробка автоматизованої станції для 3D друку // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 26 листопада 2020. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2020. С. 55 – 56

3. Невлюдов І. Ш., Нікітін Д. О., Близнюк Д. С., Разумов-Фризюк Є. А., Стрілець Р. Е. Створення топології друкованих плат за допомогою фотополімерних адитивних технологій 3D друку // Науково-технічний журнал «Проблеми тертя та зношування», № 1(90), (2021) с. 42-54. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(90\).15247](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(90).15247)

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

5. Nevliudov I., Bliznyuk D., Gurin D., Nikitin D., Razumov-Frizyuk E., Strelets R. Technology of laser exposure of topology of printed boards. International independent scientific journal. №27, VOL. 1, 2021. С. 27–32. URL: https://www.iis-journal.com/wp-content/uploads/2024/03/IISJ_27_1.pdf

6. Nevliudov I., Bliznyuk D., Nikitin D., Razumov-Frizyuk E., Strelets R. Cost Estimation of Photopolymer Resin for 3D Exposure of Circuit Board // Technology

Audit and Production Reserves № 2/2(64), 2022. P.43-49.
<https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256538>

7. Разумов-Фризюк Є. А., Гурін Д. В., Нікітін Д. О., Близнюк Д. С., Стрілець Р. Є. Моделювання шнекового екструдера для FFF 3D друку // Radiotekhnika, 2(209), 206–214. <https://doi.org/10.30837/rt.2022.2.209.21>

8. Невлюдов І.Ш., Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є. Вплив фотополімерних смол для виготовлення друкованих плат // VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2022. С. 94-95. ISSN 2222-4386. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/d03459fa-e85e-48fd-a893-43851c79c1cd/content>.

9. Стрілець Р.Є., Тарапатов А.О. Аналіз параметрів якості, що висуваються до друкованих 3D-моделей // Eurasian scientific discussions. Proceedings of the 10th International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2022. Pp. 143-148. URL: <https://sci-conf.com.ua/x-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-eurasian-scientific-discussions-23-25-10-2022-barselona-ispaniya-arhiv>

10. Nevlyudov I., Razumov-Frizyuk E., Nikitin D., Badaniuk I., Strelets R. // Practical results of the study of photopolymer exposure of printed circuit board topology. ISBN 978-9984-891-22-4 UDC 658.012.32 Information systems in project and program management, [Text]: Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga: ISMA, 2023. 317 p. Recommended for publication by the Kharkiv National University of Radio Electronics (protocol No. 10 of October 06, 2023)

11. Невлюдов І., Стрілець Р., Близнюк Д. Забезпечення якісних показників фотополімерного 3D-друку за допомогою математичного моделювання і тестових моделей.// Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2024. No2 (28), С. 96-107 DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.2.096>

12. Невлюдов І.Ш., Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є., Баданюк І.О. Візуальний контроль якості поверхні друківаних виробів за технологією FDM/FFF. Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні системи в управлінні проєктами та програмами», Коблево, 9–13 вересня 2024 р. Збірник праць.—Харків: ХНУРЕ, 2024. 167-170с. URL: <https://mmp-conf.org/documents/archive/proceedings2024.pdf#page=168>

13. Nevliudov, I., Nikitin, D., Badanyuk, I., Strelets, R., & Korotun, Y. Factor Analysis of Photopolymer Resins for 3D Printing. *Journal of Natural Sciences and Technologies*, 1(1), 166-172. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8088615>.

14. Nevlyudov Igor, Nikitin Dmytro, Blyzniuk Danylo, Strelets Roman. Features of Photopolymer 3D Printing Technology. *Journal of Natural Sciences and Technologies*, 3(2), 318-322. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14542531>.

15. Нікітін Д.О. Моделі і методи керування технологічним процесом виготовлення друківаних плат за технологією фотополімерного 3D-друку: дис. доктора філософії: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. Харків, 2024. 205 с.

16. Gebhardt A., Kessler J., Thurn L, Hanser Carl Verlag. 3D Printing: Understanding Additive Manufacturing. GmbH & Company KG, 2018. 204 p.

17. Ian Wimpenny D., Pulak M. Pandey, Jyothish Kumar L. *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*. Springer, 2016. 186 p.

18. Іскович-Лотоцький Р.Д. Сучасні адитивні технології 3D-друку. Особливості практичного застосування : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ 2021, 105 с.

19. Cumming R. *3D Printing For Dummies* / Richard Cumming. : Wiley. John Wiley & Sons, LTD, 2023 – 416 с.

20. Манжілевський, О. Д., Іскович-Лотоцький Р. Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навчальний посібник – Вінниця : ВНТУ, 2021 – 105 с

21. Сізов В.Д., Сороквашин С.В. Основи 3D-друку: електронний посібник. Дніпро: Дніпропетровський центр професійно-технічної освіти державної служби зайнятості, 2018 – 120 с.

22. Балабанов І. В. Моделювання параметрів експонування топології при автоматизованому виробництві друкованих плат : пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / І. В. Балабанов ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2024. – 80 с.

23. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (І частина) / Г. О. Андрощук // Наука, технології, інновації. 2017. № 1. С. 68-77.

24. Тулашвілі Ю.Й., Лук'янчук Ю.А. Використання сучасних SLA засобів в адитивних ІТ-технологіях // *The XXIII International Science Conference «Theory, practice and science»*, April 27 – 30, 2021, Tokyo, Japan. P 462 – 467. ISBN-978-1-63848-669-5. <https://doi.org/10.4699/ISG.2021.I.XXIII>.

25. Rossi, S.; Puglisi, A.; Benaglia, M. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing in Organic Synthesis. *ChemCatChem* 2018, 10, 1512– 1525, <https://doi.org/10.1002/cctc.201701619>.

26. Dinesh K. Patel, Amir Hosein Sakhaei, Michael Layani, Biao Zhang, Qi Ge, Shlomo Magdassi, Highly Stretchable and UV Curable Elastomers for Digital Light Processing Based 3D Printing, *Adv. Mater.*, 2017, <https://doi.org/10.1002/adma.201606000>.

27. Xue D., Zhang J. and Wang Y., et al. Digital light processing-based 3D printing of cell-seeding hydrogel scaffolds with regionally varied stiffness, *ACS Biomater. Sci. Eng.*, 2019, 5 , 4825 –4833.

28. Zhou L. Y., Fu J. and He Y. A review of 3D printing technologies for soft polymer materials, *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30 , 2000187.

29. Layani M. , Wang X. and Magdassi S. Novel materials for 3D printing by photopolymerization, *Adv. Mater.*, 2018, 30 , e1706344.

30. Traugutt N. A., Mistry D. and Luo C., et al. Liquid-crystal-elastomer-based dissipative structures by digital light processing 3D printing, *Adv. Mater.*, 2020, 32 , e2000797.

31. O. Santoliquido , P. Colombo and A. Ortona , Additive Manufacturing of ceramic components by Digital Light Processing: A comparison between the “bottom-up” and the “top-down” approaches, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2019, 39 , 2140 –2148.

32. Caprioli M., Roppolo I. and Chiappone A. , et al. 3D-printed self-healing hydrogels via Digital Light Processing, *Nat. Commun.*, 2021, 12 , 2462.

33. Zhang, J.; Xiao, P. 3D Printing of Photopolymers. *Polym. Chem.* 2018, 9, 1530–1540.

34. Ambrosio D., Gabrion X., Malécot P., Amiot F., Thibaud S. Influence of manufacturing parameters on the mechanical properties of projection stereolithography–manufactured specimens, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 106 (2020) 265–277, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04415-5>.

35. Dzadz Ł., Pszczółkowski B. Analysis of the influence of UV light exposure time on hardness and density properties of SLA models, *Tech. Sci.* 23 (2020) 175–184, <https://doi.org/10.31648/ts.6119>

36. Dall’Argine, C.; Hochwallner, A.; Klikovits, N.; Liska, R.; Stampf, J.; Sangermano, M. Hot-Lithography SLA-3D Printing of Epoxy Resin. *Macromol. Mater. Eng.* 2020, 305 (10). DOI: 10.1002/mame.202000325.

37. Ligon, S. C.; Liska, R.; Stampf, J.; Gurr, M.; Mülhaupt, R. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chem. Rev.* 2017, 117, 10212–10290.

38. Fu, J.; Yin, H.; Yu, X.; Xie, C.; Jiang, H.; Jin, Y.; Sheng, F. Combination of 3D Printing Technologies and Compressed Tablets for Preparation of Riboflavin Floating Tablet-in-Device (TiD) Systems. *Int. J. Pharm.* 2018, 549, 370–379.

39. Lim, K. S.; Schon, B. S.; Mekhileri, N. V.; Brown, G. C. J.; Chia, C. M.; Prabakar, S.; Hooper, G. J.; Woodfield, T. B. F. New VisibleLight Photoinitiating System for Improved Print Fidelity in GelatinBased Bioinks. *ACS Biomater. Sci. Eng.* 2016, 2, 1752–1762.

40. Літовченко П.І., Іванова Л.П., Технологія конструкційних матеріалів: навч. Посібник. Харків, НА НГУ, 2016. 306 с.
41. Мамуня Є.П., Юрженко М.В., Лебедєв Є.В. та ін. Електроактивні полімерні матеріали. К. : Альфа Реклама, 2013. 402 с.
42. Мельник Л.І. Хімія і фізика полімерів: навч. посіб. Київ : НТУУ "КПІ" 2016, 161 с.
43. Тагер А.А. Фізико-хімія полімерів. В-во. 4-е, перер. і доповн., переклад. К.: Науковий світ, 2007. 576 с.
44. Віленський В.О. Полімери: синтез, модифікація, дослідження : навчальний посібник. Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2024. 348 с.
45. Bagheri A., Jin J. Photopolymerization in 3D Printing. ACS Applied Polymer Materials. ACS Appl. Polym. Mater. 2019, 1, 4, 593–611 <https://doi.org/10.1021/acsapm.8b00165>
46. Гетьманчук, Ю.П. Хімія та технологія полімерів / Ю. П. Гетьманчук, М. М. Братичак. Л. : "Бескид Біт", 2006. 495 с.
47. Фартушна А.Ю., Мацюк І.М., Твердохліб О.М. Вивчення технічних характеристик фотополімерних матеріалів та їх застосування у дисципліні «Технології 3D прототипування» // Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості і транспорту 2021, м. Дніпро, 23-24 квітня : зб. наук. пр. міжнар. конф. С. 128-132. [Електронний ресурс] URL <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/160301>.
48. Нікітін Д.О., Коротун Є.В. Дослідження параметрів фотополімерної смоли для адитивного 3D-друку // Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики: матеріали II Міжнародної наукової конференції, м. Кривий Ріг, 10 січня, 2024р. / Міжнародний центр наукових досліджень. Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп, 2024. С. 292-294 с. ISBN 978-617-8126-97-1. <https://doi.org/10.30888/2663-571210.36074/mcnd-19.01.2024>.
49. Балабанов, І. В. (2023). Визначення залежності часу та інтенсивності випромінювання на температуру фотополімерної смоли (Doctoral dissertation, ХНУРЕ).

50. Нікітін Д. О. Розробка моделі керуванням температури фотополімерної смоли на базі LCD-технології 3D-друку / Д. О. Нікітін // Системи управління, навігації та зв'язкою. – 2024. – № 1(75) . – С. 31 – 37.

51. NanoDLP [Type of medium]. Available: <https://docs.nano3dtech.com/start/introduction/>.

52. ChiTuBox [Type of medium]. Available: <https://docs.chitubox.com/en-US>

53. Valentina G. Sysyuk, Vasil M. Granchak. Optical and polymerization characteristics of the materials for 3D-printing depending on the nature of their composite component // Publishing House “*Akademperiodyka*” National Academy of Sciences of Ukraine 2017. p 226 – 237. <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.444.226>.

54. Чучман Ю. І. Технологія машинобудування для електромеханіків. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2001. 348 с.

55. Кірілеско О., Строяновський В. Основи метрології, стандартизації, сертифікації та управління якістю. Вінниця: Медобори-2006, 2016. 480 с.

56. Клименко Л. П., Пізінцалі Л. В., Александровська Н. І., Євдокимов В. Д. Метрологія, стандартизація та управління якістю. Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. 243 с.

57. Федоров Г.Є., Ямшинський М.М., Фесенко А.М., Фесенко М.А. Контроль якості продукції в машинобудуванні: Навч. посіб. К.: ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2008. 352 с.

58. Суберляк О. В., Скорохода В. Й., Семенюк Н. Б. Теоретичні основи хімії та технології полімерів. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. 340 с. ISBN 978-617-607-612-4.

59. Радченко С. Г. Методология регрессионного анализа: монографія / С. Г. Радченко. К.: «Корнійчук», 2011. 376 с.

60. Важинський С. Е. Методика та організація наукових досліджень / С. Е. Важинський, Т. І. Щербак. Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. 260 с.

61. Методологія наукових досліджень технологічних процесів / П. Білей, М. Адамовський, Я. Ханік, Н. Довга, Л. Сорока. Львів: Видав. НУ «Львівська політехніка», 2003. 352 с.

62. Дефекти та вимоги до якості ЮТ [Type of medium]. Available: <https://vseosvita.ua/library/embed/0100cue4-c3ba.docx.html>.

63. Варенко В.М. Основи аналітики: навч. посіб. Київ: Видавництво Ліра-К, 2022. 248 с. ISBN 978-617-520-284-5.

64. Statistical Methods in Psychiatry Research and SPSS. 2nd Edition./ By M. Venkataswamy Reddy. [Book]. Apple Academic Press. 2019. P.442. <https://doi.org/10.1201/9780429023309>.

65. Noorani R. 3D Printing: Technology, Applications, and Selection., CRC Press, 2017. 271 p

66. Михайлюк В., Ердей З., Джус А., Дічюк В., Родіч В. Проектування та 3D прототипування. Івано-Франківськ : Фоліант, 2022. 124 с.

67. Mandrycky c. Et al. 3D bioprinting for engineering complex tissues //biotechnology advances. 2016. т. 34. №. 4. С. 422-434.

68. Doroshenko V., Kaliuzhnyi P., Kolomiitsev S. Examples of 3D-Technologies for the Production of Hardware and Polymer Patterns // December 2021, *Casting processes* 146(4):p 48-54.: <https://doi.org/10.15407/plit2021.04.048>.

69. PFA/FEP Film [Type of medium]. Available: <https://www.junkosha.com/en/products/AFZ-01>.

70. FEP Film [Type of medium]. Available: <https://holscoteurope.com/ketchup/uploads/2015/03/FEP-Film-brochure.pdf>

71. Teflon FEP [Type of medium]. Available: <https://www.teflon.com/en/-/media/files/teflon/teflon-fep-film-properties-bulletin.pdf?rev=d2270463995548c1a469d15955828540>

72. FEP datasheet and FEP properties [Type of medium]. Available: <https://fep-film.com/fep-datasheet-fep-properties/>

73. Photopolymer Resin From ELEGOO [Type of medium]. Available: <https://gzhl.s.at/blob/ldb/d/0/9/2/75b7bef452a254ca4c3d96ec9124dee5c8a9.pdf>

74. ESD-Rigid Photopolymer Resin Material Properties [Type of medium]. Available: https://www.b9c.com/hubfs/Material%20Data%20Sheets/B9Creations%20ESD%20-%20Rigid%20Material%20Properties.pdf?srltid=AfmBOooEv_XPWyjeWbZfN2oZlHLjC7ryru-LyE9E1JSgmD3WCo2AhCH1.

75. Brian H. Hahn, Daniel T. Valentine. Essential MATLAB for Engineers and Scientists, *Academic Press*. ISBN: 978-0-08-100877-5, <https://doi.org/10.1016/C2015-0-02182-7>. (2017).

76. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges, *Compos. B Eng.* 143 (2018) 172–196, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>

77. Zhang F., Zhu L., Li Z., Wang S., Shi J. The recent development of vat photopolymerization: a review. *Addit. Manuf.* (2021) 48, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102423>

78. Shaukat U., Rossegger E., Schlögl S. A review of multi-material 3D printing of functional materials via vat photopolymerization. *Polym. (Basel)* (2022) 14, <https://doi.org/10.3390/polym14122449>.

79. Mu, Q.; Wang, L.; Dunn, C. K.; Kuang, X.; Duan, F.; Zhang, Z.; Qi, H. J.; Wang, T. Digital Light Processing 3D Printing of Conductive Complex Structures. *Addit. Manuf.* 2017, 18, 74–83.

80. Cullen, A. T.; Price, A. D. Digital Light Processing for the Fabrication of 3D Intrinsically Conductive Polymer Structures. *Synth. Met.* 2018, 235, 34–41.

81. Jasinski, F.; Zetterlund, P. B.; Braun, A. M.; Chemtob, A. Photopolymerization in Dispersed Systems. *Prog. Polym. Sci.* 2018, 84, 47–88.

82. Al Mousawi, A.; Garra, P.; Schmitt, M.; Toufaily, J.; Hamieh, T.; Graff, B.; Fouassier, J. P.; Dumur, F.; Lalevee, J. 3-Hydroxyflavone and N-Phenylglycine in High Performance Photoinitiating Systems for 3D Printing and Photocomposites Synthesis. *Macromolecules* 2018, 51, 4633–4641.

83. Sycks, D. G.; Wu, T.; Park, H. S.; Gall, K. Tough, Stable Spiroacetal Thiol-Ene Resin for 3D Printing. *J. Appl. Polym. Sci.* 2018, 135, 1–12.

84. Chen, L.; Wu, Q.; Wei, G.; Liu, R.; Li, Z. Highly Stable ThiolEne System: From Structure-Property Relationship to DLP 3D Printing. *J. Mater. Chem. C* 2018, 6, 11561–11568.

85. Al Mousawi, A.; Poriel, C.; Dumur, F.; Toufaily, J.; Hamieh, T.; Fouassier J. P.; Lalevee J. Zinc. Tetraphenylporphyrin as High Performance Visible Light Photoinitiator of Cationic Photosensitive Resins for LED Projector 3D Printing Applications. *Macromolecules* 2017, 50, 746–753.

86. Park, H. K.; Shin, M.; Kim, B.; Park, J. W.; Lee, H. A Visible Light-Curable yet Visible Wavelength-Transparent Resin for Stereolithography 3D Printing. *NPG Asia Mater.* 2018, 10, 82–89.

87. Vatani, M.; Choi, J. W. Direct-Print Photopolymerization for 3D Printing. *Rapid Prototyp. J.* 2017, 23, 337–343.

88. Mu, X.; Bertron, T.; Dunn, C.; Qiao, H.; Wu, J.; Zhao, Z.; Saldana, C.; Qi, H. J. Porous Polymeric Materials by 3D Printing of Photocurable Resin. *Mater. Horiz.* 2017, 4, 442–449.

89. Shanmugam, S.; Xu, J.; Boyer, C. Living Additive Manufacturing. *ACS Cent. Sci.* 2017, 3, 95–96.

90. Bagheri, A.; Jin, J. Photopolymerization in 3D Printing. *ACS Appl. Polym. Mater.* 2019, 1, 593–611.

91. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T., and Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites Part B: Engineering*, 2018, pp. 172-196.

92. Are FEP alternatives worth it? ACF vs. nFEP vs. FEP films. [Type of medium]. Available: <https://ameralabs.com/blog/are-fep-alternatives-worth-it-acf-vs-nfep-vs-fep-films/?srsltid=AfmBOoo2Fzqp5QkPW8ckauvkrItfQoHTfdvan5ObJqTEoseu3T7lB6Ga>.

93. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма

«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 144 с.

94. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного управління» для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології денної форми навчання [Електронний ресурс] / [Упорядник Я. В. Корпань]; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси: ЧДТУ, 2019. 124 с.

95. Теорія автоматичного управління. Нелінійні та дискретні системи: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков. Електронні текстові дані . Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 98 с.

96. Bagheri A., and Jin J. Photopolymerization in 3D printing, in ACS Applied Polymer Materials, 2019, pp. 593-611.

97. Stansbury J.W., Idacavage M.J. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. Dental Materials, 2016, pp. 54-64.

98. Steyrer B., Buseti B., Harakály G., Liska R., and Stampfl J. Hot Lithography vs. room temperature DLP 3D-printing of a dimethacrylate, in Additive Manufacturing, 2018, pp. 209-214.

99. Zhang X., Xu Y., Li L., Yan B., Bao J., and Zhang A. Acrylate-based photosensitive resin for stereolithographic three-dimensional printing, in Journal of Applied Polymer Science, 2019.

100. Nadagouda M N, Ginn M, Rastogi V. A review of 3D printing techniques for environmental applications[J]. Current opinion in chemical engineering, 2020, 28: 173-178.

101. Kadry H., Wadnap S., Xu C., and Ahsan F. Digital light processing (DLP) 3D-printing technology and photoreactive polymers in fabrication of modified-release tablets, in European Journal of Pharmaceutical Sciences, 2019, pp. 60-67.

102. Zhang J., and Xiao P. 3D printing of photopolymers, in *Polymer Chemistry*, 2018, pp. 1530-1540.
103. Nowak D., Ortyl J., Kamioska-Borek I., Kukuła K., Topa M., and Popielarz R. Photopolymerization of hybrid monomers: Part I: Comparison of the performance of selected photoinitiators in cationic and free-radical polymerization of hybrid monomers, in *Polymer Testing*, 2017, pp. 313-320.
104. Zhao T., Li X., Yu R., Zhang Y., Yang X., Zhao X., Wang L., and Huang W. Silicone–epoxy-based hybrid photopolymers for 3D printing, in *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2018, pp. 1700530.
105. Yang X., Liu J., Wu Y., Liu J., Cheng F., Jiao X., and Lai G. Fabrication of UV-curable solvent-free epoxy modified silicone resin coating with high transparency and low volume shrinkage, in *Progress in Organic Coatings*, 2019, pp. 96-100.
106. Hull C. On stereolithography, in *Virtual and Physical Prototyping*, 2012, pp. 177-177.
107. Wang F., Chong Y., Wang F., and He C. Photopolymer resins for luminescent three-dimensional printing, in *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, pp. 44988.
108. Ullah A., Ur Rehman A., Salamci M. U., Pıtır F. and Liu T. *Rapid Prototyp. J.*, 2022, 28 , 1796 –1807.
109. Khorasani M., Loy J., Ghasemi A. H., Sharabian E., Leary M., Mirafzal H., Cochrane P. , Rolfe B. and Gibson I. *Rapid Prototyp. J.*, 2022, 1462 –1475.
110. Bártolo P. J. *Stereolithography: Materials, Processes and Applications* , P. J. BártoloSpringer US, Boston, MA, 2011, pp. 1–36.
111. Rossi, S.; Puglisi, A.; Benaglia, M. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing in Organic Synthesis. ChemCatChem* 2018, 10, 1512–1525. DOI: <https://doi.org/10.1002/cctc.201701619>

ДОДАТОК А

Код файлу Kontrol.py

```
import sys
import serial
import threading
import json
import time
import os
import serial.tools.list_ports
import pyqtgraph as pg
from PyQt6.QtWidgets import QApplication, QWidget, QVBoxLayout, QLabel,
QPushButton, QMessageBox, QComboBox, QLineEdit, QFileDialog
from PyQt6.QtCore import QTimer, Qt
from PyQt6.QtGui import QFont, QPixmap

import analyze_images
import analyze_sensor

# Глобальні змінні
running = True
sensor_data = []
THRESHOLD_FORCE = 0.0
TEMPERATURE_MIN = 0.0
TEMPERATURE_MAX = 40.0
EXPOSURE_TIME_NORMAL = 2.0
EXPOSURE_TIME_BASE = 20.0
TEMPERATURE_COEFFICIENT = 1.0
IMAGE_ANALYSIS_FOLDER = ""

class TimeAxisItem(pg.AxisItem):
    def tickStrings(self, values, scale, spacing):
        return [time.strftime("%H:%M:%S", time.localtime(v)) for v in values]

class PrintMonitorApp(QWidget):
    def __init__(self):
        super().__init__()

        self.serial_thread = None
        self.serial_port = None
        self.baud_rate = 9600

        self.force_values = []
        self.temp_values = []
        self.time_values = []

        self.live_spikes = []
        self.image_analysis_data = []
```

```

self.layout = QVBoxLayout()
self.init_ui()

def init_ui(self):
    self.image_analysis_data = analyze_images.load_image_data()

    self.setWindowTitle("Моніторинг 3D-друку")
    self.setGeometry(400, 200, 700, 600)

    self.status_label = QLabel("Оберіть порт і швидкість:")
    self.status_label.setFont(QFont("Arial", 14))
    self.layout.addWidget(self.status_label)

    self.port_select = QComboBox()
    self.update_ports()
    self.layout.addWidget(self.port_select)

    self.baud_select = QComboBox()
    self.baud_select.addItem(["9600", "115200", "57600", "38400",
"19200", "4800"])
    self.layout.addWidget(self.baud_select)

    self.exposure_time_normal_input = QLineEdit()
    self.exposure_time_normal_input.setPlaceholderText(f"Час експонування
звичайних шарів (сек), зараз: {EXPOSURE_TIME_NORMAL}")
    self.layout.addWidget(self.exposure_time_normal_input)

    self.exposure_time_base_input = QLineEdit()
    self.exposure_time_base_input.setPlaceholderText(f"Час експонування
базових шарів (сек), зараз: {EXPOSURE_TIME_BASE}")
    self.layout.addWidget(self.exposure_time_base_input)

    self.temp_coeff_input = QLineEdit()
    self.temp_coeff_input.setPlaceholderText(f"Температурний коефіцієнт,
зараз: {TEMPERATURE_COEFFICIENT}")
    self.layout.addWidget(self.temp_coeff_input)

    self.folder_label = QLabel("Папка для аналізу: Не вибрано")
    self.layout.addWidget(self.folder_label)

    self.folder_button = QPushButton("Вибрати папку для аналізу")
    self.folder_button.clicked.connect(self.select_folder)
    self.layout.addWidget(self.folder_button)

    self.connect_button = QPushButton("Підключитися")
    self.connect_button.setStyleSheet("background-color: blue; color:
white;")
    self.connect_button.clicked.connect(self.start_monitoring)
    self.layout.addWidget(self.connect_button)

    self.force_label = QLabel("Сила відрива:  $-H \cdot 10^{-3}$ ")

```

```

self.force_label.setFont(QFont("Arial", 16))
self.layout.addWidget(self.force_label)

self.temp_label = QLabel("Температура: – °C")
self.temp_label.setFont(QFont("Arial", 16))
self.layout.addWidget(self.temp_label)

self.live_layer_label = QLabel("")
self.live_layer_label.setFont(QFont("Arial", 16))
self.layout.addWidget(self.live_layer_label)

self.live_image_label = QLabel("")
self.layout.addWidget(self.live_image_label)

time_axis = TimeAxisItem(orientation='bottom')
self.graph_widget = pg.PlotWidget(axisItems={'bottom': time_axis})
self.layout.addWidget(self.graph_widget)

self.force_curve = self.graph_widget.plot(pen="r", name="Маса (г)")
self.temp_curve = self.graph_widget.plot(pen="b", name="Температура
(°C)")

self.stop_button = QPushButton("Остановити")
self.stop_button.setStyleSheet("background-color: red; color:
white;")

self.stop_button.clicked.connect(self.stop_monitoring)
self.layout.addWidget(self.stop_button)

self.exit_button = QPushButton("Вихід")
self.exit_button.setStyleSheet("background-color: black; color:
white;")

self.exit_button.clicked.connect(self.close_app)
self.layout.addWidget(self.exit_button)

self.setLayout(self.layout)

self.graph_timer = QTimer()
self.graph_timer.timeout.connect(self.update_graph)
self.graph_timer.start(250)

def select_folder(self):
    """Відкриває вікно вибору папки для аналізу зображень."""
    global IMAGE_ANALYSIS_FOLDER
    folder = QFileDialog.getExistingDirectory(self, "Вибрати папку для
аналізу зображень")
    if folder:
        IMAGE_ANALYSIS_FOLDER = folder
        self.folder_label.setText(f"Папка для аналізу:
{IMAGE_ANALYSIS_FOLDER}")
        self.image_analysis_data =
analyze_images.analyze_images_and_save_info()

```

```

def update_ports(self):
    """Отримання списку доступних COM-портів."""
    ports = [port.device for port in serial.tools.list_ports.comports()]
    if not ports:
        ports.append("Немає доступних портів")
    self.port_select.clear()
    self.port_select.addItems(ports)

def start_monitoring(self):
    """Запуск потоку для зчитування даних."""
    global running
    running = True
    self.serial_thread = threading.Thread(target=self.read_serial,
daemon=True)
    self.serial_thread.start()

def read_serial(self):
    """Читання даних з Arduino в окремому потоці."""
    global running
    start_timestamp = time.time()
    self.live_spikes.clear()

    self.serial_port = self.port_select.currentText()
    self.baud_rate = int(self.baud_select.currentText())

    spike_threshold = analyze_sensor.FORCE_THRESHOLD
    is_spike_detected = False

    try:
        ser = serial.Serial(self.serial_port, self.baud_rate, timeout=1)
        self.status_label.setText(f"Підключено до {self.serial_port} @
{self.baud_rate}")
        self.status_label.setStyleSheet("color: green;")
    except serial.SerialException as e:
        QMessageBox.critical(self, "Помилка підключення", f"Не вдалося
підключитися: {e}")
        return

    while running:
        try:
            line = ser.readline().decode("utf-8").strip()
            if not line: continue

            force, temperature, timestamp = self.process_data(line)
            if not force or not temperature or not timestamp: continue

            mas_vat = 624
            mas_phot = 250

            k_value_exp = 32.05

```

```

k_value_area = 140.4
with open("image_analysis_data.json", "r", encoding="utf-8")
as file:
    image_data = json.load(file)

    for item in image_data:
        item["calculatedForce"] = item["objectAreaMm"] *

k_value_area

with open("sensor_data.json", "w", encoding="utf-8") as file:
    json.dump(sensor_data, file, ensure_ascii=False,
indent=4)

if temperature <= 23:
    TEMPERATURE_COEFFICIENT = 1

if force >=1:
    force_s = ((force * 2) + mas_vat + mas_phot ) *
TEMPERATURE_COEFFICIENT
else:
    force_s = force

is_force_cross_threshold = force_s >

spike_threshold

if not is_spike_detected and is_force_cross_threshold:
    is_spike_detected = True
    self.live_spikes.append({
        "force": [force_s],
        "temperature": [temperature]
    })
elif is_spike_detected and is_force_cross_threshold:
    last_spike = self.live_spikes[-1]
    if last_spike:
        last_spike["force"].append(force_s)
        last_spike["temperature"].append(temperature)

elif is_spike_detected and not is_force_cross_threshold:
    last_index = len(self.live_spikes) -
1

    last_spike = self.live_spikes[last_index]

    if last_spike: self.spike_detected(last_index,

last_spike)

    is_spike_detected = False
elif not is_spike_detected and not is_force_cross_threshold:
    is_spike_detected = False

self.force_label.setText(f"Сила: {force_s:.2f} r")
self.temp_label.setText(f"Температура: {temperature:.2f} °C")

```

```

        self.time_values.append(timestamp - start_timestamp)
        self.force_values.append(force_s)
        self.temp_values.append(temperature)

        sensor_data.append({
            "timestamp": timestamp,
            "force": force_s,
            "temperature": temperature,
        })

        print("Spikes", len(self.live_spikes))
    except Exception:
        pass

def process_data(self, data):
    """Обробка даних від Arduino."""
    try:
        values = data.split(";")

        if len(values) == 0:
            return None, None, None

        temp_str = values[0]
        force_str = values[1]

        if temp_str is None or force_str is None:
            return None, None, None

        temperature = float(temp_str.split(":")[1])
        force = float(force_str.split(":")[1])
        timestamp = time.time()

        return force, temperature, timestamp
    except (ValueError, IndexError):
        return None, None, None

def update_graph(self):
    """Оновлення графіка."""
    if len(self.time_values) > 0 and len(self.force_values) > 0:
        self.force_curve.setData(self.time_values, self.force_values)
        self.temp_curve.setData(self.time_values, self.temp_values)
    self.graph_widget.repaint()

def save_data(self):
    """Збереження даних в JSON с позначками часу."""
    with open(os.path.join(os.path.dirname(__file__), "results",
"sensor_data.json"), "w", encoding="utf-8") as file:
        json.dump(sensor_data, file, ensure_ascii=False, indent=4)

def spike_detected(self, index, spike_data):
    if spike_data and len(self.image_analysis_data) > 0:

```

```

        analyzed_image = self.image_analysis_data[index]
        if analyzed_image:
            spike_force = max(spike_data["force"])
            actual_image =
 QPixmap(analyzed_image["imagePath"]).scaled(
                200, 200,
                Qt.AspectRatioMode.KeepAspectRatio,
                Qt.TransformationMode.SmoothTransformation
            )

            self.live_layer_label.setText(f"Горизонтальний переріз:
Номер:{analyzed_image["imageNumber"]}, Площа:{analyzed_image["objectAreaMm"]}, Сила
в момент відриву:{spike_force}")
            self.live_image_label.setPixmap(actual_image)
        else:
            self.live_layer_label.setText("There is no such image. It
can be error or BAD PRINTING PROCESS")

    def compare_force(calculated_force: float, actual_force: float,
tolerance: float = 5.0) -> str:
        difference = abs(calculated_force - actual_force)
        percent_difference = (difference / calculated_force) * 100 if
calculated_force != 0 else 0
        if percent_difference <= tolerance:
            return self.result_label.setText(f" Совпадает (отклонение
{percent_difference:.2f}%)")
        else:
            return self.result_label.setText(f"⚠ Несовпадение! Отклонение
{percent_difference:.2f}%, разница {difference:.2f} г")

    def stop_monitoring(self):
        """Зупинка моніторингу."""
        global running
        running = False
        self.status_label.setText("Моніторинг зупинено")
        self.status_label.setStyleSheet("color: gray;")
        self.save_data()
        analyze_sensor.analyze_sensor_data()

    def close_app(self):
        """Закриття програми."""
        global running
        running = False
        self.close()

if __name__ == "__main__":
    app = QApplication(sys.argv)
    window = PrintMonitorApp()
    window.show()

```

```
sys.exit(app.exec())
```

ДОДАТОК Б

Код файлу `analyz_image.py`

```
import cv2
import numpy as np
import os
import matplotlib.pyplot as plt
import json

PX_TO_MKM_SIZE = 0.033
MESSURMENT_DELTA = 0.0 # TODO: Указать правильное среднее отклонение

IMAGES_FOLDER = os.path.join(os.path.dirname(__file__), "content",
"3DBenchy")

RESULTS_FOLDER = os.path.join(os.path.dirname(__file__), "results")
IMAGE_ANALYSIS_FILE_PATH = os.path.join(RESULTS_FOLDER,
"image_analysis_data.json")
SENSOR_DATA_FILE_PATH = os.path.join(RESULTS_FOLDER, "sensor_data.json")

# анализ картинок
def getImageData(imageName):
    imagePath = os.path.join(IMAGES_FOLDER, imageName)
    image = cv2.imread(imagePath, cv2.IMREAD_GRAYSCALE)

    if image is None:
        raise ValueError("Ошибка загрузки картинки.")

    white_pixel_count = int(np.sum(image == 255))
    object_size = (white_pixel_count * PX_TO_MKM_SIZE) / 1000

    return {"objectPixels": white_pixel_count, "objectAreaMm": object_size}

def getImagePaths():
    image_paths = sorted(os.listdir(IMAGES_FOLDER), key=lambda x:
int(os.path.splitext(x)[0]))
    return image_paths

def analayze_image_layers():
    image_analysis = []
    images_paths = getImagePaths()

    print("=== Будет проанализировано", len(images_paths), "изображений ===")

    for image_path in images_paths:
        image_data = getImageData(image_path)
```

```

        image_data = {
            "imageNumber": int(os.path.splitext(image_path)[0]),
            "objectPixels": image_data["objectPixels"],
            "objectAreaMm": image_data["objectAreaMm"],
            "imagePath": os.path.join(IMAGES_FOLDER, image_path)
        }

        image_analysis.append(image_data)

    return image_analysis

def save_plot_as_image(data, output_path, plotName):
    plt.figure(figsize=(6, 4))
    plt.plot(data, marker='o', linestyle='-')
    plt.xlabel("X-axis")
    plt.ylabel("Y-axis")
    plt.title(plotName)

    plt.savefig(output_path, dpi=300, bbox_inches='tight')
    plt.close()

def analyze_images_and_save_info():
    image_data = analyze_image_layers()

    with open(IMAGE_ANALYSIS_FILE_PATH, "w", encoding="utf-8") as file:
        json.dump(image_data, file, ensure_ascii=False, indent=4)

    object_area_list = [item["objectAreaMm"] for item in image_data]
    object_pixels_list = [item["objectPixels"] for item in image_data]

    save_plot_as_image(object_area_list, os.path.join(RESULTS_FOLDER,
"area_plot_mm.png"), "Area layer plot")
    save_plot_as_image(object_pixels_list, os.path.join(RESULTS_FOLDER,
"pixel_plot.png"), "Pixel plot")

    return image_data

def load_image_data():
    data = []

    try:
        with open(IMAGE_ANALYSIS_FILE_PATH, "r", encoding="utf-8") as file:
            data = json.load(file)
    except Exception as e:
        print(f"Error reading image data: {e}")

    return data

```

ДОДАТОК В

Код файлу analyze_sensor.py

```
import analyze_images
import os
import json
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.signal import find_peaks

SENSOR_DATA_FILE_PATH = os.path.join(analyze_images.RESULTS_FOLDER,
"sensor_data.json")
FORCE_THRESHOLD = 40

# анализ сенсорных данных
def load_json_data(file_path):
    try:
        if os.path.exists(file_path):
            with open(file_path, "r", encoding="utf-8") as f:
                data = json.load(f)

                if not isinstance(data, list):
                    print("Data is not array")
                    return None

                return data
        else:
            return None
    except:
        return None

def find_peaks_data(peaks_list):
    peaks, _ = find_peaks(peaks_list, height=FORCE_THRESHOLD)
    spike_data = []

    for peak in peaks:
        spike_data.append({
            "index": peak,
            "value": peaks_list[peak],
        })
    return spike_data

def ploot_with_peaks(x_values, y_values, peaks, save_file):
    plt.plot(x_values, y_values, label="Data")
    if peaks is not None:
        plt.plot([x_values[i] for i in peaks], [y_values[i] for i in peaks],
"ro", label="Detected Spikes")
```

```

plt.xlabel("Time")
plt.ylabel("Y-Value")
plt.savefig(save_file, dpi=300, bbox_inches='tight')
plt.close()

def ploat_all(timestamps, forces, peaks, temperatures, save_file):
    plt.plot(timestamps, forces, label="Force Data")

    if peaks is not None:
        plt.plot([timestamps[i] for i in peaks], [forces[i] for i in peaks],
"ro", label="Detected Spikes")

    plt.plot(timestamps, temperatures, label="Temperature Data")

    plt.xlabel("Time")
    plt.ylabel("Y-Values")
    plt.savefig(save_file, dpi=300, bbox_inches='tight')
    plt.close()

def analyze_sensor_data():
    images_data = load_json_data(analyze_images.IMAGE_ANALYSIS_FILE_PATH)
    sensor_data = load_json_data(SENSOR_DATA_FILE_PATH)

    if images_data is None:
        print("NO IMAGES DATA")
        return

    if sensor_data is None:
        print("NO SENSOR DATA")
        return

    temperatures = [item["temperature"] for item in sensor_data]
    timestamps = [item["timestamp"] for item in sensor_data]

    forces = [item["force"] for item in sensor_data]
    forces_peaks = find_peaks_data(forces)
    peaks = [item["index"] for item in forces_peaks]

    ploat_with_peaks(timestamps, forces, peaks,
os.path.join(analyze_images.RESULTS_FOLDER, "forces_plot.png"))
    ploat_with_peaks(timestamps, temperatures, None,
os.path.join(analyze_images.RESULTS_FOLDER, "temperature_plot.png"))
    ploat_all(timestamps, forces, peaks, temperatures,
os.path.join(analyze_images.RESULTS_FOLDER, "all_plot.png"))

    print("кількість скачків", len(peaks), "повинна співпадати з",
len(images_data))

```

ДОДАТОК Г

Файл image_analysis_data.json

```
[
  {
    "imageNumber": 1,
    "objectPixels": 201288,
    "objectAreaMm": 6.642504,
    "imagePath": "c:\\Users\\Roman\\Desktop\\1\\content\\3DBenchy\\1.png"
  },
  {
    "imageNumber": 2,
    "objectPixels": 202787,
    "objectAreaMm": 6.691971000000001,
    "imagePath": "c:\\Users\\Roman\\Desktop\\1\\content\\3DBenchy\\2.png"
  },
  {
    "imageNumber": 3,
    "objectPixels": 204299,
    "objectAreaMm": 6.741867,
    "imagePath": "c:\\Users\\Roman\\Desktop\\1\\content\\3DBenchy\\3.png"
  },
  {
    "imageNumber": 4,
    "objectPixels": 205790,
    "objectAreaMm": 6.79107,
    "imagePath": "c:\\Users\\Roman\\Desktop\\1\\content\\3DBenchy\\4.png"
  },
  {
    "imageNumber": 5,
    "objectPixels": 207270,
    "objectAreaMm": 6.839910000000001,
    "imagePath": "c:\\Users\\Roman\\Desktop\\1\\content\\3DBenchy\\5.png"
  },
  {
    "imageNumber": 6,
    "objectPixels": 208804,
    "objectAreaMm": 6.890532,
    "imagePath": "c:\\Users\\Roman\\Desktop\\1\\content\\3DBenchy\\6.png"
  },
  {
    "imageNumber": 7,
    "objectPixels": 245298,
    "objectAreaMm": 8.094834,
    "imagePath": "c:\\Users\\Roman\\Desktop\\1\\content\\3DBenchy\\7.png"
  },
]
```

ДОДАТОК Г

Файл sensor_data.json

```
[
  {
    "timestamp": 1740663048.051185,
    "force": -0.31,
    "temperature": 4.51
  },
  {
    "timestamp": 1740663048.992838,
    "force": -0.2,
    "temperature": 3.93
  },
  {
    "timestamp": 1740663049.931266,
    "force": 880.62,
    "temperature": 3.64
  },
  {
    "timestamp": 1740663050.8731432,
    "force": 880.58,
    "temperature": 3.93
  },
  {
    "timestamp": 1740663051.8147612,
    "force": -0.2,
    "temperature": 3.55
  },
  {
    "timestamp": 1740663052.7567255,
    "force": -0.27,
    "temperature": 3.25
  },
  {
    "timestamp": 1740663053.69575,
    "force": 882.4,
    "temperature": 2.96
  },
  {
    "timestamp": 1740663054.6371431,
    "force": 881.82,
    "temperature": 2.86
  },
  {
    "timestamp": 1740663055.5780892,
    "force": 878.3,
    "temperature": 2.96
  },
  {
```

```
    "timestamp": 1740663056.5191133,  
    "force": 0.08,  
    "temperature": 3.25  
  },  
  {  
    "timestamp": 1740663057.4594128,  
    "force": 0.07,  
    "temperature": 3.35  
  },  
  {  
    "timestamp": 1740663058.4006512,  
    "force": 0.19,  
    "temperature": 3.45  
  },  
  {  
    "timestamp": 1740663059.3412786,  
    "force": 876.5,  
    "temperature": 3.35  
  },  
  {  
    "timestamp": 1740663060.282628,  
    "force": 876.18,  
    "temperature": 3.06  
  },  
}
```