

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ МАШИН

До захисту допущено

Завідувач кафедри

Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2024 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 131 Прикладна механіка

на тему **Модулі FDM принтеру для багатоосьового друку.**
Аналіз взаємодії модулів при відтворенні тестових деталей
(комплексний дипломний проєкт)

Виконав студент групи

IV курсу, групи МВ-01

Гаврилова Катерина Олегівна

(прізвище ім'я по батькові)

(підпис)

Керівник проекту

проф., д.т.н. Саленко О.Ф.

(вчена ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

КОНСУЛЬТАНТИ:

РЕЦЕНЗЕНТ:

Доцент кафедри ТМ, к.т.н., доцент Кореньков В.М.

(посада, наукова ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
	A4		Завдання на дипломний проект бакалавра		
			Пояснювальна записка		

Тут повинен бути штамп на 40

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського”
Навчально-науковий Механіко-машинобудівний інститут
Кафедра конструювання машин

Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

Спеціальність _____ **131 Прикладна механіка** _____

(код і назва)

Освітньо-професійна програма _____ **«Конструювання та дизайн машин»**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО** _____

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 202_ р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ

_____ **Гаврилова Катерина Олегівна** _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Модулі FDM принтеру для багатоосьового друку. Аналіз взаємодії модулів при відтворенні тестових деталей (комплексний дипломний проект)

керівник проекту _____ **Саленко Олександр Федорович проф., д.т.н.** _____

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “ _____ ” **2024 року №**

2. Термін подання студентом проекту _____

3. Вихідні дані до проекту _____

4. Зміст пояснювальної записки _____

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка

Студент _____ Гаврилова К.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту _____ Саленко О.Ф.

Реферат

Бакалаврський проект складається з вступу, змісту, двох розділів, висновків, переліку використаних джерел. Робота містить 89 сторінки, 61 рисуноків, 2 таблиці.

Тема проекту: Модулі FDM принтера для багатоосевого друку. Аналіз взаємодії модулів при відтворенні тестових деталей.

Мета проекту: Розробка модулів FDM принтера для багатоосевого друку та їх конструктивне виконання. Проект спрямований на покращення можливостей адитивного виробництва за допомогою додавання додаткових осей руху, що дозволяє друкувати складніші геометричні форми, покращувати якість поверхні та підвищувати міцність виробів.

Ключові слова: *FDM друк, адитивне виробництво, багатоосевий друк, 3D-принтер, модулі, картезіанська система координат, оптимізація, матеріали для 3D-друку, траєкторії руху, пружна система принтера.*

Abstract

The bachelor's project consists of an introduction, a table of contents, two chapters, conclusions, and a list of references. The work comprises 89 pages, 61 figures, and 2 tables.

Project Topic: FDM Printer Modules for Multi-Axis Printing. Analysis of Module Interaction in Reproducing Test Parts.

Project Objective: The development of FDM printer modules for multi-axis printing and their structural implementation. The project aims to improve the capabilities of additive manufacturing by adding additional axes of movement, allowing for the printing of more complex geometric shapes, enhancing surface quality, and increasing the strength of the products.

Keywords: *FDM printing, additive manufacturing, multi-axis printing, 3D printer, modules, Cartesian coordinate system, optimization, 3D printing materials, movement trajectories, printer's elastic system.*

Зміст

Вступ.....	9
1 Адитивне виробництво.....	10
1.1 Загальне поняття 3Д друку	10
1.2 Актуальність адитивного виробництва	13
1.3 Знайомство з існуючою технікою для адитивних технологій	18
1.4 Загальні принципи по шаровій викладки в FDM друці	32
1.5 Переваги FDM друку	35
1.6 Порівняння матеріалів для 3D-друку.....	37
1.7 Аналіз варіантів компоновок звичайних XYZ координатних FDM принтерів	38
1.8 Проблеми та недоліки FDM друку.....	45
1.9 Непланарне викладання філаменту.....	50
1.10 Багатоосьовий друк	53
Висновок	57
2 Застосування обертового модулю в конструкції принтеру	59
2.1 Аналіз взаємодії модулів при відтворенні тестової деталі.....	59
2.2 Схема викладки філаменту тестової деталі	63
2.3 Розрахунок циліндричного тонкостінного сосуда	69
2.4 Статичний і динамічний аналіз пружної системи принтера	75
2.4.1 Розрахунок поворотної платформи столу на прогин.....	75
2.4.2 Аналіз поворотної платформи столу на прогин у Autodesk Inventor	81
2.4.3 Динамічний аналіз компонентів приводу столу.....	84
Висновок	89
Список використаних джерел	91

Вступ

Сучасні технології адитивного виробництва швидко розвиваються, відкриваючи нові можливості для створення складних деталей з високою точністю та швидкістю. Одним із найпопулярніших методів є Fused Deposition Modeling (FDM), що передбачає шарове накладання розплавленого матеріалу для формування тривимірних об'єктів. Проте, традиційні FDM 3D-принтери зазвичай працюють у трьох координатних осях (X, Y, Z), що обмежує їхні можливості при виготовленні складних геометрій і деталей з підтримкою.

Введення багатоосьового друку в FDM-принтери, зокрема принтери картезіанської системи координат, відкриває нові перспективи для покращення якості друку та розширення функціональних можливостей. Багатоосьовий друк дозволяє уникати необхідності в додаткових структурах підтримки, оптимізуючи процес виробництва та знижуючи витрати на матеріали.

Важливим аспектом розробки багатоосьових систем друку є аналіз взаємодії різних модулів принтера. Кожен модуль має свою функцію та впливає на кінцевий результат друку.

Метою даного проєкту є розробка уніфікованих модулів для багатоосьового друку, призначених для FDM 3D-принтерів картезіанської системи координат. Такі модулі повинні забезпечувати покращену точність та якість друку за рахунок оптимізації траєкторій руху друкуючої головки. Зменшення витрат на матеріали шляхом мінімізації необхідності використання підтримуючих структур. Збільшення функціональності принтера для створення складних геометрій та багатошарових деталей.

Успішна реалізація уніфікованих модулів дозволить підвищити продуктивність FDM 3D-принтерів та розширить їх застосування у різних галузях промисловості та дизайну.

1 Адитивне виробництво

Адитивне виробництво (AB), — процес з'єднання матеріалів для виготовлення об'єктів із даних 3D-моделі, зазвичай шар за шаром, на відміну від обробки різання [30]. AB може постачати деталі дуже заплутаної та складної геометрії з мінімальною потребою в постобробці, створені з індивідуальних матеріалів з майже нульовими матеріальними відходами, одночасно застосовні до різноманітних матеріалів, включаючи пластик і метали. Таким чином, AB є інструментом, який пропонує більшу «свободу проектування» та дозволяє дизайнерам та інженерам створювати унікальні продукти, які можна виготовляти в невеликих обсягах економним способом [13].

1.1 Загальне поняття 3Д друку

Хоча про 3D-принтери стали активно говорити лише останніми роками, історія розвитку тривимірного друку налічує близько 30 років: перше застосування було зафіксовано в 1980-х роках. Родоначальником адитивних технологій вважається американець Чарльз Халл (Charles W. Hull), який у 1986 р. запатентував спосіб стереолітографії, заснував компанію 3D Systems і розробив перший 3D-принтер Stereolithography Apparatus.

Термін “стереолітографія” був визначений Чарльзом Халлом в патенті від 1984 р. як “система генерування тривимірних об'єктів за рахунок пошарового формування”. Удосконаливши в 1988 р. колишню модель (Рис. 1.1), компанія почала перше серійне виробництво 3D-принтерів SLA-250. Другою віхою розвитку 3D-друку стало відкриття в 1988 р. технології пошарового наплавлення FDM Скоттом Краппом і заснування ним же компанії Stratasys [45].



Рисунок 1.1– Перший 3Д-принтер SLA-1[17]

Спочатку терміну “3D-друк” не існувало, інноваційні технології називалися “швидке прототипування”. Новий термін з’явився в 1995 р. завдяки двом студентам Массачусетського технологічного інституту — Джиму Бредту і Тіму Андерсону. Вони придумали перебудувати роботу звичайного струменевого принтера так, щоб він робив об’ємне зображення в спеціальній ємності, після чого запатентували розробку і відкрили компанію Z Corporation. Ця технологія, в основі якої лежить пошарове склеювання порошку, нині використовується для промислового моделювання.

За стандартами ASTM (American Society for Testing and Materials) рекомендовано застосовувати два основні терміни — Additive Fabrication (AF), і Additive Manufacturing (AM), а також синоніми — additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing і freeform fabrication, які можуть бути коректно перекладені як “адитивні технології”. Термін Rapid Prototyping або “швидке прототипування” рекомендовано вилючити з обігу, як такий, що втратив сенс розуміння сучасних адитивних технологій [45].

Справжній прорив у галузі адитивних технологій стався у 2000-х роках, коли 3D-друк став доступним широкому колу користувачів. З появою більш

доступних та ефективних принтерів, зростання інтересу до цих технологій було вражаючим. Сьогодні адитивні технології використовуються в авіаційній промисловості, медицині, автомобільній індустрії, будівництві та інших галузях [44].

В Україні активно розвиваються адитивні лазерні технології, що сприяє становленню ринку адитивних технологій у країні. Цей процес не тільки сприяє зміцненню національної індустрії, а й відкриває нові можливості для інновацій, розвитку бізнесу та покращення економічної ситуації в цілому.

Одним із важливих аспектів розвитку адитивних лазерних технологій в Україні є можливість створення високоточних та якісних продуктів. Ці технології дозволяють виробляти деталі зі складною геометрією і відповідні вимогам замовника. Це особливо актуально для промислових підприємств, які потребують індивідуальних рішень для своїх проектів.

Крім того, розвиток адитивних лазерних технологій в Україні сприяє підвищенню конкурентоспроможності вітчизняних компаній на світовому ринку. Завдяки використанню передових методів виробництва, українські підприємства можуть запропонувати клієнтам інноваційні продукти високої якості та скоротити час на їх розробку та випуск на ринок. Це, у свою чергу, сприяє збільшенню експорту та залученню іноземних інвестицій у країну.

Крім того, розвиток адитивних технологій може стати стимулом для розвитку наукових досліджень та освіти в Україні. Навчання фахівців у галузі адитивного виробництва допоможе створити кадровий резерв для індустрії та забезпечить стійкість розвитку цієї сфери національної економіки.

Таким чином, активний розвиток адитивних лазерних технологій в Україні не тільки сприяє зміцненню ринку адитивних технологій у країні, а й позитивно впливає на економіку, науку та освіту. Це важливий крок на шляху до створення інноваційної та конкурентоспроможної національної промисловості [44].

3D-друк це група процесів, які при виготовленні виробів, застосовують пошарове накладання матеріалу на платформу відповідно до поперечних

перерізів об'єкту. Найпоширеніші матеріали, які застосовуються при 3D-друці це пластик, фотополімерні смоли, метали, композити та ін.

Спочатку 3D-друк застосовували у швидкому процесі розробки прототипів. Інженери і промислові дизайнери використовували його, щоб прискорити проведення проектувальних і прототипних операцій, заощаджуючи час і гроші. З появою нових методів і видів сировини 3D-друк почали застосовувати у виробництві компонентів і готової продукції в різних секторах економіки, включаючи аерокосмічну, авіаційну та автомобільну промисловість, будівництво, промисловий дизайн, медичні вироби і сферу оборони [45]. Адитивні технології застосовуються для виробництва деталей складної геометрії.

3D-друк використовується також створення споживчих товарів: одягу, взуття, ювелірних виробів, окулярів та їжі. Компаніям у цих галузях 3D-друк дозволяє виготовляти невелику кількість товарів за низькими цінами. Це робить 3D-друк привабливим для тих, хто працює з дрібносерійним виробництвом. У багатьох випадках 3D-друк скорочує для компанії як час, так і вартість виробництва [45].

1.2 Актуальність адитивного виробництва

Адитивне виробництво, також відоме як 3D-друк, останніми роками набуває значної популярності та важливості в різних галузях промисловості. Ця технологія, яка почала розвиватися в 1980-х роках, сьогодні стала невід'ємною частиною процесів виробництва в аерокосмічній, автомобільній, медичній, будівельній та інших галузях. Актуальність адитивного виробництва обумовлена його унікальними можливостями, які дозволяють значно підвищити ефективність виробничих процесів, скоротити витрати та створювати складні деталі, які не можна виготовити традиційними методами.

Однією з головних переваг адитивного виробництва є його здатність до швидкого прототипування. Традиційні методи виготовлення прототипів часто є

тривалими та дорогими, тоді як 3D-друк дозволяє створювати прототипи за лічені години або дні. Це значно скорочує час розробки нових продуктів та дозволяє інженерам швидко тестувати та вдосконалювати свої проекти. Здатність до швидкого прототипування особливо важлива в конкурентних галузях, де швидкість виведення продукту на ринок може бути вирішальною для успіху [41].

Іншою важливою перевагою адитивного виробництва є його гнучкість. 3D-друк дозволяє виготовляти деталі складних геометричних форм, які часто є недоступними або дуже дорогими для виробництва традиційними методами, такими як лиття або механічна обробка. Завдяки цій технології можна створювати деталі з внутрішніми структурами, зменшуючи їх вагу та підвищуючи міцність. Це особливо актуально для аерокосмічної та автомобільної промисловості, де кожен грам ваги має значення [4].

Адитивне виробництво також дозволяє знизити кількість відходів матеріалу. Традиційні методи виробництва, такі як механічна обробка, часто супроводжуються значними втратами матеріалу, оскільки деталі вирізаються з більших заготовок. У 3D-друку матеріал додається шар за шаром, що мінімізує відходи. Це не тільки економить матеріал, але й робить процес виробництва більш екологічно чистим [24].

Медична галузь також активно використовує адитивне виробництво. 3D-друк дозволяє виготовляти індивідуальні протези, імплантати (Рис. 1.2) та хірургічні інструменти, точно адаптовані до анатомічних особливостей пацієнта. Це значно підвищує ефективність медичних процедур і зменшує ризик ускладнень. Наприклад, в ортопедії та стоматології 3D-друк використовується для створення точних моделей кісток і зубів, що дозволяє хірургам та стоматологам краще планувати операції та виготовляти ідеально підходящі імплантати [33].



Рисунок 1.2 – Медичний друк з титану[1]

Крім того, адитивне виробництво відкриває нові можливості для масової кастомізації продуктів. Завдяки 3D-друку компанії можуть легко адаптувати свої вироби під індивідуальні потреби клієнтів без значних додаткових витрат. Це особливо важливо в таких галузях, як мода, ювелірні вироби та споживча електроніка, де персоналізація продуктів стає все більш популярною серед споживачів [26].

Економічні переваги адитивного виробництва також включають скорочення витрат на логістику та зберігання. Оскільки 3D-друк дозволяє виготовляти деталі за вимогою, зникає потреба у великих складах для зберігання запасів. Це також зменшує витрати на транспортування, оскільки деталі можуть виготовлятися безпосередньо на місці використання [22]. Такий підхід особливо корисний у віддалених або важкодоступних регіонах, де традиційні методи доставки є складними або дорогими.

Адитивне виробництво також сприяє розвитку інноваційних матеріалів. Традиційні методи виробництва обмежені використанням певних матеріалів, тоді як 3D-друк дозволяє експериментувати з новими композиціями та структурами. Наприклад, друк металами, композитними матеріалами та біоматеріалами відкриває нові горизонти для інженерії та медицини. Зокрема, друк біоматеріалами дозволяє створювати тканини та органи для медичних досліджень та трансплантацій [23].

Пандемія COVID-19 продемонструвала важливість адитивного виробництва у кризових ситуаціях. Під час пандемії багато виробників використали 3D-друк для швидкого виготовлення засобів індивідуального захисту, медичних пристроїв та інших необхідних товарів. Це дозволило заповнити дефіцит та забезпечити швидку реакцію на змінні потреби ринку. Такий підхід показав, що адитивне виробництво може бути ефективним інструментом для підвищення стійкості ланцюгів постачання [9].

Крім виробничих галузей, адитивне виробництво також знаходить застосування у сфері освіти та наукових досліджень. 3D-друк дозволяє студентам та дослідникам створювати фізичні моделі для вивчення та експериментів, що значно полегшує процес навчання та відкриває нові можливості для досліджень. Наприклад, в архітектурі та дизайні 3D-друк використовується для створення макетів будівель та інтер'єрів, що дозволяє більш наочно представляти проекти та вносити корективи на ранніх стадіях розробки [42].

Слід також зазначити, що адитивне виробництво має значний потенціал для зниження вартості виробництва малосерійних та унікальних виробів. Традиційні методи виробництва часто вимагають значних інвестицій у виготовлення форм та обладнання, що робить їх нерентабельними для малих серій. 3D-друк дозволяє уникнути цих витрат, оскільки кожна деталь може бути виготовлена безпосередньо за цифровою моделлю, що робить виробництво гнучкішим та економічно ефективнішим [12].

Однак, попри всі переваги, адитивне виробництво має і свої обмеження та виклики. Однією з головних проблем є обмежена швидкість друку. Хоча технологія швидко розвивається, процес друку великих або складних деталей може займати багато часу. Крім того, вартість деяких матеріалів для 3D-друку може бути досить високою, що обмежує їх використання у масовому виробництві [16].

Ще одним викликом є забезпечення якості та повторюваності виробів. Традиційні методи виробництва, такі як лиття або штампування, дозволяють виготовляти деталі з високою точністю та однаковими характеристиками. У випадку з 3D-друком можуть виникати відхилення в якості через різні фактори, такі як коливання температури, знос обладнання або якість матеріалу [34]. Це вимагає додаткових заходів контролю якості та стандартів для забезпечення стабільності виробничих процесів.

Адитивне виробництво також стикається з регуляторними та сертифікаційними викликами. У багатьох галузях, таких як авіація, медицина або автомобілебудування, існують суворі стандарти та вимоги до безпеки та якості продукції. Впровадження 3D-друку у ці галузі вимагає розробки нових стандартів та методик для сертифікації виробів, що може бути складним і тривалим процесом [27].

Ще одним аспектом, який варто враховувати, є вплив адитивного виробництва на ринок праці. З одного боку, 3D-друк створює нові робочі місця у галузях проектування, обслуговування обладнання та матеріалознавства. З іншого боку, автоматизація та цифровізація виробничих процесів можуть призвести до скорочення робочих місць у традиційних виробничих галузях. Це вимагає відповідних заходів для перекваліфікації працівників та адаптації ринку праці до нових умов [21].

Попри всі виклики, перспективи адитивного виробництва залишаються дуже оптимістичними. З розвитком технологій та зниженням вартості обладнання та матеріалів, 3D-друк стає все доступнішим для широкого кола користувачів. Це відкриває нові можливості для інновацій та розвитку різних галузей економіки. Наприклад, у будівельній галузі вже використовуються 3D-принтери для друку будинків та інших конструкцій, що дозволяє значно скоротити час та витрати на будівництво [15].

У майбутньому адитивне виробництво може стати ключовим компонентом індустрії 4.0, де цифрові технології інтегруються у всі аспекти виробничих

процесів. Це дозволить створювати повністю автоматизовані та гнучкі виробничі системи, які можуть швидко адаптуватися до змін ринку та забезпечувати високу якість продукції. У поєднанні з такими технологіями, як штучний інтелект, Інтернет речей та великі дані, адитивне виробництво має потенціал стати рушійною силою нової промислової революції [11].

Таким чином, адитивне виробництво є надзвичайно актуальним і перспективним напрямком розвитку сучасної промисловості. Воно має потенціал значно підвищити ефективність виробничих процесів, скоротити витрати, створити нові можливості для інновацій та забезпечити екологічно чисте виробництво. Водночас, для реалізації цього потенціалу необхідно подолати ряд викликів та обмежень, таких як забезпечення якості продукції, розвиток нових матеріалів, впровадження стандартів та сертифікації, а також адаптація ринку праці до нових умов. Попри ці виклики, перспективи адитивного виробництва залишаються дуже позитивними, і воно продовжуватиме відігравати важливу роль у розвитку сучасної економіки та технологій.

1.3 Знайомство з існуючою технікою для адитивних технологій

Сучасні галузі промисловості активно використовують адитивні процеси для виробництва складних і високоточних виробів. Ці технології дозволяють створювати деталі з різних матеріалів, включаючи пластмаси, метали та композити, з високим рівнем деталізації та мінімальними відходами. Знайомство з існуючими технологіями в області адитивних процесів є важливим кроком у розумінні потенціалу та можливостей цих технологій та їх впливу на різні галузі промисловості.

У 2010 році група Американського товариства з випробувань і матеріалів (ASTM) «ASTM F42 – Адитивне виробництво» сформулювала набір стандартів, які класифікують різноманітні процеси адитивного виробництва на 7 категорій [36].

Технологія струменевого зв'язування (BJT) виробляє деталі шляхом вибіркового нанесення зв'язуючої речовини на порошковий шар. BJT використовує ті ж методи розподілу порошку, що й порошкове спікання (PBF). Однак, на відміну від PBF, рідка зв'язуюча речовина зв'язує деталі замість лазера та/або променя [37]. Друкуюча головка рухається горизонтально вздовж осей X та Y принтера і наносить чергуючі шари будівельного матеріалу та зв'язуючого матеріалу (Рис. 1.3). Після кожного шару об'єкт, що друкується, опускається на платформі побудови [14]. Після завершення процесу побудови продукт проходить постобробку. Цей процес відрізняється від більшості інших технологій адитивного виробництва тим, що він не використовує тепло для з'єднання матеріалу [37].

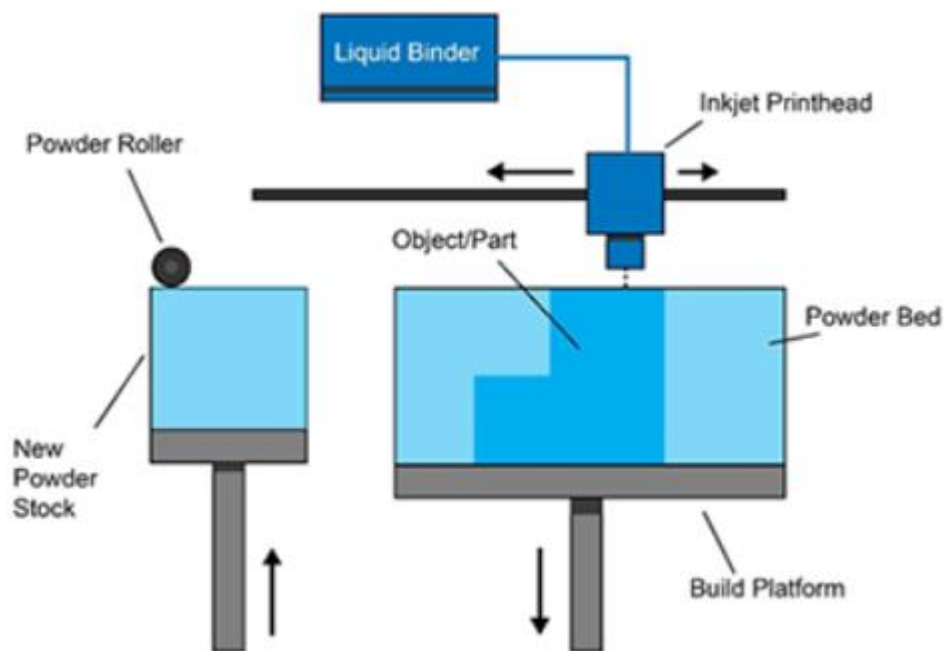


Рисунок 1.3 – Технологія струменевого зв'язування (BJT) [14]

Переваги [37]:

- Здатність виробляти складні, високоточні деталі з високою роздільною здатністю, що майже дорівнює PBF;
- Швидко та доступно;

- Можливість досягти різних механічних властивостей;
- Здатність виробляти багатокольорові деталі (лише для неметалевих матеріалів);
- Широкий асортимент порошкових матеріалів доступний;
- Мінімальні втрати матеріалу;
- Відносно велика площа будівництва;
- Може бути інтегрований з більшістю традиційних процесів лиття;
- Порошок не плавиться, тому проблеми, пов'язані з залишковим напруженням, мінімальні.

Недоліки [37]:

- Потрібно інфільтрування та синтерування, що призводить до звуження;
- Після обробки деталі є крихкими та можуть легко розсипатися;
- Навіть після постобробки механічні властивості не відповідають якості традиційно виготовлених деталей або друку PBF.

Область застосування [37]:

- Часто використовується для виготовлення форм для лиття піску;
- Ідеально підходить для прототипування повного кольору/високої відтворюваності;
- Виготовлення складних, високоточних металевих та керамічних деталей.

Процес направленого осадження енергії (DED) охоплює ряд термінів: "Лазерне інженерне формування мережі, направлена світлова фабрикація, пряме металеве осадження, 3D лазерне наплавлення". Це складніший процес друку, який зазвичай використовується для ремонту або додавання додаткового матеріалу до існуючих компонентів.

Типовий пристрій DED складається з насоса (Рис. 1.4), встановленого на багатокоординатний механізм, який осаджує розплавлений матеріал на вказану поверхню, де він затвердіває. Процес схожий за принципом на матеріальну екструзію, але насос може рухатися в різних напрямках і не закріплений на

певній вісі. Матеріал, який може бути осаджений під будь-яким кутом завдяки 4- і 5-осевим машинам, розплавляється при осадженні лазером або електронним променем. Процес може бути використаний з полімерами, керамікою, але зазвичай використовується з металами у формі порошку або дроту [19].

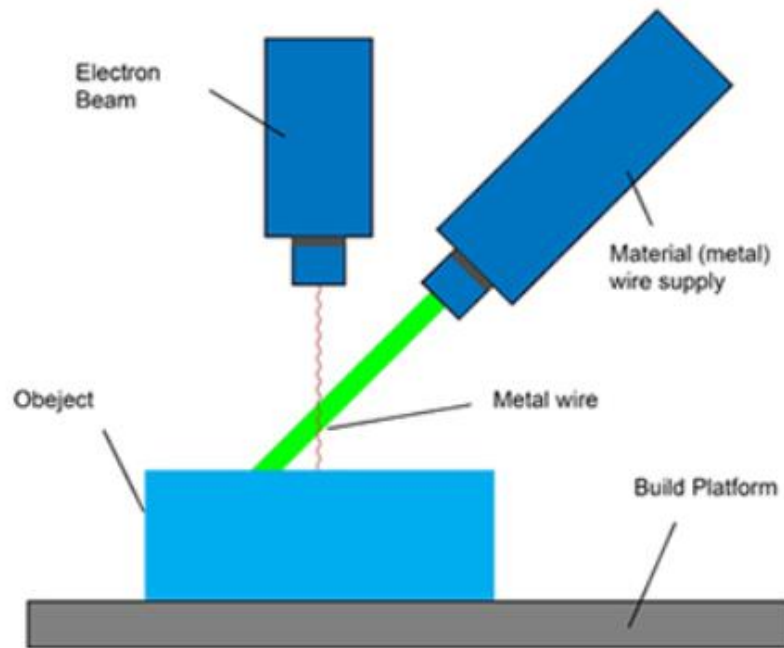


Рисунок 1.4 – Процес направленого осадження енергії (DED) [19]

Переваги направленого осадження енергії [37]:

- Може додавати матеріал до існуючих деталей, оскільки може осаджувати матеріал під різними кутами;
- Широкий вибір доступних дешевих матеріалів для друку, які також використовуються для зварювання;
- Велика робоча зона;
- Створює щільні, міцні деталі з відмінними механічними властивостями;
- Швидкі у роботі і мінімальні втрати матеріалу;
- Може використовувати кілька матеріалів.

Недоліки направленого осадження енергії [36]:

- Дороге обладнання, тому високі початкові витрати порівняно з більшістю інших процесів адитивного виробництва;

- Енергія, необхідна для підтримки температури плавлення, створює теплові градієнти, які можуть спричиняти залишкове напруження;

- Деталі можуть потребувати після обробки через погану роздільну здатність процесу.

Застосування направленого осадження енергії [37]:

- Ремонт, обслуговування та додавання функціональних або структурних деталей, особливо в важкій промисловості та машинобудуванні;

- Корисно для застосувань у космосі, оскільки процес не потребує гравітації;

- Виробництво деталей майже готової форми;

- Деталі, виготовлені за допомогою спеціалізованих гібридних виробничих машин.

Струменева обробка матеріалу (МЈТ) - одна з найшвидших і найточніших технологій адитивного виробництва. Процес МЈТ починається з плавлення fotocутливої смоли в рідку фотополімерну речовину [37].

Матеріал розпилюється на поверхню або платформу для виготовлення, де він затвердіє і модель створюється шар за шаром (Рис. 1.5). Матеріал осаджується з сопла, який рухається горизонтально по робочій платформі. Машини відрізняються за складністю і методами контролю осадження матеріалу. Шари матеріалу потім затверджуються або зміцнюються за допомогою ультрафіолетового (УФ) світла.

Оскільки матеріал повинен бути осадженим у вигляді крапель, кількість доступних матеріалів обмежена. Полімери та воски є відповідними та загальноприйнятими матеріалами, завдяки їхній в'язкості та здатності утворювати краплі [29].

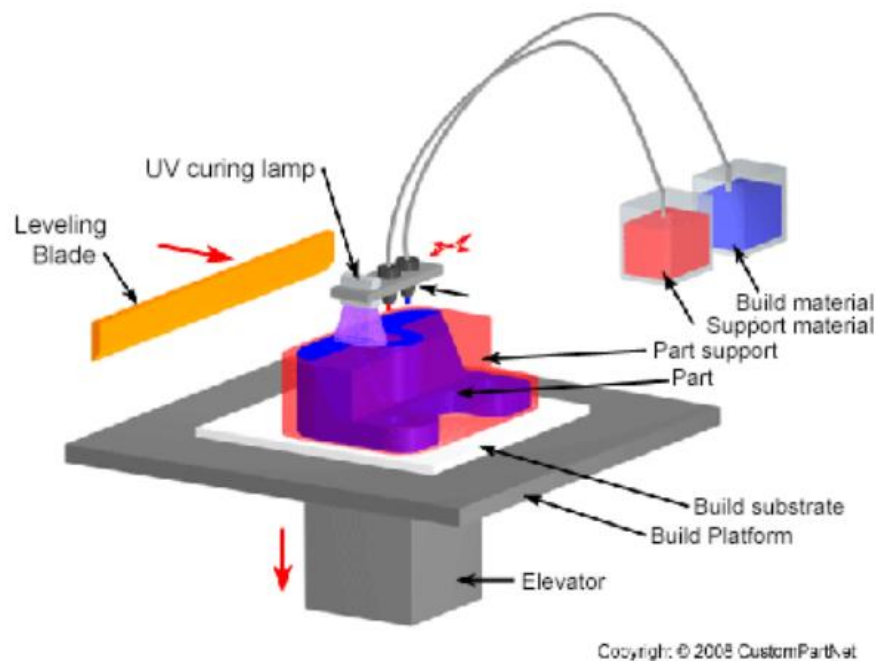


Рисунок 1.5 – Струменева обробка матеріалу (MJT) [29]

Переваги[37]:

- Цей процес АМ пропонує найвищу роздільну здатність та точність;
- Може друкувати неймовірно реалістичні об'єкти з хитромудрими формами і гострими краями;
- Може прошаркувати кілька матеріалів, так що багатобарвність можлива;
- Дуже гладкі поверхні;
- Не досягаючи такого ж рівня допусків, як PBF, як і раніше виробляє деталі з дуже високими допусками;
- Велика робоча зона.

Недоліки[37]:

- Обладнання є дорогим, а час збірки повільним, оскільки воно створює одну краплю за раз;
- Опорні конструкції повинні бути твердими, що створює значні матеріальні відходи;
- Матеріали обмежені і дорогі, з воскоподібними речовинами є найбільш поширеним варіантом, який може призвести до крихких відбитків;

– Через їх погані механічні властивості ці деталі, як правило, не підходять для функціонального використання, оскільки вони, як правило, крихкі і не можуть нести значні навантаження.

Застосування [37]:

- Дуже реалістичні прототипи;
- Лиття під тиском виробництва;
- Шаблони для інвестиційних виливків, особливо в ювелірній промисловості;
- Медичні прилади, хірургічні інструменти та анатомічні моделі.

Процес розплавлення порошкового шару (PBF) включає такі широко використовувані методи друку: пряме лазерне спікання металу (DMLS), плавлення електронним променем (EBM), селективне термічне спікання (SHS), селективне лазерне плавлення (SLM) і селективне лазерне спікання (SLS).

У методах порошкового плавлення (PBF) використовується лазерний або електронний промінь для плавлення та сплавлення порошку матеріалу. Електронно-променеве плавлення (EBM), методи вимагають вакууму, але можуть використовуватися з металами та сплавами для створення функціональних деталей. Усі процеси PBF передбачають нанесення порошкового матеріалу на попередні шари. Для цього існують різні механізми, включно з роликом або лезом (Рис. 1.6). Резервуар під боковим шаром забезпечує подачу свіжого матеріалу. Пряме лазерне спікання металу (DMLS) — це те саме, що SLS, але з використанням металів, а не пластмас. Процес спікає порошок шар за шаром. Вибіркове термічне спікання відрізняється від інших процесів використанням нагрітої термічної друкуючої головки для сплавлення порошкового матеріалу. Як і раніше, шари додаються валиком між сплавленням шарів. Платформа відповідно опускає модель [32].

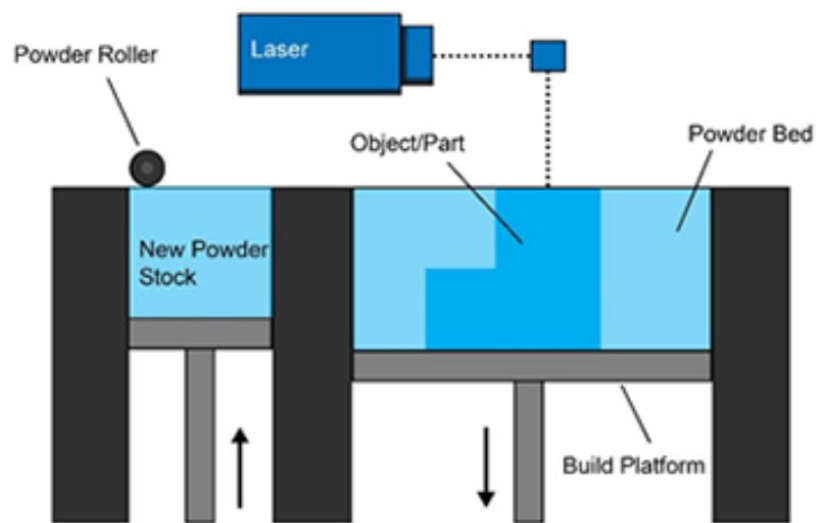


Рисунок 1.6 – Порошкове плавлення (PBF) [32]

Переваги [37]:

- Частини мають допуски, рівні VPP, але частини PBF, як правило, сильніші;
- Може виробляти деталі зі складними формами;
- Механічні властивості металевих деталей можна порівняти з обробкою та литтям;
- Здатний до функціональних пластикових деталей;
- Доступний широкий асортимент матеріалів;
- Можливі кілька матеріалів в одній збірці;
- Одночасно можна виготовити більше однієї деталі;
- Для збірки (пластикової) не потрібні мінімальні опорні конструкції;
- Використаний порошок можна переробляти.

Недоліки [37]:

- Тривалий час друку та дорога постобробка;
- Використовується дорогий матеріал і багато електроенергії, особливо коли сировиною є метал;
- Оскільки вона вимагає ложа порошку, вона непридатна для офісної обстановки;

- Деталі мають різну якість текстури поверхні;
- Деталі можуть мати термічні спотворення - в першу чергу з полімерними деталями.

Застосування [37]:

- Низькі обсяги функціональних частин у всіх галузях промисловості, особливо медичної та оборонної, а також аерокосмічної.
- Загальні програми включають в себе одноразове промислове обладнання, таке як деталі машин, перемички, захвати та світильники, а також малопотужні виробничі роботи індивідуальних пластикових компонентів.
- Швидке прототипування складних деталей.
- Широко використовується для виробництва деталей.
- Архітектурні моделі (SLS).

Листове ламінування (SHL) є простим методом АВ. В основному він використовується для створення кольорових об'єктів із високою роздільною здатністю. SHL — це, по суті, процес укладання дуже тонких листів матеріалу та їх ламінування за допомогою ультразвукового зварювання, склеювання або пайки. Тонкі шаруваті матеріали, такі як алюмінієва фольга або нитки на паперовій основі, скріплюються та нарізаються на профільовані шари за допомогою лазерів або гострих лез (Рис. 1.7). Найбільш поширеною технологією SHL є ультразвукова консолідація (UC) або ультразвукове адитивне виробництво (UAM). У цій техніці металеві листи при кімнатній температурі скріплюються разом за допомогою ультразвукових хвиль і механічного тиску. Кінцевий об'єкт виготовляється за допомогою лазерного/ножового різання/обробки з ЧПУ [37].

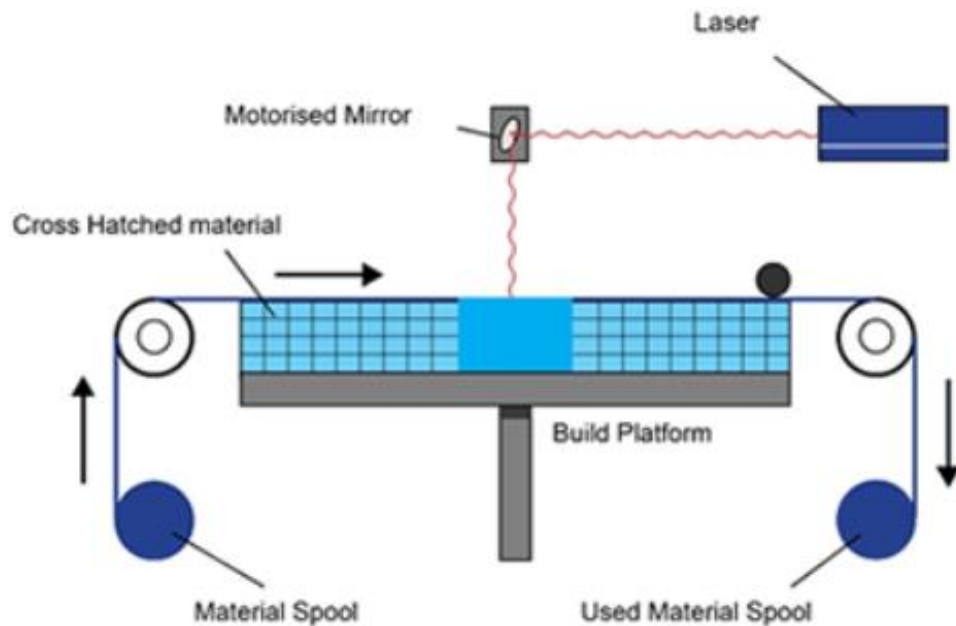


Рисунок 1.7 – Листове ламінування (SHL) [35]

Переваги [37]:

- Мало до ніякого попереднього виробництва; швидкий час друку; відносно невисока вартість;
- Легка обробка матеріалів;
- Ніяких допоміжних структур не потрібно;
- Велика площа забудови;
- Можливість прошаркувати кілька матеріалів, так що багатобарвність можлива;
- Мінімальне споживання енергії;
- Можливість інтеграції в гібридну виробничу систему;
- У деяких випадках різаний матеріал можна легко переробляти.

Недоліки [37]:

- Деталі зі складними формами неможливі;
- Деталі з внутрішніми порожнинами і порожнинами важко виробляти;
- Клейові зв'язки з часом погіршуються, тому процес не ідеальний для деталей, які будуть використовуватися довгостроково;

- Створює багато відходів матеріалу, якщо частина менше, ніж розмір листа або площа будівлі;
- Вимагає трудомісткої постобробки;
- Обмежується матеріалами, які можуть надходити в листах;
- Висоту шару неможливо змінити без зміни товщини листа;
- Досягнута обробка іноді змінюється.

Застосування [37]:

- Будівельні моделі для архітектурних проектів;
- Кольорові об'єкти для прототипування proof-of-concept та look-and-feel;
- Швидке прототипування деталей без складних геометрій.

Чанова фотополімеризація (VPP) (Рис. 1.8) була першою промисловою технологією адитивного виробництва і, як правило, вважається однією з найшвидших технологій адитивного виробництва. Він може створювати неймовірно деталізовані деталі. Мікростереолітографія, наприклад, точно друкує деталі в нанометричному масштабі. Деякі смоли, які використовуються у VPP, є біосумісними, тому це одна з найкращих технологій для друку медичних імплантатів. Фотополімеризація — це, по суті, процес, у якому фотополімерні рідкі смоли в ємності піддаються вибіркового впливу ультрафіолетового світла [37].

Оскільки в цьому процесі для формування об'єктів використовується рідина, на етапі створення не існує структурної опори з матеріалу, на відміну від методів на основі порошку, де опора надається з незв'язаного матеріалу. У цьому випадку часто потрібно додавати опорні конструкції [36].

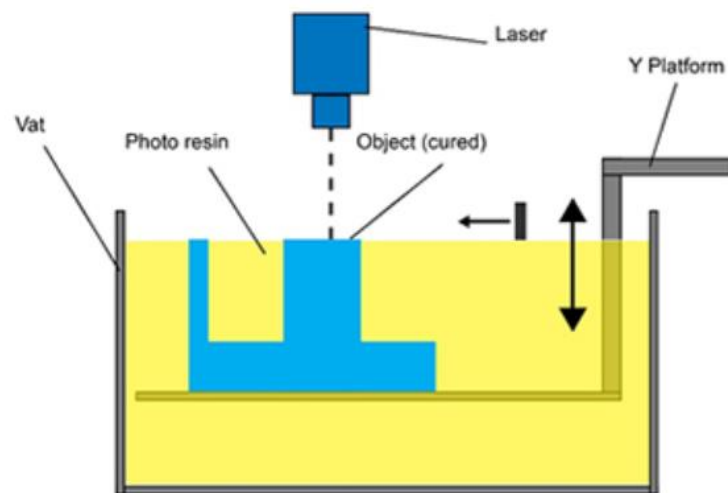


Рисунок 1.8 – Чанова фотополімеризація (VPP) [40]

Переваги [37]:

- Одна з найшвидших адитивних технологій;
- Деталі можуть мати неймовірно маленькі складні елементи з дуже реалістичною обробкою;
- Після затвердіння може бути водонепроникним та/або повітронепроникним;
- Деталі мають гладку поверхню;
- Послідовна повторюваність;
- Велика площа забудови;
- Смола, злита після створення, може бути використана знову;
- Доступні біосумісні матеріали.

Недоліки ванної фотополімеризації [37]:

- Доступні відносно дорогі смоли та обмежені матеріали;
- Тривалий час постобробки;
- Може стати крихким, особливо під час тривалого впливу сонячного світла.

Область застосування [37]:

- Ювелірні вироби (невеликі тиражі/прототипування);

- Стоматологічні програми;
- Медичні застосування;
- Аерокосмічна (короткі серії/прототипування);
- Автомобільна промисловість (короткі серії/прототипування).

Моделювання за допомогою методу наплавлення (FDM) є звичайним процесом екструзії матеріалів і є торговою маркою компанії Stratasys. Матеріал втягується через сопло, де він нагрівається, а потім наноситься шар за шаром (Рис. 1.9). Сопло може рухатися горизонтально, а платформа рухається вгору та вниз вертикально після кожного нового шару. Це широко використовувана техніка, яка використовується на багатьох недорогих домашніх 3D-принтерах і принтерах для любителів.

Процес має багато факторів, які впливають на кінцеву якість моделі, але має великий потенціал і життєздатність, якщо ці фактори успішно контролюються. Хоча FDM подібний до всіх інших процесів 3D-друку, оскільки він створює шар за шаром, він відрізняється тим, що матеріал додається через сопло під постійним тиском і безперервним потоком. Шари матеріалу можуть бути скріплені за допомогою контролю температури або за допомогою хімічних агентів. Матеріал часто додається в машину у формі котушки, як показано на схемі [28].

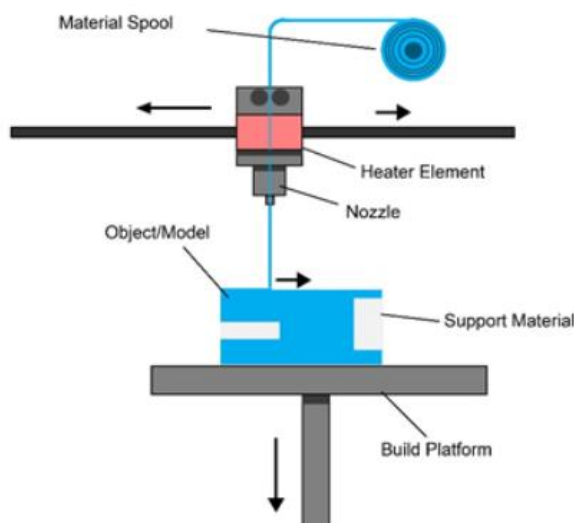


Рисунок 1.9 – Моделювання за допомогою методу наплавлення (FDM)[28]

У табл. 1.1 наведено основні методи, що використовуються в адитивному виробництві, їх переваги та обмеження.

Таблиця 1.1 – Основні типи 3Д друку

Тип	Технологія	Друк кількома матеріалам и одночасно	Кольорови й друк	Опис
Екструзія	Моделювання методом наплавлення FDM	можливо	можливо	Застигання матеріалу при охолодженні – друкувальна головка видавлює на охолоджувану платформу-основу краплі розігрітого термопластика. Краплі швидко застигають і злипаються один з одним, формуючи шари майбутнього об'єкта
	Робокастинг DI W	можливо	можливо	«Чорнило» (зазвичай керамічний шлам) виходять з сопла в рідкому стані, але відразу ж приймають потрібну форму завдяки псевдопластичні рідини.
Фотополімеризація	Лазерна стереолітографія SLA	Неможливо	Неможливо	Ультрафіолетовий лазер засвічує рідкий фотополімер (через фотошаблон, або поступово, піксель за пікселем)
	SLA-DLP	Неможливо	Неможливо	DLP-проектор засвічує фотополімер
Формування шару на рівному шарі порошку	англ. 3D-Printing, 3DP	Неможливо	Неможливо	склеювання порошку шляхом нанесення рідкого клею за допомогою струминного друку
	електронно-променева плавка EBM	Неможливо	Неможливо	плавлення металевого порошку електронним променем у вакуумі
	селективне лазерне спікання	Неможливо	Неможливо	плавлення порошку під дією лазерного випромінювання

Кінець таблиці 1.1

Тип	Технологія	Друк кількома матеріалам и одночасно	Кольорови й друк	Опис
Формування шару на рівному шарі порошку	Пряме лазерне спікання металу	Неможливо	Неможливо	плавлення металевого порошку під дією лазерного випромінювання
	Вибіркове теплове спікання, SHS	Неможливо	Неможливо	плавлення порошку нагрівальною голівкою
Подача матеріалу у вигляді дроту	англ. Electron Beam Freeform Fabrication, EBF	можливо	можливо	плавлення подається дротяного матеріалу під дією електронного випромінювання
Ламінування	Виготовлення об'єктів з використанням ламінування LOM	можливо	можливо	деталь створюється з великої кількості шарів робочого матеріалу, які поступово накладаються один на одного і склеюються, при цьому лазер (або ріжучий інструмент) вирізає в кожному контурі перетину майбутньої деталі
Точкова подача порошку	Directed Energy Deposition	можливо	можливо	Порошок, що подається, плавиться під дією лазерного або електронного променя
Струминний друк	Метод багатоструминно го моделювання (Multi Jet Modeling, MJM)	можливо	можливо	робочий матеріал наноситься за допомогою струминного друку

1.4 Загальні принципи по шаровій викладки в FDM друці

FDM (Fused deposition modeling) - моделювання методом пошарового наплавлення, популярна технологія адитивного виробництва. Застосовується для створення тривимірних моделей, макетів, виробів до яких не пред'являються особливі вимоги до якості поверхні і точності виготовлення.

Технологія FDM має на увазі створення тривимірних об'єктів за рахунок нанесення послідовних шарів матеріалу, які повторюють контури цифрової моделі. Матеріалом для друку виступають термопластики, що поставляються у вигляді котушки ниток різних кольорів.

Виробничий цикл починається з обробки тривимірної цифрової моделі. Модель у форматі STL ділиться на шари і орієнтується відповідним чином для друку. При необхідності створюються підтримуючі структури, необхідні для друку нависаючих елементів. Деякі пристрої дозволяють використовувати різні матеріали під час одного виробничого циклу. Можливим є друк моделі з одного матеріалу з печаткою опор з іншого, легкорозчинного матеріалу, що дозволяє з легкістю видаляти підтримуючі структури після завершення процесу друку. Альтернативно можливим є друк різними кольорами одного і того ж виду пластику при створенні єдиної моделі [6].

Деталь формується пошарово. Розплавлений пластик укладається по контурах, які утворено цифровою моделлю [6]. Філамент нагрівається до температури плавлення і видавлюється через сопло, створюючи тонкий шар розплавленого матеріалу, який накладається на платформу [41]. Після укладання пластик миттєво охолоджується і твердне [6]. Важливим аспектом є точний контроль над температурою екструдера і швидкістю подачі філаменту, що дозволяє забезпечити рівномірний потік матеріалу і високу якість друку [5]. По завершенню одного шару, екструдер переміщається вертикально вгору на величину товщини нитки розплавленого пластику. Формується другий шар. Пластикова нитка подається з котушки в екструдер. Екструдер (друкована головка) – це пристрій, обладнаний механічним приводом для подачі нитки, нагрівальним елементом для плавки матеріалу і соплом, через яке здійснюється безпосередньо екструзія. Нагрівальний елемент передає тепло на сопло, яке, в свою чергу, плавить пластикову нитку і подає розплавлений матеріал на той шар, що формується. Температура сопла може регулюватися від 150°C до 310°C для використання різних матеріалів. Як правило, верхня частина сопла навпаки

охолоджується за допомогою конвективного кожуха і вентилятора для запобігання передчасного розплавлення пластикової нитки з наступним засміченням друкуючої головки, що в свою чергу призведе до втрати плавності подачі матеріалу, а також до втрати якості друку.

Екструдер переміщується в горизонтальній і вертикальній площинах під контролем алгоритмів, аналогічних використуваним в верстатах з ЧПУ. Сопло переміщується по траєкторії, заданої системою автоматизованого проектування. Модель будується шар за шаром, від низу до верху. Як правило, екструдер приводиться в рух покроковими моторами або сервоприводами. Найбільш популярною системою координат, яка застосовується в FDM, є декартова система, побудована на прямокутному тривимірному просторі з осями X, Y і Z.

Технологія FDM відрізняється високою гнучкістю, але має певні обмеження. Хоча створення нависаючих структур можливо при невеликих кутах нахилу, у випадку з великими кутами необхідне використання штучних опор, які, створюючись в процесі друку, і відокремлюються від моделі по завершенню процесу.

В якості витратних матеріалів доступні всілякі термопластики і композити, включаючи ABS, PLA, полікарбонати, поліаміди, полістирол, лігнін та багато інших. Як правило, різні матеріали надають вибір балансу між певними характеристиками міцності і температурними характеристиками.

Моделювання методом FDM застосовується для швидкого прототипування і швидкого виробництва. Швидке прототипування полегшує повторне випробування з послідовною, покроковою модернізацією предмета. Швидке виробництво слугує недорогою альтернативою стандартним способам при створенні дрібносерійних партій. FDM є одним з найменш дорогих способів друку, що забезпечує зростаючу популярність побутових принтерів, заснованих на цій технології. У побуті 3D-принтери, що працюють за технологією FDM, можуть застосовуватися для створення самих різних об'єктів цільового призначення, а також іграшок, прикрас і сувенірів [6].

1.5 Переваги FDM друку

FDM друк або друк методом наплавлення має багато переваг, які роблять цей метод популярним серед інших видів адитивного виробництва. Наприклад такі як доступність, простота у використанні, різноманітне програмне забезпечення, багатий вибір матеріалів для друку, можливість виготовляти деталі з композитних матеріалів, міцність та довговічність, легкі методи обробки або відсутність необхідності в постобробці та ін.

FDM принтери, як правило, мають нижчу вартість в порівнянні з іншими технологіями 3D-друку, що робить їх доступними для широкого кола користувачів, включаючи любителів і малі підприємства. Це дозволяє здійснювати 3D-друк без значних капіталовкладень [41].

Пластики, такі як PLA (полілактид) і ABS (акрилонітрил-бутадієн-стирол), є найбільш поширеними матеріалами для FDM друку. Вони доступні за помірними цінами і продаються в різних кольорах та спеціалізованих складах [5].

Більшість сучасних FDM принтерів оснащені зрозумілим інтерфейсом, що полегшує процес друку. Вбудовані дисплеї та сенсорні екрани забезпечують легкий доступ до налаштувань і параметрів друку [24]. Слайсери, такі як Cura (Рис. 1.10) або PrusaSlicer, дозволяють легко налаштовувати параметри друку, такі як висота шару, швидкість друку і температура екструдера [33].

FDM принтери можуть працювати з різними видами термопластиків, що забезпечує великий вибір матеріалів з різними механічними властивостями. Наприклад, TPU (термопластичний поліуретан) підходить для виготовлення гнучких деталей, тоді як PETG (поліетилентерефталатгліколь) має високу стійкість до хімічних впливів [41]. Деякі FDM принтери підтримують друк матеріалами, посиленими волокнами (вуглецеві волокна, скловолокно), що дозволяє створювати міцніші та легші деталі [5].

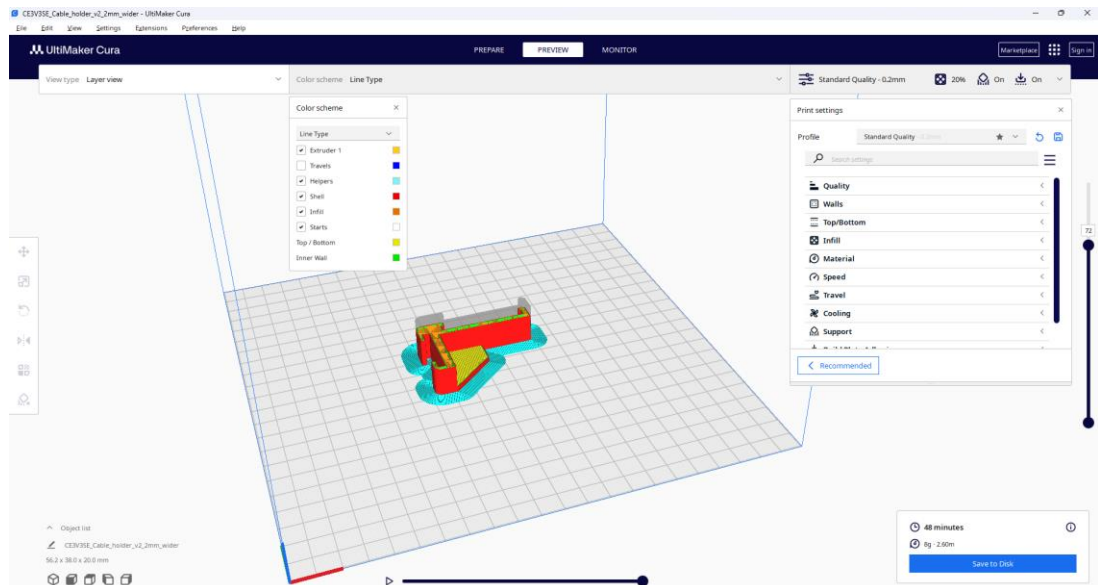


Рисунок 1.10 – Інтерфейс програмного забезпечення UltiMaker Cura

Деталі, виготовлені методом FDM, можуть витримувати значні механічні навантаження, що робить їх придатними для функціональних тестів і прототипів [24]. У багатьох випадках FDM друк використовується для виготовлення кінцевих продуктів, включаючи промислові компоненти і споживчі товари [33].

Для багатьох застосувань деталі, надруковані на FDM принтерах, не потребують складної постобробки, що знижує витрати і скорочує час виготовлення [41]. Якщо постобробка все ж необхідна, FDM деталі легко шліфуються, фарбуються і обробляються іншими методами [5].

Деякі FDM принтери мають великі платформи для друку, що дозволяє виготовляти великі деталі за один цикл друку. Це особливо важливо для створення прототипів великих виробів [24].

Біорозкладні матеріали: PLA є біорозкладним матеріалом, що робить його екологічно безпечним вибором у порівнянні з іншими видами пластику. Це важливо для зменшення впливу на навколишнє середовище [24]. Переробка матеріалів: Відходи від FDM друку часто можна переробляти і використовувати повторно, що сприяє зменшенню кількості пластикових відходів [41].

Деякі моделі FDM принтерів підтримують друк кількома філаментами одночасно, що дозволяє створювати багатоколірні об'єкти без необхідності фарбування. Це забезпечує більшу гнучкість у дизайні та виробництві [5].

Ці переваги роблять FDM друк привабливим вибором для різних застосувань, від хобі до промислових виробництв.

1.6 Порівняння матеріалів для 3D-друку

Полімерні пластики є найпоширенішими матеріалами для адитивних технологій. Для 3D-друку полімери випускають у вигляді смол або ниток. Нитка нагрівається під час проходження через екструдер і формується, лягаючи поверх попереднього шару. Смола подається із резервуару для рідкої смоли та під час екструзії піддається впливу світла. Коли світло направлене на поверх попереднього шару, воно твердне в суцільний шар.

У таблиці 1.6.1 наведені властивості різних термопластичних матеріалів для 3D-друку.

Таблиця 1.2 Властивості різних термопластичних матеріалів для 3Д-друку[38]

	Границя міцності, МПа	Максимальна робоча температура, °C	Коефіцієнт теплового розширення	Густина, г/см ³	Температура екструзії, °C	Температура столу, °C
ABS	40	98	90	1,04	220-250	95-110
Flexible	26-43	60-74	157	1,19-1,23	225-245	45-60
PLA	65	52	68	1,24	190-220	45-60
HIPS	32	100	80	1,03-1,04	230-245	100-115
PETG	53	73	60	1,23	230-250	75-90
Nylon	40-85	80-95	95	1,06-1,14	220-270	70-90
Carbon Fiber Filled	45-48	52	57,5	1,3	200-230	45-60
ASA	55	95	98	1,07	235-225	90-110
Polycarbonate	72	121	69	1,2	260-310	80-120
Polypropylene	32	100	150	0,9	220-250	85-100
Metal Filled	20-30	52	33,75	2-4	190-220	45-60
Wood Filled	46	52	30,5	1,15-1,25	190-220	45-60
PVA	78	75	85	1,23	185-200	45-60

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

Якщо ж відкинути це обмеження, то в плані вибору витратних матеріалів 3D друк FDM сміливо можна назвати найбільш універсальною технологією адитивного виробництва. Користувачі мають можливість роботи з пластиками всіх кольорів і відтінків, прозорими, глянцевими і матовими полімерами, з гнучкими і жорсткими інженерними матеріалами, з металізованим пластиком, і пластиком, що змінює колір. Також доступні водорозчинні, флуоресцентні, люмінесцентні матеріали, пластик з дерев'яним наповненням і багато іншого [7].

1.7 Аналіз варіантів компоновок звичайних XYZ координатних FDM принтерів

Хоча декартові координати не завжди використовуються, кожен 3D-принтер FDM вимагає певного способу опису позицій у просторі, щоб розташувати та знайти сопло. Для цього, між тим, різні типи машин використовують різні системи механічного руху для маневру гарячого кінця і осадження розплавленого нитки. Процес нанесення шару за шаром сильно залежить від руху осей, що безпосередньо впливає на друк, включаючи якість і швидкість [2].

Декартові плоскі FDM-принтери є популярним вибором через їх точність. Завдяки декартовій системі координат ці принтери здатні забезпечити точний контроль, необхідний для забезпечення точних відбитків. Насправді цей рівень точності є однією з головних переваг використання декартової площини FDM 3D-принтера.

Однак важливо мати на увазі, що є також деякі потенційні недоліки. Наприклад, розмір принтера може бути обмежуючим фактором. Враховуючи, що ці принтери можуть бути досить великими, вони можуть бути не практичними для використання у всіх середовищах. Крім того, використання декартової системи координат може призвести до уповільнення швидкості друку порівняно з іншими типами 3D-принтерів [39].

Як правило, бічний рух (тобто лівий, правий, передній, задній) зазвичай призначається осям X і Y , тоді як вісь Z відповідає вертикальному руху. За цією угодою кожен шар відкладається в площині XY , тоді як рух Z відповідає за просування між шарами за допомогою попередньо визначеної висоти, встановленої в 3D-слайсері [2].

3D-принтер FDM може приймати безліч конфігурацій для здійснення тривимірного руху його сопла відносно платформи збірки. Тим не менш, немає офіційної системи класифікації, яка може призвести до плутанини при обговоренні різних стилів принтерів [2]. Тому на рис. 1.11 зображена запропонована ієрархія, яка заснована на системах координат принтера і механічних конструкціях [2].

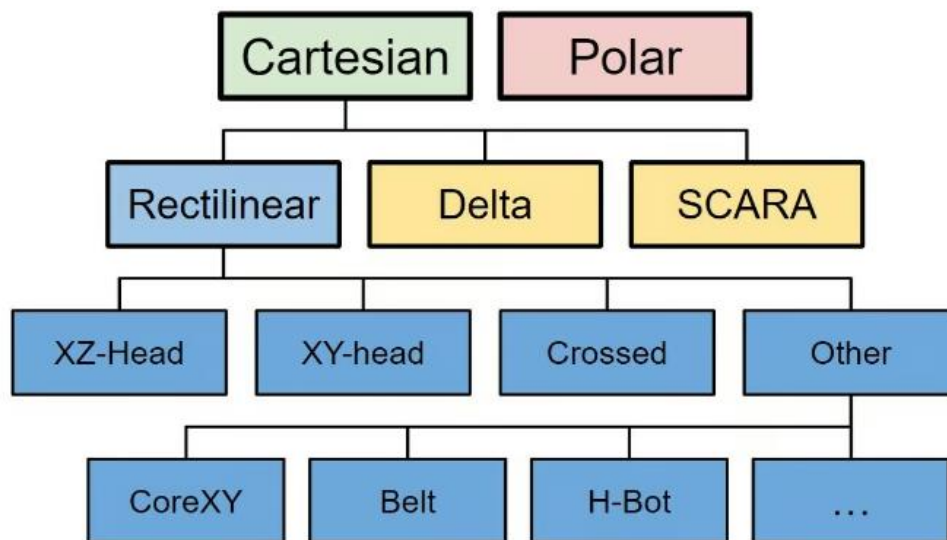


Рисунок 1.11 – Схема систем координат принтерів і механічних конструкцій [2]

Деякі 3D-принтери взагалі не покладаються на декартову систему координат для позиціонування. Це стосується полярних 3D-принтерів, які є двовимірною системою координат, що використовує одну лінійну розмірність, радіус від початку координат та одну кутову розмірність, кут від 0° [2].

Полярні 3D-принтери можуть мати різні механічні конструкції, а в деяких випадках для позиціонування XY може обертатися як гарячий кінець, так і кругла пластина. Тим не менш, полярні машини рідко можна побачити в комерційних настільних 3D-принтерах, але вони все ще можуть працювати досить добре. Друга істотна відмінність полягає в механічній конструкції. [2]

Прямолінійні принтери є найбільш поширеними FDM принтерами і охоплюють ряд загальних і конкретних підтипів машин [2]. «Прямолінійний» відноситься до того факту, що рух уздовж кожної осі є (в основному) незалежним і лінійним, що зазвичай призводить до квадратної або коробчастої конструкції принтера [2].

Більшість прямолінійних принтерів є або принтерами з рухомою головою XZ, з рухомою головою XY, або принтерами з перехресним стилем, де ці позначення стосуються різних конфігурацій гантрі.

Рухомі компоненти для цих принтерів можуть бути досить важкими, що означає, що раптові зміни в напрямку на більш високих швидкостях можуть бути проблемою. Ця проблема пов'язана з параметрами ривка принтера і може призвести до неточного осадження та навіть збоїв друку [2].

Консольні принтери, такі як Prusa Mini (Рис. 1.12) і Ender 2 Pro, по суті є XZ-головними принтерами з іншою рамою.

3D-принтери CoreXY використовують досить особливий механізм руху. Їхній рух по горизонталі (XY) здійснюється за допомогою двох моторів і двох довгих ременів у досить складній і динамічній системі. Вертикальний рух (по осі Z) виконується виключно робочою платформою в напрямку вниз.



Рисунок 1.12 – Принтери Prusa використовуючи систему руху XZ head [2]

Хоча ці 3D-принтери мають численні переваги перед іншими, мабуть, найбільш цінною є їх здатність обробляти друк з набагато більшою швидкістю. Принтери в стилі CoreXY мають менше і легше рухомих частин, що забезпечує більш швидкий рух гарячого кінця і, отже, друк. Цьому сприяє той факт, що двигуни, що відповідають за рух XY, нерухомі і прикріплені до рами принтера, значно зменшуючи вібрацію.

Однак, покладаючись занадто багато на довгі ремені ГРМ може бути проблемою, тому що вони завжди повинні бути належним чином вирівняні і натягнуті. Низько натягнуті ремені можуть призвести до неточних рухів, тоді як надмірно натягнуті ремені збільшать знос. Низькоякісні ремені також можуть бути основним джерелом проблем у цьому типі принтера.

3D-принтери H-bot дуже схожі за стилем і часто плутаються з принтерами CoreXY, хоча вони відрізняються конфігурацією ременів. У той час як CoreXY використовує два ремені, принтери H-bot стилю використовують лише один, що призводить до деяких відмінностей у вібрації та крутному моменті. Оскільки натяг цього одного ременя є дуже важливим, він вимагає постійного налаштування. Крім того, специфічна конфігурація ременя показала, що вона

сприяє небажаному "перетягуванню канату" під час руху друкуючої головки. Через ці причини H-bot принтери втратили популярність з моменту їх появи.

Стрічкові 3D-принтери є недавнім і досить унікальним доповненням до світу 3D-друку FDM (Рис. 1.13). «Стрічковий» відноситься до того, що платформа збірки являє собою конвеєрну стрічку. Це, мабуть, основна точка продажу цих машин, оскільки вона дозволяє користувачам створювати дуже довгі деталі або повторювано виробляти деталі, не потребуючи зупинки принтера (теоретично).

У більшості випадків стрічкові 3D-принтери - це або CoreXY, або XY-головний принтер з рамкою, нахиленою відносно платформи складання (ремня), що означає, що система координат ефективно нахилена. З цієї причини стрічкові принтери, як кажуть, мають «нескінченну» вісь Z. Наслідком цього є те, що загальна швидкість друку зменшується, а друк може потребувати додаткових структур підтримки [2].



Рисунок 1.13 – Стрічковий 3D-принтер демонструючи «нескінченну» вісь Z у вигляді конвеєрної стрічки [2]

Ці принтери також обмежені з точки зору матеріалів, які вони можуть використовувати, оскільки їм не вистачає підігріву стола друку; такі матеріали, як ABS, можуть мати серйозні проблеми зчеплення з робочою поверхнею.

Переходячи від прямолінійних принтерів, дельта-3D-принтери використовують досить унікальний механізм руху, відомий в індустрії як «дельта-робот» (Рис. 1.14). Гарячий кінець у цих машинах кріпиться до трьох рухомих рукавів, кожна з яких з'єднана з власною вертикальною рейкою. Жоден з рукавів не відповідає якійсь окремій осі, оскільки всі гарячі кінцеві рухи виконуються всіма трьома руками одночасно [2].

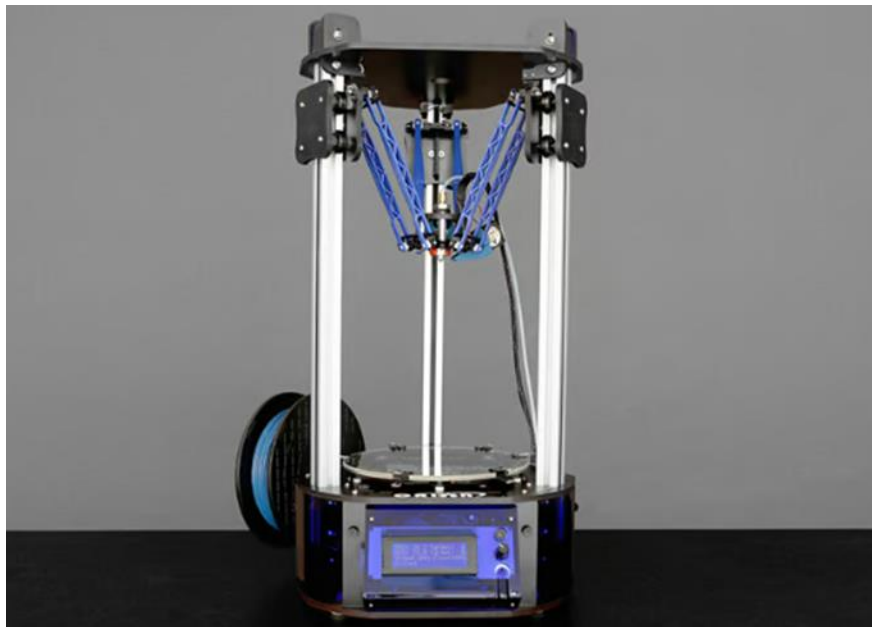


Рисунок 1.14 – Дельта 3Д-принтер ORION [31]

Хоча його все ще вважають декартовим принтером, кінематика дельта-принтерів не така інтуїтивна, як у порівнянні з прямолінійними типами. Характер руху в дельта-принтерах робить дуже швидкі та точні маневри, оскільки друкована шпилька може бути набагато легшою, ніж на прямолінійних машинах. Це зменшує інерцію руху printhead, що дозволяє прискорити рух і зменшити вібрації.

Дельта-принтери мають повністю стаціонарні круглі складальні пластини, які добре працюють при друку кругових моделей. Крім того, їх унікальний

дизайн сприяє висоті і зазвичай використовується при друку більш високих об'єктів. При цьому менші розміри XY можуть бути граничними. Ці принтери також важче калібрувати та усувати через їх більшу складність.

SCARA означає “шарнірний робот-маніпулятор виборчої відповідності”. Як випливає з назви, він використовує роботизовані маніпулятори для здійснення руху по осям XY, тоді як вертикальний рух (по осі Z) зазвичай здійснюється виключно за рахунок робочої платформи (Рис. 1.15) [2].



Рисунок 1.15 – 3D-принтер SCARA[2]

Обидва роботизовані маніпулятори приводяться в дію двома окремими моторами, і їхній узгоджений рух дозволяє розташовувати гарячий кінець в межах площини XY. Правильна система механічних з'єднань дозволяє узгодженим маніпуляторам досягати всієї будівельної поверхні. Рух по осі Z часто виконується за допомогою одного крокового двигуна.

Ці принтери можуть бути швидкими, але для їхньої правильної роботи потрібні високоякісні рухомі з'єднання. Завдяки своїй унікальній конфігурації, 3D-принтери SCARA також можуть займати менше місця порівняно з прямолінійними машинами. Тим не менш, SCARA, ймовірно, є найрідкіснішою конфігурацією 3D-принтерів, яку ви знайдете на ринку [2].

1.8 Проблеми та недоліки FDM друку

Однією з основних проблем Fused Deposition Modeling (FDM) друку є якість поверхні виробів. Через пошарове накладання матеріалу, поверхня деталей, створених методом FDM, часто має видимі лінії між шарами. Це особливо помітно при використанні великої висоти шару, що призводить до грубої поверхні і потребує додаткової обробки для досягнення бажаної гладкості. Наприклад, висота шару 0,3 мм забезпечує швидший друк, але створює більш грубу поверхню порівняно з шаром 0,1 мм (Рис. 1.17), який дає більш гладку поверхню, але значно збільшує час друку [41]. Крім того, при друку деталей з тонкими стінками можуть виникати проблеми з рівномірністю накладання шарів, що впливає на зовнішній вигляд і точність виготовлених об'єктів [5].

LAYER HEIGHT 0.20 mm	LAYER HEIGHT 0.10 mm	SMOOTH VARIABLE LAYER HEIGHT 0.07 ~ 0.25 mm
1h : 50min	3h : 45min	2h : 20min
		

Рисунок 1.17 – Приклад порівняння висоти шару 3D-принтера та часу друку [46]

Міцність деталей, надрукованих за допомогою FDM, також сильно залежить від напрямку друку. Оскільки матеріал накладається шарами, деталі зазвичай мають різну міцність у різних напрямках. Це явище відоме як анізотропія матеріалу. Зокрема, міцність деталей вздовж осі Z (перпендикулярно до шарів) значно нижча, ніж у напрямках X і Y (паралельно до шарів). Це

пов'язано з тим, що зчеплення між шарами менш міцне, ніж внутрішня міцність кожного шару. Наприклад, випробування на розтягування показують, що зразки, надруковані горизонтально (паралельно до шарів), мають вищу міцність, ніж зразки, надруковані вертикально (перпендикулярно до шарів) [24]. Ця анізотропія матеріалу обмежує застосування FDM друку для деталей, що піддаються високим навантаженням у всіх напрямках. Крім того, анізотропія може призвести до утворення тріщин вздовж меж шарів, що знижує загальну надійність і довговічність деталей [33].

Ще одна проблема, пов'язана з FDM друком, полягає у вимогах до адгезії між шарами. Недостатнє зчеплення може призвести до розшарування і розривів, особливо при друку великих і складних деталей. Це може бути викликано неправильними налаштуваннями температури екструдера, недостатньою температурою платформи або неправильно підбраною швидкістю друку [41]. Окрім того, вплив навколишнього середовища, такого як протяги або коливання температури, може додатково знижувати якість друку і адгезію між шарами. Наприклад, використання охолоджувачів для швидкого охолодження шарів може призвести до поганого зчеплення між шарами, оскільки матеріал не встигає повністю зв'язатися [5]. На рис. 1.18 показана адгезія робочої платформи та на рис. 1.19 низька адгезія високого предмету.

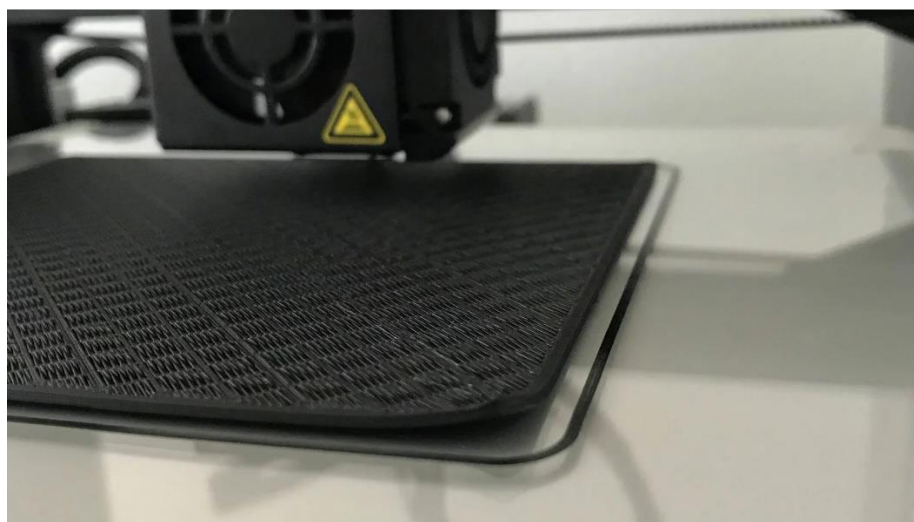


Рисунок 1.18 – Адгезія робочої платформи [43]



Рисунок 1.19 – Низька адгезія високого предмету [49]

Точність виготовлення деталей також є важливим аспектом FDM друку. Пошарове накладання матеріалу і обмежена точність позиціонування екструдера можуть призвести до неточностей у розмірах і формах деталей. Це особливо критично для дрібних і складних об'єктів, де потрібна висока точність. Важливо враховувати, що кожен шар додає свою похибку, і ці похибки накопичуються, що може призвести до значних відхилень від проектних розмірів [24]. Крім того, використання підтримуючих структур для друку навислих частин може залишити сліди на поверхні після їх видалення, що також впливає на якість виготовлених деталей [33].

Важливо також зазначити, що процес калібрування платформи і екструдера має великий вплив на якість друку. Неправильне калібрування може призвести до нерівномірного нанесення першого шару, що впливає на подальші шари і може призвести до деформації (Рис. 1.20) і втрати точності. Регулярне калібрування і налаштування обладнання є ключовими для забезпечення високої якості друку [41].



Рисунок 1.20 – Відсутність деяких шарів [49]

Ще одним важливим аспектом є вибір матеріалу для друку. Різні матеріали мають різні властивості, які впливають на адгезію між шарами, міцність і довговічність деталей. Наприклад, PLA є легким у використанні і біорозкладним матеріалом, але його міцність і термостійкість нижчі порівняно з ABS. ABS, у свою чергу, має кращу міцність і стійкість до температур, але його друк складніший через вищі вимоги до температури платформи і можливість деформації [5]. Інші матеріали, такі як PETG, TPU та композитні філаменти з додаванням вуглецевих волокон, також мають свої специфічні властивості і вимоги до друку, що потрібно враховувати при виборі матеріалу [24].

Щільність заповнення деталей також впливає на їх міцність і вагу. Висока щільність заповнення (80-100%) забезпечує високу міцність, але збільшує час друку і витрати матеріалу. Розріджене заповнення (20-30%) зменшує вагу і витрати матеріалу, але може не забезпечити необхідну міцність для деяких застосувань. Вибір оптимальної щільності заповнення залежить від вимог до кінцевого виробу і його призначення [33]. На рис. 1.21 наведено приклад внутрішнього заповнення.

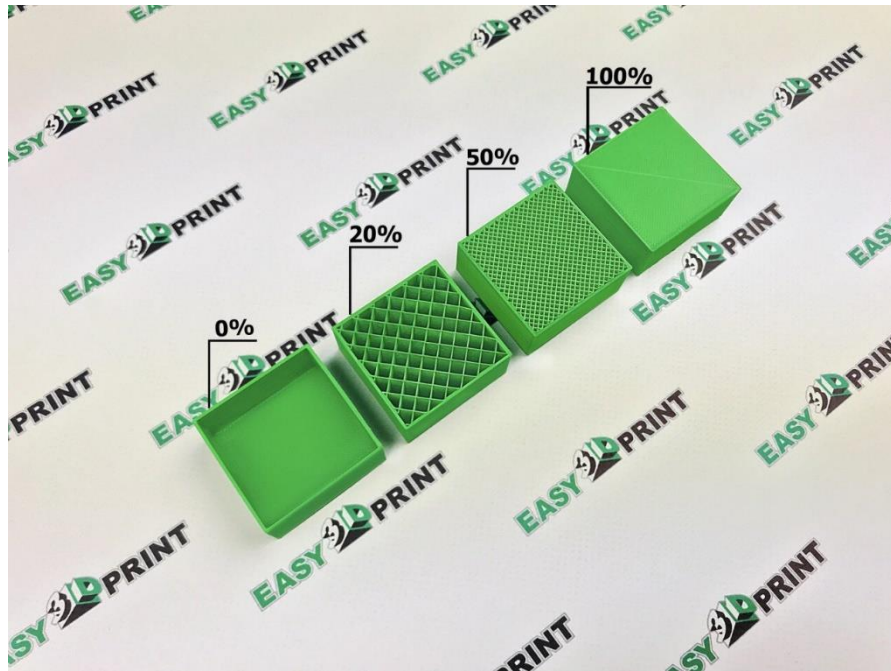


Рисунок 1.21 – відсоток внутрішнього заповнення [20]

Крім того, вплив температурного режиму під час друку і після нього має велике значення для якості деталей. Занадто швидке охолодження може призвести до виникнення внутрішніх напружень і тріщин у матеріалі. Використання спеціальних умов для охолодження і подальшої обробки, таких як термопечі, може покращити властивості деталей і зменшити внутрішні напруження [41].

Нарешті, проблеми FDM друку також можуть бути пов'язані з використанням підтримуючих структур (Рис. 1.22). Хоча вони необхідні для друку складних геометричних форм і навислих частин, їх видалення після друку може залишати сліди і пошкодження на поверхні деталей. Для зменшення цього впливу важливо правильно налаштовувати параметри друку підтримуючих структур і вибирати матеріали, які легко видаляються [5].

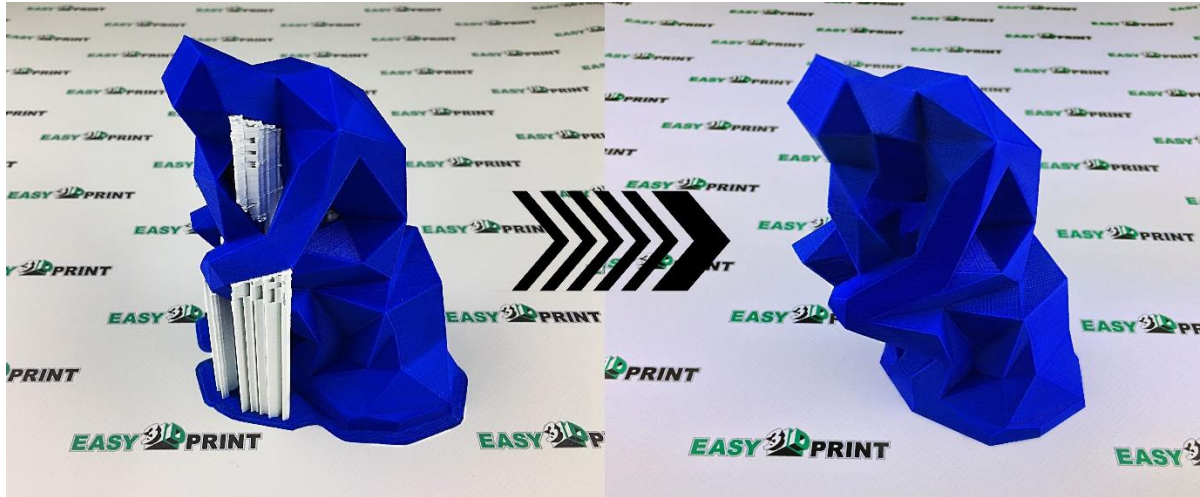


Рисунок 1.22 – Підтримки нависаючих елементів тривимірної моделі [20]

Загалом, хоча FDM друк є популярною і доступною технологією, він має ряд технічних обмежень і проблем, які слід враховувати при проектуванні і виготовленні деталей. Важливо ретельно налаштовувати параметри друку, вибрати відповідні матеріали і враховувати специфіку кожного проекту для досягнення найкращих результатів.

1.9 Непланарне викладання філаменту

Непланарне викладання філаменту є інноваційною методикою в галузі адитивного виробництва, яка дозволяє значно розширити можливості традиційного тривимірного друку. Ця технологія включає накладання матеріалу не лише у стандартній горизонтальній площині, але й у різних напрямках та під різними кутами, що забезпечує створення складніших геометричних форм і покращення механічних властивостей друківаних виробів.

Моделювання плавленого осадження неплосинного шару (FDM) – це будь-яка форма моделювання плавленого осадження, де 3D-друковані шари не є плоскими або однакової товщини (рис. 1.23) [3].

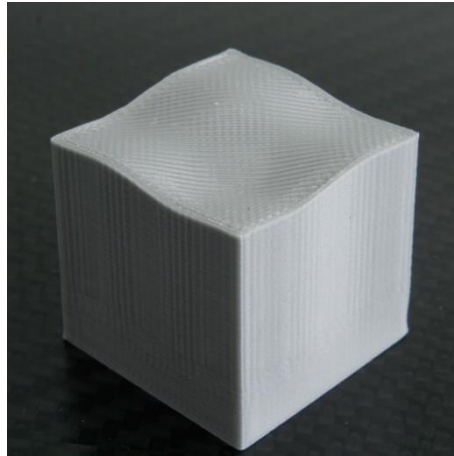


Рисунок 1.23 – Непланарний FDM 3Д-друк [3]

Непланарний друк значно складніший у функціонуванні, ніж звичайний FDM-друк, тому це вимагає деяких модифікацій FDM 3D-принтера для роботи, сопла та друку.

В ідеалі, непловий 3D-друк виконується за допомогою дещо загостреного сопла, оскільки плоскі сопла мають тенденцію впадати в раніше надрукований матеріал і легко заплутуються в структурах заповнення. Як правило, загострене сопло забезпечує більш круті кути друку, хоча завжди потрібно переконуватися, що інші частини сопла або друкуючої головки не заважають. Особливо кріплення вентиляторів або повітропроводи схильні до зіткнень з частинами друку. Було використано хотенд та сопло E3Dv6 для прикладу (рис. 1.24), хоча, ймовірно, є і кращі рішення. Зокрема, Merlin hotend має дуже тонке і загострене сопло, єдине, що може завадити, – це блок нагрівача [3].

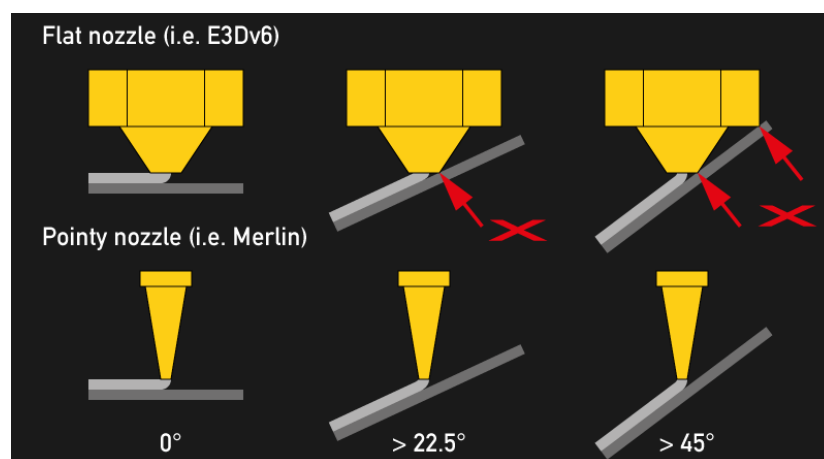


Рисунок 1.24 – Вплив розмірів сопла на непланарний друк [3]

Неплощинні друковані деталі здаються міцнішими, ніж їх плоскі аналоги. Це може видатись скептичним, але різна орієнтація контактних поверхонь між шарами може призвести до більш рівномірного опору розтягуванню. Плоскі друковані деталі FDM, як правило, менш стійкі до розтягуючих напружень вздовж осі напрямку побудови, ніж уздовж двох інших розмірів, що може призвести до розшарування. З'єднані, неплоскі шари можуть розподіляти зусилля розтягування на поєднання сил розтягування та зсуву, причому останнє є особливою міцністю друкованих деталей FDM [3]. На рис. 1.25 показано, як зсувний компонент FS збільшується зі збільшенням переміщення.

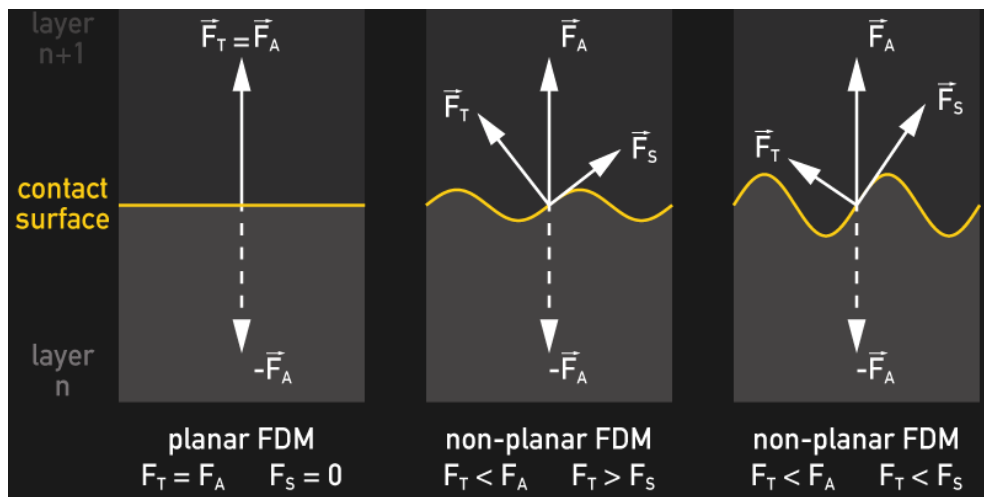


Рисунок 1.25 – Графік залежності зсувного компоненту від переміщення [3]

Складність непланарного 3D-друку полягає в необхідному програмному забезпеченні складних алгоритмах нарізки та складних алгоритмах нарізки. Ці системи обчислюють найбільш дієвий шлях для кожного шару, що відповідає кривизні об'єкта, забезпечуючи цілісність структури кінцевого продукту. Ця складність означає збільшення обчислювальних вимог, для цього вимагається більш надійне обчислювальне обладнання та тривалий час обробки.

Для постоброблення G-коду зібрано невеликий скрипт, який дозволяє генерувати непланарний G-код за допомогою Slic3r. Отримати скрипт можна із репозиторію GitHub, який також містить детальні інструкції щодо його використання. Він також містить кілька прикладів: Перші три приклади — це

куб, разом із такою ж функцією синусоїдального зміщення. Четвертий приклад — модель крила літака (рис. 1.26) [3].

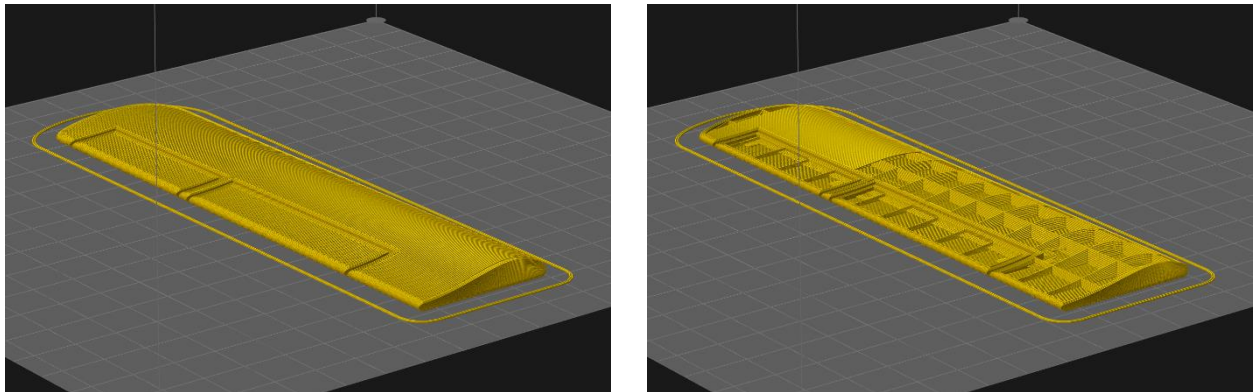


Рисунок 1.26 – Принцип друку моделі крила літака [3]

Незважаючи на свої переваги, непланарний викладення філаменту не позбавлений своїх проблем. Наприклад такі проблеми, як підтримання точності розмірів та уникнення викривлення або спотворення, забезпечення послідовної адгезії між вигнутими шарами, які потрібно подолати. Також, відсутність широкої підтримки програмного забезпечення для слайсерів серед 3D-принтерів, яке обмежує доступність цієї технології.

Непланарний 3D-друк має революціонувати функціональні якості 3D-друкованих об'єктів, особливо тих, які потребують складних деталей або гладких поверхонь. Поточні досягнення в галузі програмного забезпечення, обладнання та матеріалознавства матимуть вирішальне значення для розкриття її повного потенціалу та вирішення її поточних обмежень.

1.10 Багатоосьовий друк

Багатоосьовий друк на 3D принтерах представляє собою нову еру в адитивному виробництві, яка дозволяє значно розширити можливості традиційного тривимірного друку. Ця технологія, яка включає використання більше трьох осей руху для друку, відкриває нові горизонти для створення складних геометричних форм та підвищення якості друкованих виробів. У традиційних 3D принтерах, як правило, використовується три осі (X, Y, Z), що

обмежує можливості друку складних структур без використання підтримуючих елементів. Багатоосьовий друк додає додаткові осі, такі як обертання навколо осей або додаткові лінійні рухи, що дозволяє друкувати складніші конструкції без необхідності у підтримках і з покращеною структурною цілісністю.

Одна з ключових переваг багатоосьового друку полягає у здатності досягати більш високої якості поверхні та деталізації виробів. Використання додаткових осей дозволяє уникнути традиційних обмежень FDM друку, таких як видимі лінії між шарами, що значно покращує зовнішній вигляд готових деталей. Наприклад, можливість друку під різними кутами дозволяє уникнути накопичення шарів у вертикальному напрямку, що забезпечує більш гладку поверхню та зменшує потребу в постобробці [41].

Ще однією важливою перевагою багатоосьового друку є підвищена структурна цілісність і міцність деталей. У традиційному 3D друку адгезія між шарами є слабким місцем, що може призводити до зниження міцності деталей вздовж осі Z. Використання додаткових осей дозволяє друкувати таким чином, щоб зчеплення між шарами було більш рівномірним і міцним, що значно підвищує загальну міцність виробів. Це особливо важливо для деталей, що піддаються механічним навантаженням або використовуються в критичних застосуваннях [41].

Багатоосьовий друк також значно розширює можливості проектування. Інженери та дизайнери можуть створювати більш складні конструкції без обмежень, пов'язаних з необхідністю додаткових підтримуючих структур. Це дозволяє реалізовувати більш складні геометричні форми, внутрішні канали та інші елементи, які раніше були неможливі або дуже складні у виготовленні за допомогою традиційного 3D друку. Наприклад, у виробництві компонентів для аерокосмічної або автомобільної галузей це може призвести до значного зниження ваги деталей при збереженні або навіть підвищенні їх міцності [24].

Крім того, багатоосьовий друк відкриває нові можливості для використання різних матеріалів в одному процесі друку. Завдяки додатковим

осям можна більш точно контролювати процес накладання матеріалів, що дозволяє створювати багат шарові структури з різними фізичними властивостями. Це може бути особливо корисно для створення композитних матеріалів, де поєднання різних типів матеріалів може забезпечити кращі експлуатаційні характеристики кінцевих виробів [33].

Одним із найбільших викликів, з якими стикається багатоосьовий друк, є складність управління та програмного забезпечення. Розширення кількості осей потребує більш складних алгоритмів управління і більш потужного програмного забезпечення для генерації траєкторій друку. Це вимагає додаткових зусиль з боку розробників програмного забезпечення і користувачів для освоєння нових інструментів і методів проектування. Однак, розвиток програмного забезпечення для багатоосьового друку активно триває, і все більше інструментів стають доступними для полегшення цього процесу [26].

Варто також зазначити, що багатоосьовий друк може мати значний вплив на економічну ефективність виробництва. Хоча початкові інвестиції в обладнання та програмне забезпечення можуть бути високими, з часом ці витрати можуть бути компенсовані за рахунок зниження витрат на матеріали, підвищення якості продукції і скорочення часу на постобробку. Крім того, можливість виготовлення більш складних деталей за один цикл друку може знизити потребу в складних складальних процесах, що також сприяє зниженню витрат [22].

Багатоосьовий друк також сприяє розвитку нових галузей застосування адитивного виробництва. Наприклад, у медичній галузі можливість друку складних анатомічних моделей і імплантатів, точно адаптованих до індивідуальних особливостей пацієнта, відкриває нові перспективи для хірургічних операцій і протезування. У архітектурі та будівництві багатоосьовий друк може використовуватися для створення складних конструкцій і деталей з високою точністю і мінімальними витратами матеріалу [23].

У галузі наукових досліджень багатоосьовий друк також знаходить широке застосування. Наприклад, у матеріалознавстві ця технологія дозволяє досліджувати нові композиційні матеріали і їх властивості, створюючи зразки з різними конфігураціями і характеристиками. Це відкриває нові можливості для розробки інноваційних матеріалів з покращеними експлуатаційними властивостями [10].

Попри всі переваги, багатоосьовий друк стикається з певними технічними викликами. Одним з них є забезпечення точності і повторюваності друку. Додаткові осі і рухи вимагають більш точного контролю і калібрування обладнання, що може бути складним завданням. Крім того, використання кількох матеріалів у одному процесі друку може вимагати спеціальних умов і налаштувань для забезпечення оптимального зчеплення і сумісності матеріалів [42].

Не менш важливим є питання безпеки при використанні багатоосьових 3D принтерів. Додаткові осі і рухомі частини підвищують ризик механічних пошкоджень і аварій. Тому необхідно впроваджувати додаткові заходи безпеки і системи контролю для забезпечення безпечної експлуатації обладнання [12].

Багатоосьовий друк також вимагає розвитку відповідної інфраструктури та стандартів. Впровадження цієї технології у промисловість потребує розробки нових стандартів і методик для сертифікації продукції, що може бути тривалим і складним процесом. Однак, з розвитком технології і її широким застосуванням, ці питання поступово вирішуються, і багатоосьовий друк стає все більш доступним для широкого кола користувачів [16].

У перспективі багатоосьовий друк має потенціал стати ключовою технологією в індустрії 4.0, де цифрові технології інтегруються у всі аспекти виробничих процесів. Це дозволить створювати повністю автоматизовані і гнучкі виробничі системи, які можуть швидко адаптуватися до змін ринку і забезпечувати високу якість продукції. У поєднанні з такими технологіями, як

штучний інтелект, Інтернет речей і великі дані, багатоосьовий друк має потенціал стати рушійною силою нової промислової революції [34].

Багатоосьовий друк на 3D принтерах є надзвичайно актуальною і перспективною технологією, яка має потенціал значно підвищити ефективність виробничих процесів, скоротити витрати, створити нові можливості для інновацій і забезпечити високу якість продукції. Водночас, для реалізації цього потенціалу необхідно подолати ряд викликів та обмежень, таких як забезпечення точності і повторюваності друку, розвиток відповідного програмного забезпечення, впровадження стандартів і методик сертифікації, а також забезпечення безпеки експлуатації обладнання.

Попри ці виклики, перспективи багатоосового друку залишаються дуже позитивними, і ця технологія продовжуватиме відігравати важливу роль у розвитку сучасної економіки і технологій.

Висновок

Загалом, адитивне виробництво має великий потенціал для розвитку і вже сьогодні відіграє важливу роль у багатьох галузях. Перехід до багатоосового друку дозволить ще більше підвищити ефективність та якість виробничих процесів, створити нові можливості для інновацій та забезпечити конкурентні переваги на ринку. Впровадження цих технологій потребує інвестицій у розвиток інфраструктури, навчання персоналу та адаптації існуючих виробничих процесів, але результати вартують цих зусиль.

FDM друк, зокрема, є однією з найбільш доступних і популярних технологій адитивного виробництва завдяки своїй простоті та широким можливостям. Водночас, для досягнення ще кращих результатів у FDM друці, необхідно розвивати багатоосьовий друк. Цей напрямок дозволить значно покращити міцність та якість деталей, зменшити потребу у підтримуючих структурах і розширити можливості створення складних геометричних форм. У перспективі, адитивне виробництво, включаючи багатоосьовий друк, стане

невід'ємною частиною індустрії, де цифрові технології забезпечать новий рівень автоматизації та гнучкості виробництва.

2 Застосування обертового модулю в конструкції принтеру

Для розширення можливостей друку і підвищені якості деталей був створений модуль FDM принтеру для багатоосьового друку. Впровадження обертового модуля в конструкцію 3Д-друку значно розширює можливості друку, підвищує якість і збільшує міцність виготовленої деталі.

Додаючи осі обертання, можна створювати складну геометрію, яка не буде впливати на якість поверхні та не буде необхідності в додаткових опорах. Традиційні галузі виробництва вже давно використовують 5-осьові системи для фрезерних верстатів із ЧПК[8]. Під час друку з різних напрямків, деталь може вийти набагато міцніше, ніж при простому укладанні шарів у напрямку осі Z.

2.1 Аналіз взаємодії модулів при відтворені тестової деталі

На рис. 2.1 зображена схема принтеру FDM друку картезіанської системи координат, який складається з модулів повздовжнього, поперечного і вертикального переміщення. На цій схемі показано, що екструдер переміщається по координатам X і Z, а робоча платформа (стіл) по координаті Y.

При такій системі координат принтеру, філамент може викладатися шар за шаром у напрямку осі Z.

Для більш детального розуміння взаємодії модулів принтеру було зроблено дві керуючі програми у програмному забезпеченні UltiMaker Cura. Для цього обрали циліндр з розмірами $D = 20$ мм – зовнішній діаметр, $d = 17$ мм – внутрішній діаметр та $l = 30$ мм – довжина. Матеріал обраний для друку пластик PLA.

Перша програма – циліндр, який розташований перпендикулярно до робочої платформи. Таке розташування деталі дозволяє друкувати її без підтримуючих структур. На рис. 2.2 показана симуляція керуючої програми для

друкування деталі, час друку, який складає 33 хвилини та довжина використаного матеріалу – 1,15 м.

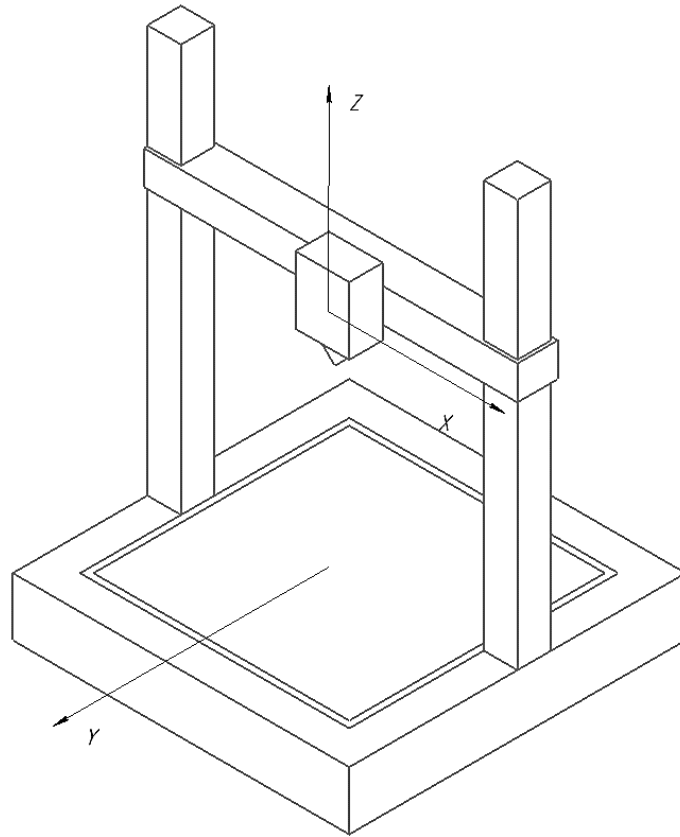


Рисунок 2.1 - Схема принтеру FDM друку картесіанської системи координат

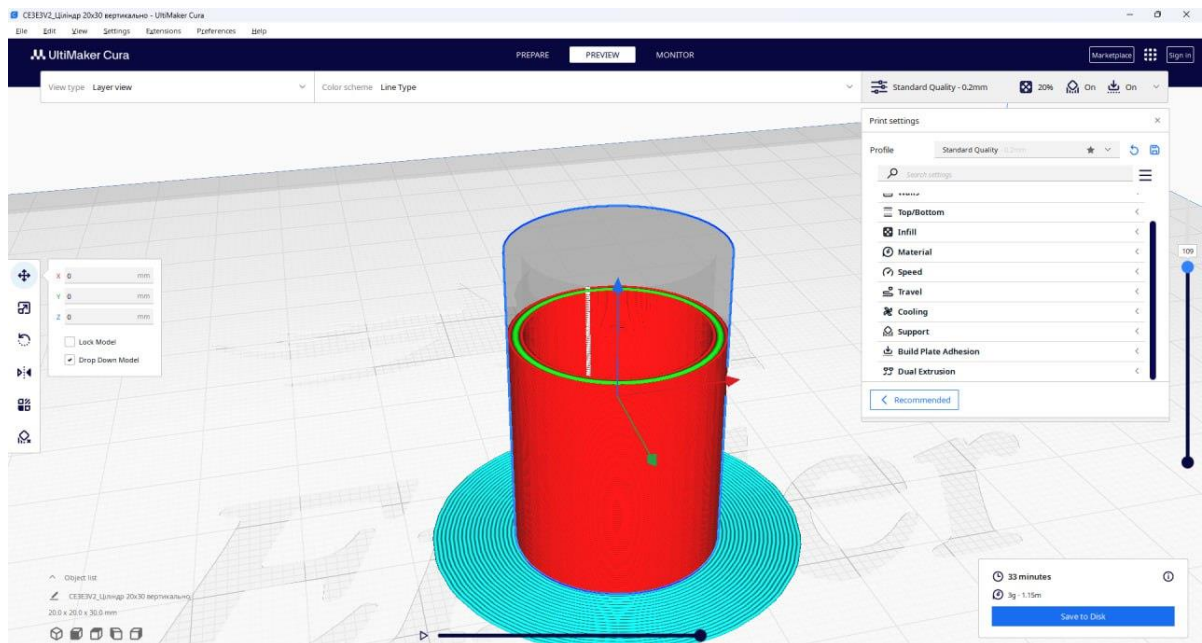


Рисунок 2.2– Симуляція друку циліндру розташованого перпендикулярно до робочої платформи

На рис. 2.3 показаний надрукований циліндр на принтері Creality Ender-3 V3 SE за допомогою першої керуючої програми.



Рисунок 2.3 – Надрукований циліндр за першою керуючою програмою

Друга програма – циліндр, який розташований горизонтально на поверхні робочої платформи. Розміри циліндру однакові з першою програмою. При такому розташуванні деталі потрібні підтримуючі структури. На рис. 2.4 показана симуляція циліндру розташованого горизонтально на поверхні столу. Також, показані підтримки «дерево (tree)», які потрібні для друкування деталі.

«Дерево» один із типів підтримок, що широко використовуються при 3Д-друці. Такі підтримки мають структуру, що нагадує гілки дерева, і мають переваги порівняно із стандартними підтримками. Підтримки типу «дерево» використовують менше матеріалу, оскільки мають мінімальну площу контакту з деталлю та тонкі гілки, що підтримують нависаючі елементи. Через мінімальну площу контактів, такі підтримки легше відокремлювати від поверхні деталі, що зменшує ризик пошкодження її поверхні.

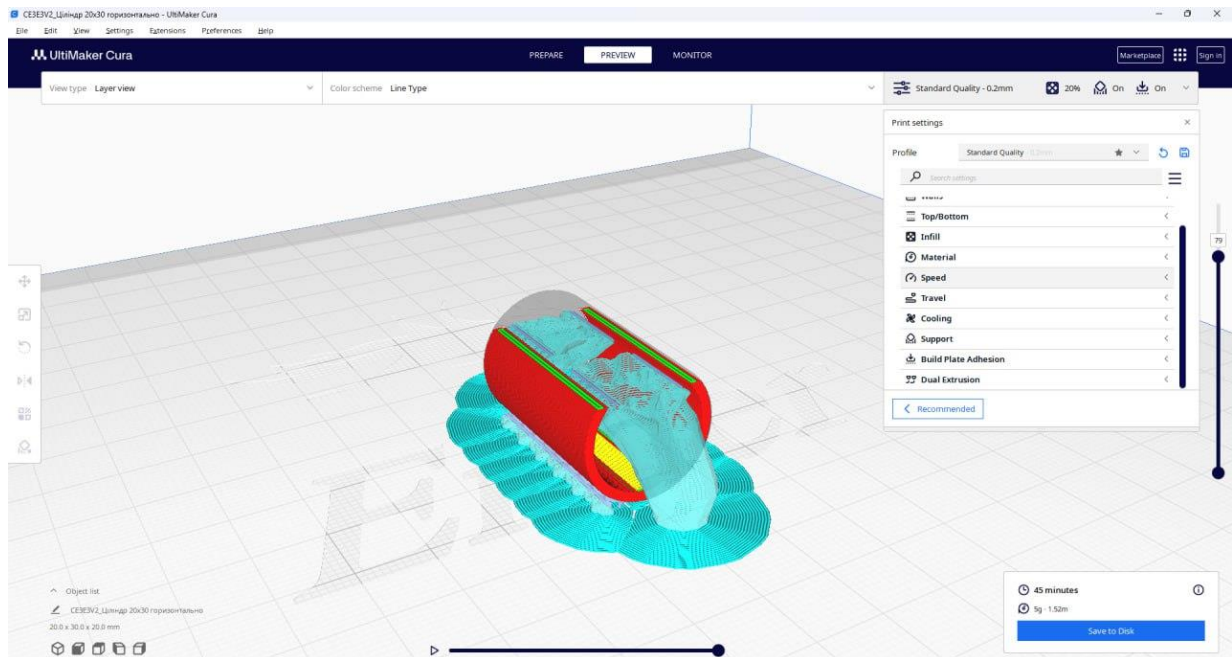


Рисунок 2.4 – Симуляція друку циліндру розташованого горизонтально на поверхні робочої платформи

На рис. 2.5 показано надруковану деталь за допомогою другої керуючої програми на принтері Creality Ender-3 V3 SE. Також надрукована як перша деталь з пластику PLA.



Рисунок 2.5 – Надрукований циліндр за другою керуючою програмою

Час друку другої деталі склав 45 хвилини та довжина використаного матеріалу – 1,52 м.

При друкуванні цих двох тестових деталей метод накладання матеріалу був в напрямку осі Z.

На поперечний модуль переміщення принтеру FDM друку картезіанської системи координат ми додаємо додаткову модулі обертання C і повороту B, як зображено на рис. 2.6. Це дає нам відійти від стандартної викладки матеріалу в декартовій системі координат.

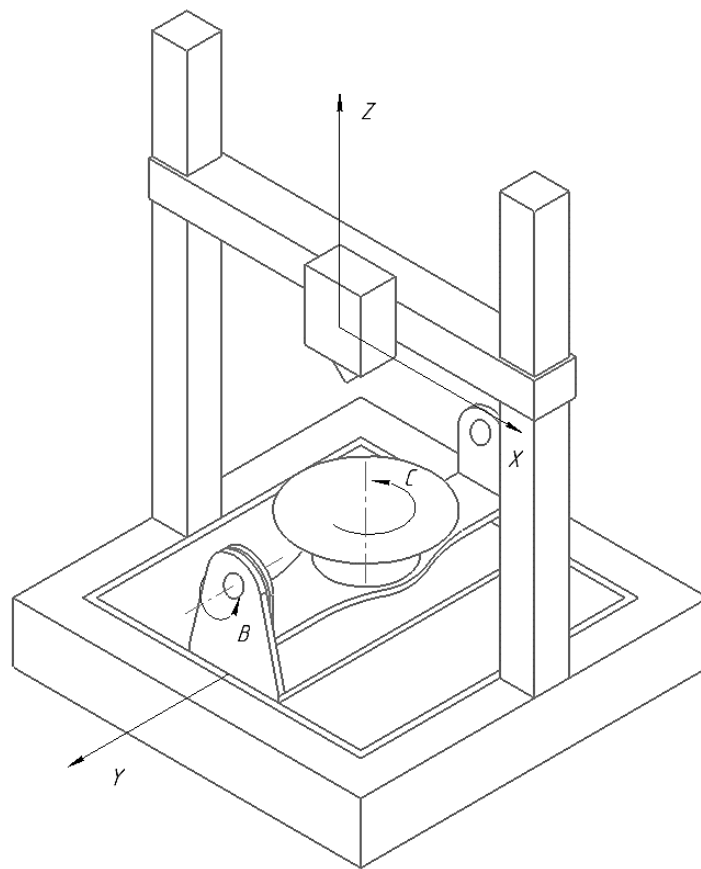


Рисунок 2.6 – Схема принтеру FDM друку з додаванням модулів обертання та повороту

2.2 Схема викладки філаменту тестової деталі

У FDM друці важливо враховувати параметри друку, а саме критичним фактором є адгезія між шарами, що впливає на міцність та якість деталі. Адгезійні площадки використовуються, щоб забезпечити надійне зчеплення між

деталлю та робочою поверхнею (столом) 3Д принтера, а також для уникнення деформацій, відшаровувань та поліпшити загальну стабільність друку.

Ряд основних положень механіки руйнування тонкостінних виробів (оболонки), сформованих методом FDM, сформульовані [25]. Так, показано, що руйнування адитивних конструкцій розпочинається із розвитку дефектів, які формуються у процесі створення виробу і які умовно можна поділити на:

1) дефекти структури, сформовані у процесі викладки філаменту і які передбачаються самім процесом;

2) дефекти процесу, які носять випадковий характер та пов'язані із дією зовнішніх чинників та умов формування;

3) дефекти матеріалу, які проявляються в наявності в матеріалів певних включень, забруднень, а також наявності водяної пари, що відіграє роль активного збурювача плавлення та застигання пластику.

На рис. 2.7 представлена традиційна схема викладки філаменту в технології FDM (Fused Deposition Modeling) друку, де шари викладені паралельно один над одним. Нитки філаменту викладаються одна поряд з іншою на попередній шар. Контакт між нитками філамента утворює адгезійні точки зчеплення, що забезпечує зв'язок між шарами.

Візьмемо маленький прямокутник цього циліндру і розглянемо які напруження діють на філамент. Згідно з [48], виникають σ_M – меридіональне нормальне напруження і σ_T – колове нормальне напруження.

За [48] напружений стан в такій оболонці визначали тільки з рівнянь рівноваги, не розглядаючи геометричний та фізичний аспект задачі. Це пояснюється тим, що ми відразу постулювали закон розподілу напружень по товщині оболонки – вважали їх постійними. Напруження σ_M і σ_T – головні, а третє головне напруження напрямлене нормально до поверхні оболонки в даній точці. На одній з поверхонь оболонки воно дорівнює тиску p , а на протилежній – нулю. В тонкостінних оболонках завжди σ_M і σ_T значно більші ніж p і, отже,

третім головним напруженням порівнянно з σ_M і σ_T можна знехтувати, тобто вважати його нульовим.

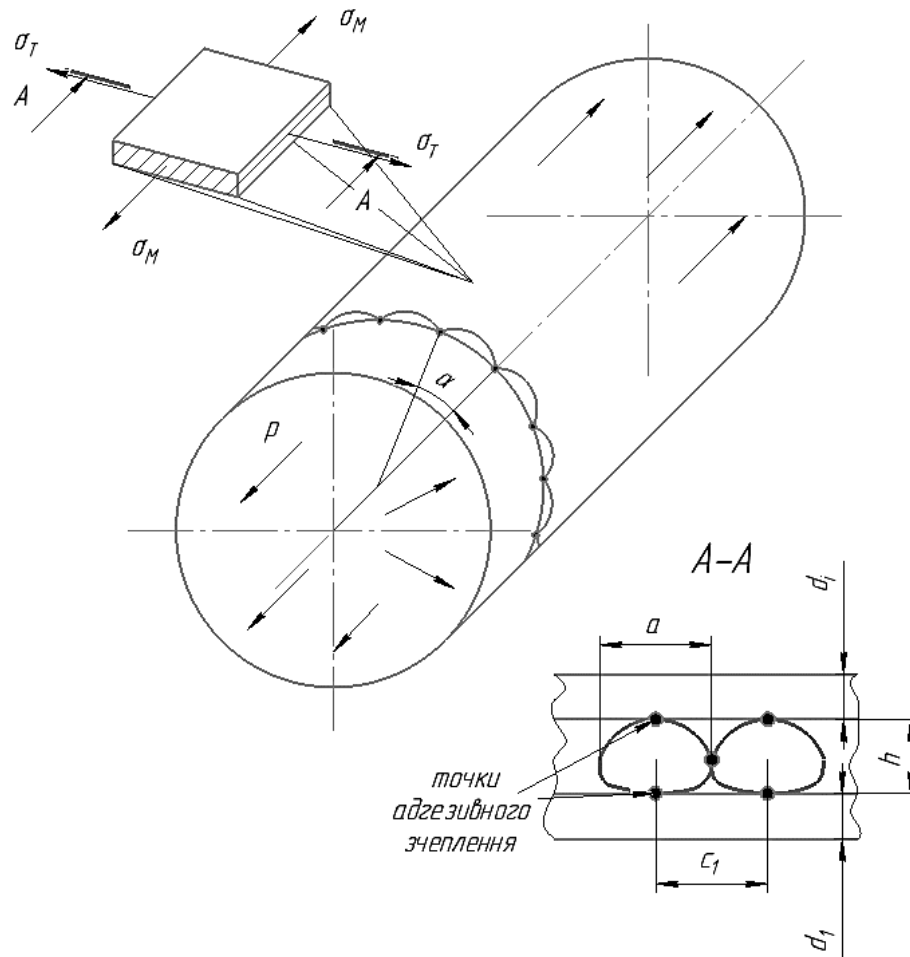


Рисунок 2.7 – Традиційна схема викладки філаменту (шар до шару)

Адгезійні точки – це місця, де нитки філаменту зчеплюються одна з одною, що утворює міцний зв'язок між шарами. Розташування адгезійних точок визначається геометрією викладення філаменту та параметрами друку такими як температура, швидкість, товщина шару. Висока температура філаменту під час викладання сприяє розплавленню поверхневих шарів попередньо викладених ниток, що покращує адгезію. Оптимальна товщина шару дозволяє забезпечити хорошу механічну зв'язок без утворення порожнин чи дефектів.

Нитки викладаються з певним перекриттям для забезпечення кращої адгезії та міцності конструкції. Відстань між нитками регулюється так, щоб забезпечити оптимальне перекриття і зчеплення.

Ця схема демонструє основні принципи та механізми, які діють в процесі FDM друку, забезпечуючи міцність та якість друкованих виробів.

На рис. 2.8 представлена мікрофотографія де зображено перетин адитивно виготовленого виробу, створеного методом FDM друку. Фото показує шари матеріалу, які були нанесені методом екструзії. Видно, що філаменти викладені паралельними шарами один над одним.

Деякі нитки філаменту мають незначні дефекти, такі як тріщини та нерівності поверхні, що може свідчити про налаштування параметрів друку або властивості матеріалу.

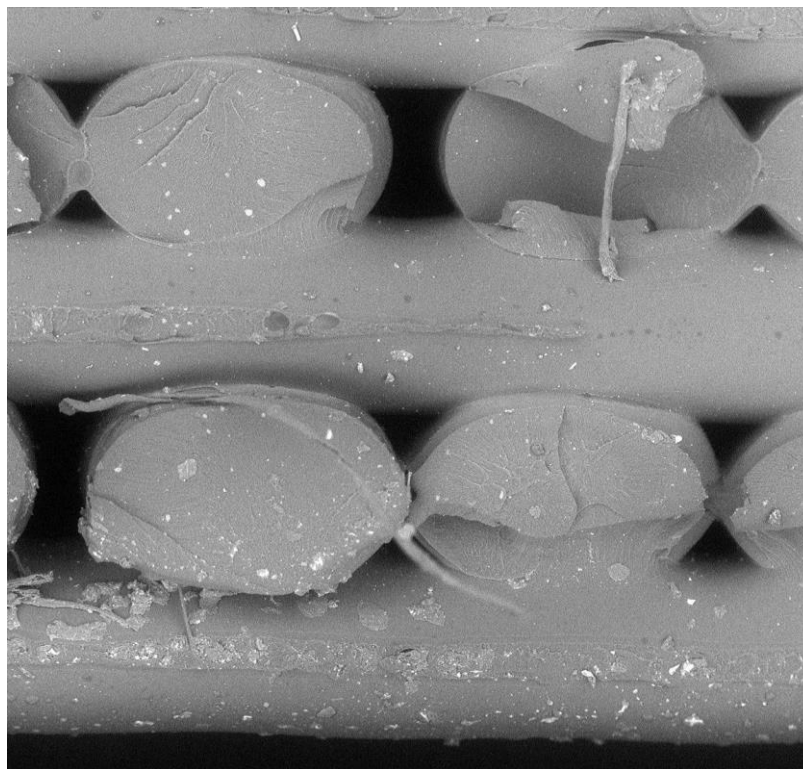


Рисунок 2.8 – Мікрофотографія перетину виробу, створеним методом FDM друку

Фото зроблено з збільшенням у 220 разів, що дозволяє детально розглянути структуру зразка. Використане прискорююче напруження 10 кВ.

Діаметр одного філамента (шару) приблизно 300-350 мікрметрів, що відповідає стандартним налаштуванням FDM принтерів з діаметром насадки 0,4 мм.

На представленому зображенні можна бачити межі між шарами матеріалу, які і є площинами адгезійного зчеплення. Ці площини можна ідентифікувати як місця, де матеріал одного шару контактує з матеріалом іншого, утворюючи з'єднання. Приблизна довжина адгезійного зчеплення між шарами 310-320 мікрметрів. Також можна зазначити з мікрофотографії, що не завжди, нитки філаменту одного шару, утворюють точки або площини адгезійного зчеплення. Якість цих з'єднань визначає міцність та довговічність виробу.

Проаналізувавши метод викладки шар до шару і ознайомившись з деякими недоліками цього методу викладання філаменту, хочу запропонувати метод викладання ниток навхрест при багатоосьовому друці.

На рис. 2.9 представлена схема викладання філаменту навхрест, що використовується при багатоосьовому друці на FDM принтері. Ця схема ілюструє поперечний переріз ниток філаменту, які викладаються під кутом одна до одної, утворюючи сітчасту структуру.

Нитки філаменту викладаються навхрест, створюючи переплетену структуру. Контактні точки між нитками утворюють адгезійні зчеплення, які забезпечують зв'язок між шарами та підвищують міцність конструкції.

Місця, де нитки філаменту зчеплюються одна з одною, забезпечують міцний зв'язок між шарами. Переплетення ниток під кутом утворює множинні точки зчеплення, що покращує механічні властивості виробу.

Позначення d – діаметр викладеної нитки філаменту, а c_2 – це крок викладання ниток.

Висока температура філаменту під час викладання сприяє розплавленню поверхневих шарів попередньо викладених ниток, покращуючи адгезію.

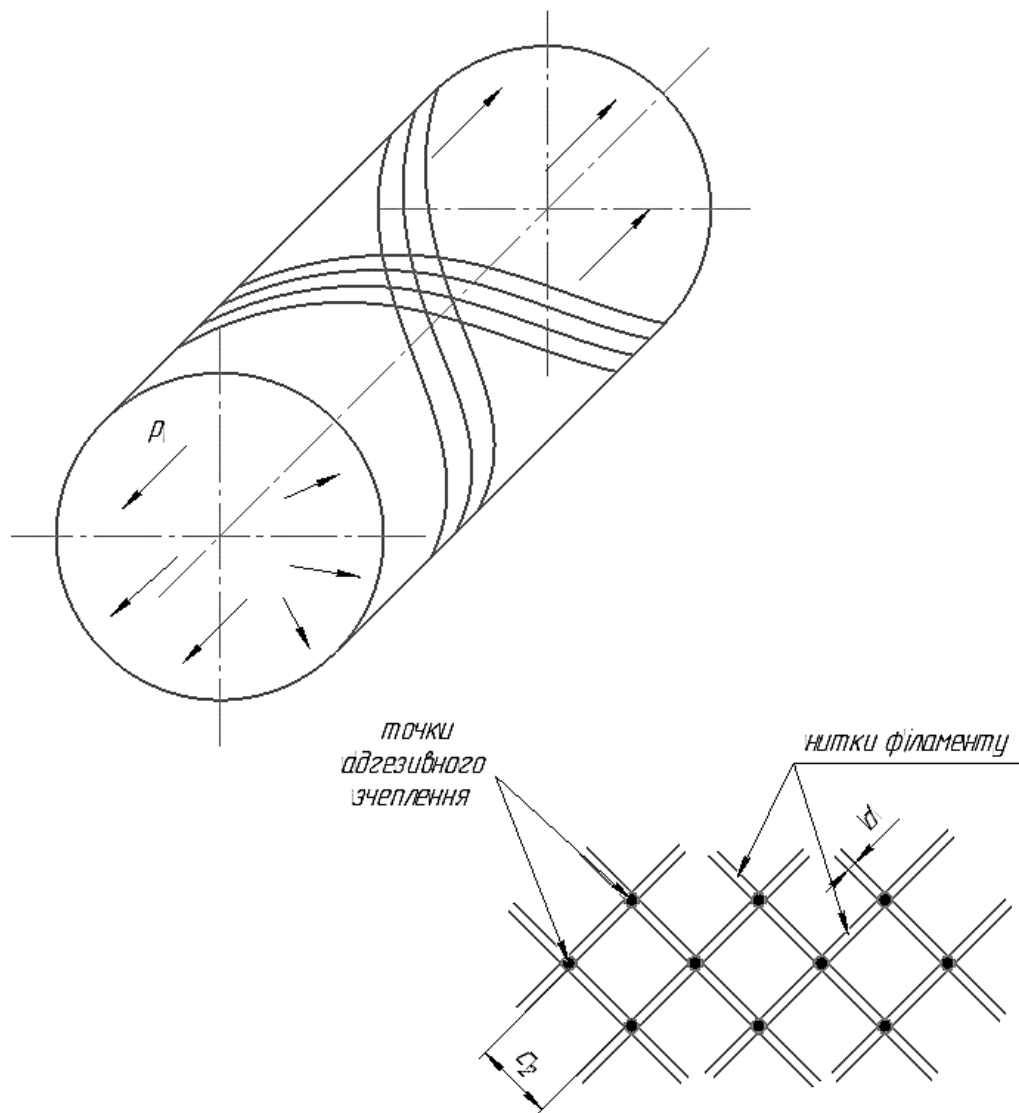


Рисунок 2.9 – Схема викладання філаменту навхрест при багатоосьовому друці

Ця схема демонструє, як переплетення ниток філаменту під кутом у багатоосьовому друці на FDM принтері дозволяє створювати міцні та стабільні структури, що є особливо важливим для виготовлення деталей зі складною геометрією та підвищеними вимогами до механічних властивостей.

Для аналізу та подальших розрахунків приймаємо за тестову деталь – тонкостінний циліндр з розмірами які вказані на рис. 2.10 та з матеріалу – пластик PLA.

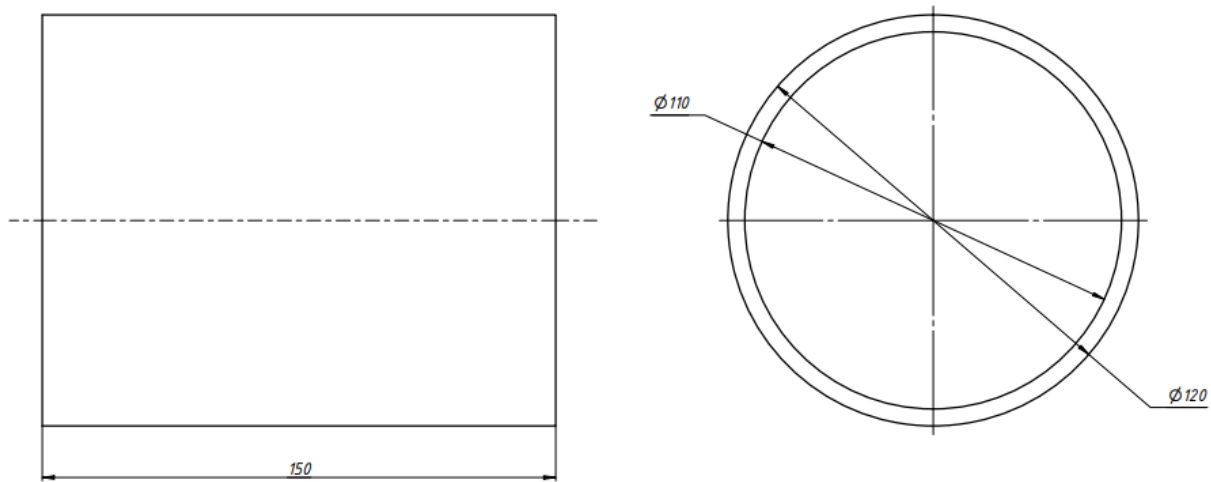


Рисунок 2.10 – Ескіз тестової деталі (циліндр тонкостінний)

2.3 Розрахунок циліндричного тонкостінного сосуду

Для визначення напружень у замкнених тонкостінних конструкціях переважно використовується так звана безмоментна («мембранна») теорія оболонок [48]. За цією теорією стінки судини розглядаються як дуже тонкі оболонки («мембрани»), які не сприймають згинальних моментів.

Судини, що розраховуються за безмоментною теорією, повинні задовольняти обов'язкові умови:

- 1) судини повинні бути тонкостінними (товщина стінок не перевищує однієї двадцятої частини діаметра судини);
- 2) форма судини обов'язково повинна бути тілом обертання;
- 3) навантаження має бути розподіленим (наприклад, газове або гідростатичний тиск), симетричної щодо осі обертання, плавно змінюватись і не мати різких стрибків.

Візьмемо деталь довільної форми в якому є тиск і виріжемо в його стінці малий прямокутник (рис. 2.11) двома меридіанними і двома кільцевими площинами і будемо вивчати цей елемент, що знаходиться в рівновазі згідно з [47]

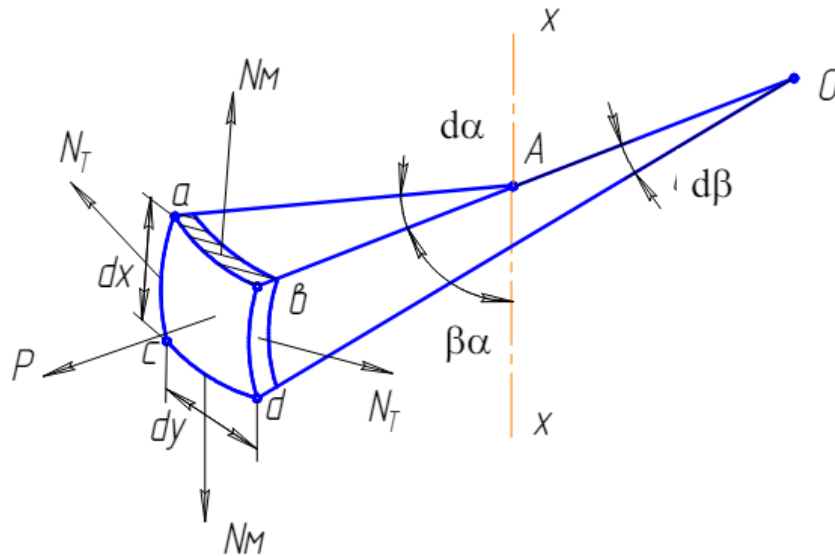


Рисунок 2.11 – Елементи деталі довільної форми [47]

Позначимо, що δ – товщина стінки, dx і dy – розміри квадрата, $d\alpha, d\beta$ – відповідно меридіальні і колові кути, σ_M – напруження меридіональне, σ_T – напруження кругове (тангенціальне).

Векторне рівняння рівноваги:

$$\bar{P} = 2\overline{N_T} + 2\overline{N_M} \quad (2.1)$$

Напишемо рівняння рівноваги для виділеного квадратика, але ці кути, $d\alpha, d\beta$ дуже малі і можна написати:

$$2 \sin \frac{d\alpha}{2} = d\alpha = \frac{dx}{\rho_M};$$

$$2 \sin \frac{d\beta}{2} = d\beta = \frac{dy}{\rho_T}.$$

Тобто попереднє рівняння (2.1) можна записати у такому вигляді, якщо підставити значення кутів:

$$P \cdot dx \cdot dy = \sigma_M \cdot dx \cdot dy \cdot \frac{\delta}{\rho_M} + \sigma_T \cdot dx \cdot dy \cdot \frac{\delta}{\rho_T}$$

Після скорочення отримаємо рівняння Лапласа:

$$\frac{P}{\delta} = \frac{\sigma_M}{\rho_M} + \frac{\sigma_T}{\rho_T} \quad (2.2)$$

Для циліндричної оболонки $\rho_M = \infty$, тоді $\frac{\sigma_M}{\rho_M} = 0$, тобто

$$\frac{P}{\delta} = \frac{\sigma_T}{\rho_T} \quad (2.3)$$

З формули (2.3) знайдемо максимальний тиск

$$P = \frac{\sigma_T \cdot \delta}{\rho_T} \quad (2.4)$$

де σ_T – напруження кругове (тангенціальне);

ρ_T – радіус кільцевий;

δ – товщина стінки.

Пластик PLA має максимальне допустиме напруження до руйнування σ_{max} , яке зазвичай становить приблизно 50-70 МПа (це значення може варіюватися в залежності від конкретного складу PLA та умов друку). Припустимо, що максимальне допустиме напруження для PLA $\sigma_{max} = 60$ МПа.

Підставимо значення у формулу (2.4):

$$P = \frac{60 \cdot 10^6 \cdot 5}{55} = 5,45 \text{ МПа}$$

Зробимо аналіз тестової деталі (рис. 2.12) в програмному забезпеченні Autodesk Fusion. Змоделюємо циліндр з пластику PLA за розмірами вказаними на рис. 2.10. Визначаємо обмеження степенів свободи на торцях циліндру, як зображено на рис. 2.13. Прикладемо максимальний тиск до внутрішньої стінки деталі (рис. 2.14), який був розрахований за формулою (2.4). Зробимо симуляцію в Autodesk Fusion і отримаємо результат.

На рис. 2.15 бачимо, що максимальне загальне переміщення буде 1,421 мм, а мінімальне дорівнює нуль в місцях обмежень степені свободи.

На рис. 2.16 можна побачити, що мінімальний коефіцієнт запасу міцності дорівнює 0,58 при прикладанні максимального допустимого тиску. А це означає, що умова міцності не виконується і деталь зламається відповідно до поточних критеріїв.

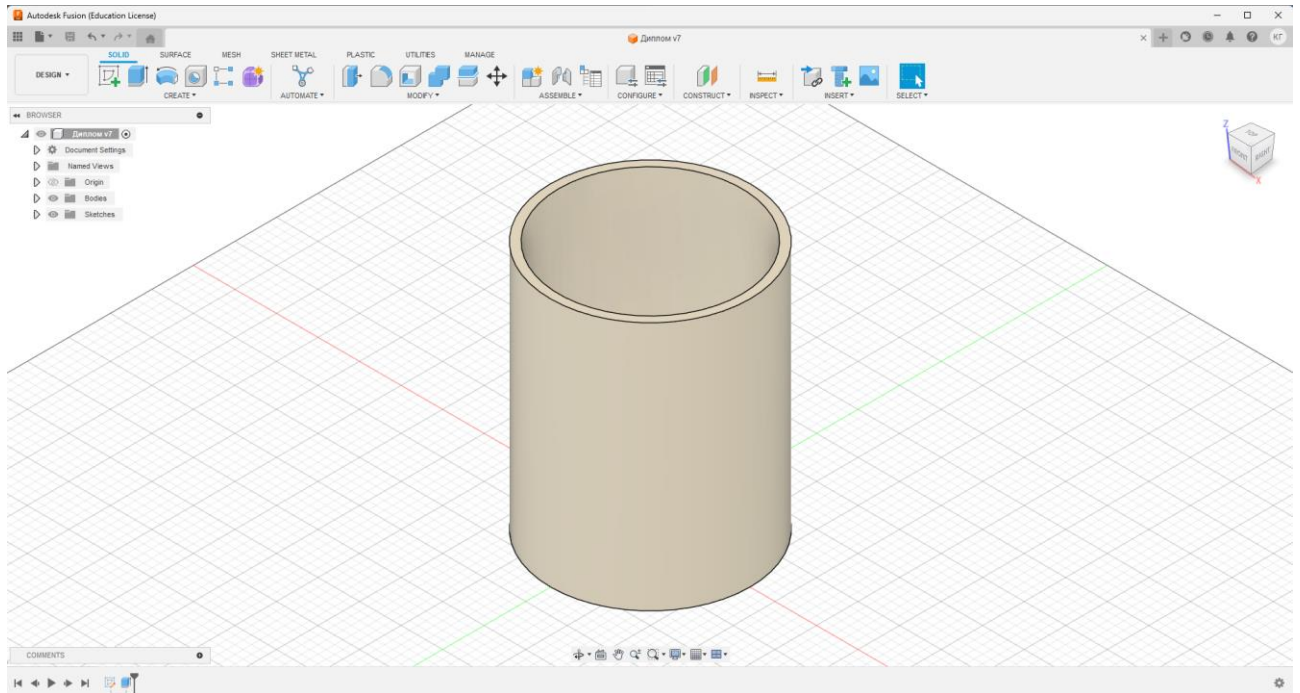


Рисунок 2.12 – Тестова деталь

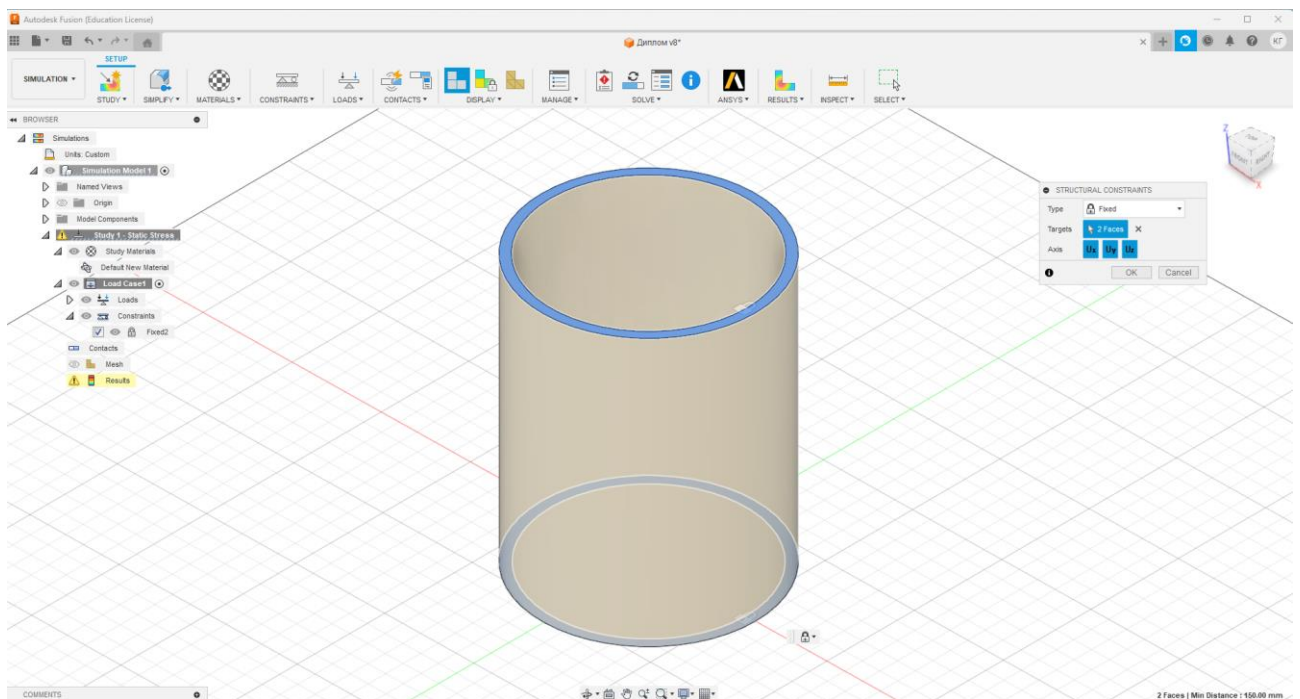


Рисунок 2.13 - Визначення обмежень степенів свободи – Structural Constrains.

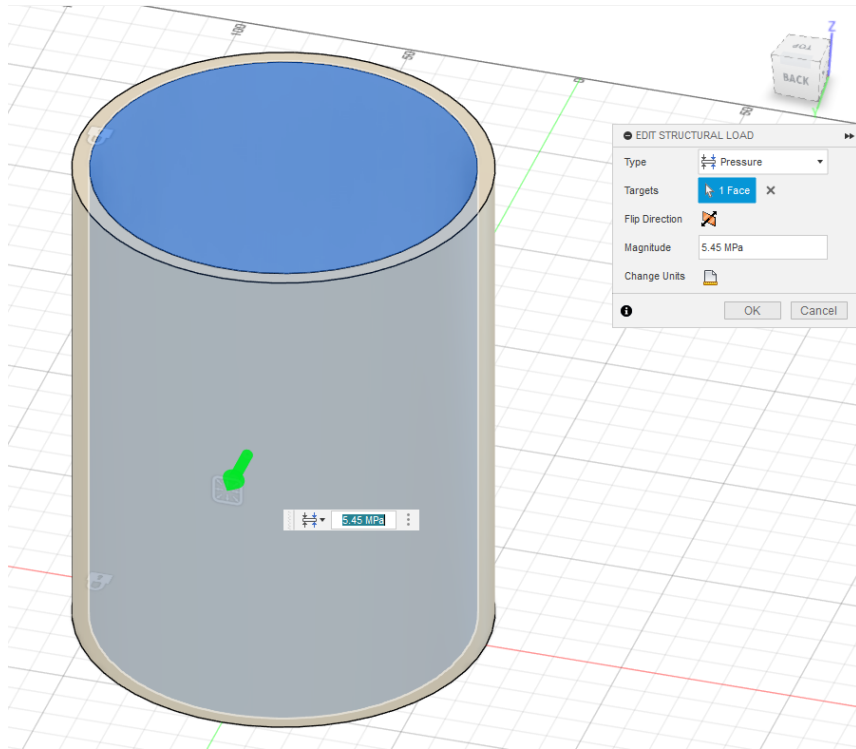


Рисунок 2.14 – Прикладання тиску до внутрішньої стінки циліндра

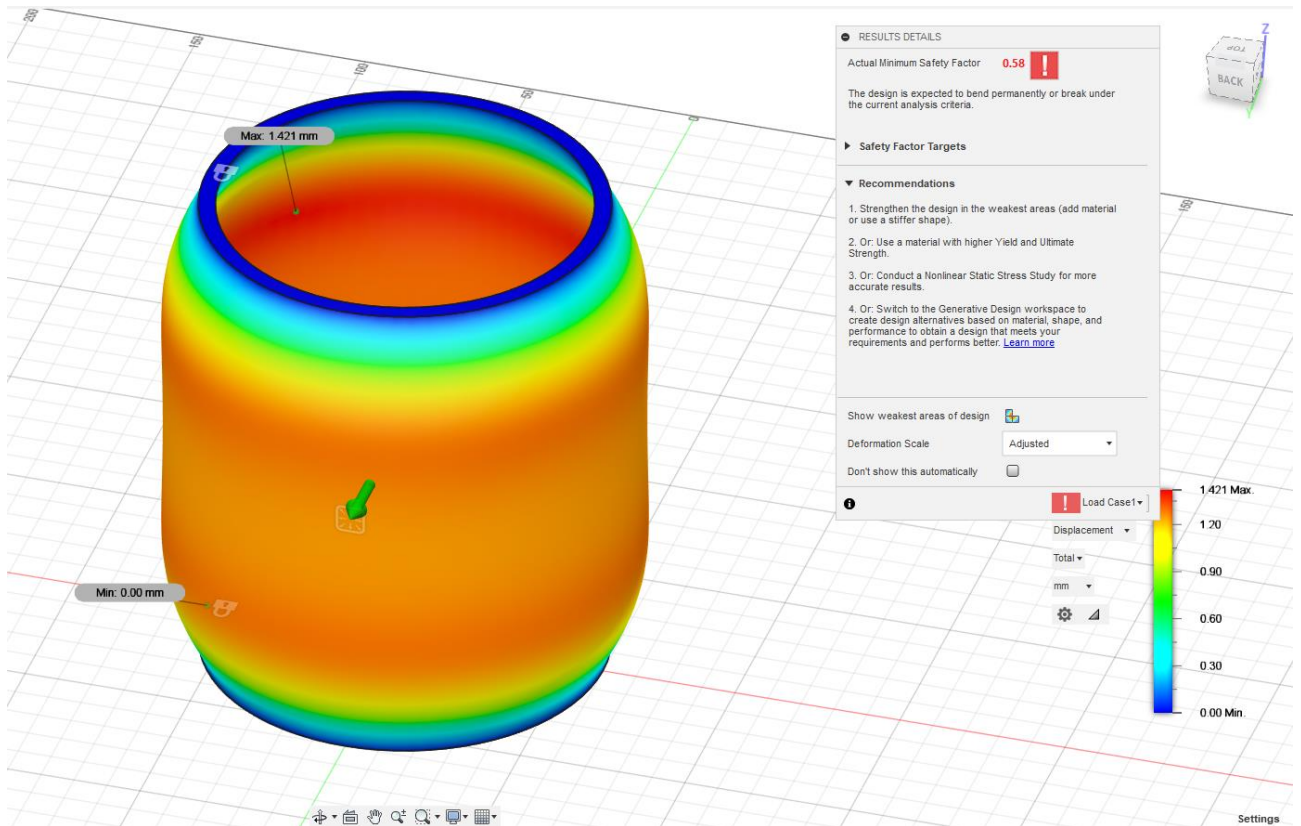


Рисунок 2.15 – Результат переміщення стінок циліндра від прикладання тиску

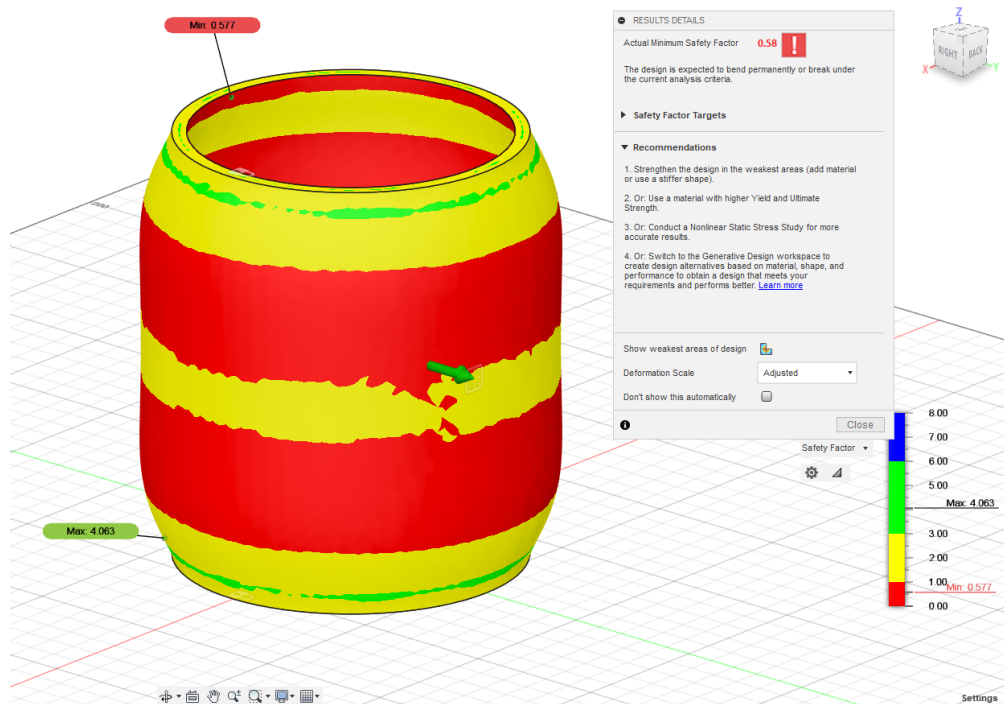


Рисунок 2.16 – Результат коефіцієнту запасу міцності тестової деталі

На рис. 2.17 показаний результат напружень тестової деталі, де ми можемо побачити де є найбільші напруження, а це максимальне значення 88,362 МПа. Мінімальне значення напружень – 12,554 МПа.

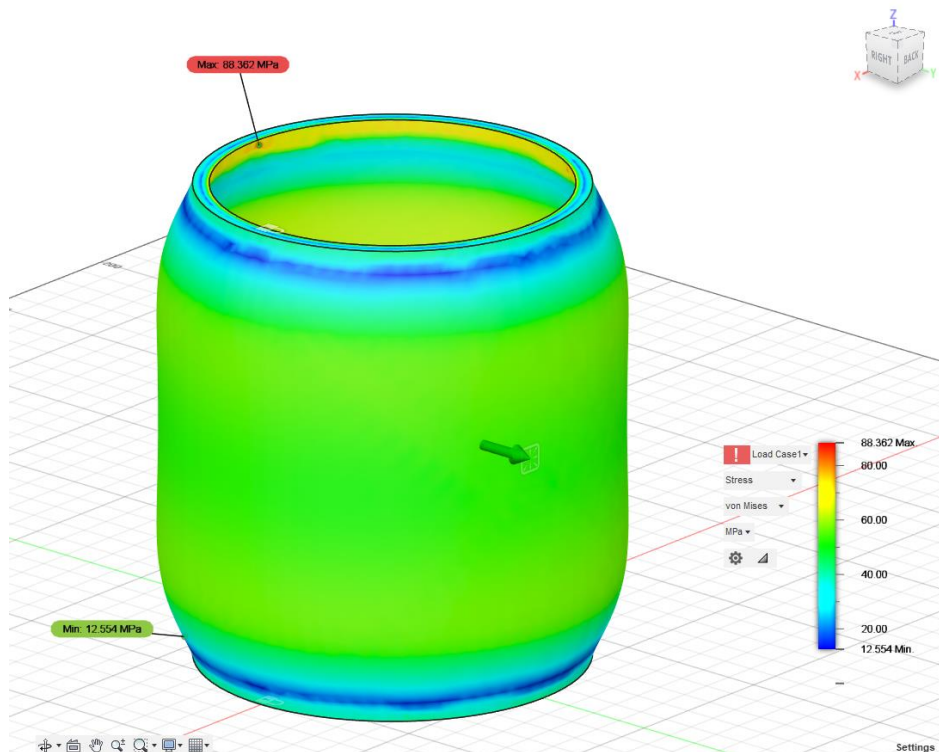


Рисунок 2.17 – Результат напружень тестової деталі

2.4 Статичний і динамічний аналіз пружної системи принтера

2.4.1 Розрахунок поворотної платформи столу на прогин

На рис. 2.18 показана 3Д модель модуля стола в закріпленому положенні перпендикулярному до стола принтера при відтворенні тестової деталі.

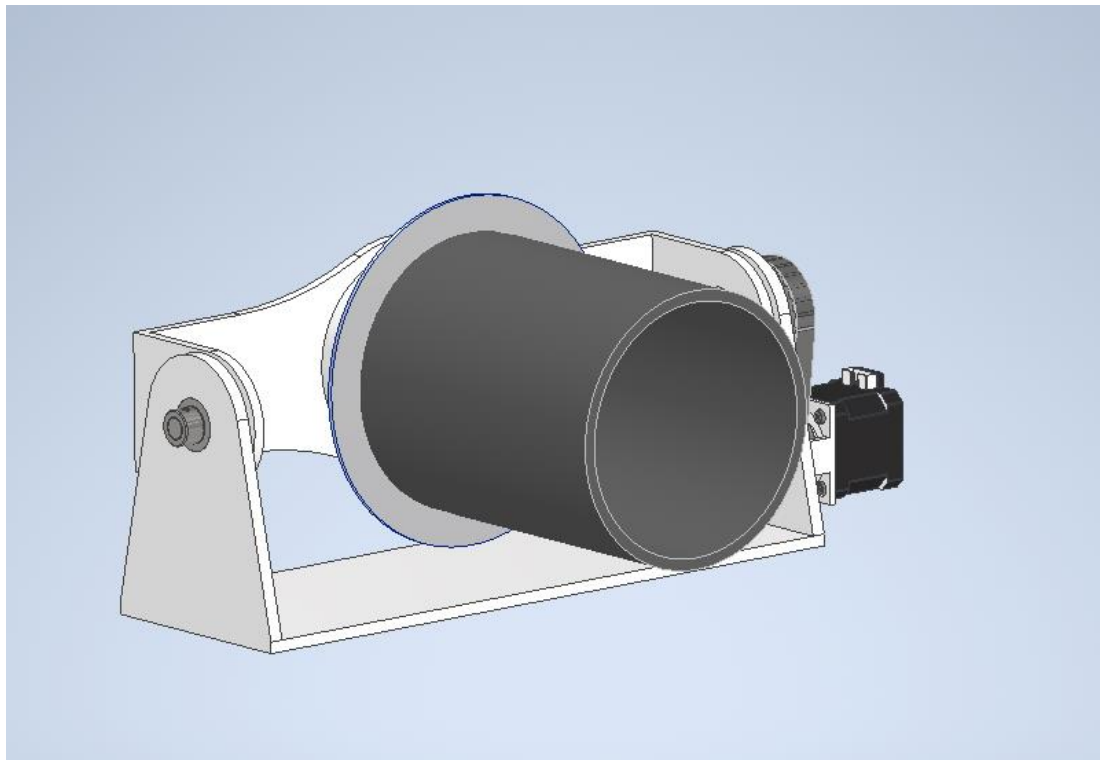


Рисунок 2.18 – 3Д модель модуля стола в закріпленому положенні при відтворенні тестової деталі

Для розрахунку обертової платформи столу на прогин потрібно зробити розрахункову схему, яка зображена на рис. 2.19.

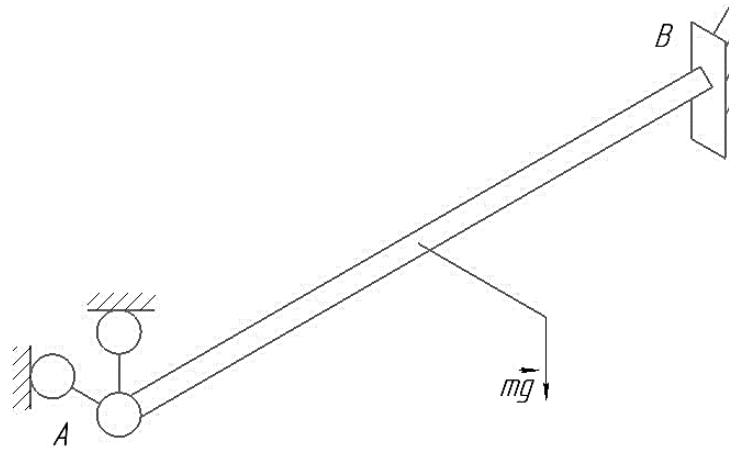


Рисунок 2.19 – Розрахункова схема

Знайдемо реакції при згині згідно [48], які зображені на рис. 2.20:

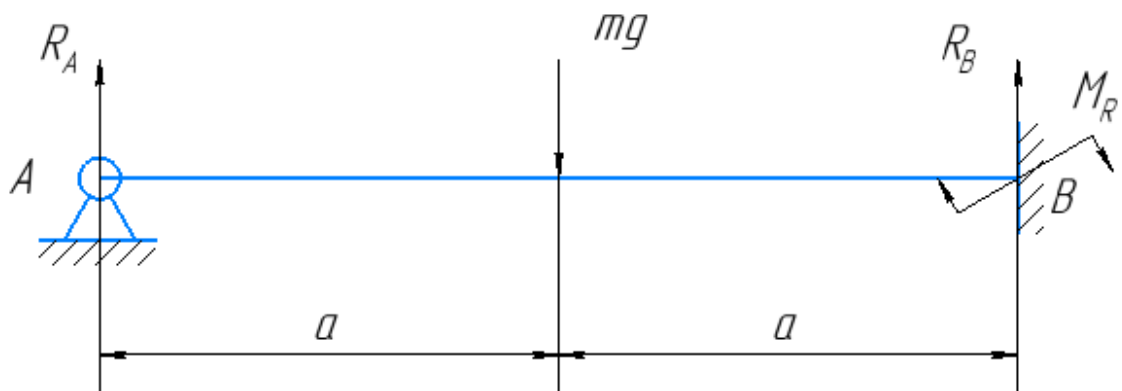


Рисунок 2.20 – Загальна розрахункова схема

Система статично невизначена. Розкриємо статичну невизначеність за допомогою методу сил. Для цього побудуємо епюри згинальних моментів від зовнішніх сил (рис. 2.21) і від одиничної сили (рис. 2.22).

Ділянка 1 ($0 < x < a$): $M(x) = 0$;

Ділянка 2 ($0 < x < a$): $M(x) = mgx$.

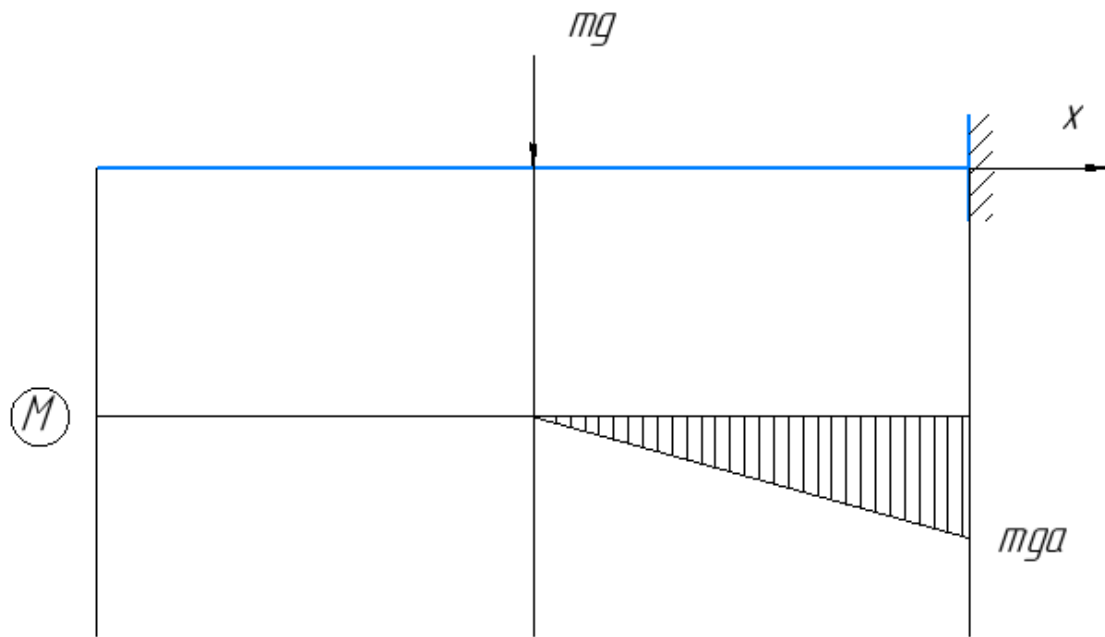


Рисунок 2.21 – Епюра згинальних моментів

Ділянка 1 ($0 < x < a$): $M(x) = x$;

Ділянка 2 ($0 < x < a$): $M(x) = a + x$.

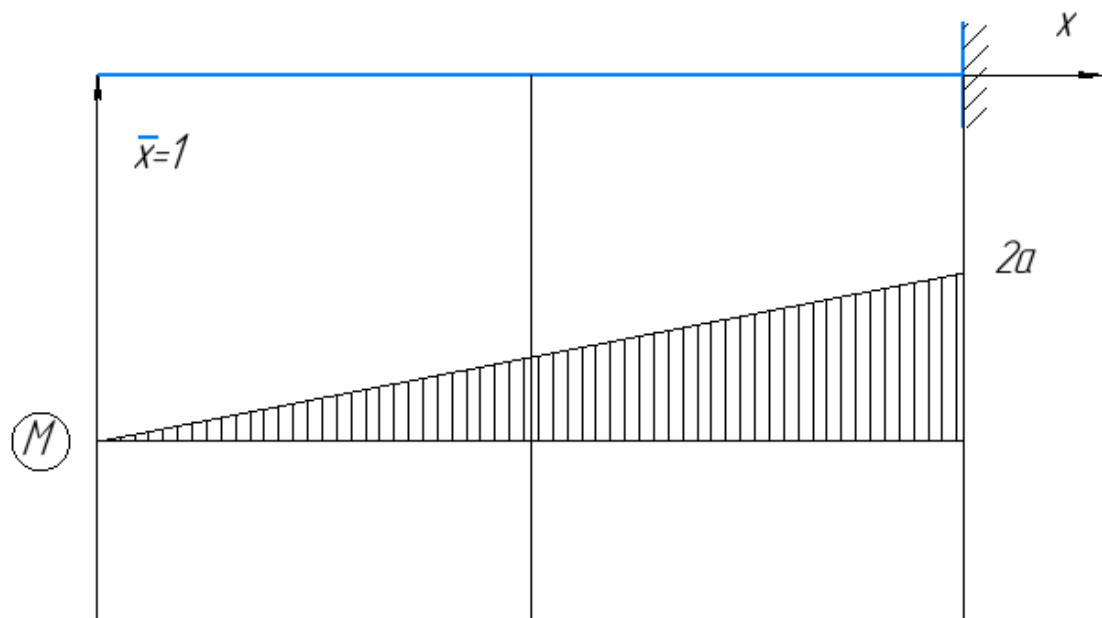


Рисунок 2.22 – Епюра від одиничної сили

Запишемо канонічне рівняння:

$$\Delta = \delta \cdot R_A \quad (2.5)$$

Знайдемо прогин від зовнішніх сил

$$\Delta = \frac{1}{EI} \int_0^{2a} M(x) \bar{M}(x) dx \quad (2.6)$$

Підставимо значення у формулу (2.6)

$$\Delta = \frac{1}{EI} \left(\int_0^a 0x dx + \int_0^a mgx(a+x) dx \right) = \frac{1}{EI} \left(mg \frac{a^3}{2} + mg \frac{a^3}{3} \right) = \frac{1}{EI} \cdot \frac{5a^3 mg}{6}$$

Знайдемо прогин від одиничних сил:

$$\delta = \frac{1}{EI} \int_0^{2a} \bar{M}(x) \bar{M}(x) dx \quad (2.7)$$

Підставимо значення у формулу (2.7)

$$\delta = \frac{1}{EI} \int_0^{2a} x \cdot x dx = \frac{1}{EI} \cdot \frac{8a^3}{3}$$

Підставивши розрахунки формул (2.6) і (2.7) в (2.5) отримаємо

$$R_A = \frac{5a^3 mg \cdot 3}{6 \cdot 8a^3} = \frac{15mg}{32} = \frac{15 \cdot 1,297 \cdot 9,81}{32} = 5,96 \text{ Н}$$

де $a = 0,136 \text{ м}$ – довжина ділянка, $m = 1,297 \text{ кг}$ – маса прикладена на поворотню платформу столу, g – прискорення вільного падіння, яке дорівнює $9,81 \text{ м/с}^2$.

Знайдемо решту реакцій з рівнянь статки

$$\sum R_y = 0: R_A - mg + R_B = 0,$$

$$R_B = mg - R_A = 1,297 \cdot 9,81 - 5,96 = 6,76 \text{ Н}$$

$$\sum M_A = 0: mga - R_B \cdot 2a + M_R = 0,$$

$$M_R = R_B \cdot 2a - mga = 6,76 \cdot 2 \cdot 0,136 - 1,297 \cdot 9,81 \cdot 0,136 = 0,11 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Будуємо епюри поперечних сил і моментів (рис. 2.23):

Ділянка 1 при $0 < x < a$: $M(x) = 5,96x$

Ділянка 2 при $0 < x < a$: $M(x) = 5,96(a+x) - mgx$

Будуємо епюру одиничних сил (рис. 2.23):

Ділянка 1 при $0 < x < a$: $\bar{M}(x) = 0,5x$

Ділянка 2 при $0 < x < a$: $\bar{M}(x) = 0,5(x + a)$

Знайдемо прогин методом Мора згідно з [48]:

$$y = \frac{1}{EI} \int_0^{2a} M(x) \bar{M}(x) dx \quad (2.8)$$

Зробимо математичні розрахунки та підставимо значення у (2.8)

$$\begin{aligned} y &= \frac{1}{EI} \left(\int_0^a 5,96x \cdot 0,5x dx + \int_0^a (5,96(a+x) - mgx)(0,5(a+x)) dx \right) = \\ &= \frac{1}{EI} \left(2,98 \cdot \frac{a^3}{3} + \int_0^a (5,96a + 5,96x - mgx)(0,5a + 0,5x) dx \right) = \\ &= \frac{1}{EI} \left(2,98 \cdot \frac{a^3}{3} + \int_0^a (2,58a^2 + 5,96ax + 2,98x^2 - 0,5mgax - 0,5mgx) dx \right) = \\ &= \frac{1}{EI} \left(2,98 \cdot \frac{a^3}{3} + 2,98a^3 + 2,98a^3 + 2,98 \cdot \frac{a^3}{3} - 0,5mg \frac{a^3}{2} - 0,5mg \frac{a^3}{3} \right) = \\ &= \frac{a^3}{EI} \left(5,96 \cdot \frac{1}{3} + 5,96 - 0,5mg \frac{1}{2} - 0,5mg \frac{1}{3} \right) = \\ &= \frac{0,136^3}{2240 \cdot 10^6 \cdot 9 \cdot 10^{-8}} \cdot \left(5,96 \cdot \frac{1}{3} + 5,96 - 0,5 \cdot 1,297 \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{2} - \right. \\ &\quad \left. - 0,5 \cdot 1,297 \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{3} \right) = 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0,033 \text{ мм} \end{aligned}$$

де $E = 2240$ МПа – модуль Юнга для пластика ABS, $I = \frac{t \cdot b^3}{12} = \frac{0,005 \cdot 0,06^3}{12} = 9 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$ – момент інерції перерізу відносно осі X ($t = 5$ мм, $b = 60$ мм згідно з рис. 2.24), $a = 0,136$ м – довжина ділянка, $m = 1,297$ кг – маса прикладена на поворотню платформу столу, g – прискорення вільного падіння, яке дорівнює $9,81 \text{ м/с}^2$.

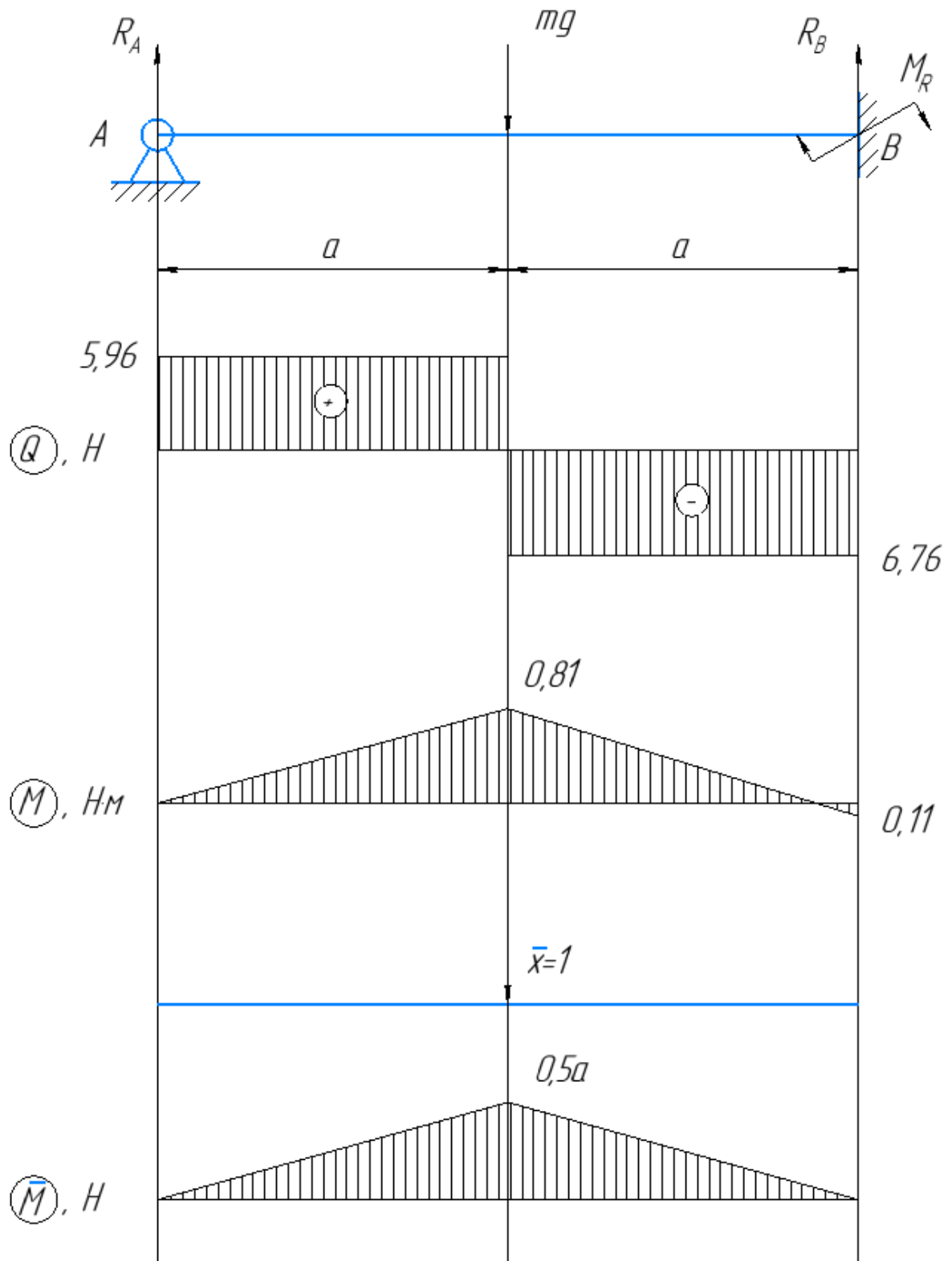


Рисунок 2.23 – Епюри поперечних навантажень та згинальних моментів

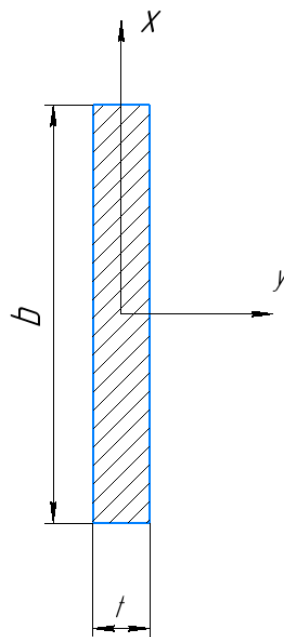


Рисунок 2.24 – Прямокутний переріз

2.4.2 Аналіз поворотної платформи столу на прогин у Autodesk Inventor

Зробимо аналіз поворотної платформи столу на прогин у програмному забезпеченні Autodesk Inventor Professional 2024. Для цього потрібна 3Д модель поворотної платформи столу, яка зображена на рис. 2.25.

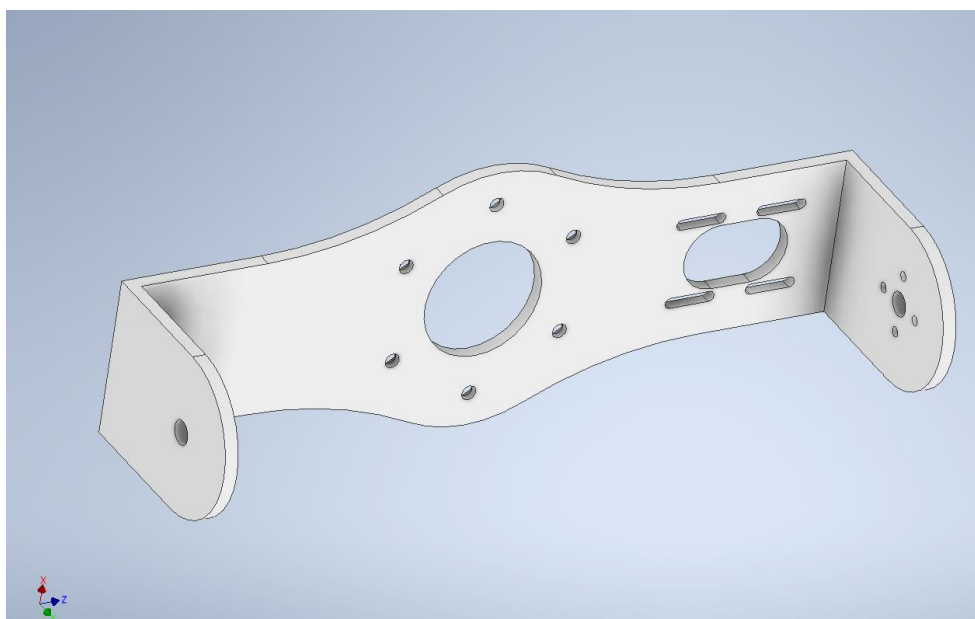


Рисунок 2.25 – 3Д модель поворотної платформи столу

Для того щоб, зробити аналіз, потрібно було в одному кінці зробити жорстке защемлення (рис. 2.26), а в іншому шарнірну опору (рис. 2.27).

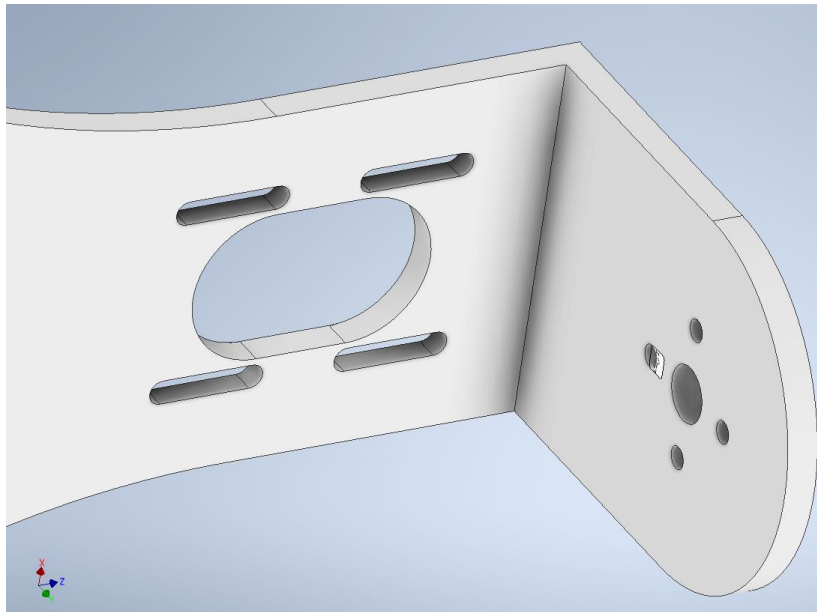


Рисунок 2.26 – Жорстке защемлення

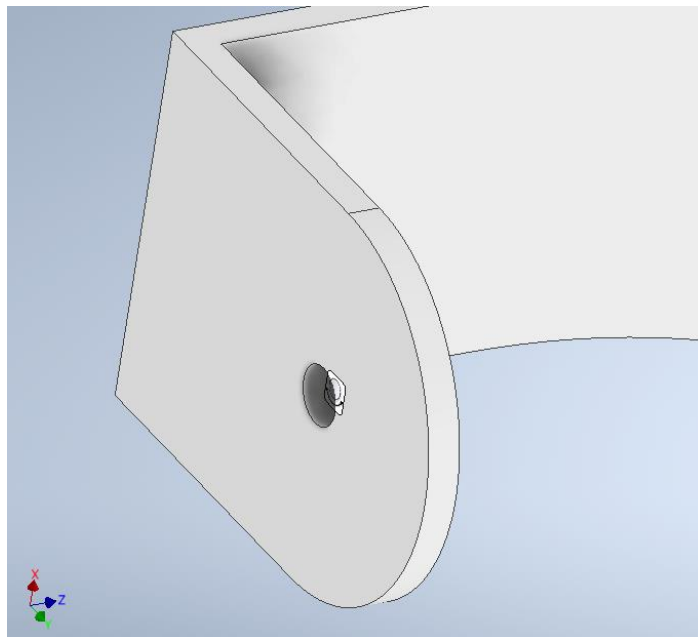


Рисунок 2.27 – Шарнірна опора

Потім прикладаємо силу на поверхню отвору віддалену до осі опор (рис. 2.28), яка дорівнює $F = mg = 12,97 \text{ Н}$.

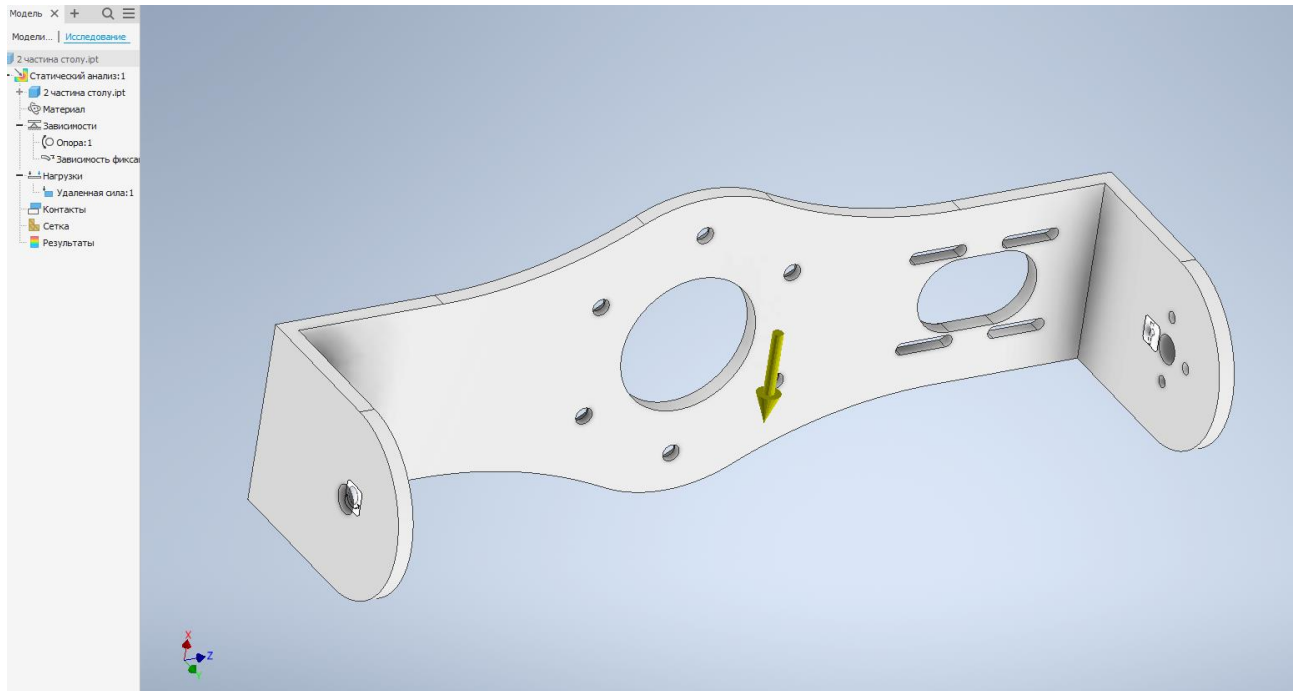


Рисунок 2.28 – Прикладена віддалена сила

Створюємо сітку деталі, зображену на рис. 2.29.

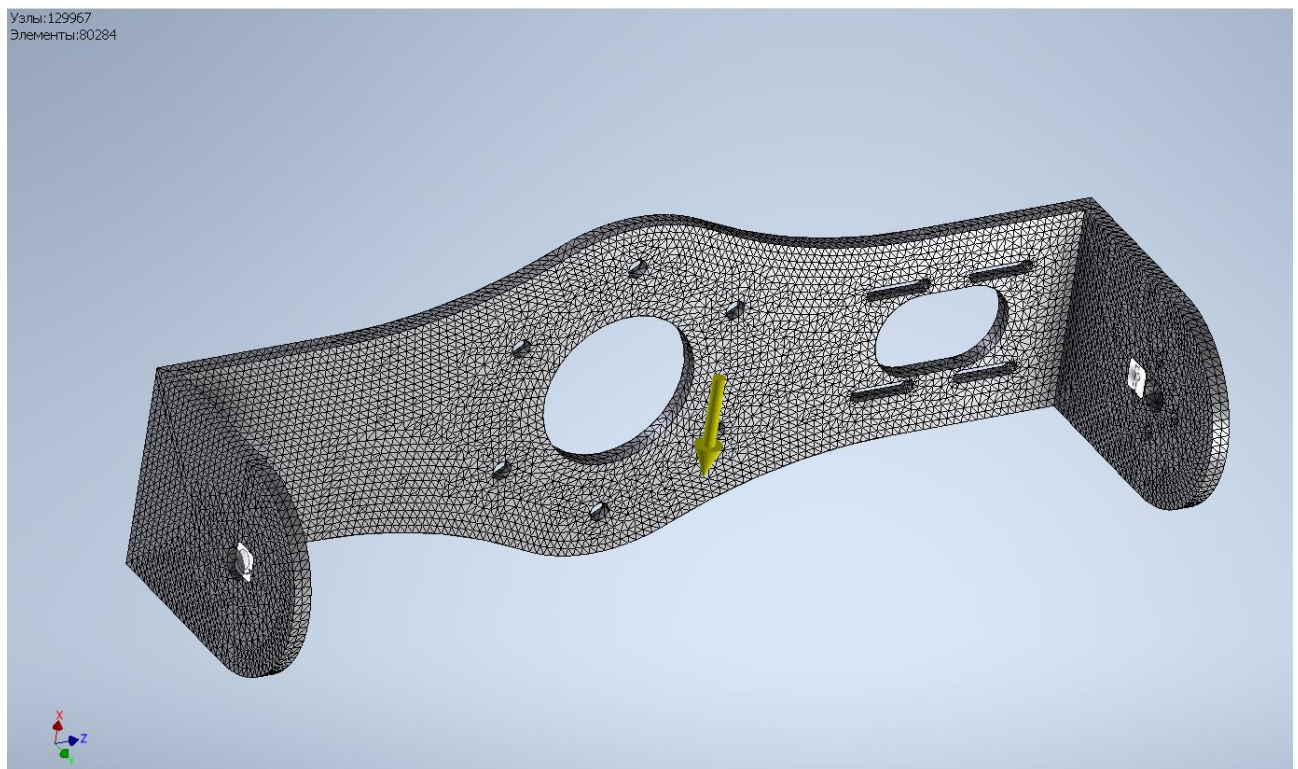


Рисунок 2.29 – Сітка деталі

Запускаємо моделювання та отримуємо результат. На рис. 2.30 представлено зміщення по осі X. Так як, в пункті 2.4.1 шукала прогин по центру деталі, то беремо інструмент датчик, та дізнаємось прогин в центрі поворотної платформи столу. На рис. 2.30 показане що це значення 0,0465 мм.

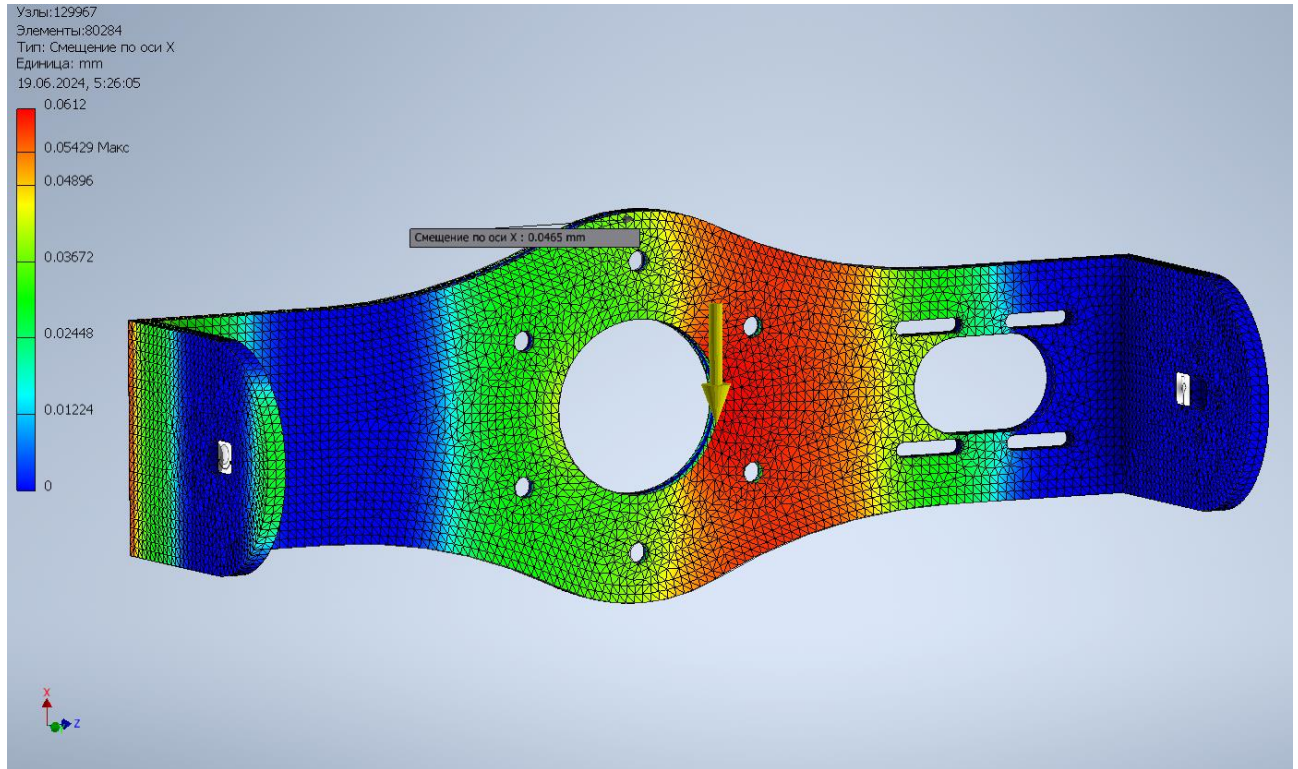


Рисунок 2.30 – Зміщення по осі X

Похибка між аналітичним розрахунком і розрахунком в програмному забезпеченні Autodesk Inventor Professional 2024 складає 41%, що є допустимим значенням тому, що не враховувалися податливі контакти в місцях сполучення елементів столу.

2.4.3 Динамічний аналіз компонентів приводу столу

Створюючи алгоритм, потрібно прагнути скласти його зі стандартних структур. Якщо використовувати будівельну аналогію, можна, сказати, що структурна методика побудови алгоритму подібна збірці будівлі зі стандартних секцій на відміну від складання по цеглинці.

Алгоритм роботи принтера для 3Д-друку на рисунках 2.31, 2.32 і 2.33.

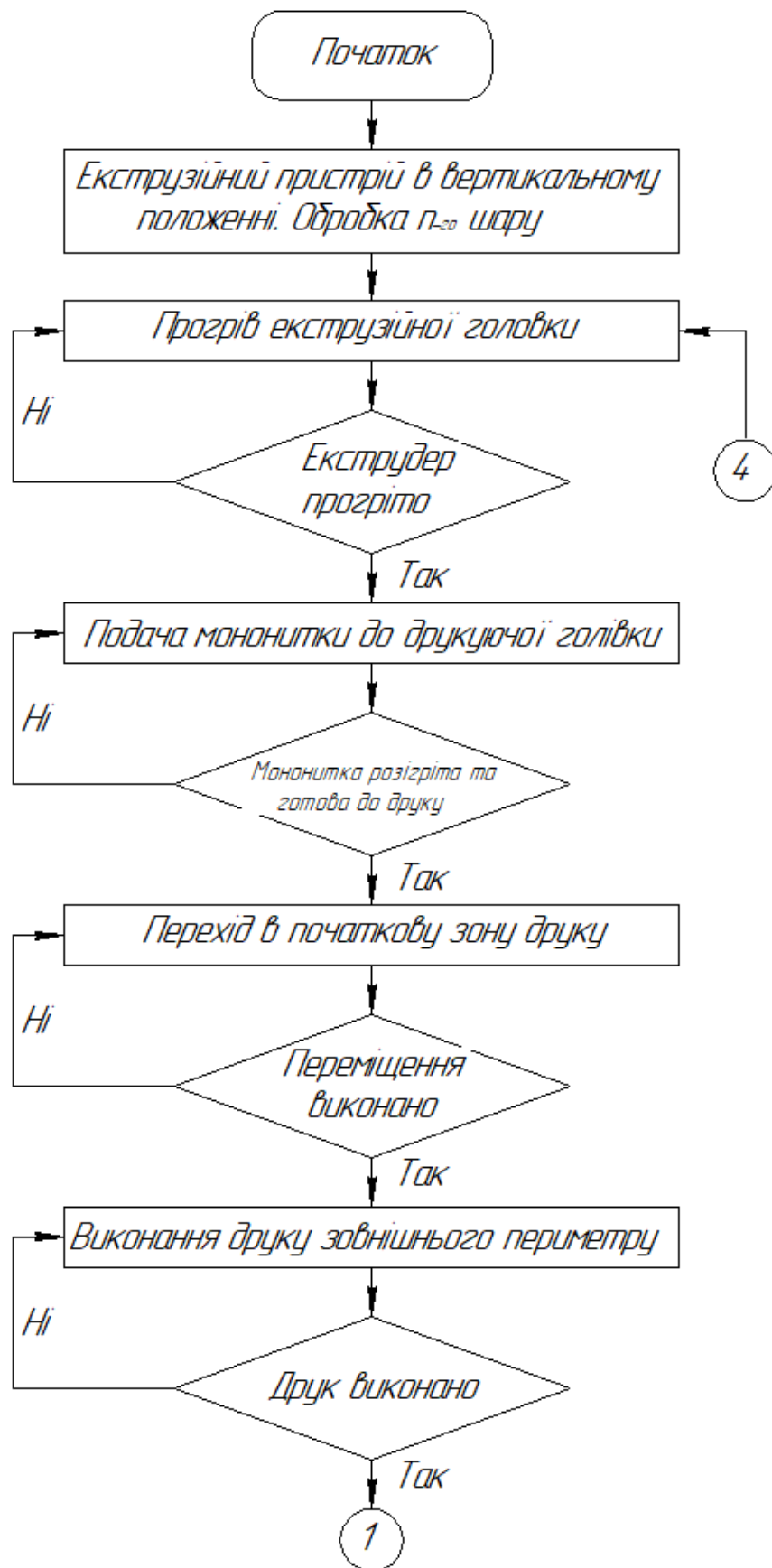


Рисунок 2.31 – Початок алгоритма

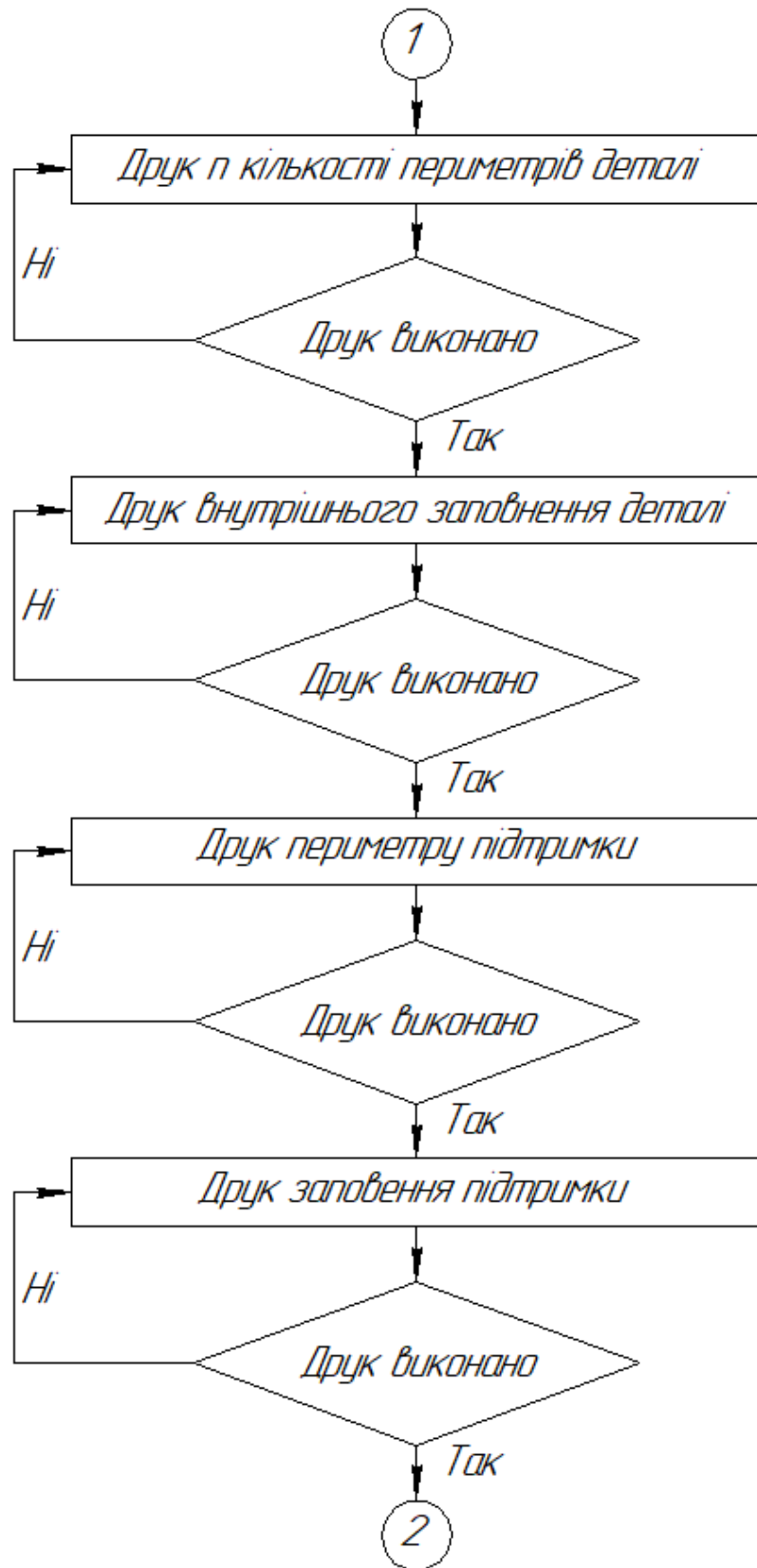


Рисунок 2.32 – Продовження алгоритму

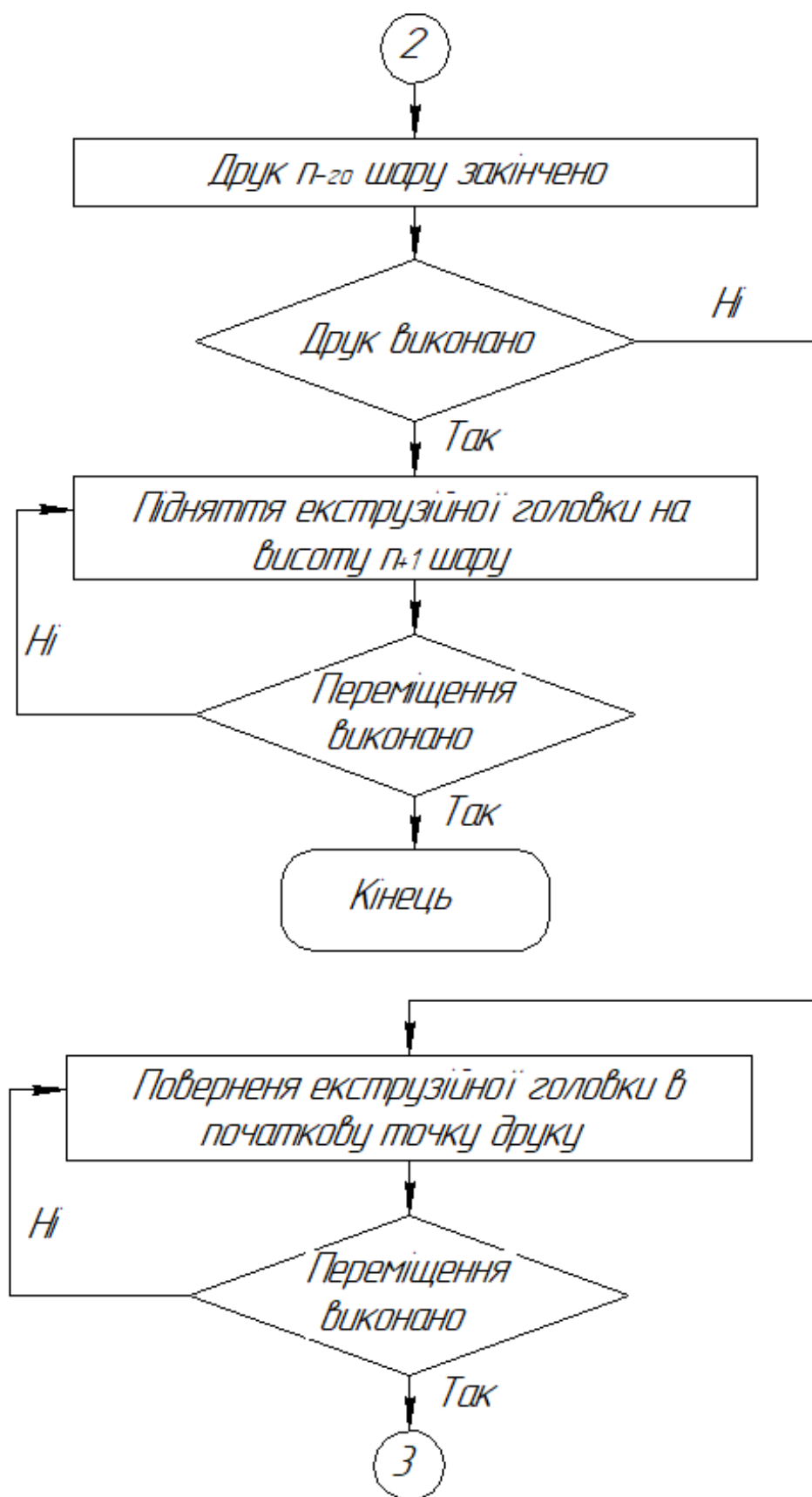


Рисунок 2.33 – Кінець алгоритму

Моделювання роботи компонентів приводу столу розглядається в контексті всього принтеру, з урахуванням його кінетичної і потенціальної енергії.

Моделювання здійснюється в програмі Matlab з використанням графічного пакету для імітації моделі Simulink, що дозволяє за допомогою блок-діаграм у вигляді направлених графів, будувати динамічні системи.

Пропорційно-інтегрально- диференціальний регулятор є основним механізмом зворотного зв'язку контуру управління, принципова схема якого наведена на рис. 2.34.

Він розраховує значення помилки позиціонування як різницю між виміряною змінною процесу та бажаною заданою точкою та намагається мінімізувати її за допомогою змінної, що регулюється. Такими змінними служать три контрольних параметра: пропорційний (P), інтегральний (I) і похідна (D). P - Створює сигнал, який компенсує відхилення отриманого значення (кута) від заданого значення. I - дозволяє з часом усунути статичні помилки. D – Відхилення зсуву від прогнозованого цільового значення.

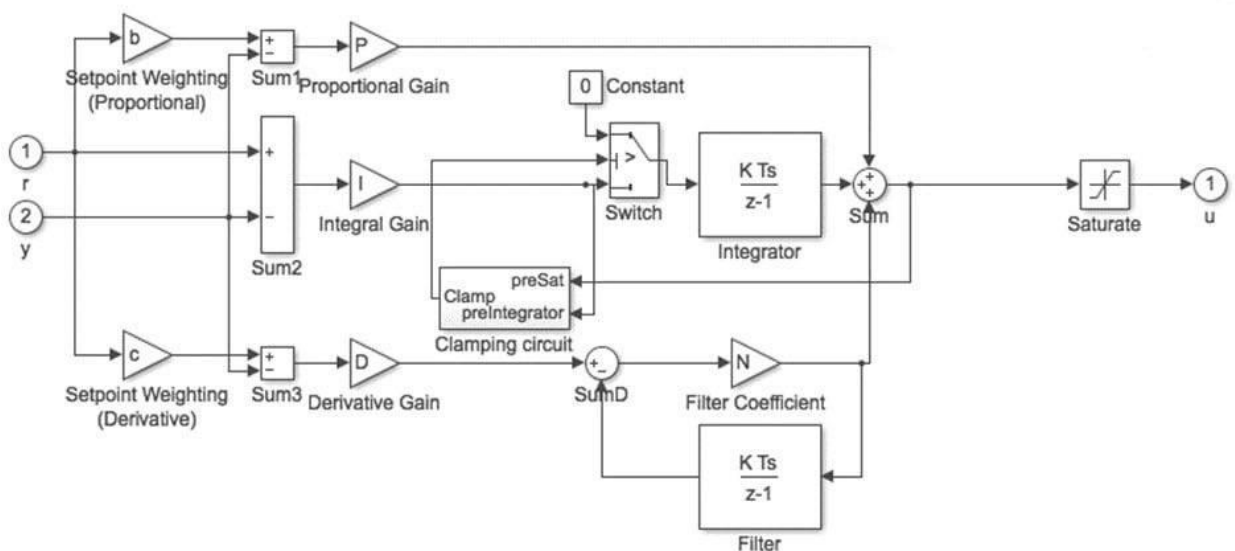


Рисунок 2.34 – Принципова схема пропорційно-інтегрально- диференціального регулятора

Проведене тестування показало, що траєкторія руху переміщення,

повороту та оберту задовольняє вимогам точності позиціювання та швидкості руху (рис. 2.35).

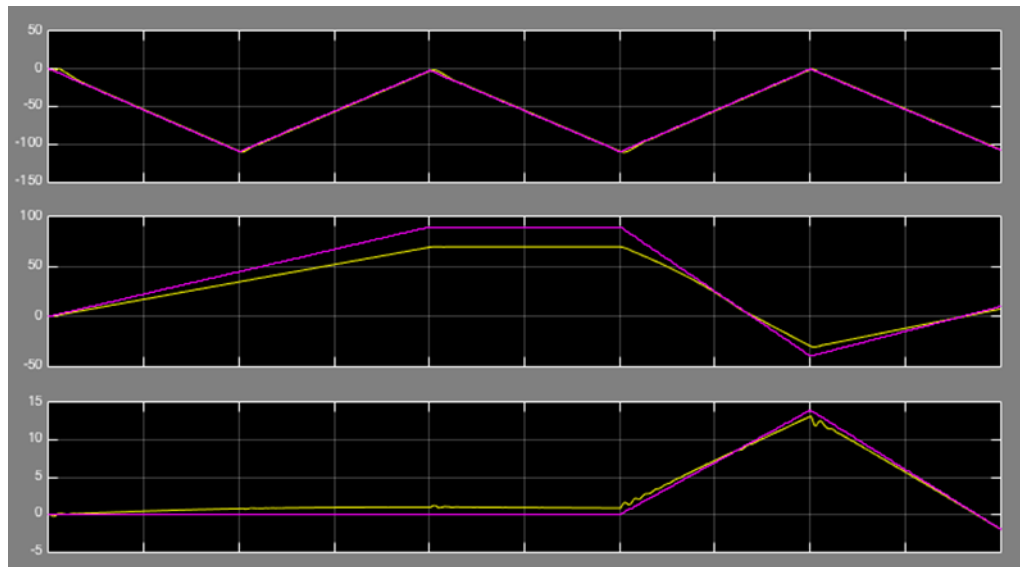


Рисунок 2.35 – Графіки відпрацювання траєкторії

Висновок

Розширення можливостей друку та підвищення якості деталей стало можливим завдяки створенню модуля для багатоосьового друку на FDM принтері. Впровадження обертового модуля у конструкцію 3D-принтера значно розширює можливості друку, покращує якість та збільшує міцність виготовлених деталей. Додаючи осі обертання, можна створювати складну геометрію без зниження якості поверхні та без необхідності в додаткових опорах.

Аналіз взаємодії модулів при виготовленні тестової деталі показав, що застосування багатоосьового друку дозволяє отримувати більш міцні деталі порівняно з традиційним методом пошарового викладання в напрямку осі Z. Вивчення різних схем викладання філамента, зокрема навхрест, показало, що така техніка дозволяє створювати переплетені структури з множинними точками зчеплення, що значно покращує механічні властивості виробу.

Динамічний аналіз компонентів стола 3D-принтера за допомогою Matlab та Simulink дозволив детально дослідити рух платформи та повороти навколо осей Y і Z. Використання пропорційно-інтегрально-диференціального

регулятора забезпечило точність позиціювання та швидкість руху, задовольняючи вимоги до якості друку.

Отримані результати підтверджують ефективність використання багатоосьового друку для виготовлення складних деталей з високою міцністю та якістю. Це відкриває нові можливості для адитивного виробництва у різних галузях промисловості.

Список використаних джерел

1. 3d metal tech. 3D Metal Tech. URL: <https://3dmetaltech.com.ua/> (дата звернення: 11.06.2024).
2. 3D printer axis: the basics simply explained. All3DP. URL: <https://all3dp.com/2/3d-printer-axis-the-basics-simply-explained/> (дата звернення: 12.06.2024).
3. 3D printering: non-planar layer FDM. Hackaday. URL: <https://hackaday.com/2016/07/27/3d-printering-non-planar-layer-fdm/> (дата звернення: 12.06.2024).
4. 3D printing: What is it & how does it work? | Protolabs Network. Protolabs Network. URL: <https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing/> (дата звернення: 11.06.2024).
5. 3D printing: What is it & how does it work? | Protolabs Network. Protolabs Network. URL: <https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing/> (дата звернення: 12.06.2024).
6. 3D друк в умовах біомедичного використання: конспект лекцій з дисципліни «3D друк в умовах біомедичного використання» для студентів спеціальності 163 «Біомедична інженерія» денної та заочної форм навчання / уклад. Б. В. Єфременко. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – 56 с.
7. 3D ДРУК методом наплавлення (FDM). статті компанії «pro3d.com.ua». "pro3d.com.ua" - контакти, товари, послуги, ціни. URL: <https://pro3d.com.ua/a366711-druk-metodom-naplavlennya.html> (дата звернення: 12.06.2024).
8. 5-осьові фрезерні верстати. Haas Automation Inc. - CNC Machine Tools. URL: <https://www.haascnc.com/uk/machines/multi-axis/5-axis-mills.html> (дата звернення: 18.06.2024).
9. Additive manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations / Y. Huang та ін. Journal of manufacturing science and

engineering. 2015. Т. 137, № 1. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4028725> (дата звернення: 11.06.2024).

10. Additive manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations / Y. Huang та ін. Journal of manufacturing science and engineering. 2015. Т. 137, № 1. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4028725> (дата звернення: 12.06.2024).

11. Attaran M. The rise of 3-D printing: the advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. Business horizons. 2017. Т. 60, № 5. С. 677–688. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011> (дата звернення: 11.06.2024).

12. Berman B. The new industrial revolution. Business horizons. 2012. Т. 55, № 2. С. 155–162.

13. Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. The international journal of advanced manufacturing technology. 2015. Т. 83, № 1-4. С. 389–405. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2> (дата звернення: 11.06.2024).

14. Binder jetting | additive manufacturing research group | loughborough university. Home | Loughborough University. URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/> (дата звернення: 11.06.2024).

15. Cotteleer M., Joyce J. 3D opportunity: additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth. Deloitte review. 2014. Т. 14. С. 5–19.

16. Could 3D printing change the world? Technologies, potential, and implications of additive manufacturing. / T. Campbell та ін. Atlantic council. 2011. С. 20.

17. Deckner A. The history of 3D printing: from the 80s to today. Sculpteo. URL: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/> (дата звернення: 11.06.2024).

18. Directed energy deposition | additive manufacturing research group | loughborough university. Home | Loughborough University. URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/> (дата звернення: 11.06.2024).

19. Directed energy deposition | additive manufacturing research group | loughborough university. Home | Loughborough University. URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/> (дата звернення: 12.06.2024).

20. FDM друк. Easy 3D print. URL: <https://easy3dprint.com.ua/uk/3d-druk/fdm-druk/> (дата звернення: 12.06.2024).

21. Ford S., Despeisse M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of cleaner production*. 2016. Т. 137. С. 1573–1587. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150> (дата звернення: 11.06.2024).

22. Gibson I., Stucker B., David R. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Springer, 2016. 519 с.

23. Guo N., Leu M. C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of mechanical engineering*. 2013. Т. 8, № 3. С. 215–243. URL: <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8> (дата звернення: 11.06.2024).

24. Homepage. UltiMaker. URL: <https://ultimaker.com/learn/fdm-3d-printing-technology> (дата звернення: 11.06.2024).

25. Influence of the temperature of the extruded filaments on the strength parameters of thin-walled products / О. Salenko та ін. *International scientific and technical conference "the progressive technics, technology and engineering education"*. 2023. № XXIII. С. 185–189. URL: <https://doi.org/10.20535/2409-7160.2023.xxiii.278904> (дата звернення: 19.06.2024).

26. Lipson H., Kurman M. *Fabricated: the new world of 3D printing*. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2013. 320 с.

27. Lipson H., Kurman M. The next digital frontier: 3D printing. IEEE spectrum. 2013. T. 50, № 6. С. 56–67.

28. Material extrusion | additive manufacturing research group | loughborough university. Home | Loughborough University. URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/> (дата звернення: 12.06.2024).

29. Material jetting | additive manufacturing research group | loughborough university. Home | Loughborough University. URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/> (дата звернення: 12.06.2024).

30. MIT - Massachusetts Institute of Technology. URL: <https://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf> (дата звернення: 11.06.2024).

31. ORION™ delta 3D printer - black. Adafruit Industries, Unique & fun DIY electronics and kits. URL: <https://www.adafruit.com/product/2259> (дата звернення: 12.06.2024).

32. Powder bed fusion | additive manufacturing research group | loughborough university. Home | Loughborough University. URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/> (дата звернення: 12.06.2024).

33. Prusament | original prusa 3D printers directly from josef prusa. Prusa3D by Josef Prusa. URL: <https://www.prusa3d.com/prusament/> (дата звернення: 11.06.2024).

34. Rayna T., Striukova L. From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. Technological forecasting and social change. 2016. T. 102. С. 214–224. URL: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.023> (дата звернення: 11.06.2024).

35. Sheet lamination | additive manufacturing research group | loughborough university. Home | Loughborough University. URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/> (дата звернення: 12.06.2024).

36. The 7 categories of additive manufacturing | additive manufacturing research group | loughborough university. Home | Loughborough University. URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/> (дата звернення: 11.06.2024).

37. The seven categories of additive manufacturing technologies. Default. URL: <https://altair.com/blog/articles/the-seven-categories-of-additive-manufacturing-technologies> (дата звернення: 11.06.2024).

38. Ultimate 3D printing material properties table. Home | Simplify3D Software. URL: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/properties-table/> (дата звернення: 12.06.2024).

39. Understanding cartesian plane FDM 3D printers. URL: <https://themakersdomain.medium.com/understanding-cartesian-plane-fdm-3d-printers-9feea732d986>.

40. VAT photopolymerisation | additive manufacturing research group | loughborough university. Home | Loughborough University. URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/> (дата звернення: 12.06.2024).

41. What is FDM 3D printing? – simply explained. All3DP. URL: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/> (дата звернення: 11.06.2024).

42. Wohlers T., Cafrey T. Additive manufacturing: going mainstream. Manufacturing engineering. 2014. Т. 152, № 4. С. 67–73.

43. Адгезія на 3D принтері все, що вам потрібно знати блог artline.ua. Збірка ПК онлайн у Києві Магазин комп'ютерів Artline ► зібрати ПК. URL:

<https://artline.ua/uk/blogs/adgeziya-na-3d-printere-vse-chto-vam-nuzhno-znat> (дата звернення: 12.06.2024).

44. Адитивна технологія. 3D Ukraine. URL: <https://3d-ukraine.top/ua/catalog/additive-technologies-development-technologies-and-processes> (дата звернення: 11.06.2024).

45. Андросук Г. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3d-друку. Наука, технології, інновації. 2017. № 1. С. 68–77.

46. Висота шару в 3D-друці | Блог | 3D WAY. 3DWay | 3D друк та моделювання будь-якої складності. URL: <https://3dway.com.ua/blog/layer-height-in-3d-printing> (дата звернення: 12.06.2024).

47. Є.М. Бабко, М.М. Даценко, І.В. Житнецький Основи розрахунків конструктивних елементів обладнання: Курс лекцій для студ. спец.6090221 “Обладнання переробних і харчових виробництв” ден. та заоч. форм навчання – К.: НУХТ, 2007. - 56 с.

48. Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Е. С. Опір матеріалів : Підручник / За ред. Г. С. Писаренка. 2-ге вид., допов., і переробл. - К.: Вища шк., 2004. 655 с.

49. Усунення несправностей 3d-друку: всі проблеми та рішення (частина 1) блог artline.ua. Збірка ПК онлайн у Києві Магазин комп'ютерів Artline ► зібрати ПК. URL: https://artline.ua/uk/blogs/ustranenie-nepoladok-3d-pechati-vse-problemy-i-resheniya-chast-1#h_167155192280011715344680169 (дата звернення: 12.06.2024).