Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра Машинобудування, транспорту і зварювання

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Професійна підготовка фахівця машинобудівних підприємств з підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 5 курсу, групи ЗПОМ24мг
спеціальності:015.34«Професійна освіта (Машинобудування)»
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

_____/Степан ГЕРАСИМЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/Антон СКОРКІН
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/Світлана АРТЮХ
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____/ Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/Валентина СКОРКІНА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. КАРАЗІНА
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра машинобудування, транспорту і зварювання
Спеціальність 015.34 Професійна освіта (Машинобудування)
Освітньо-професійна програма Професійна освіта (Машинобудування)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МТіЗ
_____ О.С. Подоляк
"06" 10 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти

студенту (ці) Степану ГЕРАСЕМЕНКО
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Професійна підготовка фахівця машинобудівних підприємств з підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів

затверджена наказом 4801-5/3665 від 06.10. 2025 р.

2. Термін здачі магістрантом закінченої роботи "01" грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: *Зразки полімерів для виробництва просторових криволінійних деталей*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити): *Вступ. Актуальність професійної підготовки фахівця машинобудівних підприємств з підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів. Аналіз особливостей адитивних технологій і способів розрахунку траєкторій переміщення друкуючої головки. Розробка дидактичного проєкту факультативного заняття на тему «підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів» для фахівця машинобудівних підприємств. Висновки. Список джерел інформації. Додатки.*

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів): *У вигляді презентації PowerPoint.*

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	
педагогічний	Бакуменко Л.Г.			

7. Дата видачі завдання «7» 10 2025 р.

Керівник _____ Антон СКОРКІН
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ Степан ГЕРАСИМЕНКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1.	Вибір теми й обґрунтування проблеми дослідження. Визначення об'єкта, предмета, мети й завдань.		
2.	Складання плану роботи. Підбор літератури й інших джерел		
3.	Оформлення завдання проектування для затвердження теми кваліфікаційної роботи		
4.	Підготовка аналітичної частини		
5.	Підготовка теоретичної частини		
6.	Розробка дослідницької частини		
7.	Розробка методичного розділу		
8.	Підготовка графічного матеріалу		
9.	Доробка проекту по зауваженнях наукового керівника		
10.	Доробка проекту по зауваженнях консультантів		
11.	Оформлення кваліфікаційної роботи. Підготовка до захисту.		
12.	Захист кваліфікаційної роботи		

Здобувач вищої освіти _____ Степан ГЕРАСИМЕНКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

Нормоконтроль _____ Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я, прізвище)

ЗМІСТ

Вступ	7
Розділ 1 Актуальність професійної підготовки фахівця машинобудівних підприємств з підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів	11
2. Аналіз особливостей аддитивних технологій і способів розрахунку траєкторій переміщення друкуючої головки	26
3 Метод розрахунку траекторій розробленого методу	42
4. Розроблене програмне забезпечення	51
5 експериментальна перевірка розроблених рішень	55
Розділ 6 Розробка дидактичного проєкту факультативного заняття на тему «підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів» для фахівця машинобудівних підприємств	67
Висновки	85
Список використаних джерел	86

Реферат магістерської кваліфікафійної роботи з теми “ Професійна підготовка фахівця машинобудівних підприємств з підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів”

РЕФЕРАТ

Робота містить 88с., 35 рис., 21 табл., 23 джерел.

Кваліфікаційна робота (дипломний проєкт) присвячений науковому обґрунтуванню та вдосконаленню системи підготовки фахівців машинобудівних підприємств з підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів.

У першому розділі розглянуто Актуальність професійної підготовки фахівця машинобудівних підприємств з підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів.

У другому розділі виконано Аналіз особливостей аддитивних технологій і способів розрахунку траєкторій переміщення друкуючої головки.

У третьому розділі виконано метод розрахунку траекторій розробленого методу.

У четвертого розділі Розроблене програмне забезпечення.

У п’ятому розділі виконано експерементальні дослідження.

Запропонована методика може бути покладена в основу інноваційних технологій під час навчання для отримання кваліфікованих фахівців машинобудівної галузі.

Ключові слова: професійна підготовка, машинобудівна галузь, фахівець, друкуюча головка, адитивне виробництво

Abstract of the master's qualification work on the topic "Professional training of specialists of machine-building enterprises to increase the productivity of the additive manufacturing process by improving the method of manufacturing products from spatial curvilinear layers"

ABSTRACT

The work contains 88 pages, 35 figures, 21 tables, 23 sources.

The qualification work (diploma project) is devoted to the scientific substantiation and improvement of the system of training specialists of machine-building enterprises to increase the productivity of the additive manufacturing process by improving the method of manufacturing products from spatial curvilinear layers.

The first section considers the relevance of professional training of specialists of machine-building enterprises to increase the productivity of the additive manufacturing process by improving the method of manufacturing products from spatial curvilinear layers.

The second section analyzes the features of additive technologies and methods for calculating the trajectories of the print head movement.

The third section analyzes the method for calculating the trajectories of the developed method.

In the fourth section, the developed software is presented.

In the fifth section, experimental research is performed.

The proposed methodology can be used as the basis for innovative technologies during training to obtain qualified specialists in the mechanical engineering industry.

Keywords: professional training, mechanical engineering industry, specialist, print head, additive manufacturing

ВСТУП

В даний час застосування адитивних технологій (АТ) для кінцевих виробів є досить поширеною практикою в багатьох галузях промисловості. В першу чергу різні АТ знайшли застосування як засоби виготовлення виробів зі складною геометрією і різними фізичними властивостями, таких як: конструктивні елементи літальних апаратів; виробів, що спроектовані на основі біонічного дизайну; прототипи різної продукції; імпланти у стоматології; майстер-моделі для створення ливарних форм; зразки для візуальної оцінки та тестування тощо. При цьому основою сучасного адитивного виробництва закладаються різні способи виготовлення: моделювання методом пошарового наплавлення (FDM); вибіркове лазерне наплавлення/спікання (SLM/SLS); лазерна стереолітографія (SLA); виготовлення об'єктів методом ламінування (LOM) та інші.

Найбільш доступною і поширеною є АТ, заснована на методі FDM, який передбачає екструдування розплаву полімеру у вигляді тонкої нитки на плоску основу. Ця технологія працює з термопластами промислового класу, тому вироби мають механічні, термічні та хімічні характеристики, порівняні з іншими технологіями виробництва. Однак для неї характерна істотна відмінність міцності виробу в різних напрямках (анізотропія), спричинена орієнтацією шарів при побудові виробу. Виріб виходить досить міцним на стиск у напрямку, перпендикулярному розташуванню шарів та на розтягування вздовж шарів. Однак, при згинанні та розтягуванні поперек шарів, виріб є набагато менш міцним, що може призвести до розриву по межі шарів.

Порівняльному аналізу міцності виробів, вироблених за допомогою АТ присвячені роботи E. Cuan-Urquizo, Guan HW, Jo W., Kwon OC, Popescu D., Zapciu A. та ін. та подальшої термічної обробки.

Було показано, що АТ дозволяють отримувати вироби, які не

поступаються за міцністю виготовленим традиційними способами, а в окремих випадках і перевершують їх.

Питанням підвищення міцності виробів присвячені праці F. Liou, J. Ruan, TE Sparks. [4, 5] Основна увага в них приділяється технологіям SLM, SLS і DED, проте дані технології використовують дорогі матеріали та обладнання, а також пов'язані зі значним енергоспоживанням.

Технологія FDM значно економічніша, проте при виробництві кінцевих виробів сильно загострюються проблеми, пов'язані з їхньою міцністю. Це з тим, що з фізичних властивостей полімерних матеріалів, зазвичай використовуваних цією технологією, їх макромолекули в розплавленому стані витягуються у бік укладання (рухи друкуючої головки), забезпечуючи вищу міцність у цьому напрямі. Порівняно слабке зчеплення між плоскими шарами (міжшарова адгезія) викликає зниження міцності вздовж напряму накладання матеріалу. Крім того, філамент викладається в розплавленому стані на тверду (суттєво холоднішу) основу і потім охолоджується, зменшуючись у розмірах. Це призводить до термічних деформацій, розтріскування та жолоблення виробу вже в процесі друку. В результаті надруковані вироби вирізняються яскраво вираженою анізотропією фізичних властивостей. Виріб значно краще витримує навантаження, прикладені вздовж шарів, ніж упоперек.

Ще одним недоліком FDM-технології є потреба в одноразових підтримуючих конструкціях під елементами, що нависають. На їх створення витрачається додатковий час та матеріал. Після виготовлення підтримуючі конструкції видаляються. У місцях зіткнення з виробом потрібна додаткова механічна обробка.

Перспективним способом зменшення вищезазначених проблем присвячені роботи E. Vasiliauskaitė, JA Gardner, OK Grutle, Gao, W.; Zhang, Y., Eryildiz M., Markiz N., Hambali RH, Rennie A. [6, 7] переважно вони пов'язані зі

способами укладання розплаву полімеру за просторовими криволінійними траєкторіями в рамках технології FDM. Однак у цих роботах, по-перше, не розглядаються питання, пов'язані зі зміною характеристик міцності виробів, і, по-друге, використовується напівавтоматичний спосіб генерації траєкторій друкуючої головки, що є складним і трудомістким процесом. Для автоматичної підготовки коду для виробництва виробу таким методом в даний час не розроблено методик розрахунку траєкторій робочих ходів інструменту та заготівлі, а також програмного та інформаційного забезпечення.

Таким чином, удосконалення технологічного процесу адитивного виробництва виробів у рамках FDM-технології з використанням просторових криволінійних шарів, спрямоване на підвищення міцності виробів, продуктивності процесу виробництва, а також зниження його матеріаломісткості є актуальним завданням.

Об'єкт дослідження. Вироби складної форми, що виробляються на п'ятиосьових адитивних пристроях із просторових криволінійних шарів у рамках FDM-технології.

Предмет дослідження. Методи формування виробу з просторових криволінійних шарів та їх вплив на міцність та матеріаломісткість виробів, що отримуються, а також продуктивність процесу їх виробництва.

Метою роботиє підвищення міцності та зниження матеріаломісткості виробів, а також підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок удосконалення методу виготовлення виробу із просторових криволінійних шарів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань та досягнення наміченої мети використано методи математичного моделювання за допомогою комп'ютерних засобів, що дозволяють відобразити процес виготовлення виробу шляхом накладання криволінійних шарів, що складаються з просторових

траєкторій. При розробці програмного забезпечення використано низхідний та висхідний методи структурного програмування, прямої та непрямої рекурсії, а також об'єктно-орієнтованого аналізу та проектування. Експериментальні дослідження виконані із застосуванням фізичного моделювання. При обробці результатів використано методи математичної статистики.

Практична цінність.Розроблено технологічний процес адитивного виробництва виробів підвищеної міцності на п'ятиосьових FDM 3D-принтерах і програмне забезпечення, що дозволяє виробляти автоматичну підготовку виробництва виробу будь-якої форми за його 3D моделі в універсальному форматі STL, що діє 5 координат переміщення інструмент-заготівля 3D принтера, надрукованими з плоских шарів, швидкість виробництва та економічність матеріалу. Вироби, вироблені таким чином, пройшли випробування у сертифікованих лабораторіях, що підтвердили 4-кратне підвищення міцності.

РОЗДІЛ 1
АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦЯ МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВ З ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЧОГО ПРОЦЕСУ ЗА РАХУНОК ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБУ З ПРОСТОРОВИХ КРИВОЛІНІЙНИХ ШАРІВ

1.1. Необхідність професійної підготовки фахівців для адитивного виробництва

Сучасне машинобудування характеризується швидким розвитком технологій, серед яких особливе місце займають адитивні методи виробництва. Вони дозволяють створювати деталі складної геометрії, значно скорочувати витрати матеріалів і часу на виготовлення продукції, а також підвищувати функціональні властивості виробів. Водночас ефективність впровадження адитивних технологій безпосередньо залежить від кваліфікації та компетентностей персоналу. Підготовка інженерів і технологів для роботи в умовах адитивного виробництва стає критично важливою для забезпечення конкурентоспроможності підприємств, стабільності та високої якості виготовлення виробів.

Сучасні машинобудівні підприємства висувають високі вимоги до професійної підготовки інженерів та технологів. До них належить здатність працювати з сучасними цифровими моделями виробів, аналізувати технологічні карти, планувати виробничі маршрути та оптимізувати параметри обробки. Крім того, фахівці повинні володіти знаннями в області матеріалознавства, механіки, фізики та комп’ютерного моделювання, щоб забезпечити надійність і довговічність виготовлених виробів. Відсутність цих знань і навичок може

призвести до погіршення якості продукції, збільшення браку та підвищення матеріаломісткості виробництва.

Компетентності, необхідні для ефективної роботи в умовах адитивного виробництва, включають як професійні, так і технологічні навички. Серед них слід виділити здатність до розробки цифрових моделей виробів з криволінійними просторовими шарами, аналізу їхньої геометрії та механічних властивостей, підготовки виробничих файлів для роботи з адитивним обладнанням, визначення оптимальних параметрів процесу виготовлення та контролю якості готової продукції. Також важливими є аналітичні та проєктні здібності, які дозволяють своєчасно ідентифікувати критичні точки технологічного процесу та вносити необхідні корективи для підвищення продуктивності.

Роль спеціаліста у забезпеченні ефективності та продуктивності адитивного виробничого процесу є надзвичайно важливою. Інженер або технолог відповідає за коректне перенесення цифрової моделі у виробничий процес, правильний вибір обладнання, режимів друку або спікання матеріалів, а також за дотримання стандартів якості та безпеки. Підготовка таких фахівців повинна охоплювати як теоретичні знання про адитивні технології, властивості матеріалів та механіку процесів, так і практичні навички роботи з сучасними адитивними установками, системами управління та цифровими симуляторами виробництва.

Не менш важливою складовою професійної підготовки є формування у майбутніх фахівців здатності до критичного аналізу та оптимізації виробничих процесів. Адитивне виробництво передбачає роботу з багатьма параметрами, від правильності геометричного моделювання до контролю температурного режиму та швидкості нанесення матеріалу. Фахівець, що володіє навичками системного мислення та аналітичної оцінки, здатний підвищити продуктивність процесу, зменшити ймовірність дефектів, а також знизити витрати часу та ресурсів.

Окремо слід зазначити, що адитивне виробництво деталі з просторових

криволінійних шарів потребує високого рівня спеціалізації. Це пов’язано зі складністю геометрії виробу, нестандартними властивостями матеріалів та необхідністю точного дотримання технологічних параметрів. Тому навчальні програми для інженерів і технологів повинні включати моделювання процесів, аналіз потенційних дефектів та навчання методам їх усунення. Крім того, особлива увага має приділятися практичним заняттям, стажуванням на виробництві та роботі з реальним адитивним обладнанням, що дозволяє закріпити теоретичні знання і підвищити рівень готовності до професійної діяльності.

У підсумку, професійна підготовка фахівців для адитивного виробництва є ключовим фактором підвищення ефективності та продуктивності сучасних машинобудівних підприємств. Вона забезпечує формування необхідних компетентностей, дозволяє впроваджувати інноваційні технології, зменшувати виробничі витрати та підвищувати якість продукції. Без висококваліфікованих спеціалістів неможливе успішне впровадження методів виготовлення виробів із просторових криволінійних шарів, що робить професійну підготовку інженерів і технологів надзвичайно актуальною та стратегічно важливою для розвитку машинобудівної галузі.

1.2. Особливості адитивного виробництва та його вимоги до підготовки фахівців

Адитивне виробництво є однією з найінноваційніших технологій у сучасному машинобудуванні, що дозволяє створювати вироби складної геометрії шляхом послідовного нарощування матеріалу у вигляді шарів. Особливо складними вважаються вироби, що формуються з просторових криволінійних шарів, де кожен шар має індивідуальну форму, товщину та положення в просторі.

Така технологія відкриває нові можливості для проектування виробів із високою функціональною і конструктивною складністю, проте одночасно вона висуває підвищені вимоги до рівня підготовки інженерів і технологів.

Складність технологічного процесу формування просторових криволінійних шарів полягає в багаторівневому контролі геометрії виробу на кожному етапі нарощування матеріалу. Підготовка фахівців у цій сфері повинна включати не лише знання про принципи роботи адитивного обладнання, але й уміння прогнозувати поведінку матеріалу під час процесу нанесення та твердіння, визначати критичні точки можливого деформування, а також оптимізувати параметри друку чи спікання. Інженер має вміти оцінювати вплив температурних режимів, швидкості нарощування та властивостей порошкових або рідких матеріалів на якість кінцевого виробу.

Важливою складовою ефективності адитивного виробництва є точність цифрового моделювання та підготовки виробництва. Цифрові моделі виступають основою технологічного процесу і визначають кінцеву геометрію, розташування внутрішніх структур, а також товщину шарів. Від помилок на етапі моделювання залежить надійність, міцність та естетичні властивості виробу. Тому фахівці повинні володіти навичками тривимірного моделювання, розуміти методи оптимізації шарування та перевіряти цифрові моделі на наявність критичних дефектів ще до запуску виробничого процесу. Крім того, важливою є здатність правильно переводити модель у формат, сумісний з адитивним обладнанням, та коригувати параметри друку відповідно до характеристик матеріалу та обраної технології.

Необхідність інтеграції знань з матеріалознавства, механіки та цифрового проєктування є однією з ключових особливостей підготовки фахівців для адитивного виробництва. Для успішної роботи з просторовими криволінійними шарами потрібно розуміти властивості матеріалів, які застосовуються: їх

здатність до твердіння, усадки, деформації під час охолодження або спікання, а також вплив міжшарових зв’язків на механічні характеристики виробу. Знання з механіки дозволяють прогнозувати поведінку виробу під навантаженням, оцінювати можливість появи внутрішніх напружень та тріщин. Водночас цифрове проєктування забезпечує точність створення складних моделей і дозволяє інтегрувати їх у виробничі процеси з мінімальними втратами часу та ресурсів.

Підготовка фахівців повинна включати також розвиток аналітичних та критичних навичок, необхідних для оптимізації технологічного процесу. Це передбачає здатність аналізувати результати попередніх виробничих циклів, визначати закономірності виникнення дефектів, а також розробляти рекомендації щодо удосконалення параметрів виробництва. Особливу увагу слід приділяти формуванню компетентностей у використанні програмного забезпечення для моделювання та симуляції адитивних процесів, що дозволяє прогнозувати результат та зменшувати кількість експериментальних циклів.

Практична підготовка в адитивному виробництві включає роботу з реальними установками, тренажерами та симуляторами, що дозволяє студентам відпрацьовувати навички налаштування обладнання, контролю процесу та аналізу кінцевого виробу. Важливо, щоб навчальні програми включали роботу з виробами різної складності, починаючи від простих деталей і закінчуючи виробами з багатошаровою криволінійною структурою, що дозволяє поступово нарощувати рівень професійної компетентності.

Таким чином, особливості адитивного виробництва з просторовими криволінійними шарами визначають специфічні вимоги до підготовки фахівців: поєднання знань з матеріалознавства, механіки та цифрового проєктування, навички роботи з адитивним обладнанням, здатність до аналітичного прогнозування та оптимізації виробничих процесів. Тільки комплексна

підготовка забезпечує високу точність, продуктивність і надійність виготовлених виробів, що робить професійне навчання інженерів і технологів критично важливим для розвитку сучасного машинобудівного виробництва.

1.3. Роль інженера та технолога у підвищенні продуктивності адитивного процесу

Адитивне виробництво є складною багатофакторною технологією, де ефективність і продуктивність значною мірою залежать від рівня підготовки інженерного та технологічного персоналу. Інженер та технолог відіграють ключову роль у плануванні, організації та контролі всіх етапів виробничого процесу, що передбачає роботу з цифровими моделями, налаштування обладнання та забезпечення стабільності технологічних параметрів. Їх професійна компетентність визначає якість кінцевого виробу, тривалість виробничого циклу та економічну ефективність підприємства.

Однією з основних функцій інженера є планування виробничого процесу. Це включає розробку маршруту нарощування шарів, вибір оптимальної послідовності операцій, визначення параметрів обладнання, таких як швидкість нанесення матеріалу, температура та інтенсивність випромінювання у лазерних або електронно-променевих системах. В інженерну компетенцію також входить аналіз геометрії виробу та прогнозування зон можливих деформацій, які можуть виникати під час формування просторових криволінійних шарів. Завдяки цьому інженер забезпечує, щоб кожен етап виробництва проходив із мінімальними відхиленнями від заданої моделі, а виріб відповідав заданим функціональним і естетичним параметрам.

Технолог, у свою чергу, відповідає за налаштування обладнання та контроль технологічних параметрів у процесі виробництва. Його завдання включають перевірку матеріалів, підготовку робочого середовища, калібрування адитивних установок та контроль витрати матеріалу. Технолог також відстежує процес нарощування шарів у реальному часі, здійснює корекцію параметрів друку залежно від поведінки матеріалу та умов навколишнього середовища, що

дозволяє скоротити кількість бракованих виробів і підвищити стабільність процесу.

Компетентність персоналу безпосередньо впливає на скорочення часу виготовлення та зменшення дефектів виробів. Добре підготовлений інженер може оптимізувати маршрути обробки, використовуючи аналітичні дані та цифрове моделювання для мінімізації непотрібних операцій. Технологічні рішення фахівців дозволяють зменшити ризик появи тріщин, порожнин, деформацій та інших дефектів, що виникають у процесі нарощування шарів. Кожне відхилення від заданих параметрів здатне вплинути на міцність, точність та функціональність виробу, а тому професійна компетентність інженера та технолога є критично важливою для досягнення стабільної якості продукції.

Особливу увагу слід приділяти взаємодії інженера та технолога на всіх етапах виробництва. Інженер проектує процес і формує технічне завдання, тоді як технолог реалізує цей процес, враховуючи специфіку обладнання та матеріалів. Така співпраця забезпечує високий рівень синхронізації робіт, своєчасне виявлення потенційних проблем та їх усунення. Від цього залежить не лише продуктивність виробництва, а й економічна ефективність, оскільки скорочуються простої, матеріальні витрати та кількість браку.

Інженер і технолог несуть відповідальність за технологічну стабільність та ефективність виробництва. Вони повинні забезпечити відтворюваність процесу для повторюваних виробів, дотримання допусків і геометричних параметрів, а також мінімізацію впливу зовнішніх факторів на якість виробу. Це передбачає постійне моніторування стану обладнання, контроль матеріалів та регулярне оновлення знань про нові методи адитивного виробництва. В умовах високих вимог до продуктивності та точності, фахівці мають володіти навичками швидкого прийняття рішень і адаптації технологічного процесу до нових завдань.

Ключовим аспектом підготовки інженерів і технологів є розвиток

аналітичних та управлінських компетентностей. Фахівці повинні вміти оцінювати ефективність виробничого процесу, планувати оптимізацію послідовності операцій, прогнозувати вплив змін технологічних параметрів на якість виробу. Вони також повинні навчитися інтегрувати цифрові моделі, симуляції та результати експериментальних досліджень для прийняття обґрунтованих рішень.

Таким чином, роль інженера та технолога у підвищенні продуктивності адитивного виробництва є вирішальною. Їх компетентність визначає точність, надійність та економічну ефективність процесу, забезпечує зменшення дефектів та скорочення часу виготовлення виробів із просторових криволінійних шарів. Професійна підготовка фахівців має поєднувати знання цифрового моделювання, матеріалознавства, механіки та технологічних процесів, що дозволяє досягти високого рівня продуктивності та стабільності виробництва в сучасному машинобудуванні.

1.4. Взаємозв’язок освіти та виробництва у сфері адитивного виробництва

Сучасне машинобудування, а особливо адитивне виробництво, вимагає від фахівців високого рівня професійної підготовки, яка поєднує теоретичні знання та практичні навички. Одним із ключових аспектів розвитку компетентного персоналу є тісний зв’язок освітніх програм і реальних виробничих потреб підприємств. Цей взаємозв’язок забезпечує ефективне формування професійних умінь, необхідних для організації та оптимізації адитивного виробничого процесу.

Сучасні підходи до підготовки фахівців у машинобудівних навчальних закладах передбачають інтеграцію міждисциплінарних знань: матеріалознавства,

механіки, цифрового проєктування та технології адитивного виробництва. Викладачі створюють навчальні програми, що поєднують теорію та практику, використовуючи лабораторні роботи, практичні завдання та проєктні роботи. Такий підхід дозволяє студентам зрозуміти не лише загальні принципи адитивного виробництва, а й конкретні способи оптимізації процесу формування виробів із просторових криволінійних шарів.

Практикоорієнтоване навчання займає центральне місце в підготовці фахівців. Застосування моделювання, тренажерів та симуляцій дозволяє студентам відпрацьовувати навички планування технологічних процесів без ризику пошкодження обладнання або матеріалів. Цифрові симуляції дають можливість змоделювати поведінку матеріалу, розподіл тепла та внутрішні напруження в шарах виробу, що дозволяє прогнозувати дефекти та заздалегідь обирати оптимальні параметри процесу. Тренажери і макети адитивних установок допомагають закріпити навички роботи з обладнанням, налаштування параметрів і контролю якості, що в результаті підвищує готовність майбутніх фахівців до роботи на реальному виробництві.

Важливою складовою професійної підготовки є дуальна освіта та проходження виробничих практик. Стажування на підприємствах дозволяє студентам безпосередньо застосовувати знання у реальних умовах, ознайомлюватися з робочими процесами, контролювати технологічні параметри та взаємодіяти з досвідченим персоналом. Такий підхід забезпечує ефективне поєднання теоретичної підготовки та практичних навичок, дозволяє студентам побачити реальні наслідки своїх рішень і краще зрозуміти складність адитивного виробничого процесу.

Системний зв’язок освіти та виробництва також передбачає участь студентів у спільних проєктних роботах, де вони виконують завдання, схожі на реальні виробничі кейси. Наприклад, моделювання та виготовлення складних

виробів із просторових криволінійних шарів дозволяє оцінити ефективність різних стратегій нарощування шарів, визначити критичні точки процесу та запропонувати способи підвищення продуктивності. Цей досвід допомагає майбутнім інженерам та технологам розвивати критичне мислення, аналітичні здібності та навички прийняття рішень у виробничих умовах.

Особливу увагу варто приділяти використанню сучасного програмного забезпечення та цифрових платформ, які інтегрують навчальні та виробничі процеси. Використання CAD/CAM систем, програм для симуляції адитивного виробництва та інструментів управління технологічними параметрами дозволяє студентам оволодіти сучасними методами проєктування та оптимізації виробів. Це не лише підвищує професійну компетентність, а й формує навички адаптації до швидкозмінних технологічних процесів на підприємствах машинобудівної галузі.

Таким чином, взаємозв’язок освіти та виробництва у сфері адитивного виробництва є ключовим чинником підготовки компетентних фахівців. Комплексне поєднання теоретичних знань, практикоорієнтованих методів навчання, стажувань та дуальної освіти дозволяє сформувати у студентів необхідні навички для планування, налаштування, контролю та оптимізації адитивного виробничого процесу. Такий підхід підвищує готовність майбутніх інженерів і технологів до роботи на сучасних машинобудівних підприємствах, сприяє зменшенню браку та дефектів виробів і забезпечує високу продуктивність процесу виготовлення виробів із просторових криволінійних шарів.

1.5. Актуальність удосконалення методів підготовки фахівців для адитивного виробництва

Сучасне машинобудівне виробництво перебуває у стані швидкої

технологічної трансформації, що зумовлено впровадженням цифрових та адитивних технологій. В умовах таких змін особливо важливо забезпечити підготовку фахівців, здатних ефективно управляти адитивними виробничими процесами та інтегрувати інноваційні рішення у виробничу діяльність. Традиційні методи навчання вже не здатні в повній мірі формувати у студентів компетентності, необхідні для роботи на сучасних підприємствах, де застосовуються складні технології формування виробів із просторових криволінійних шарів.

Інтеграція цифрових технологій у навчальні програми є одним із ключових напрямків удосконалення підготовки фахівців. Це включає використання CAD/CAM систем для проєктування виробів, цифрових симуляторів адитивного процесу, систем контролю технологічних параметрів та програм для аналізу поведінки матеріалу під час нарощування шарів. Завдяки такому підходу студенти отримують можливість моделювати реальні виробничі ситуації, оцінювати наслідки різних технологічних рішень, прогнозувати можливі дефекти та оптимізувати параметри процесу ще на етапі підготовки. Інтеграція цифрових технологій дозволяє поєднувати теоретичну підготовку з практичними навичками, формуючи у майбутніх інженерів здатність приймати обґрунтовані рішення у реальному виробничому середовищі.

Особливу роль у підготовці відіграють інноваційні методи навчання, зокрема проєктні роботи, кейс-стаді, моделювання виробничих процесів і симуляції. Такі методи дозволяють студентам відпрацьовувати комплексні навички аналізу технологічних процесів, планування послідовності операцій, контролю параметрів і прийняття рішень щодо оптимізації виробництва. Практичне виконання завдань із моделювання та виготовлення виробів із просторових криволінійних шарів розвиває аналітичне мислення, здатність оцінювати технологічні ризики та приймати ефективні рішення щодо підвищення

продуктивності процесу.

Формування навичок аналітичної та проєктної діяльності є невід'ємною частиною підготовки інженерів для адитивного виробництва. Вміння аналізувати технологічні карти, визначати критичні точки процесу та оптимізувати параметри нарощування шарів дозволяє забезпечити високу точність, надійність і стабільність виробів. Аналітичні компетентності включають оцінку матеріалознавчих характеристик, прогнозування поведінки матеріалу та вибір оптимальних режимів роботи обладнання. Проєктні навички дозволяють інтегрувати знання з різних дисциплін і розробляти ефективні технологічні рішення, що сприяють підвищенню продуктивності адитивного процесу.

Підвищення кваліфікації та компетентності фахівців безпосередньо впливає на конкурентоспроможність підприємств. Висококваліфіковані інженери та технологи здатні впроваджувати інноваційні методи виробництва, скорочувати час виготовлення виробів, зменшувати кількість браку та дефектів, підвищувати точність і стабільність продукції. Це дозволяє підприємствам залишатися конкурентоспроможними на ринку, впроваджувати нові технології та забезпечувати високу якість продукції.

Не менш важливим аспектом є постійне оновлення освітніх програм відповідно до розвитку технологій. Адитивне виробництво швидко розвивається, і методи підготовки повинні адаптуватися до нових матеріалів, обладнання та цифрових платформ. Сучасні освітні програми повинні включати навчання роботі з багатоматеріальними системами, комбінованими технологіями, автоматизованими системами контролю якості та цифровими симуляторами процесів. Це забезпечує формування універсальних фахівців, які можуть швидко адаптуватися до нових виробничих умов і впроваджувати передові технології на підприємствах.

Таким чином, удосконалення методів підготовки фахівців для адитивного

виробництва є надзвичайно актуальним завданням сучасної освіти та промисловості. Інтеграція цифрових технологій, практикоорієнтованих методів навчання та формування аналітичних і проєктних навичок дозволяє підготувати висококваліфікованих фахівців, здатних підвищувати продуктивність виробництва, оптимізувати технологічні процеси та сприяти конкурентоспроможності підприємств у сфері сучасного машинобудування. У результаті реалізації таких методів освіти формується нове покоління інженерів і технологів, здатних ефективно працювати в умовах швидко змінюваних технологічних процесів та високих вимог сучасного виробництва.

Висновки до розділу 1

Аналіз актуальності професійної підготовки фахівців машинобудівних підприємств у сфері адитивного виробництва засвідчує, що сучасний етап розвитку промисловості вимагає якісно нового рівня компетентностей. Технології виготовлення виробів із просторових криволінійних шарів належать до найбільш прогресивних напрямів, оскільки забезпечують високу точність, можливість створення складних форм та значне скорочення часу виробництва. Проте впровадження таких технологій неможливе без кваліфікованих інженерів і технологів, які здатні керувати складними цифровими системами, оптимізувати параметри процесу та забезпечувати стабільну якість продукції.

Професійна підготовка фахівця для адитивного виробництва повинна бути комплексною та багаторівневою. Вона має включати вивчення властивостей матеріалів, основ механіки, методів 3D-моделювання, принципів побудови криволінійних шарів, а також засобів контролю та аналізу технологічних параметрів. Сучасні підприємства очікують від студентів не лише теоретичних знань, а й здатності працювати з цифровими платформами, виконувати симуляції

процесів, аналізувати дані та приймати інженерні рішення, що підвищують продуктивність виробництва.

Особливе значення має інтеграція освітніх програм із реальним виробництвом. Стажування, практики, участь у проєктних завданнях та роботі з промисловим обладнанням дозволяють сформувати практичний досвід, без якого неможливо ефективно працювати в сфері адитивних технологій. Така взаємодія сприяє адаптації майбутніх фахівців до сучасних умов машинобудівних підприємств та формує здатність швидко реагувати на технологічні зміни.

Отже, підготовка фахівця, здатного підвищувати продуктивність адитивного виробничого процесу завдяки вдосконаленню методів формування просторових криволінійних шарів, є ключовою умовою інноваційного розвитку машинобудівної галузі. Вона забезпечує можливість створення високотехнологічних виробів, оптимізації виробничих ресурсів та посилення конкурентоспроможності підприємств. Формування таких фахівців – це стратегічний напрям, що визначатиме майбутнє як промисловості, так і системи професійної освіти.

2. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ АДДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І СПОСОБІВ РОЗРАХУНКУ ТРАЄКТОРІЙ ПЕРЕМІЩЕННЯ ДРУКУЮЧОЇ ГОЛОВКИ

2.1 Адитивні технології: відмінності від традиційних способів виробництва та недоліки технології

Принцип адитивних технологій полягає у формуванні виробу із шарів. Кожен шар є певним перерізом виробу. Існує безліч адитивних технологій. У деяких шари можуть формуватися окремо і надалі складатися один з одним, формуючи об'ємний виріб. В інших технологіях наступний шар формують відразу поверх попереднього.

Фактично адитивні технології є відмінними від таких традиційних методів механічного виробництва та обробки, як фрезерування або точення, де формування вигляду виробу відбувається за рахунок видалення зайвого матеріалу (т.зв. «субтрактивне виробництво»).

У виробництві, особливо машинної обробці, термін «субтрактивні» має на увазі більш традиційні методи і є ретронімом, придуманим останніми роками для розмежування традиційних способів та нових адитивних методів. Хоча традиційне виробництво використовує, по суті, «адитивні» методи протягом століть (такі, як клепка та зварювання), у них відсутня тривимірна інформаційна технологічна складова. Машинна ж обробка (виробництво виробів точної форми), як правило, ґрунтується на субтрактивних методах – точенні, фрезеруванні, свердлінні та шліфуванні. Результати порівняння технологій показані у таблиці 2.1.

Основною технологією, що використовує повністю адитивне виробництво виробів, є об'ємний (3D) друк – процес створення тривимірного твердотільного об'єкта практично будь-якої форми.

3D-принтерами називають верстати з програмним керуванням, що

виконують побудову виробу адитивним способом.

Вироби, виготовлені адитивним методом, можуть застосовуватися на будь-якому виробничому етапі – як для виготовлення дослідних зразків (т.зв. швидке прототипування), так і як готові вироби (т.зв. швидке виробництво).

Таблиця 2.1 – Порівняння традиційних та адитивних технологій

Ознака	**Традиційні технології**	**Аддитивні технології**
Спосіб отримання виробу	Видалення зайвого матеріалу від заготівлі свідомо більшого розміру	Додавання матеріалу в потрібних місцях
Наявність сил між інструментом та заготовкою / міцність верстата	Високі	Незначні
Похибки перебазування	Присутні	Відсутні
Знос інструменту, потрібна номенклатура	Значний	Незначний
Ступінчастість поверхні	Незначна	Велика
Необхідне оснащення	Багаторазове	Одноразове
Температурні деформації	Слабкий вплив (можуть бути знижені різними способами)	Дуже великий вплив (Практично не піддаються компенсації)
Час підготовки виробництва	Тривале	Короткий
Час безпосереднього виробництва	Короткий	Тривале

Якість виробів залежить від того, наскільки точно будуть передані геометричні та фізичні параметри від вихідної моделі до готового виробу. Під точністю виробу розуміється її відповідність вимогам креслення: за розмірами,

геометричною формою, ступенем шорсткості поверхонь цього виробу. На критерій точності впливають похибки різного роду (систематичні та випадкові). В адитивних технологіях, виходячи з їх принципу побудови виробу по шарах, завжди буде присутня «ступінчастість» між шарами. Але на відміну від механічних видів обробки виробів, об'ємний друк позбавлений впливів зусилля затиску заготовки (внаслідок відсутності вихідної заготівлі як такої), похибок перебазування (виріб, що виробляється, не потребує переміщень), а також немає зносу інструменту (внаслідок відсутності впливу на твердий матеріал).

Відомо безліч технологій друку, але найбільш широко використовується метод пошарового наплавлення (FDM) [22]. Він є простим і найбільш дешевим, що забезпечило появу великої кількості принтерів, що працюють за цим принципом. Технологія FDM передбачає створення тривимірних об'єктів шляхом нанесення послідовних шарів матеріалу, що повторюють форму цифрової моделі (Малюнок 1.1). Як правило, як матеріали для друку виступають термопластики, що постачаються у вигляді котушок ниток або прутків.

Технологія FDM була розроблена Скоттом Крампом наприкінці 1980-х і вийшла на ринок у 1990 році.

Оригінальний термін "Fused Deposition Modeling" та абревіатура FDM є торговими марками компанії Stratasys. Ентузіасти 3D-друку, учасники проекту RepRap, придумали аналогічний термін Fused Filament Fabrication (Виробництво методом наплавлення ниток) або FFF для використання в обхід юридичних обмежень. Терміни FDM і FFF еквівалентні за змістом та призначенням.

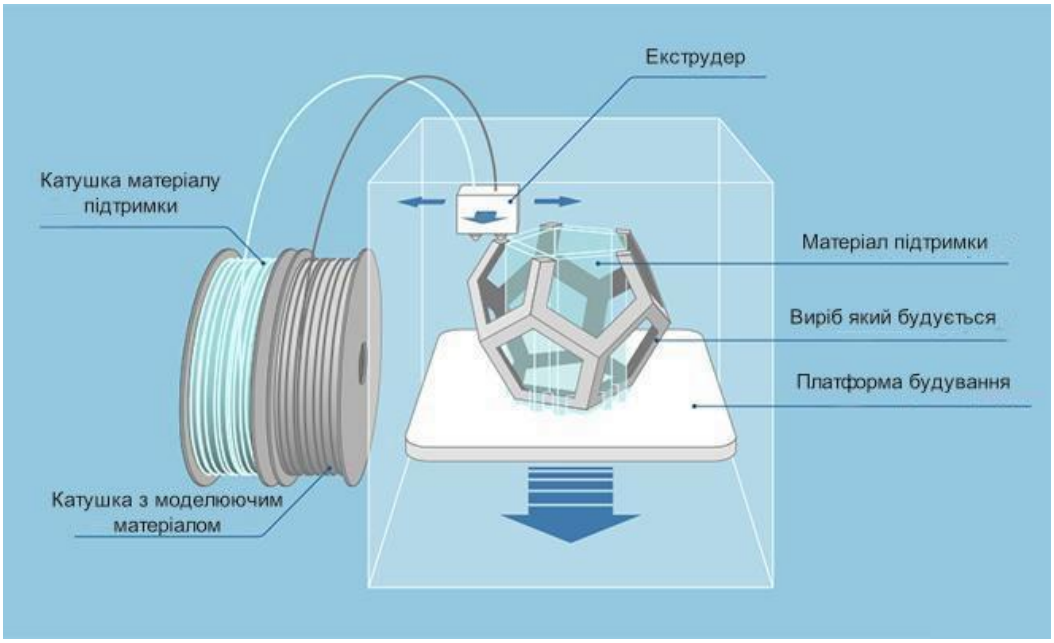


Рисунок 2.1 – Принципова схема процесу друку за технологією FDM

Більшість 3D принтерів створюють виріб за шарами. На кожному шарі відбуваються переміщення друкуючої головки принтера FDM або лазера SLS принтера в горизонтальній площині (по осях XY) з нанесенням робочого матеріалу (FDM) або спіканням шарів (SLS). Після друку одного шару відбувається зміщення по вертикалі (осі Z) на наступний шар, проводиться його друк і так далі. Всі ці дії готуються спеціалізованим програмним забезпеченням, ключовою функцією якого є "нарізання" моделі виробу на шари [23], тому такі програми прийнято називати "слайсерами" (від англ. slice - нарізати). Існує безліч різних "слайсерів", виробники 3D принтерів намагаються випускати власне програмне забезпечення для своїх пристроїв, але принципи підготовки програми роботи в цих програмах більш схожі. Тим не менш, існує програмне забезпечення, яке можна використовувати з різними 3D принтерами, найбільш відомими серед них: Slic3r, Simplify3D, Cura та ін.

У більшості адитивних технологіях матеріал нагрівається до температури вище температури плавлення і наноситься на більш холодну основу, а потім якомога швидше охолоджується до температури нижче температури плавлення.

І тут ми стикаємося з серйозним недоліком адитивних технологій - матеріал при охолодженні зменшується в розмірах (сідає), що призводить до деформації виробу вже в процесі виробництва. Крім того, зчеплення нового гарячого шару з попереднім, що вже охололо, часто відбувається погано через проблеми адгезії гарячого матеріалу до холодного. Дана проблема в сукупності з проблемою усадки в процесі охолодження обумовлює високий напружений стан у виробі, що виробляється, приводячи до появи тріщин на виробі часто вже в процесі виробництва. Але навіть якщо вдається уникнути утворення подібних тріщин поперек шарів, то міцність виробу в даному напрямку все одно буде суттєво нижчою, ніж уздовж шарів, що призводить до яскраво вираженої анізотропії властивостей виробів.

Відповідно до результатів випробувань, показаних у таблиці 2.2 виробників матеріалів для друку міцність виробів упоперек шарів нижче міцності на вигин уздовж шарів більш ніж у 3 рази і до 50% нижче, ніж міцність при розтягуванні вздовж шарів. Зразки випробувань показані на рисунках 2.2 та 2.3.

Таблиця 2.2. – Результати досліджень на міцність вздовж та поперек шарів

	Міцність вдоль шарів	Міцність упоперек шарів	Ставлення
Згідно з дослідженнями [56], матеріал – ABS	36,6	19,7	49,7%
Згідно з дослідженнями [56], матеріал – PLA	55,49	35,72	64%
Згідно з дослідженнями [56], матеріал – ABS	45,8	21,3	49,8%
Згідно з дослідженнями [56],	86,42	5,23	6%

матеріал – PEEK			

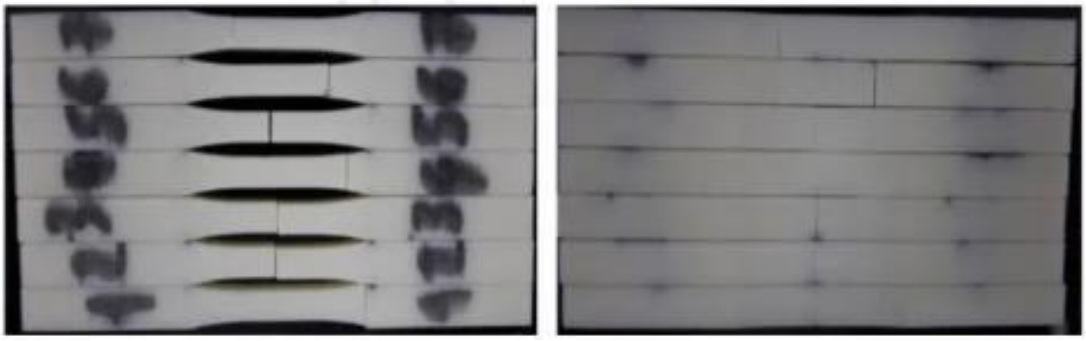


Рисунок 2.2 – Результати випробувань на вигин

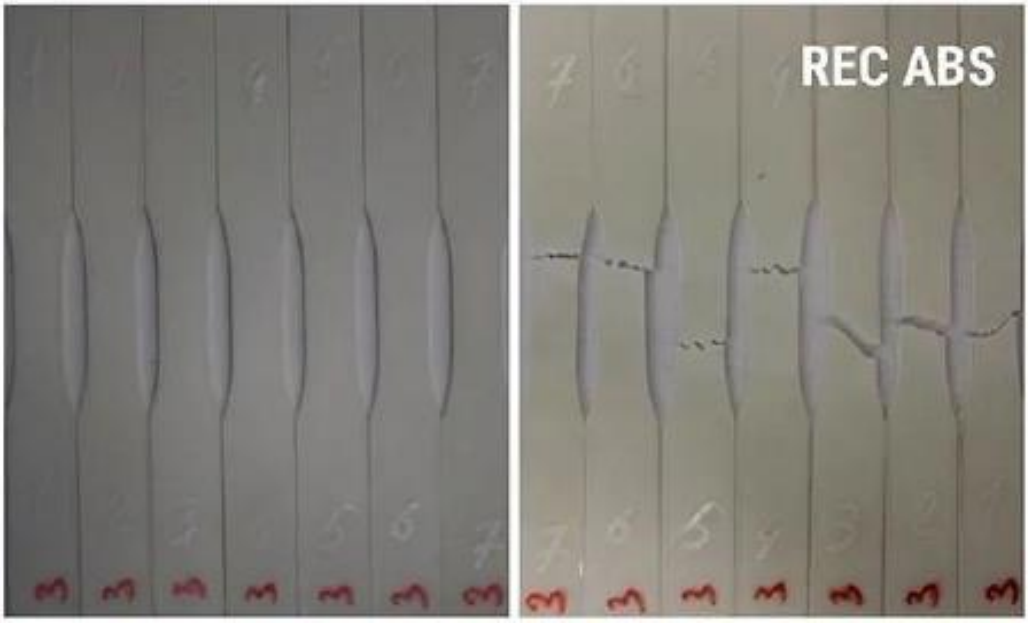


Рисунок 2.3 – Результати випробувань на розтягування

У всіх видах адитивних технологій укладання матеріалу першого шару здійснюється на різні платформи. Платформи виготовляються з різних матеріалів залежно від технології, що застосовується. Наприклад, для пристроїв, що працюють за технологією FDM, використовуються нагрівальні платформи зі скла або алюмінію. Нагрівання платформи дозволяє збільшити адгезію першого шару до платформи та знизити вплив усадки матеріалу. Але, у зв'язку з тим, що адгезія між матеріалами платформи і використовуваними полімерами часто недостатня, навіть при нагріванні столу до високих температур, порівнянних з температурою

розм'якшення полімерів, додатково застосовуються спеціальні адгезиви (клеючі склади). Дані адгезиви є розчинами, що наносяться на поверхню платформи і утворюють полімерний шар товщиною 2-5 мкм, що сприяє кращому зчепленню виробу з основою. Однак, при виготовленні відносно великих виробів (від 150 мм) з матеріалів, що мають усадку більше 1% даних засобів, може бути недостатньо для утримання виробу на платформі або деформації частин виробу, як показано на малюнку 2.4.

Малюнок 2.4 – Деформація деталі внаслідок усадки

Причому силу зчеплення виробу з основою не можна підвищувати дуже сильно, тому що при надмірній силі зчеплення основи з виробом воно просто ламається при знятті. Ця проблема проявляється з багатьма матеріалами, але особливо актуальна в адитивних технологіях, що використовують як матеріал металеві порошки. Виріб із таких матеріалів після друку (до запікання в печі) дуже крихкий. Для полегшення зняття таких деталей друк проводиться на структурах, що підтримують, готові деталі іноді відрізаються від платформи ручним інструментом.

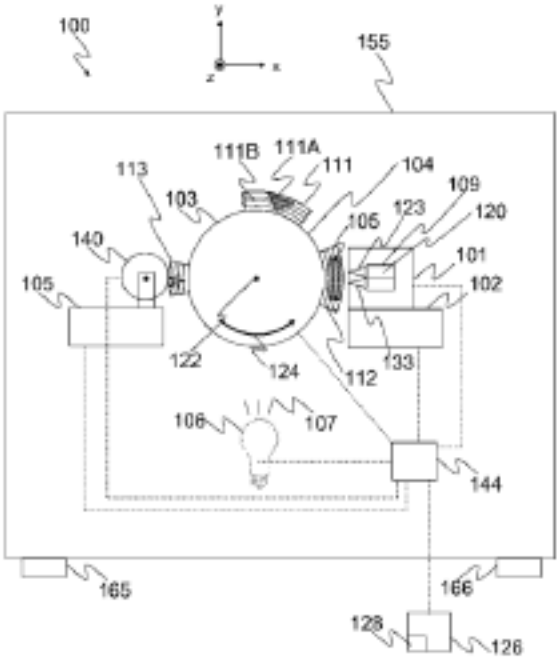
Проблема утримання першого шару виробу на платформі також є одним із недоліків адитивних технологій.

2.2 Устаткування для багатоосьової обробки

Один із напрямків вирішення нестачі анізотропії друкованих виробів – адитивні технології, в яких матеріали наносяться не на плоскі, а на циліндричні робочі (прийомні) поверхні. Розглянемо відомі в даний час підходи в даній галузі.

Так, відомий 3D принтер компанії Zydex (рисунок 1.5), в якому друкований матеріал 1 за допомогою аплікатора 2 наноситься на обертову циліндричну приймальну поверхню 3 (циліндричну платформу з окремою кутовою віссю С). У процесі виробництва об'єкта аплікатор та приймальна поверхня зміщуються відносно один одного в напрямку, перпендикулярному осі обертання. Спосіб виготовлення виробів полягає у визначенні керуючої програми по 3D моделі об'єкта, причому програма поділяє модель на безліч плоских шарів і складає набір лінійних (або кутових) переміщень по кожній осі 3D принтера, які дозволяють нанести «плоскі» шари на циліндричну приймальну поверхню у вигляді вигнутих шарів [25].

Подібні пристрої об'ємного друку розроблені Tyco Electronics Corp. та Xerox. Основна їх відмінність у тому, що приймальну поверхню утворює не платформа, а стрижень, закріплений в патроні (рисунок 2.6, [26]) чи двох опорах (рисунок 2.7, [27]). Стрижень виконує роль основи для побудови об'єкта і може бути включений у тіло виробу або видалено (механічно чи хімічно).



Малюнок 2.5 – 3D принтер компанії Zydex

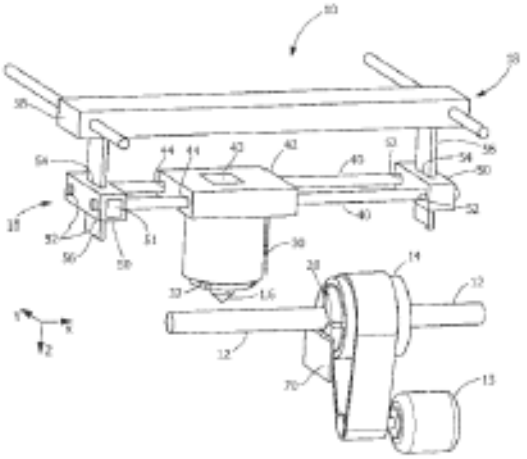


Рисунок 2.6 – Об'ємний друк Tyco Electronics Corp.

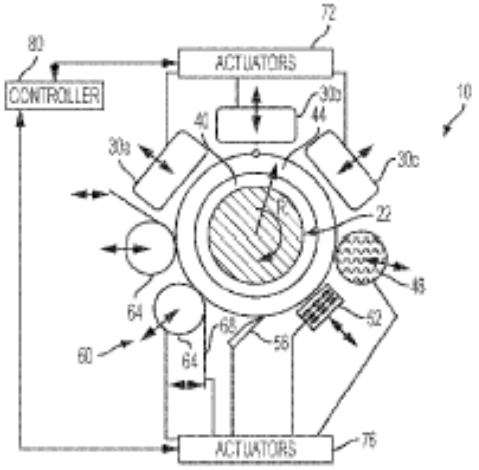


Рисунок 2.7 – Пристрій об'ємного друку Xerox

Ще один пристрій об'ємного друку (рисунок 2.8), сконструйований за образом токарного верстата, ґрунтується на використанні циліндричних координат (R, Θ (тета), Z) [28]. Його відмінна риса - можливість наносити циліндричні шари різного типу (відрізками прямих, кільцями або гвинтовими лініями).

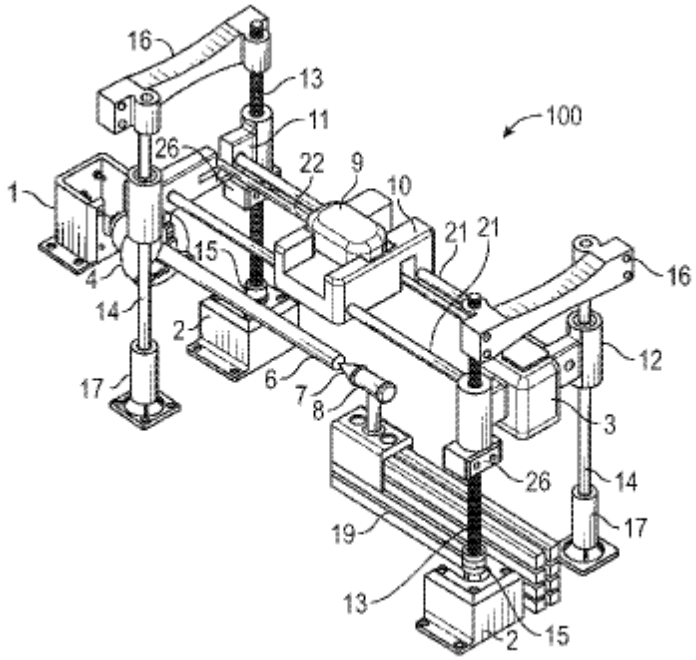


Рисунок 2.8 – Пристрій об'ємного друку в циліндричних координатах

3D друк шляхом накладання матеріалу на циліндричну основу – окремий

випадок загального руху до багатоосьового друку, тобто виробництві об'єктів у пристрої, робочі органи якого мають більше трьох ступенів рухливості. Інше його відгалуження – нарізка та друк об'єкта вигнутими шарами замість плоских. Цей підхід викладався у роботах [29, 30], а окремий варіант його реалізації представлений у патенті [31] (рисунок 1.9). З даного патенту відома система 3D друку, що містить друкувальну головку на трикоординатному маніпуляторі і плоску приймальну поверхню, виконану з можливістю обмеженого повороту навколо осей X і Y (кутові осі A і B).

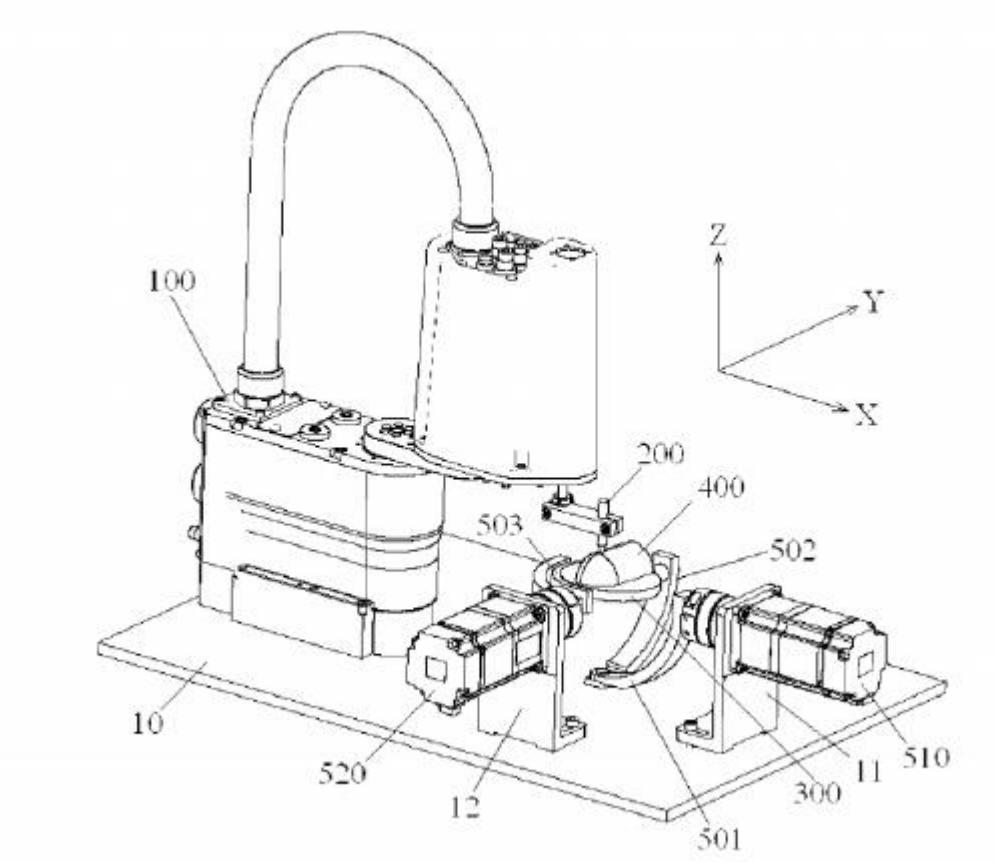
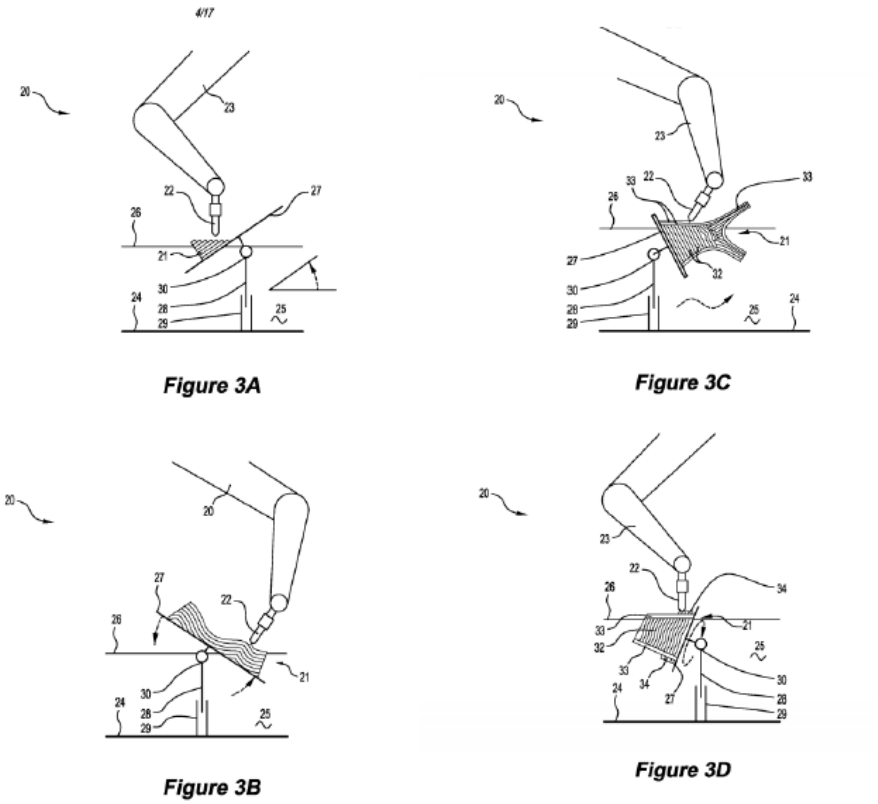


Рисунок 2.9 – Пристрій для друку зігнутими шарами

Незважаючи на зміну форми шару, цей і подібний до нього прийоми не здатні значно згладити анізотропію властивостей міцності виробу. Приріст міцності на розрив при додатку навантаження в осьовому напрямку забезпечується головним чином рахунок збільшення площі контакту сусідніх

шарів.

Інший спосіб багатоосьового 3D друку викладено в патенті [32] компанії Laing O'Rourke Australia Pty Ltd. (Малюнок 1.10). Цей 3D принтер містить друкувальну головку та плоску приймальну поверхню, закріплені на маніпуляторах з можливістю переміщення по трьох лінійних координатах та здійснення кутових переміщень навколо однієї, двох або трьох осей. Пристрій реалізує кілька способів побудови об'єкта: він може вироблятися у вигляді безлічі плоских шарів, вигнутих шарів, плоских і вигнутих шарів, орієнтованих у різних напрямках, також об'єкт може бути покритий оболонкою у вигляді плоских шарів та/або у вигляді кільцевих шарів, які наносяться на об'єкт.



Малюнок 2.10 – Пристрій Laing O'Rourke Australia Pty Ltd.

Таким чином видно активне опрацювання питання побудови виробу з просторових криволінійних шарів на патентному рівні, проте практичної реалізації викладених у цих патентах ідей не спостерігається. У продажу

багатоосьові 3D принтери не зустрічаються. Однією з причин цього є те, що програма 3D друку навіть невеликого виробу складається з мільйонів переміщень друкуючої голівки та вироби, розрахувати вручну які практично неможливо. Тому практично всі експерименти в цій галузі закінчуються виготовленням кількох тестових нескладних виробів, програми виробництва яких розраховуються в неспеціалізованих програмах із застосуванням слабких засобів автоматизації. Для масового виробництва такі технології годяться.

2.3 Формати даних, що використовуються для автоматичної генерації коду керування для адитивних пристроїв

Для автоматичної генерації керуючого коду виробу на першому етапі потрібно розібрати файл, який надходить від систем 3D проектування та представляє 3D модель виробу, який потрібно зробити. Розглянемо найбільш поширені формати файлів та їх структуру, щоб розуміти як надалі з ними працювати.

Основним форматом вихідних даних, які використовуються слайсерами є STL файл.

STL файл – формат файлу, що регламентує спосіб зберігання інформації про форму поверхні виробу, яку може використовувати будь-яка САПР у процесі прискореного прототипування. Більшість систем прискореного прототипування підтримує роботу з цим форматом файлів. Цей формат дозволив подолати комунікаційний бар'єр між САПР та пристроями прискореного прототипування.

Файл STL, як і, як і IGES, DXF, STEP, дозволяє будь-який САПР конвертувати дані подальшої роботи пристрою об'ємного друку. Однак, він набагато простіше, оскільки містить набагато менше інформації, позбавляє необхідності створення складної програми читання та перекладу. Недоліком такого спрощення можна вважати те, що втрачається можливість істотної зміни файлу. Будь-які перетворення, крім масштабування та поділу на частини, можуть

вимагати повернення до оригінального САПР файлу.

STL файл відтворює геометрію САПР файлу. Як і вихідна модель, STL модель зображує фігуру малюнку 2.11.

Однак на цьому подібність закінчується. STL використовує набір трикутних граней (фасет) для відтворення поверхні виробу. Також, STL файл намагається повторити поверхню, використовуючи якнайменше фасетів.

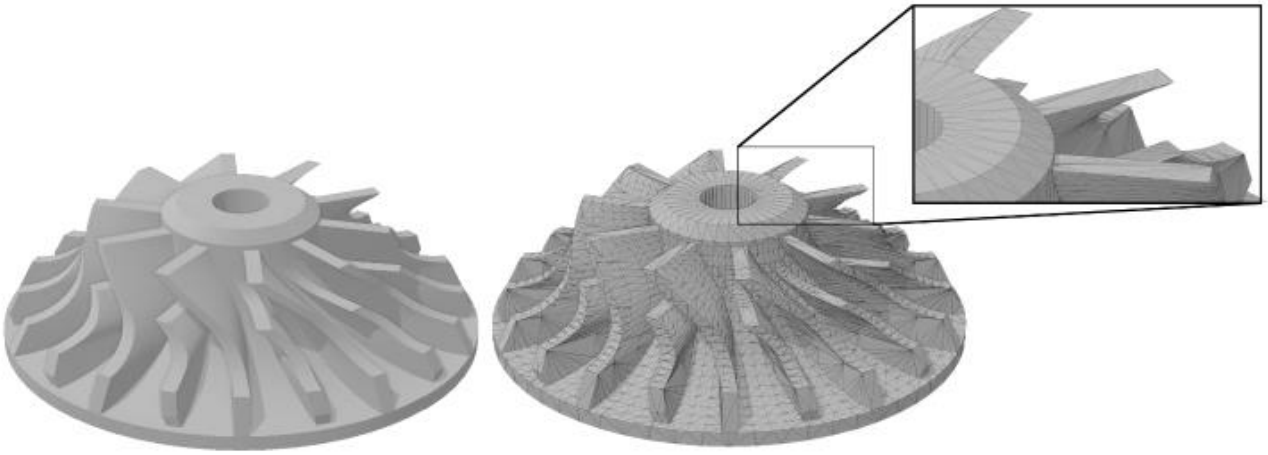


Рисунок 2.11 – Порівняння візуалізації САПР файлу (а) та файлу STL (б)

При експортуванні файлу STL слід дотримуватися балансу між якістю моделі та розміром файлу. Цей баланс досягається завданням допустимого відхилення між поверхнею моделі та гранями фасетів.

Малюнок 1.12 показує, як виглядає поверхня циліндра у STL файлі та CAD моделі. Зі зменшенням відхилення точність виробу підвищується. Найчастіше, граничним є відхилення 0,025..0,05 мм, т.к. великі значення не вплинуть на якість поверхні готового виробу при 3D друку через фізичне обмеження 3D друку. При збільшенні цього значення на готовому виробі можна буде розрізнити окремі фасети, що зменшує точність виготовлення готового виробу [34].

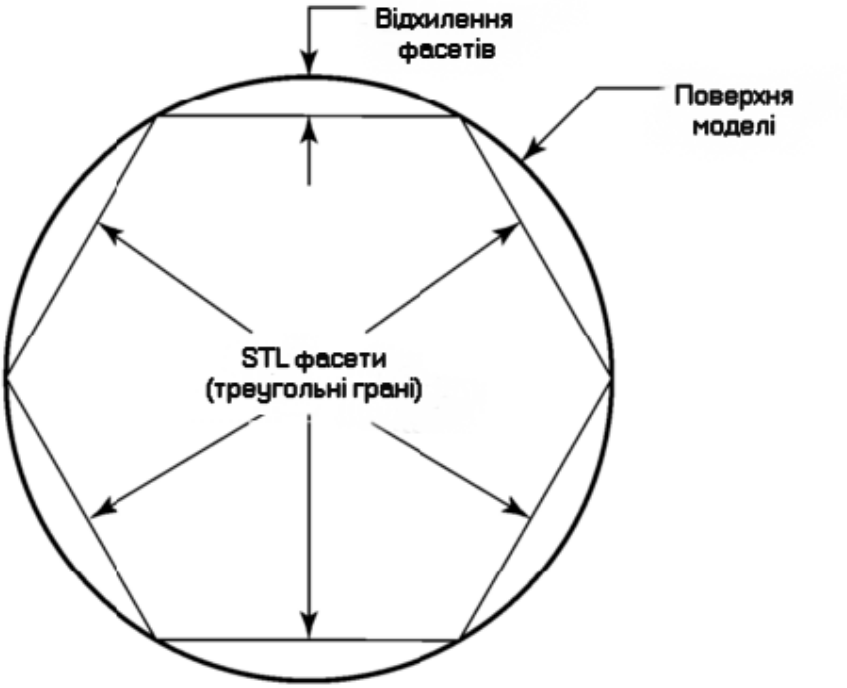


Рисунок 2.12 – Порівняння візуалізації циліндричної поверхні САПР файлу та файлу STL

STL ASCII файл спочатку призначений для тестування нових САПР інтерфейсів. Його можна використовувати і на практиці, але через його великий розмір може бути важко. Синтаксис ASCII STL представлений малюнку 2.13.

$$
\begin{array}{l}
solid \ \ < \text{ім'я} > \\
\left(facet\ normal\ n_i\ \mathrm{n}_j\ \mathrm{n}_k \right)^{+} \\
\quad outer\ \text{loop} \\
\left\{ \begin{array}{l} \text{vertex}\ \mathrm{v1}_x\ \mathrm{v1}_y\ \mathrm{v1}_z \\ \text{vertex}\ \mathrm{v2}_x\ \mathrm{v2}_y\ \mathrm{v2}_z \end{array} \right\} \\
\text{vertex}\ \mathrm{v3}_x\ \mathrm{v3}_y\ \mathrm{v3}_z \\
\quad end\ \text{loop} \\
\quad end\ \text{facet} \\
end\ solid \ \ < \text{ім'я} >
\end{array}
$$

Рисунок 2.13 – Синтаксис ASCII STL файлу

Поле <ім'я> є необов'язковим, але навіть якщо ім'я опущене після слова solid потрібно пробіл. Запис {…}+ означає, що цей блок може повторюватися

багато разів. Кожне n або v – число з точкою, що плаває, у вигляді знака-мантиси або знак-експоненти.

За своєю суттю, 3MF файл являє собою ZIP архів, що містить 3D моделі, параметри друку виробів, інформацію про матеріали друку та колір моделей. Один файл може містити декілька окремих моделей, що забезпечує можливість збереження збірної моделі безпосередньо із САПР. Структура 3MF файлу показана малюнку 2.15:

Таким чином, можна припустити, що незабаром цей формат витіснить STL і стане основним типом вихідних даних для адитивного виробництва. Вже зараз цей формат застосовується різним програмним забезпеченням як основний формат даних, наприклад, у слайсері Cura, а також у програмі 3D Builder від компанії Microsoft.

Малюнок 2.15 – Структура 3MF файлу

3 МЕТОД РОЗРАХУНКУ ТРАЕКТОРІЙ РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ

3.1 Принцип побудови

В результаті проведеного аналізу існуючих недоліків адитивних технологій та тенденцій їх вирішення було запропоновано метод друку з укладанням просторових криволінійних верств. Відмінною особливістю методу є можливість друку без використання плоскої платформи як підстави, як і в більшості інших адитивних технологій. Друк виробу може проводитися на різних підставах, наприклад, на циліндричній основі, закріпленому на платформі з двома додатковими можливими рухами - нахилом виробу та його обертанням у процесі виробництва (рисунок 3.1).

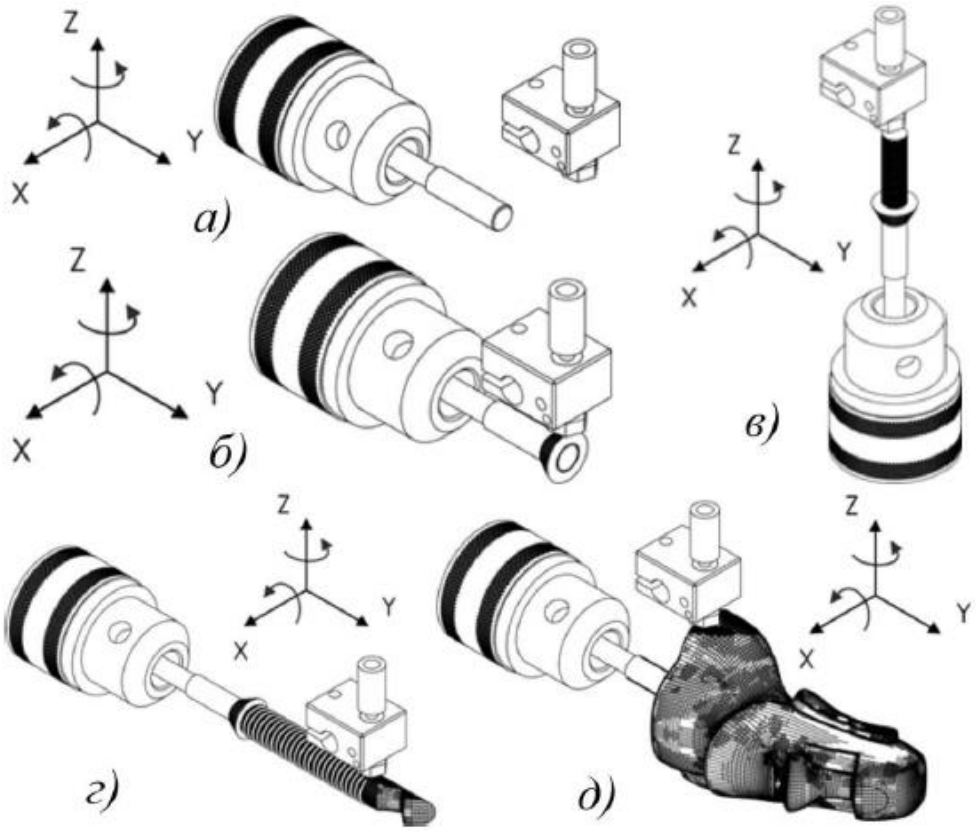


Рисунок 3.1 – Принцип побудови виробу

На першому етапі запропонованого способу друку спіралеподібні траєкторії накладаються на 3D друкарський сердечник. Порядок роботи цього режиму включає:

- модель ділиться по заданому діаметру (параметр Base Diameter, що задає діаметр центральної частини;
- генерується підкладка, показана на малюнку 2.1б (вона необхідна при друку сердечника на підставі меншого діаметра для утримання моделі на підставі).
- частина моделі, що перетинається з базовим циліндром, ділиться на плоскі шари
- частина моделі, з якої віднімається центральний сердечник, готується для друку просторовими траєкторіями.

p align="justify"> Далі, кожна з частин моделі може бути підготовлена різними способами поділу моделі на шари (слайсинг). Так як багатоосьові FFF 3D принтери мають можливість змінювати положення інструменту щодо моделі, для них доступний друк з використанням просторових криволінійних шарів замість плоских. Наприклад, крім слайсингу плоскими шарами, для багатоосьових систем можна використовувати слайсинг шарами, що мають форму геометричних примітивів (циліндр, сфера і т.д.) або шарами, що мають форму самої 3D моделі. Шляхом комбінування різних способів слайсингу можна досягти певних характеристик міцності та якості поверхні виробу.

3.2 Розрахунок шляхів переміщення у криволінійних шарах

Розподіл вихідної моделі на шари відбувається шляхом пошуку перетину вихідної моделі з циліндричними поверхнями, що складаються з трикутних граней.

Для розрахунків ліній перетину використовують полярні координати (r, φ, z). Таким чином, кожен наступний шар має різні значення r, а лінії перетину мають координати (φ, z).

Пошук ліній перетину здійснюється наступним чином (рисунок 2.2). Насамперед вибираються трикутні грані, що перетинають циліндр з радіусом r.

Для визначення перетину трикутника знаходиться мінімальна і максимальна координати трикутника в площині X і Y. Якщо Xmin або Ymin більше, ніж r, або Xmax або Ymax менше, ніж -r, то трикутна грань не перетинає циліндр з радіусом r.

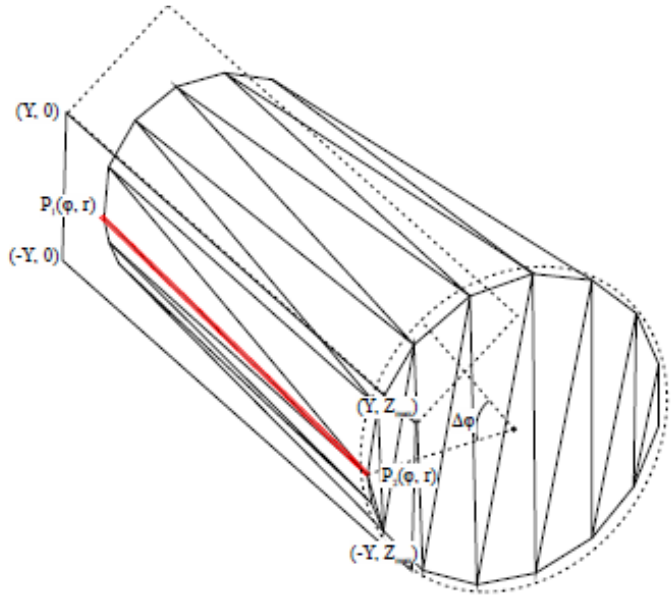


Рисунок 3.2 – Схема пошуку ліній перетину

Далі коло ділиться на сегменти певної величини Δφ. Для кожного сегмента знаходиться перетин кожної з обраних трикутних граней з площиною, паралельною площині YZ і зміщеною величину r. Також площина обмежується значеннями (Y, Y), які визначаються як:

$$Y = r * tg(\frac{\varphi}{2}),$$

Після знаходження точок перетину трикутної грані з січною площиною необхідно обмежити отриманий сегмент до значень (Y, -Y). В даному випадку існує 3 способи перетину:

Обидві точки перетину знаходяться поза обмеженням (Y, -Y)

Обидві точки перебувають усередині обмеження (Y, -Y)

Одна з точок лежить поза обмеженням (Y, -Y), або обидві точки лежать з різних боків від обмеження.

У першому випадку точки перетину пропускаються і відбувається перехід до наступної трикутної грані. У другому випадку сегмент, утворений з точок перетину, додається до списку сегментів для утворення контурів. Полярні координати точок розраховуються як:

$$P_{1\varphi} = \varphi * i + \arcsin\left(\frac{P_{1y}}{\sqrt{r^2+P_{1y}^2}}\right),$$

$$P_{2\varphi} = \varphi * i + \arcsin\left(\frac{P_{2y}}{\sqrt{r^2+P_{2y}^2}}\right),$$

У третьому випадку кожна з точок розглядається окремо, і якщо вона виходить за обмеження, її координати розраховуються як

$$P_{1y} = -Y, если\ P_{1y} < -Y,$$

$$P_{1y} = Y, если\ P_{1y} > Y,$$

$$P_{1z} = P_{1z} + \left|\pm Y - P_{1y}\right| * \frac{P_{2z}-P_{1z}}{|(P_{1y}-P_{2y})|},$$

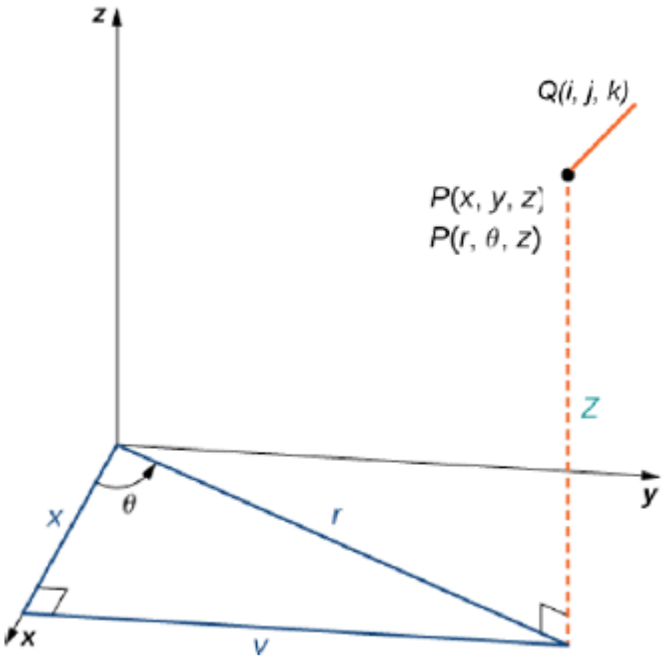
Подальший перерахунок у полярні координати аналогічний другий випадок.

Після обчислення координат ліній перетину між вихідною моделлю необхідно провести їх перетворення на циліндричні координати для подальшої генерації структур шляхів переміщення моделі: контурів, що повторюють форму шару, ліній заповнення, що є сіткою на циліндричній поверхні.

У циліндричній системі координат (Малюнок 2.3), точка у просторі представлена у вигляді трьох координат (r, θ, z), де

(r, θ) – полярні координати проекції точки на площину XY

Координата z у прямокутній системі координат



Малюнок 3.3 – Схема перетворення координат

Таким чином, декартові координати перетворюються до циліндричних, використовуючи рівняння:

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \varphi = arctg(\frac{y}{x}) \\ z = z \\ i = \frac{x}{|\rho|} \\ j = \frac{y}{|\rho|} \\ k = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{x^2 + y^2}, \\ \varphi = \text{arctg}\left(\frac{y}{x}\right), \\ z = z. \end{cases}$$

У разі циліндричних шарів, координата р задаватиме радіус січної циліндричної поверхні та показуватиме поточну висоту шару, координати φ і z – координати шляхів переміщення в шарі.

Крім координат точок необхідно обчислити орієнтацію друкувальної головки у просторі. Для кожної з точок на поверхні циліндра орієнтація задається вектором одиничної довжини з координатами (i, j, k), що визначають орієнтацію друкуючої головки в просторі. Для циліндричної поверхні координати вектора орієнтації обчислюються як:

$$i = x / |p|$$

$$j = y / |p|$$

$$k = 0$$

3.3 Генерація шляхів переміщення інструменту у криволінійному шарі

Після отримання розрахункових координат, необхідно їхнє перетворення, т.к. використання цих даних безпосередньо для друку неможливе. Розрахункові дані для п'ятиосьових пристроїв включають крім координат, що описують положення сопла в просторі вектор орієнтації сопла в просторі. У обробних центрів із ЧПУ це т.зв. Cutter Location Data [40]. У зв'язку з цим виникає завдання у створенні постобробника, завданням якого стає перетворення цих даних в координати пристрою об'ємного друку.

Так як багатоосьовий 3D принтер є верстатом з ЧПУ, його можна уявити, як ланцюжок кінематичних зв'язків. Типова конфігурація п'ятиосьового пристрою може бути розділена на три основні типи:

тип з платформою, що має дві обертальні осі;

тип з друкуючою головкою, що має дві обертальні осі;

гібридний тип, що має по одній обертальній осі на платформі та друкуючою головкою.

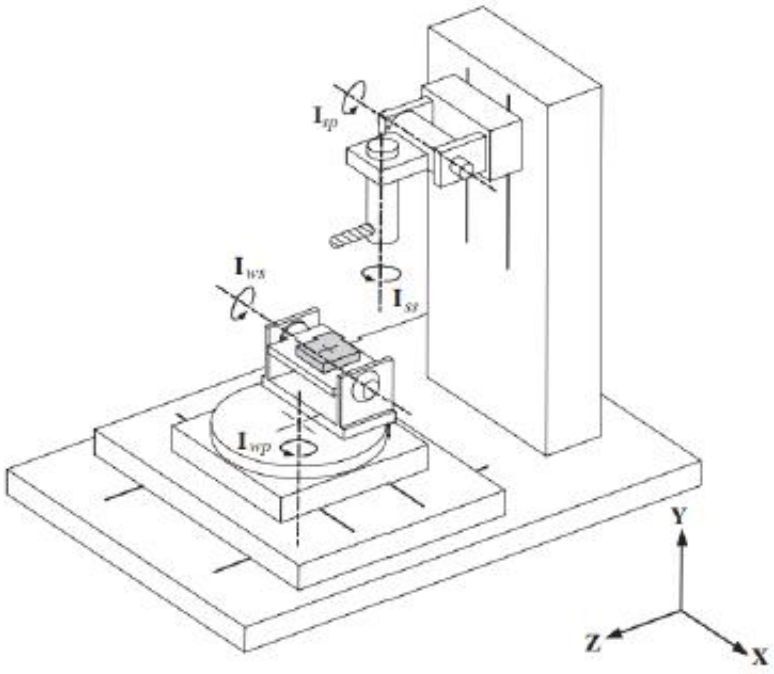
Для управління позицією та орієнтацією друкувальної голівки необхідно визначити відносини систем координат сусідніх зв'язків та з'єднань [41]. Припустимо, що з'єднання містить два зв'язку i і j. Системи координат OiXiYiZi

та OjXjYjZj утворені відповідно зв'язками i та j. Відносне положення та орієнтація j-тої системи координат по відношенню до i-тої системи може бути виражено математично як:

$$^{i}A_j = Trans(L_{i,j,x}, L_{i,j,y}, L_{i,j,z})Rot(N, \varphi_N),$$

де iAj є відносною матрицею переходу з системи координат OiXiYiZi в систему OjXjYjZj. Li, j = Li, j, xi + Li, j, yj + Li, j, zk - Вектор відстані між початками координат Oi і Oj. N ≡ x, y, z, Trans та Rot – матриці 4×4 переміщення та обертання в однорідних тривимірних координатах.

Узагальнений п'ятиосьовий пристрій має 4 обертальні рухи, як показано на малюнку 3.4, де Iwp і Iws - перша і друга обертальні осі на платформі, а Isp і Iss - відповідно, перша і друга обертальні осі на голівці. Перші обертальні осі розташовані ближче до платформи. Другі обертальні осі є залежними від перших.



Малюнок 3.4 – Узагальнений п'ятиосьовий пристрій, що має 4 обертальні рухи

Для визначення положення друкувальної головки щодо виробу, що друкується, необхідно визначити координатні системи, показані на малюнку 2.5.

Системи координат виробу, що друкується, і друкуючої головки відповідно OwXwYwZw і OtXtYtZt. Системи координат OwpXwpYwpZwp і OwsXwsYwsZws відповідають першій і другій обертальним осям на платформі, а системи OspXspYspZsp і OssXssYssZss відповідають першій і другій обертальної осі на головці. Системи координат ObXbYbZb, OTxXTxYTxZTx, OTyXTyYTyZTy та OTzXTzYTzZTz відповідають нерухомій основі пристрою та складовим X, Y та Z платформи (або порталу). Положення та орієнтація системи координат OtXtYtZt щодо OwXwYwZw, wAt, може бути отримано перетвореннями wAws до ssAt серією матриць:

$$
\begin{aligned}
{}^{w}A_{t} &= {}^{w}A_{ws}\,{}^{ws}A_{wp}\,{}^{wp}A_{Tx}\,{}^{Tx}A_{Tz}\,{}^{Tz}A_{b}\,{}^{b}A_{Ty}\,{}^{Ty}A_{sp}\,{}^{sp}A_{ss}\,{}^{ss}A_{t} \\
&= Trans(L_{w,ws,x}, L_{w,ws,y}, L_{w,ws,z})Rot(nws, -\varphi_{nws}) \times \\
&\times Trans(L_{ws,wp,x}, L_{ws,wp,y}, L_{ws,wp,z}) \times \\
&\times Rot(nwp, -\varphi_{nwp})Trans(P_x, P_y, P_z)Rot(nsp, \varphi_{nsp}) \times \\
&\qquad \times Trans(L_{sp,ss,x}, L_{sp,ss,y}, L_{sp,ss,z})Rot(nss, \varphi_{nss}),
\end{aligned}
$$

де nwp, nws, nsp, nss ≡ x, y, z. Px, Py, Pz позначають відносні переміщення X, Y, Z. Кути ϕnwp, ϕnws, ϕnsp, і ϕnss позначають кути обертання платформи та друкувальної головки. Вектор осі друкуючої головки ttax і вектор кінця сопла rtp щодо системи OtXtYtZt можуть бути перетворені до системи OwXwYwZw і розраховані за рівнянням таким чином:

$$
\begin{aligned}
&\begin{bmatrix} t_{ax}^{w} & r_{p}^{w} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^{w}A_{t}\begin{bmatrix} t_{ax}^{t} & r_{p}^{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= Trans(L_{w,ws,x}, L_{w,ws,y}, L_{w,ws,z})Rot(nws, -\varphi_{nws}) \times \\
&\times Trans(L_{ws,wp,x}, L_{ws,wp,y}, L_{ws,wp,z}) \times \\
&\times Rot(nwp, -\varphi_{nwp})Trans(P_x, P_y, P_z)Rot(nsp, \varphi_{nsp}) \times \\
&\times Trans(L_{sp,ss,x}, L_{sp,ss,y}, L_{sp,ss,z})Rot(nss, \varphi_{nss})\begin{bmatrix} t_{ax}^{t} & r_{p}^{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.
\end{aligned}
$$

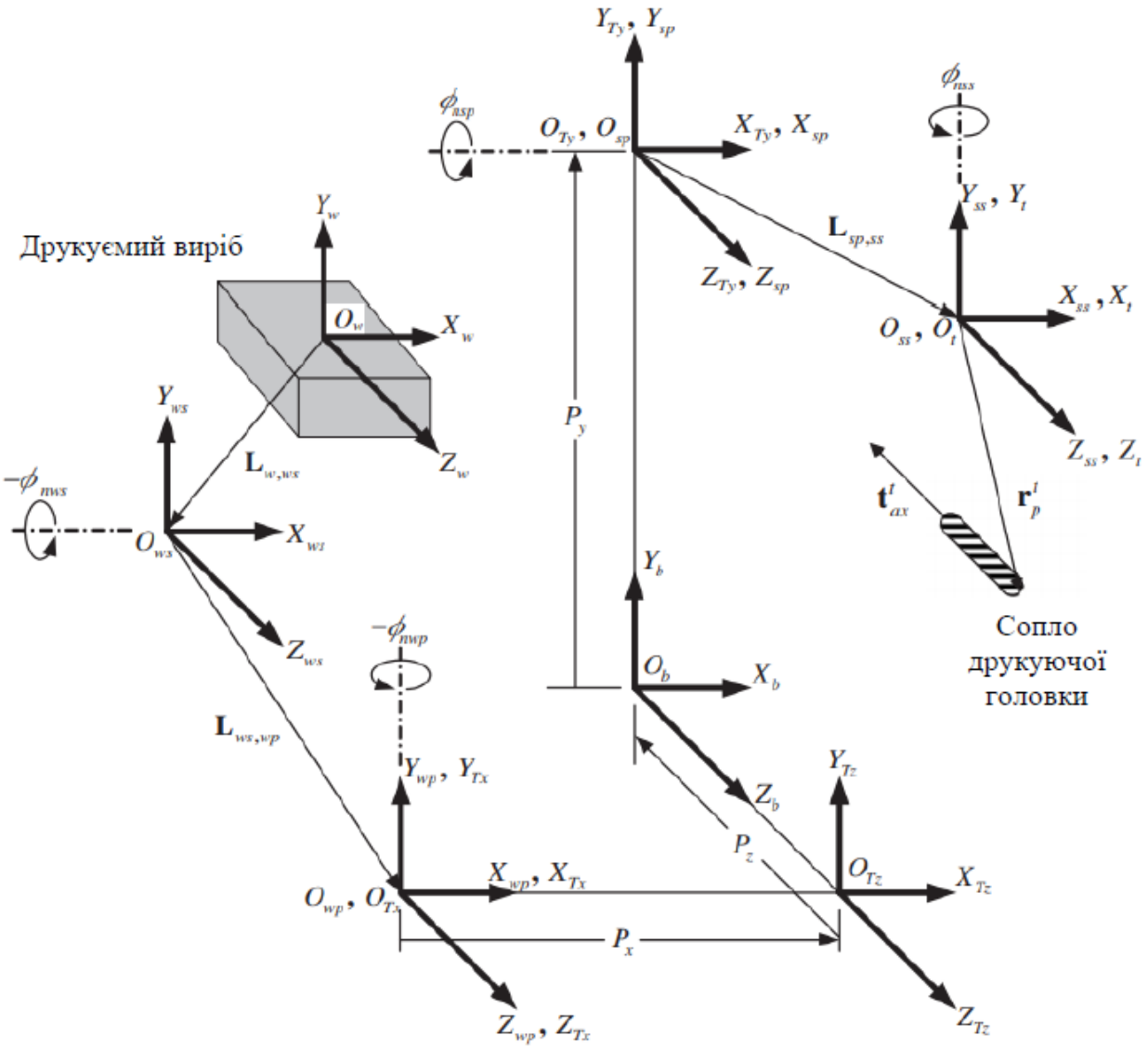


Рисунок 3.5 – Системи координат узагальненого п'ятиосьового пристрою

4.РОЗРОБЛЕНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Stereotech STE Slicer – програмне забезпечення для підготовки моделей для FDM (FFF) друку за 5 координатами. Інтерфейс Stereotech STE Slicer [47] створений на базі програмного забезпечення Ultimaker Cura [48], що розповсюджується за ліцензією LGPL-3.0. Програмне забезпечення має дворівневу архітектуру, інтерфейс відокремлений від генераторів програм для друку, що забезпечує оптимізацію швидкості роботи і дозволяє доступним чином перемикатися між трьох і п'яти координатним друком. Як генератор програми трикоординатної друку використовується модифікована версія генератора CuraEngine [37].

Для розробки інтерфейсу був використаний Python 3.5 [49] з використанням фреймворку PyQt 5 [50]. Для генераторів програм друку використано C++11. Зв'язок між інтерфейсом і генераторами забезпечується сокетами, а дані структуруються і серіалізуються за допомогою Protobuf [51].

Для організації роботи кількох генераторів програм друку було розроблено модуль BackendManager. Він дозволяє перемикати використовуваний генератор програми друку залежно від налаштувань. Структура модулів показано малюнку 3.1.

При виклику старту підготовки BackendManager передає команду на старт підготовки до поточного Backend. Поточний Backend запускає завдання StartSliceJob результатом роботи якої є підготовлене повідомлення Protobuf для генератора програми друку. Далі це повідомлення відправляється в генератор програми друку і запускає його роботу. У процесі своєї роботи генератор може надсилати повідомлення про прогрес підготовки, дані для візуалізації та gcode кожного шару і повідомлення про час і витрату матеріалу. Повідомлення про візуалізацію збираються разом і відправляються в завдання ProcessLayersJob, що

робить обробку та генерує OpenGL дані для візуалізації.

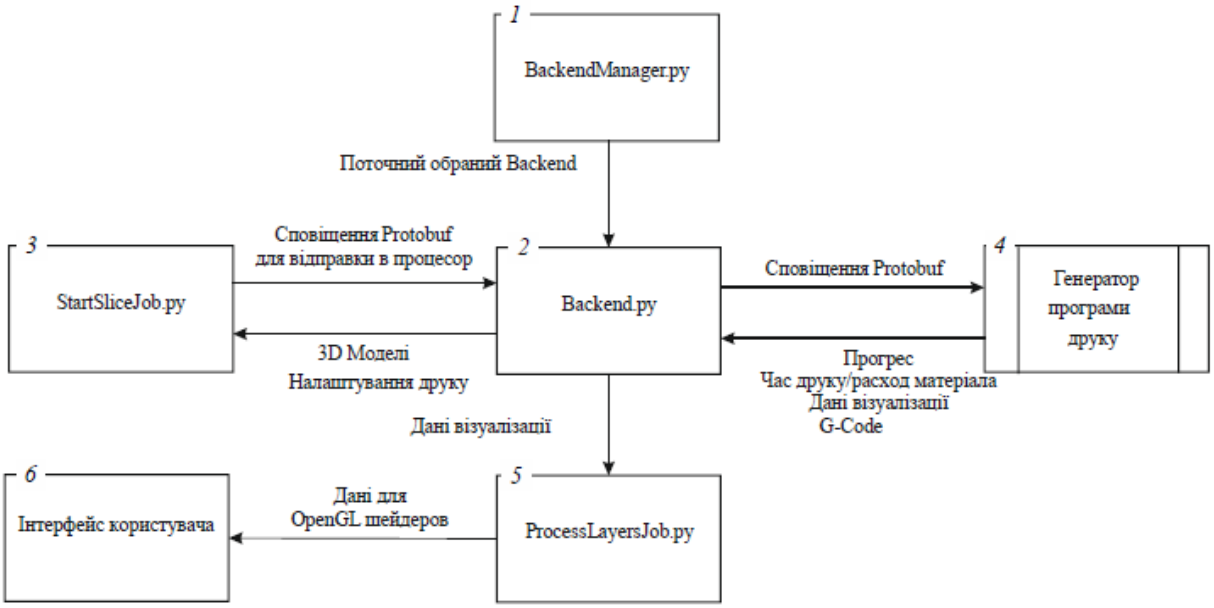


Рисунок 4.1 – Структура модулів для роботи з генератором програми друку

На малюнку 4.2 показано основний інтерфейс STE Slicer з найважливішими функціями.

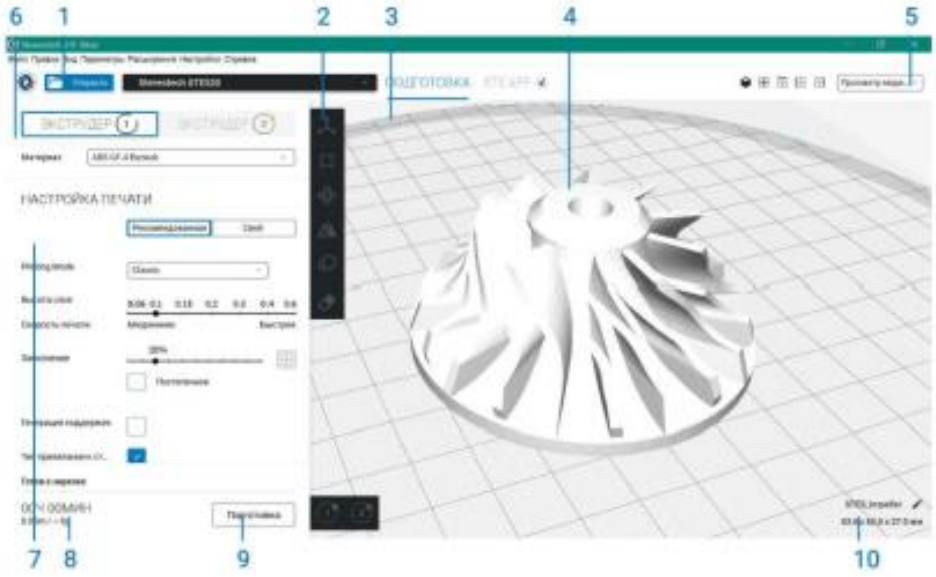


Рисунок 4.2 – Основний інтерфейс STE Slicer

Розроблена програма підтримує необхідні функції відкриття (1) 3D-файлу моделі в універсальному форматі STL. Після його відкриття 3D модель можна переміщати, обертати, і виконувати інші операції за допомогою групи

інструментів налаштування 3D моделі 2. При цьому на екрані темно-сірим кольором відображаються області, що не друкуються 3. Завантажена модель 4 відображається в області друку і відображається у вигляді суцільної 3D моделі. Перемикання режимів відображення здійснюється за допомогою випадаючого меню 5. Ліворуч відображається панель інструментів, що містить усі настоянки друку та інформацію про матеріал та витрати часу. Зверху відображаються увімкнені екструдери 6, і вибраний профіль матеріалу. Далі йде блок параметрів друку 7, що дозволяє вибрати режим побудови шарів (плоських або криволінійних) і встановити супутні параметри. Внизу відображається розрахунковий час друку та витрата матеріалу в метрах та грамах 8, кнопка, що запускає процес підготовки моделі до друку 9. Справ відображається інформація про модель 10, що відображає розміри моделі та найменування файлу для друку.

Розроблена програма містить кілька інструментів для налаштування моделі перед друком. Це дозволяє розташувати моделі на платформі найефективнішим способом. Частково ці налаштування запозичені із програми Ultimaker Cura з доробками для багатоосьового друку. Нижче наведено інструменти налаштування.

Інструмент переміщення дозволяє переміщати модель по осях X, Y та Z. Таким чином, ви можете перемістити модель у потрібне місце. Моделі автоматично поділяються і за замовчуванням опускаються на поверхню платформи. Змінити цю поведінку можна у налаштуваннях програми (рисунок 4.3).

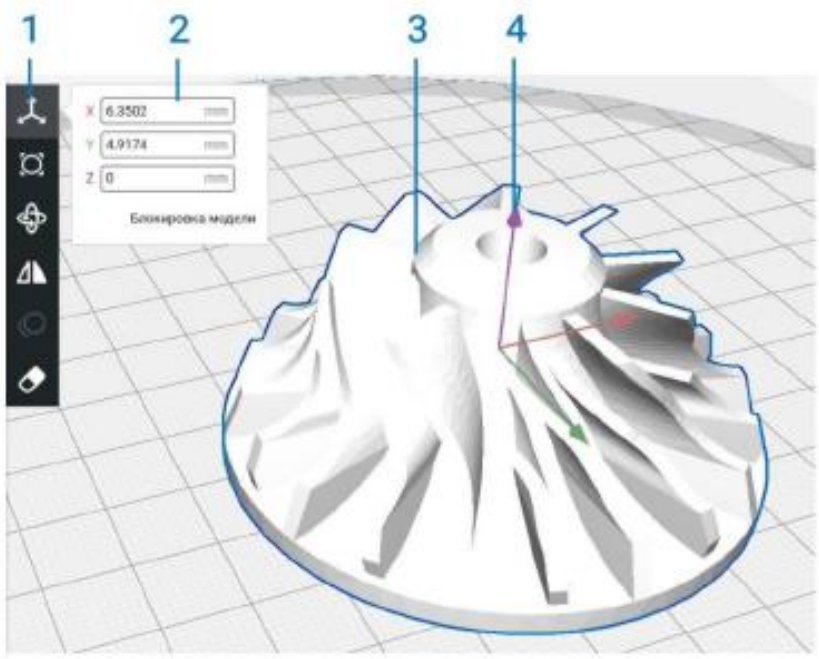


Рисунок 4.3 – Інструмент переміщення

Інструмент масштабування дозволяє масштабувати модель як по всіх вимірах, так і тільки по одному. Модель може бути масштабована трьома різними способами: у міліметрах, у відсотках та за допомогою стрілок у 3D вигляді (рисунок 3.4).

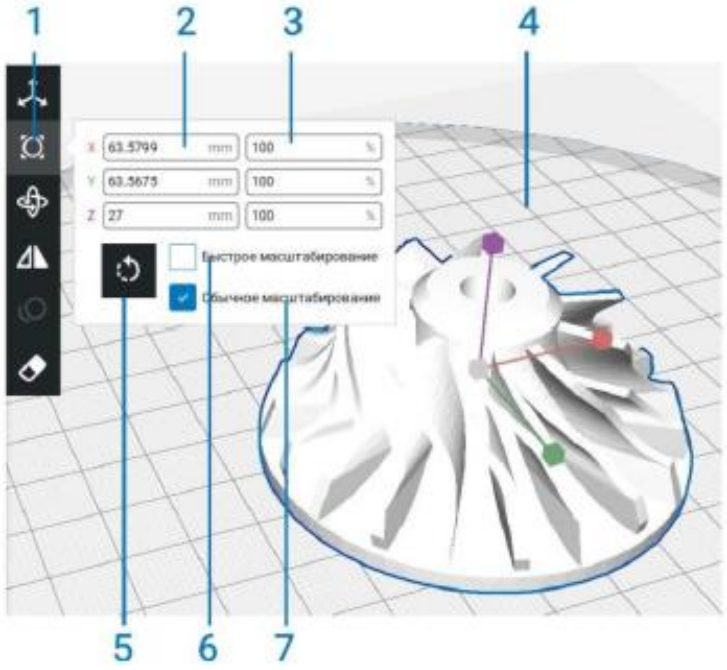


Рисунок 4.4 – Інструмент масштабування

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РОЗРОБЛЕНИХ РІШЕНЬ

5.1 Приклади генерації просторових криволінійних шарів

Нижче розглянуто приклади генерації просторових криволінійних верств у розробленому програмному забезпеченні. Як перша модель використана 3D модель елемента управління автомобільного обігрівача салону, показана на малюнку 5.1. Так як модель має безліч нависаючих елементів, при друкуванні в режимі 3D вона матиме безліч підтримуючих структур.

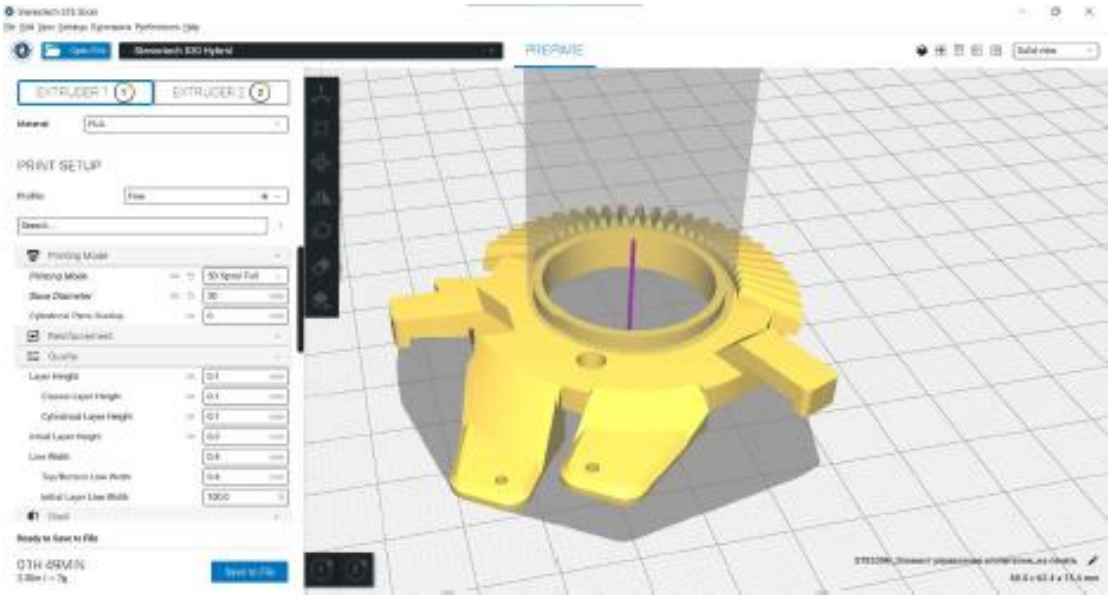


Рисунок 5.1 – Початкова модель

Задаючи базовий діаметр 30 мм і режим друку Spiral Full, цей режим дозволяє виготовити цю деталь без використання підтримуючих структур. Розроблене програмне забезпечення дозволяє переглянути процес виготовлення деталі пошарово та переглянути порядок укладання ниток матеріалу в кожному шарі. Вікно перегляду виготовлення даної деталі показано малюнку 5.2.

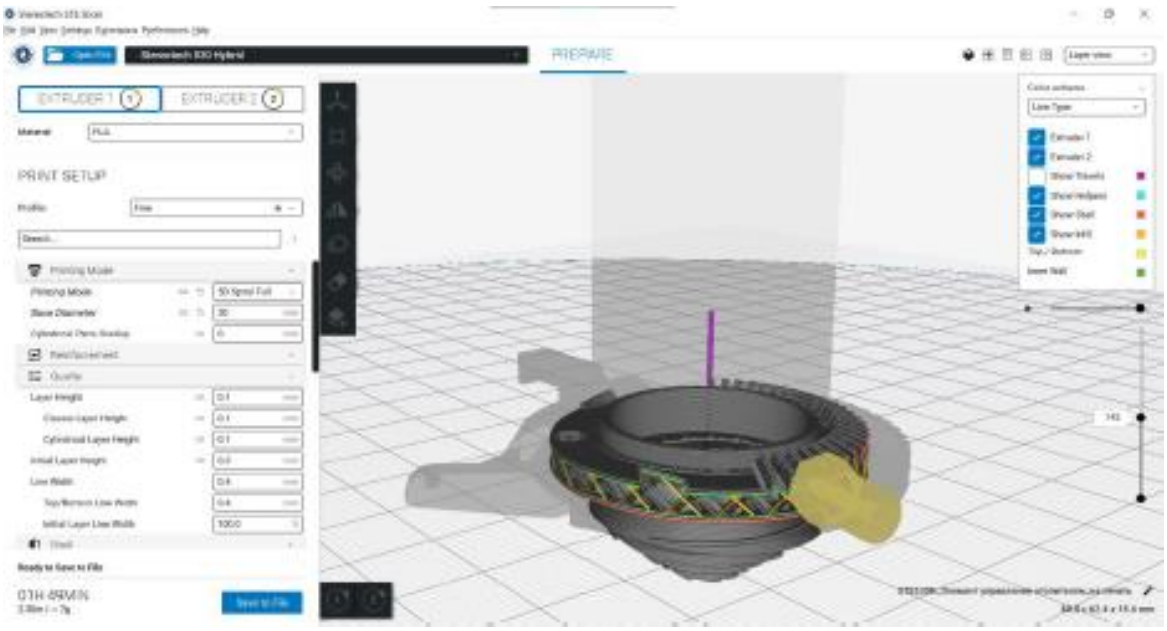
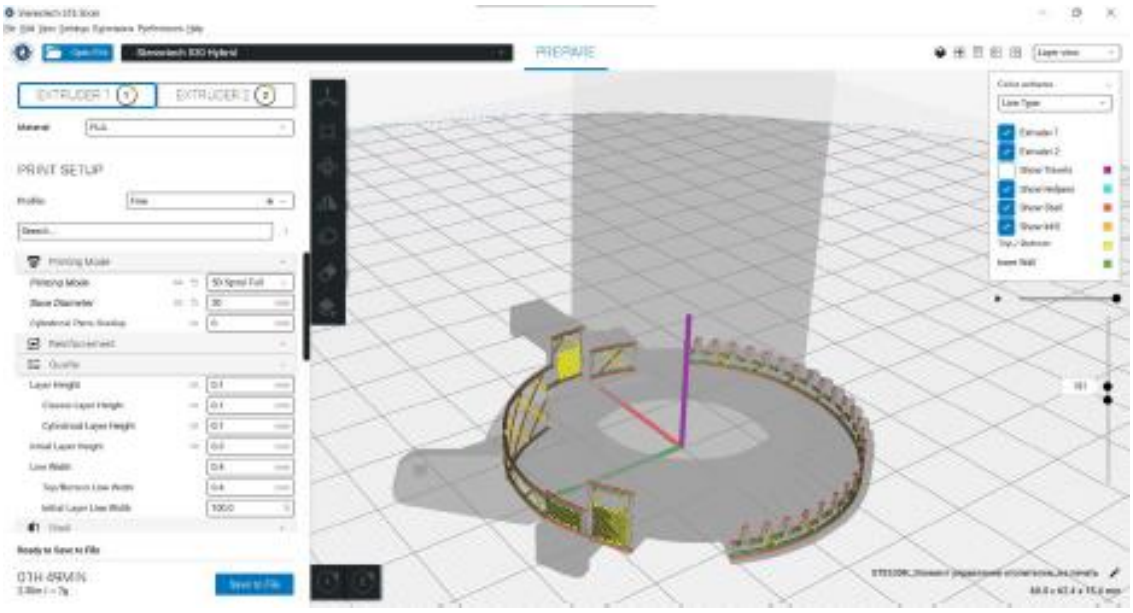


Рисунок 5.2 – Симулятор нанесення шару

На малюнку 5.3 показаний окремий шар моделі, який дозволяє вивчити внутрішню структуру моделі, розташування сітки заповнення та стінок, що повторюють форму виробу.



Малюнок 5.3 – Окремий шар моделі

5.2 Порівняння кількості підтримуючих структур та часу виготовлення

В рамках експериментальної частини роботи було проведено

порівняльний аналіз розрахункового часу виготовлення деталей і маси виробів. Було обрано 5 3D моделей, спроектованих для друку FFF. Для друку 3D плоскими шарами даних моделей обов'язково потрібна наявність підтримуючих структур. Як профіль матеріалу був використаний PLA пластик із щільністю 1,24 г/см3, товщина шару 0,1 мм, щільність внутрішнього заповнення моделі 20%. Ці параметри не змінювалися протягом усіх експериментів.

Перша 3D модель є модель ротора насоса Wilo IPL65/115-1,5/2 (рисунок 5.4). Під час друку плоскими шарами за допомогою маса готового виробу становить 209 грам, а час виготовлення складає 27 годин 15 хвилин (рисунок 4.5). Режим Spiral Full дозволяє виготовити цю деталь з мінімумом структур, що підтримують. В результаті час виготовлення скорочується на 8 годин, а кількість матеріалу, що використовується, скорочується на 7% (рисунок 4.6).

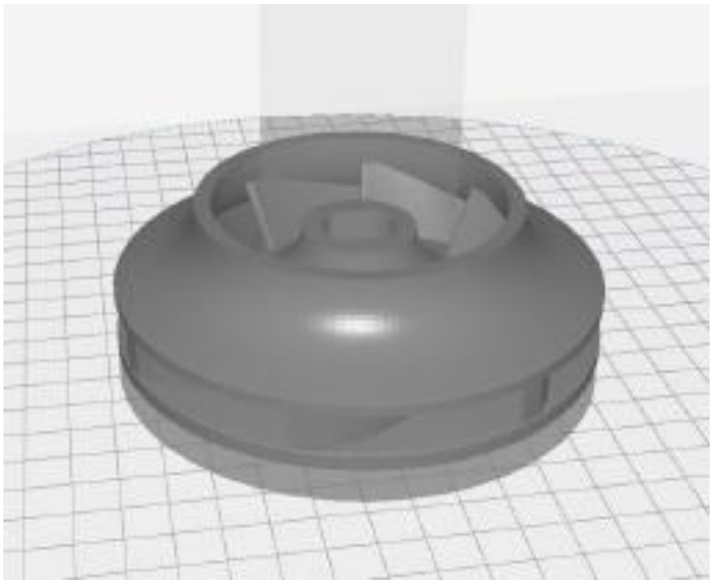


Рисунок 5.4 – Початкова модель ротора насоса Wilo IPL65/115-1,5/2

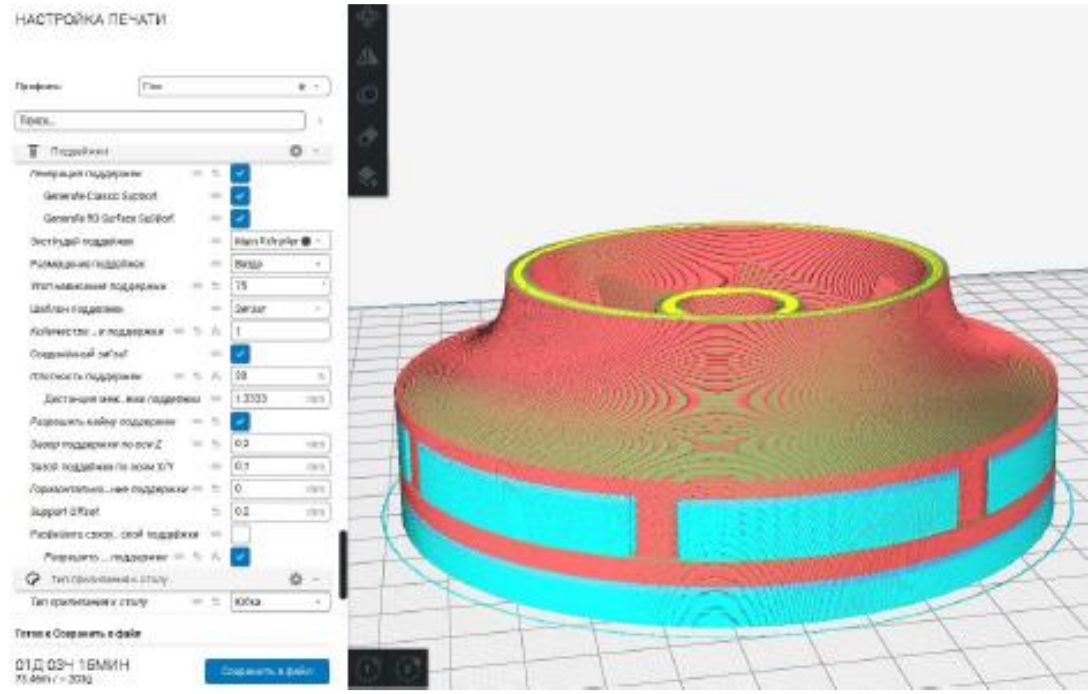


Рисунок 5.5 – Модель із підтримками в режимі Classic

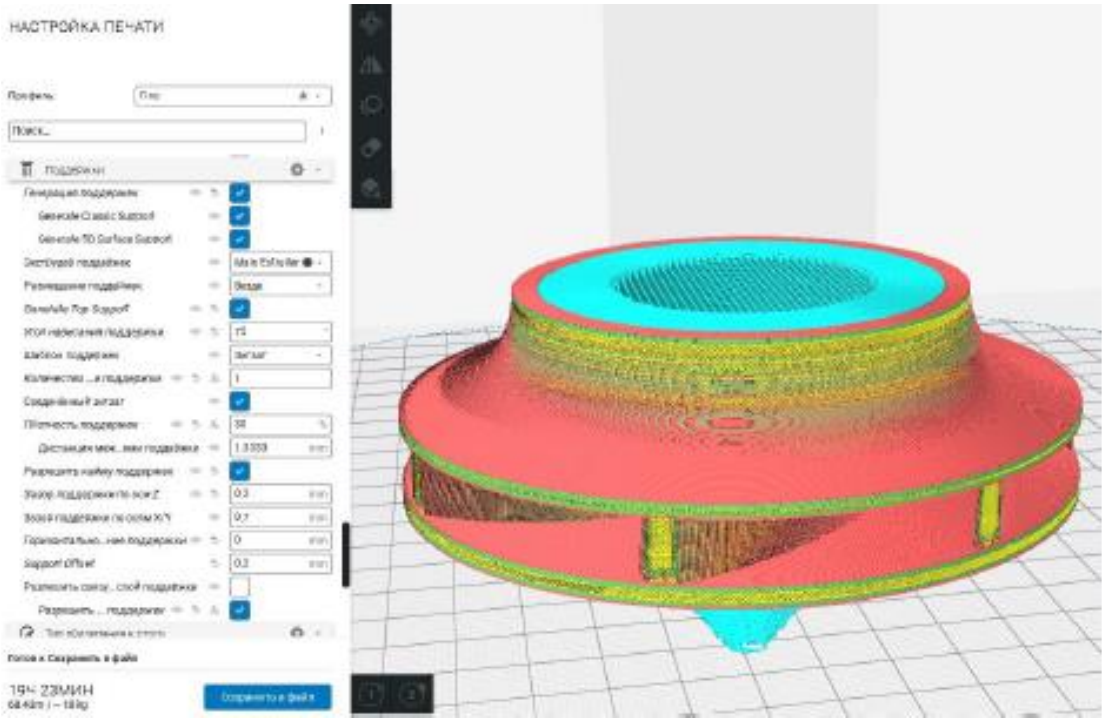


Рисунок 5.6 – Ротор насоса Wilo IPL65/115-1,5/2 у режимі Spiral Full

Наступним прикладом є модель кронштейна (рисунок 5.7). нависання мають кут, що вимагає використання структур, що підтримують. Використання режиму Spiral Full (малюнок 5.9) дозволяє скоротити час виготовлення на 1,5

години (-26%) та зменшити витрату матеріалу на 10 грама (-17%), порівняно з друком плоскими шарами (малюнок 5.8).

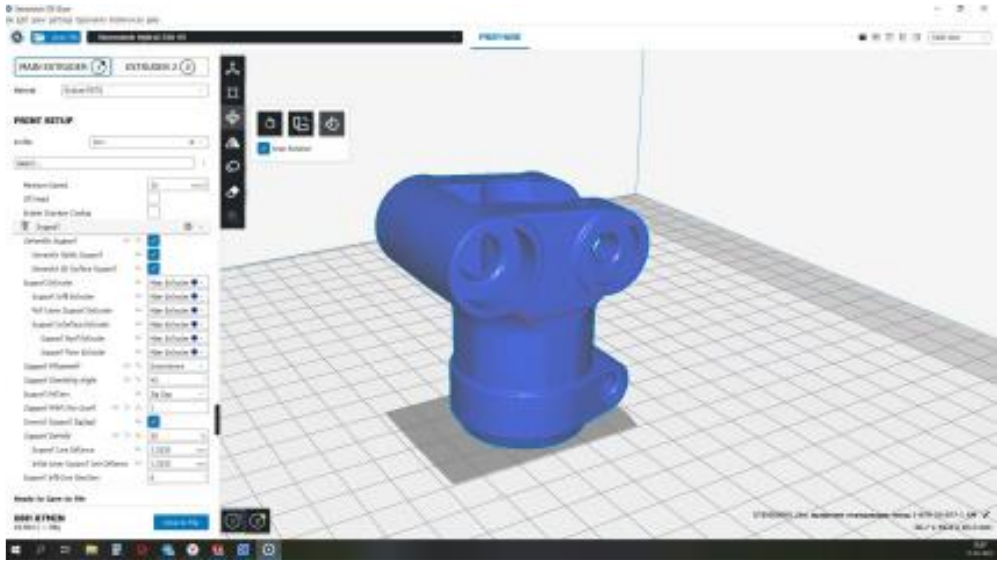
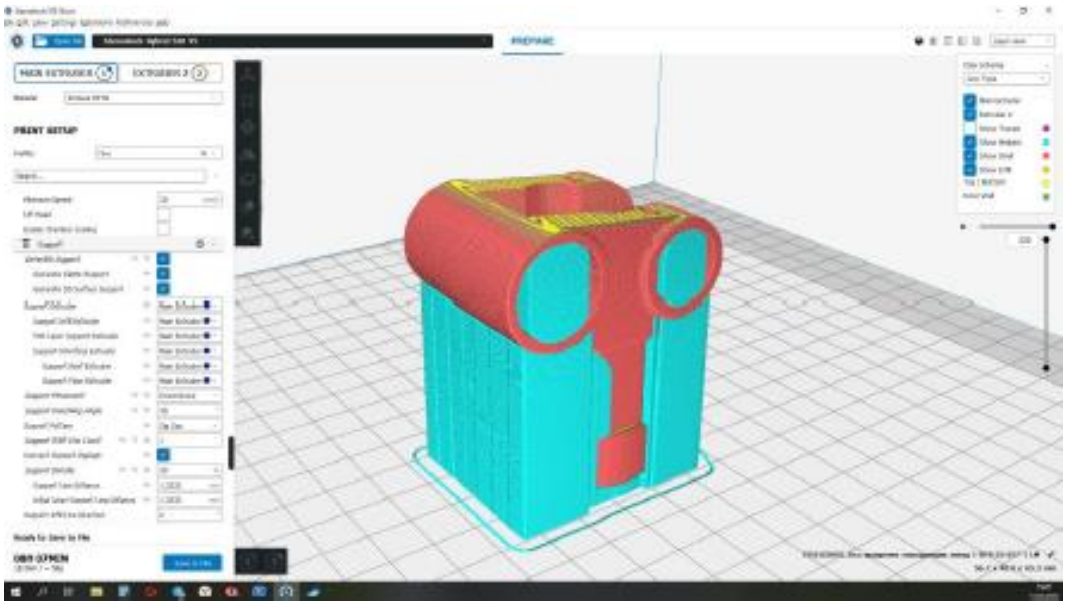


Рисунок 5.7 – Початкова модель кронштейна



Малюнок 5.8 – Модель кронштейна з підтримкою

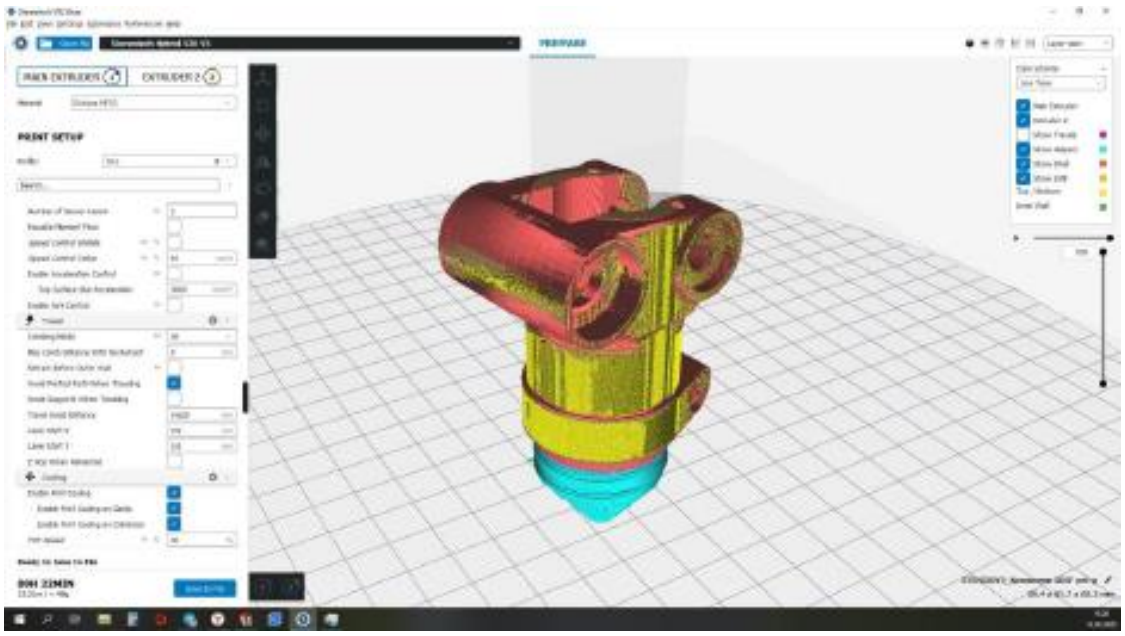


Рисунок 5.9 – Модель кронштейна у режимі Spiral Full

Незважаючи на відносно невисокий відсоток економії підтримуючих структур, дана модель має складні нависаючі елементи, видалення підтримок під якими може бути скрутним.

5.3 Аналіз міцності виробів

Зразки для випробувань на стиск (рисунок 4.10а) та статичний вигин (рисунок 4.10б) були виготовлені з ABS-пластику при температурі розплаву 240±1 °С зі 100% заповненням шару. За технологією навивки матеріалу на сердечник для кожного виду випробувань отримано п'ять груп зразків, що мають 2, 4, 6, 8 або 10 циліндричних шарів завтовшки 0.2 мм кожен. Відповідно до цього за стандартною технологією 3D-друку були попередньо виготовлені сердечники різного діаметра (що більше шарів – тим менше діаметр сердечника), а також зразки, повністю виконані за стандартною технологією для отримання зразкових даних; товщина плоского шару становила 0,2 мм.

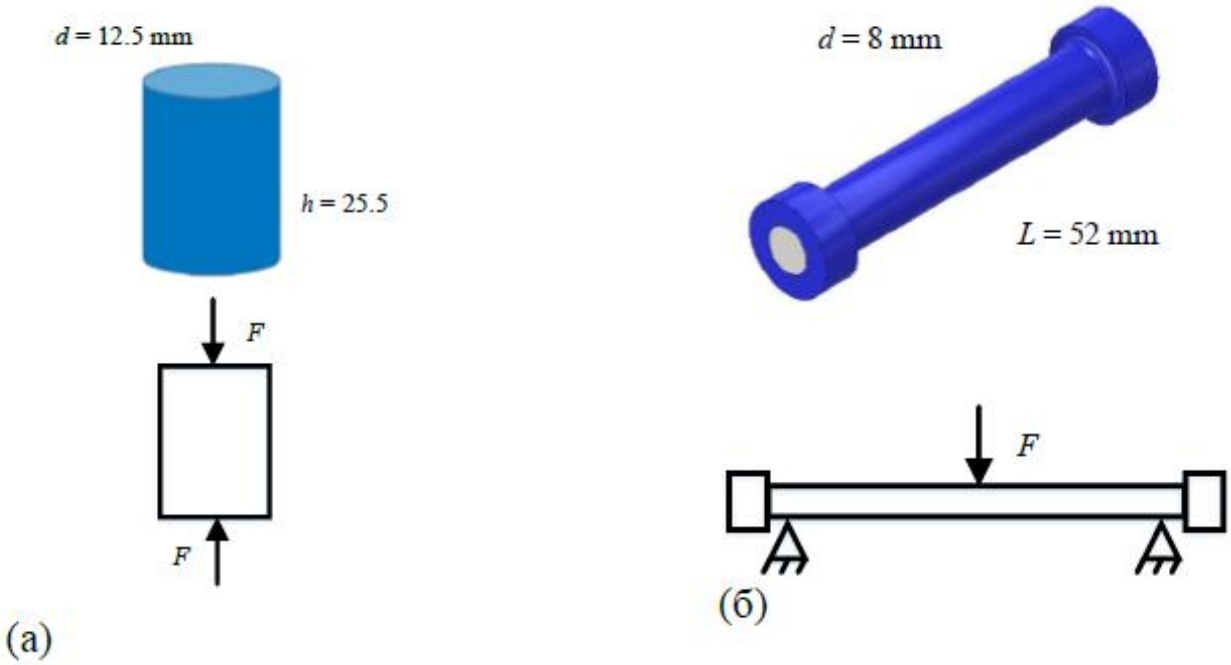


Рисунок 5.10 – Форма та спосіб навантаження зразків: (а) випробування на стиск; (б) випробування на статичний вигин

Зразки першого типу були випробувані на універсальній випробувальній машині UT-02-0025 [53] на монотонне стиснення в межах близько 25% від висоти зразка відповідно до принципу, викладеного у стандарті ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002) «Пластмаси. Метод випробування на стиск» (рисунок 4.11). Досліди характеризуються швидкістю зміни навантаження, що дорівнює 120 Н/с. Лінійні розміри зразків визначені за допомогою штангенциркуля з цифровим пристроєм типу ШЦЦ-1-250 0,01.

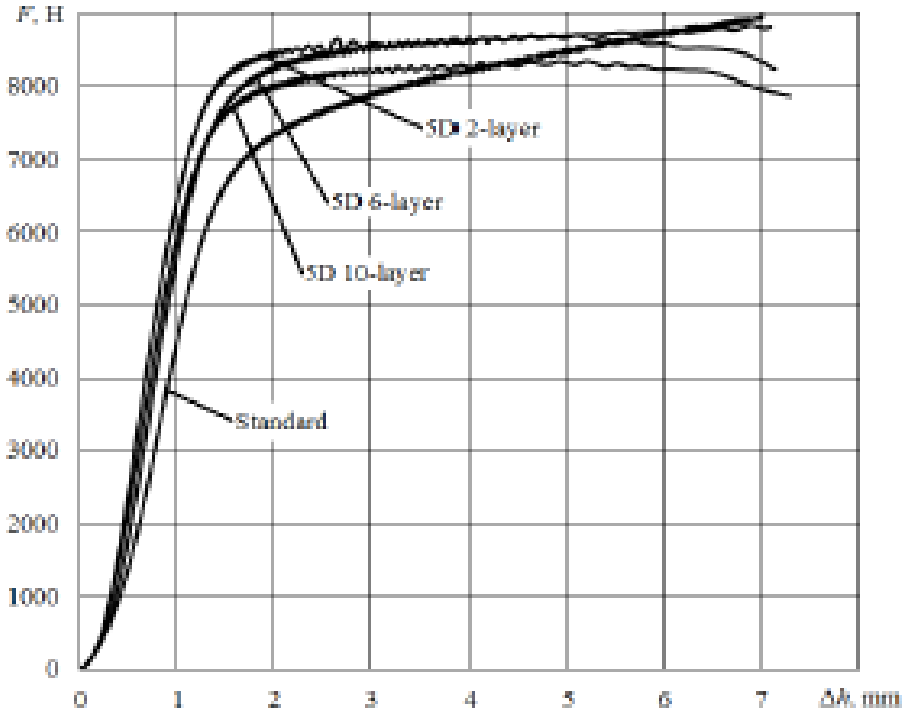
(а)

(б)

Рисунок 5.11 – Випробування циліндричних зразків для стиснення: (а) встановлення; (б) зразки після випробувань

На малюнку 5.12 наведено діаграми, отримані при випробуванні стандартних зразків і зразків з двома, шістьма і десятьма шарами навитого матеріалу.

Діаграми стиснення характеризуються лінійною початковою ділянкою зі значеннями абсолютної деформації зразка за висотою до 1.5 мм, наявністю точки перегину та протяжної ділянки розвиненої пластичності. Виміряні значення абсолютної Δh деформації та навантаження F у точці перегину, розрахункові значення відносної εз деформації та напруги σ при стисненні в точці перегину, а також розрахункове значення модуля пружності Ес наведені в Таблиці 5.1. Відповідно до стандарту, модуль пружності визначається за двома заданими значеннями відносної деформації за формулою.



Малюнок 5.12. Діаграми стиснення циліндричних зразків

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1},$$

де σ2, σ1 – напруги при стисканні при значенні відносної деформації ε2 = 0.0025 та ε1 = 0.0005 відповідно.

У разі стандартних зразків руйнування зразків не спостерігалося, відбувалося лише їхнє подальше осадження. При випробуванні зразків з навитим матеріалом у точці перегину відбувалося руйнування зміцнювальних шарів, після чого спостерігалося сплющування надрукованого за стандартною технологією сердечника за аналогією зі стандартними зразками. У випадку 5D-зразків з досить товстими сердечниками (з двома та чотирма шарами навивки) руйнування сердечників також не було досягнуто, на відміну від зразків з більш тонкими сердечниками, які руйнувалися шляхом зсуву шарів один щодо одного, імовірно, через меншу площу контакту між плоскими шарами.

Таблиця 5.2 - Результати випробувань на стиск.

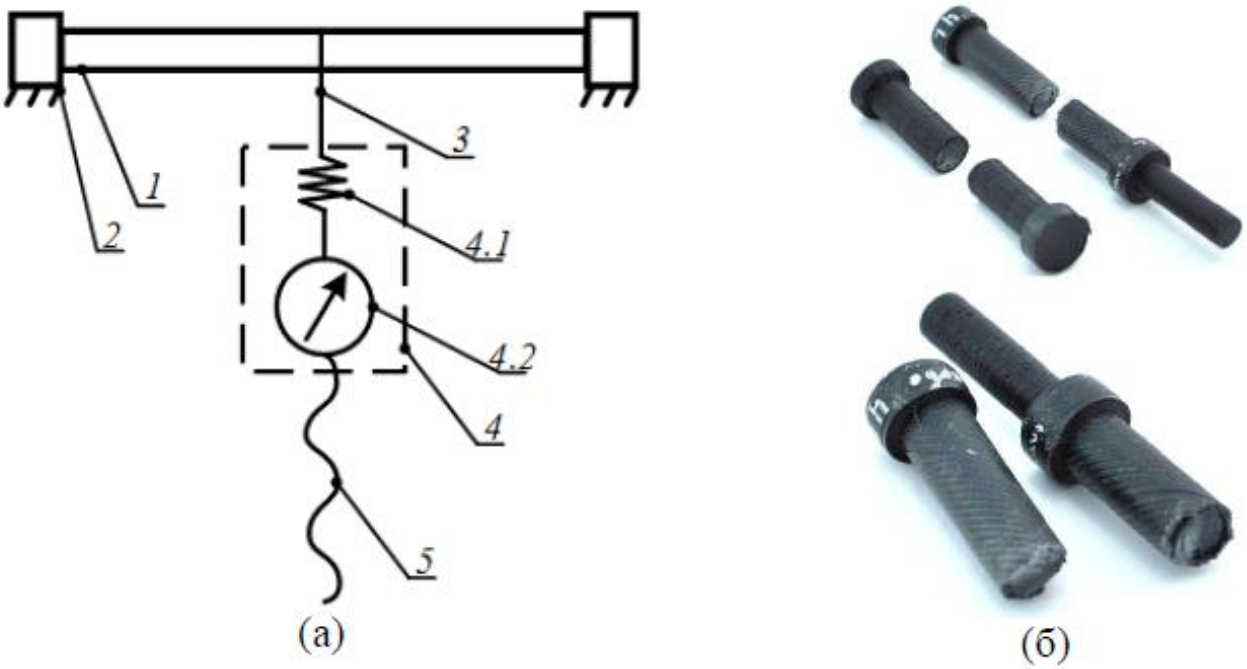
Зразок	d, мм	h, мм	Δh, мм	εc, %	F, Н	σ, МПа	Ec, МПа
Стандартний	12.46	24.01	1.59	6.64	6825.30	55.975	241.402
Два шари	12.70	23.85	1.41	5.89	7975.25	62.957	189.345
Чотири шари	12.78	23.90	1.37	5.72	7810.04	60.884	193.603
Шість шарів	12.57	24.82	1.46	5.88	7640.04	61.565	266.417
Вісім шарів	12.74	23.33	1.40	6.00	7656.97	60.066	190.109
Десять шарів	12.77	22.16	1.33	6.00	7292.77	56.940	187.262

Обробка діаграм стиснення показала, що при такому вигляді навантаження наявність укріплюючих циліндричних шарів у вигляді навитого на сердечник матеріалу сприяє деякому уповільнення процесу деформації на початковому етапі (до руйнування навивки). Так, величина напруги в точці перегину, по досягненню якої швидкість зростання навантаження різко падає, для стандартного зразка склала близько 57 МПа, а для 5D-зразка з двома шарами навивки - близько 66 МПа, причому збільшення кількості циліндричних шарів (і, таким чином, зменшення товщини сердечника) знижувало це значення і зсуву.

Проведені випробування зіставлені із зразковими випробуваннями на стиск від виробника [54]. Якісна схожість отриманих діаграм стиснення (Figure 11) із зразковими та зіставлення кількісних параметрів (навантаження F у точці перегину від 5442.9 до 6321.4 Н, напруга σ = 49.3 МПа в середньому по семи дослідах, модуль пружності Ec проведених випробувань.

Зразки другого типу були випробувані у лабораторних умовах відповідно до принципу, викладеного у стандарті ГОСТ 4648-2014 (ISO 178:2010) «Пластмаси. Метод випробування на статичний вигин», при цьому вироблявся вигин зразків до їх видимого зламу з фіксацією навантажувальної сили при

руйнуванні без визначення поведінки матеріалу в процесі навантаження (рисунок 4.13). Досліди характеризуються відстанню між опорами, що дорівнює 47.20 мм. Вимірювання навантаження у момент руйнування проводилося за допомогою механічного динамометра загального призначення 5031-ДПУ-1-2. Лінійні розміри зразків визначені за допомогою штангенциркуля з цифровим пристроєм типу ШЦЦ-1-250 0.01.



Малюнок 5.13. Випробування циліндричних зразків на статичний згин: (а) схема установки: 1 – зразок; 2 – опори; 3 – трос, що зв'язує зразок та динамометр; 4 – динамометр (4.1 – пружний елемент, 4.2 – відліковий пристрій); 5 – гвинтова передача; (б) зразки після випробувань

Отримані значення згинальної напруги при руйнуванні усереднені та наведені на діаграмі (рисунок 4.14).

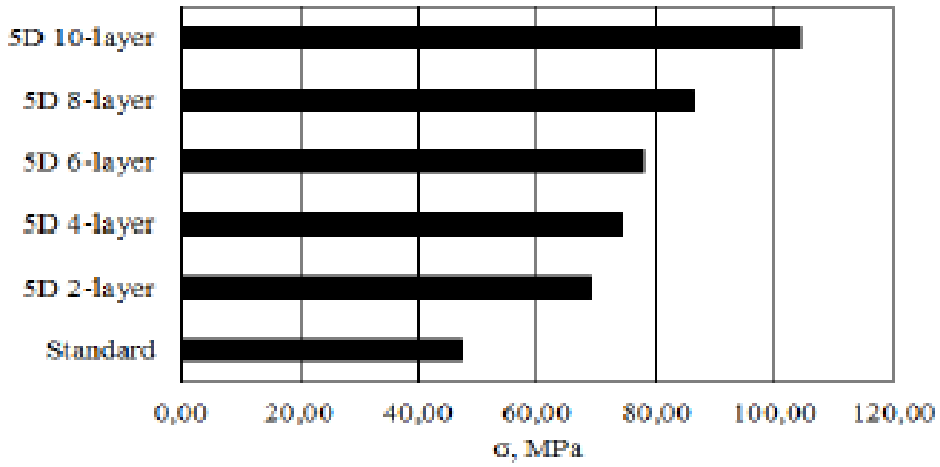


Рисунок 5.14 – Експериментальні значення згинальної напруги при руйнуванні циліндричних зразків

Проведені випробування зіставлені зі зразковими випробуваннями на статичний вигин від виробника [55], в яких використовувався зразок довжиною близько 60 мм з прямокутним перерізом 3x12.6 мм, величина критичної згинальної сили в семи дослідах становила близько 100 Н, а напруги згинання при руйнуванні - близько 65.

Зіставлення результатів випробування зразків з навивкою зміцнювальних шарів як з даними, отриманими на зразках з тими ж формою і розміром, так і зі зразковими даними показує, що при даному способі навантаження збільшення кількості навитих зміцнювальних шарів призводить до рівномірного зростання ступеня опору зразків зруйнуванням. приріст міцності порівняно із стандартними зразками та полуторний приріст – порівняно із зразковими випробуваннями.

РОЗДІЛ 6
РОЗРОБКА ДИДАКТИЧНОГО ПРОЄКТУ ФАКУЛЬТАТИВНОГО ЗАНЯТТЯ НА ТЕМУ «ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЧОГО ПРОЦЕСУ ЗА РАХУНОК ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБУ З ПРОСТОРОВИХ КРИВОЛІНІЙНИХ ШАРІВ» ДЛЯ ФАХІВЦЯ МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВ

6.1. Постановка цілей факультативного заняття з теми «Підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів»

В таблиці 6.1 наведено оперативні цілі з теми.

Таблиця 6.1

Постановка цілей факультативного заняття

№	Цілі факультативного заняття	Цілі формування різних рівнів засвоєння навчального матеріалу	Умови досягнення цілей	Результат у вигляді дій здобувачів освіти
1	2	3	4	5
1	Ознайомити студентів із сучасними методами адитивного виробництва та принципами формування просторових криволінійних шарів	Засвоєння базових понять і термінів, розуміння сутності процесу формування виробів	Лекційне пояснення, демонстрація цифрових моделей виробів	Студенти зможуть описати принципи адитивного виробництва та характеристики криволінійних шарів

Продовження табл. 6.1

1	2	3	4	5

2	Розвинути навички планування та оптимізації технологічного процесу виготовлення виробів	Здатність застосовувати знання для розрахунку параметрів процесу та вибору оптимальної послідовності операцій	Практичні завдання на симуляторах та CAD/CAM-платформах	Студенти зможуть розробляти технологічні карти та моделювати процес формування виробів з криволінійних шарів
3	Формувати компетентності у використанні цифрових методів контролю та оцінки якості продукції	Аналітичне мислення, уміння оцінювати ефективність процесу та виявляти дефекти	Робота з віртуальними тренажерами, аналіз виробничих симуляцій	Студенти зможуть контролювати параметри адитивного виробництва та пропонувати заходи щодо підвищення продуктивності
4	Виховувати відповідальність за технологічну стабільність і ефективність виробництва	Освоєння практичних навичок управління процесом та прийняття рішень у реальних або змодельованих виробничих умовах	Виконання практичних проєктів на макетах або програмних симуляторах	Студенти зможуть обґрунтовувати зміни технологічних параметрів для підвищення точності та продуктивності адитивного процесу
5	Сприяти формуванню навичок командної роботи та проєктної діяльності	Здатність працювати у групі над комплексними завданнями, аналізувати результати та узгоджувати рішення	Групові проєктні завдання, дискусії, мозковий штурм	Студенти зможуть виконувати проєктування технології виготовлення виробів із просторових криволінійних шарів у команді та представити результати

6.2. Перелік літературних джерел з теми

1. Петров С.В. Адитивне виробництво у сучасному машинобудуванні: технології та перспективи. – Київ: Техніка, 2020. – 256 с.

2. Іваненко М.А., Ковальчук В.П. Цифрове моделювання та оптимізація виробничих процесів у 3D-друку. – Харків: Машинобудування, 2021. – 312 с.

3. Smith J., Brown L. Additive Manufacturing: Principles and Applications. – London: Springer, 2019. – 278 p.

4. Zhang Y., Li H. Optimization of Layered Manufacturing for Complex Geometries. – New York: Wiley, 2020. – 245 p.

6.3. Конструювання дидактичних матеріалів з теми «Підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів»

Конструювання дидактичних матеріалів для професійної підготовки фахівців у сфері адитивного виробництва передбачає створення навчальних ресурсів, які забезпечують системне формування компетентностей у роботі з сучасними технологіями тривимірного друку. Основною метою таких матеріалів є розвиток у студентів здатності аналізувати технологічні процеси, планувати виробництво виробів із складною криволінійною геометрією та оптимізувати шари нанесення матеріалу для підвищення продуктивності та точності.

Дидактичні матеріали повинні включати кілька блоків інформації: теоретичний, практичний та аналітичний. Теоретичний блок охоплює основи адитивного виробництва, властивості матеріалів для 3D-друку, методи цифрового моделювання та принципи формування просторових криволінійних шарів. Практичний блок передбачає демонстрацію процесу виготовлення виробу на тренажерах або макетах 3D-принтерів, виконання лабораторних завдань з

налаштування параметрів друку та контролю якості кожного шару. Аналітичний блок передбачає аналіз ефективності обраного методу, виявлення критичних елементів технології та оптимізацію послідовності операцій для скорочення часу виробництва та зменшення браку.

Для підвищення ефективності засвоєння матеріалу використовуються різні форми дидактичних засобів: інтерактивні презентації, схемні моделі, цифрові симуляції процесу нанесення шарів, відео демонстрації роботи 3D-принтерів, а також приклади виробів із просторовими криволінійними елементами. Застосування таких засобів дозволяє студентам одночасно отримувати візуальне, практичне та аналітичне уявлення про процес виробництва.

Особлива увага приділяється методичному супроводу практичних завдань. Для кожного завдання створюються покрокові інструкції, контрольні запитання та критерії оцінки результатів. Це дозволяє студентам формувати практичні навички з налаштування параметрів друку, управління програмним забезпеченням, аналізу геометрії виробу та корекції дефектів. Крім того, до дидактичних матеріалів включаються кейси, де порівнюються різні методи виготовлення виробів, що стимулює розвиток аналітичного мислення та здатності до прийняття оптимальних рішень.

Таким чином, конструювання дидактичних матеріалів для теми «Підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів» ґрунтується на поєднанні теоретичного навчання, практичної роботи та аналітичного моделювання. Це забезпечує комплексну підготовку фахівців, здатних ефективно працювати у сфері адитивного виробництва та впроваджувати інноваційні технологічні рішення для підвищення продуктивності та якості виготовлення виробів.

6.4. Аналіз базових умов навчання з теми «Підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів»

В таблиці 6.2 приведено вибір базових понять, визначення способів перевірки та формування базових знань.

Таблиця 6.2

Вибір базових понять, визначення способів перевірки та формування базових знань

Перелік базових понять, законів, способів дії	Способи (методи, форми, засоби) перевірки рівня сформованості базових знань і способів дій	Способи актуалізації або поповнення базових знань і способів дій
1	2	3
1. Вступ до адитивного виробництва:	Метод – усне опитування. Форма – фронтальна. Засіб – контрольні питання, тестові завдання. Контрольні питання: 1. Що таке адитивне виробництво і які основні принципи його роботи? 2. Які основні переваги та обмеження адитивного виробництва порівняно з традиційними методами? 3. Як змінилися технології 3D-друку за останнє десятиліття?	Розв'язування ситуаційних задач. Практичні завдання, засновані на реальних виробничих проблемах, допомагають студентам застосовувати
2. Методи 3D-друку та їх класифікація:	1. Назвіть основні методи 3D-друку і поясніть принцип роботи кожного з них. 2. У яких випадках доцільно використовувати селективне лазерне спікання, а коли – FDM? 3. Які фактори визначають вибір технології друку для конкретного виробу?	

Продовження табл. 6.2

1	2	3
3. Цифрове моделювання виробів з просторовими криволінійними шарами:	1. Що таке просторові криволінійні шари і чим вони відрізняються від плоских шарів? 2. Як параметри цифрової моделі впливають на точність та якість надрукованого виробу? 3. Які програмні засоби використовуються для моделювання та підготовки до друку виробів складної геометрії?	базові знання у процесі прийняття рішень, планування маршрутів друку, вибору матеріалів та оптимізації параметрів процесу.
4. Матеріалознавство для адитивного виробництва:	1. Які матеріали найчастіше використовуються у адитивному виробництві та їх основні властивості? 2. Як властивості матеріалу впливають на вибір параметрів друку? 3. Які проблеми можуть виникнути при друку виробів із композитних матеріалів?	
5. Параметри адитивного процесу та їх вплив на якість і продуктивність:	1.Які основні параметри процесу 3D-друку впливають на продуктивність? 2.Як налаштування товщини шару та швидкості друку впливають на точність виробу? 3.Чому контроль температури та швидкості охолодження є критичним для якості виробу?	
6. Методи контролю точності та якості виробів:	1. Які методи контролю геометрії виробу застосовуються після друку? 2. Як визначають наявність дефектів у внутрішніх шарах виробу? 3. Які інструменти та прилади використовуються для вимірювання допусків та відхилень?	
7. Оптимізація шарів і маршрутів друку:	1. Які стратегії оптимізації шарів дозволяють підвищити продуктивність процесу? 2. Як планування маршрутів друку впливає на час виготовлення виробу? 3. Чим небезпечні неправильно обрані шари або маршрути друку для якості та міцності виробу?	

Продовження табл. 6.2

1	2	3
8. Підвищення продуктивності та ефективності:	1. Які методи дозволяють скоротити час виготовлення виробу без втрати якості? 2. Як впровадження цифрового моделювання підвищує ефективність виробничого процесу? 3. Які навички та компетентності інженера забезпечують стабільну продуктивність адитивного виробництва?	

6.5. Проєктування мотиваційних технологій навчання з теми «Підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів»

На рис. 6.3 представимо характеристику мотиваційних технологій навчання.

Таблиця 6.3

Визначення способів реалізації мотивації

Способи реалізації мотивації	Внутрішня мотивація
1	2
Вступна мотивація	Доброго дня, шановні здобувачі освіти! У сучасному машинобудуванні адитивні технології займають все більш значущу роль завдяки здатності виготовляти складні деталі з високою точністю та мінімальними втратами матеріалів. Продуктивність адитивного виробничого процесу безпосередньо залежить від правильності планування, налаштування та виконання виробничих операцій, а також від компетентності фахівців, що здійснюють підготовку та керування процесом. Вдосконалення методів виготовлення виробів із просторових криволінійних шарів дозволяє значно скоротити час виробництва, зменшити кількість дефектів і підвищити стабільність отриманих виробів. Для майбутніх інженерів та

Способи реалізації мотивації	Внутрішня мотивація
1	2
	технологів важливо не лише знати теоретичні основи адитивного виробництва, але й розвивати практичні навички

Продовження табл. 6.3

1	2
	оптимізації параметрів друку, аналізу цифрових моделей та контролю якості виготовлення. Розуміння впливу кожного етапу процесу на кінцевий результат формує у студентів відповідальність за технологічну ефективність і дає змогу приймати обґрунтовані рішення щодо удосконалення виробничих методів. Заняття з вдосконалення технології адитивного виробництва стимулює аналітичне мислення, формує проєктні навички та готує майбутніх фахівців до роботи в умовах сучасного цифрового машинобудівного виробництва, де висока продуктивність і точність деталей є ключовими показниками ефективності. Таким чином, мотивація до вивчення цієї теми полягає у формуванні у студентів практичних компетентностей, здатності до оптимізації виробничих процесів і усвідомлення їхнього впливу на підвищення продуктивності та якості адитивного виробництва. Освоєння цих навичок сприятиме підготовці висококваліфікованих інженерів, здатних впроваджувати інноваційні рішення та підвищувати конкурентоспроможність підприємств.

6.6. Проєктування технології формування орієнтовної основи діяльності на факультативному занятті з теми «Підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів»

Вибір методів, форм та засобів формування ООД наведено в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4

Способи формування ООД на факультативному занятті

Рівень засвоєння (Б. Блум)	Форми організації навчання	Методи навчання	Засоби навчання
1	2	3	4
Знання (Knowledge)	Лекція, фронтальна бесіда	Пояснення, демонстрація	Презентації, схеми процесу

Продовження табл. 6.4

1	2	3	4
			адитивного виробництва, відео процесів друку
Розуміння (Comprehension)	Групова дискусія, семінар	Порівняльний аналіз, обговорення, усне опитування	Креслення виробів, 3D-моделі, приклади параметрів друку
Застосування (Application)	Практична лабораторна робота	Виконання технологічних операцій, моделювання процесів	3D-принтер, програмне забезпечення CAD/CAM, макети виробів
Аналіз (Analysis)	Інтерактивне заняття, кейс-стаді	Аналіз дефектів, оцінка параметрів процесу	Таблиці контролю якості, програми аналізу помилок друку
Синтез (Synthesis)	Проєктна робота, групове моделювання	Розробка оптимальної послідовності шарів, планування процесу	CAD/CAM моделі, симулятори адитивного друку, програмне забезпечення для оптимізації процесу
Оцінка (Evaluation)	Захист проєкту, обговорення результатів	Порівняння ефективності методів, обґрунтування вибору	Презентації проєктів, звіти про контроль якості, відеозвіт процесу виробництва

Рівень засвоєння (Б.Блум)	Форми організації навчання	Методи навчання	Засоби навчання

6.7 Проєктування технології формування виконавчих дій на факультативному занятті з теми «Підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів»

Вибір методів, форм та засобів формування виконавчих дій наведено в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5

Способи формування виконавчих дій з теми

Рівні засвоєння навчального матеріалу	Форми, методи, засоби
1	2
I, II, III, IV	Вправа 1. Аналіз та підготовка 3D-моделі виробу • Мета: Формування уміння аналізувати геометрію виробу та визначати оптимальну структуру шарів. • Завдання: 1. Ознайомитись із цифровою моделлю виробу. 2. Визначити ділянки з криволінійними поверхнями, що потребують особливої уваги при друку. 3. Розробити оптимальну послідовність нанесення шарів. • Методи: Моделювання, дискусія, аналіз. • Засоби: CAD-програма, 3D-модель виробу, креслення.

Рівні засвоєння навчального матеріалу	Форми, методи, засоби
	Вправа 2. Налаштування параметрів адитивного друку • Мета: Навчитися визначати оптимальні параметри друку для складних криволінійних шарів. • Завдання: 1. Встановити товщину шару, швидкість друку та температуру для різних зон виробу. 2. Виконати тестовий друк малого фрагменту виробу. 3. Проаналізувати якість поверхні та точність відтворення криволіній. Методи: Практична робота, експеримент, аналіз результатів. Засоби: 3D-принтер, програмне забезпечення CAM, матеріали для друку**.**

Продовження табл. 6.5

1	2
	Вправа 3. Виявлення дефектів та оптимізація процесу • Мета: Розвинути вміння контролювати якість та вносити корективи у виробничий процес. • Завдання: 1. Перевірити надрукований виріб на наявність деформацій, тріщин або відхилень від моделі. 2. Визначити причини дефектів та запропонувати методи їх усунення. 3. Скоригувати параметри друку та повторити виробництво. • Методи: Аналіз, корекція технологічного процесу, повторний експеримент. • Засоби: 3D-сканер, вимірювальні інструменти, CAD/CAM програми.

	Вправа 4. Розробка методики прискорення виробничого процесу • Мета: Підвищити продуктивність шляхом оптимізації нанесення криволінійних шарів. • Завдання: 1. Дослідити альтернативні стратегії формування шарів (змінна товщина, адаптивні траєкторії). 2. Порівняти час друку та якість виробів для різних методів. 3. Вибрати оптимальний метод та обґрунтувати його застосування. • Методи: Проєктна робота, моделювання, експеримент. • Засоби: CAD/CAM програми, 3D-принтер, програмне забезпечення для симуляції друку.
	Вправа 5. Підготовка звіту та презентації результатів • Мета: Навчитися аналізувати результати та представляти технологічні рішення. • Завдання: 1. Оформити звіт із описом параметрів друку, виявлених дефектів та проведених оптимізацій. 2. Підготувати презентацію із результатами тестового друку та пропозиціями щодо підвищення продуктивності. • Методи: Аналітична робота, усна презентація. • Засоби: Текстовий редактор, графічні програми, презентаційне програмне забезпечення.

6.8 Проєктування контрольних дій з теми «Підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів»

Вибір методів, форм та засобів формування контрольних дій наведено в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6

Засоби контролю з теми факультативного заняття

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми, методи, засоби
1	2
III рівень	Контрольні питання. 1. Які основні особливості адитивного виробництва впливають на продуктивність виготовлення виробів з просторових криволінійних шарів? 2. Як точність цифрового моделювання визначає якість кінцевого виробу та ефективність виробничого процесу? 3. Які компетентності повинні мати інженери та технологи для оптимізації адитивного виробничого процесу? 4. В яких випадках доцільно застосовувати змінну товщину шарів при формуванні криволінійних виробів? 5. Як впливає правильне налаштування параметрів 3D-принтера на зменшення дефектів та підвищення продуктивності? 6. Які методи контролю якості виробу можна застосовувати під час виробництва складних криволінійних поверхонь? 7. Як інтеграція знань з матеріалознавства, механіки та цифрового проєктування підвищує ефективність адитивного процесу? 8. Які стратегії оптимізації траєкторій шарів дозволяють скоротити час друку без втрати точності виробу?

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми, методи, засоби
1	2
	9. Яку роль відіграють симуляції та тренажери у підготовці фахівців для адитивного виробництва?

Продовження табл. 6.6

1	2
	4. Як результати практичного тестового друку можуть впливати на вдосконалення технологічного процесу? 5. Чому важлива аналітична та проєктна діяльність при розробці методів підвищення продуктивності адитивного виробництва? 6. Як впровадження інноваційних методів виготовлення впливає на конкурентоспроможність підприємства? 7. Які ключові критерії оцінки продуктивності адитивного виробничого процесу? 8. Які фактори можуть призвести до зниження стабільності процесу при друку складних криволінійних шарів? 9. Як підготовка та аналіз 3D-моделі виробу допомагають у плануванні оптимальної послідовності нанесення шарів?

6.9 Розробка сценарію факультативного заняття з теми «Підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів»

Сценарій заняття, його структура й зміст структурних елементів представлені у вигляді табл. 6.7.

Таблиця 6.7

Сценарій факультативного заняття

№ з/п	Структурні елементи заняття	Зміст структурних елементів
1	2	3
1	Організаційний момент	Привітання студентів, перевірка присутніх. Створення робочої атмосфери та налаштування на активну навчальну діяльність. Нагадування

Продовження табл. 6.7

1	2	3
		правил безпеки та технологічної дисципліни при роботі з адитивним обладнанням, інструментами та вимірювальними приладами.
2	Повідомлення теми і мети заняття	Тема: «Підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів». Мета: сформувати у студентів знання та практичні навички планування адитивного процесу, вибору оптимальної стратегії шарування, налаштування параметрів 3D-друку та використання цифрового моделювання для підвищення продуктивності та точності виробів.
3	Мотивація навчальної діяльності	Обговорення актуальності теми: необхідність підвищення ефективності та якості адитивного виробництва, скорочення часу друку та зменшення дефектів. Демонстрація прикладів виробів із складними криволінійними шарами, виготовлених із застосуванням оптимізованих методів. Пояснення, як цифрове моделювання дозволяє прогнозувати ефективність виробничого процесу.
4	Актуалізація базових знань	Усне опитування та дискусія щодо: • Основ адитивних технологій та їхніх типів; • Впливу параметрів друку на точність та поверхневу якість виробу; • Принципів формування просторових криволінійних шарів; • Роль цифрового моделювання та симуляції процесу. Методи: дискусія, усне опитування. Форма: фронтальна. Засоби: креслення виробів, моделі 3D, контрольні питання.
5	Формування нового навчального досвіду (ООД)	Демонстрація симуляції адитивного процесу із застосуванням CAD/CAM-програмного забезпечення. Студенти аналізують послідовність шарування, виявляють критичні ділянки та обговорюють способи оптимізації товщини та траєкторії шарів. Методи: пояснення, демонстрація, дискусія, мозковий штурм.
6	Формування вмінь та дій (ВД)	Практичні вправи: 1. Аналіз цифрової моделі виробу та визначення зон високої складності; 2. Вибір оптимальної послідовності шарування; 3. Імітаційне

		моделювання процесу друку; 4. Підбір параметрів друку для скорочення часу виробництва та підвищення точності; 5. Формування рекомендацій

Продовження табл. 6.7

1	2	3
		щодо зменшення браку та підвищення продуктивності.
7	Формування компетентності (КД)	Обговорення результатів практичних робіт та контрольні питання: • Вплив параметрів друку на продуктивність та якість; • Методи оптимізації траєкторії шарів; • Використання симуляцій для планування процесу; • Оцінка ефективності обраних методів та пропозиції щодо вдосконалення технології.
8	Підбиття підсумків, видача домашнього завдання	Підсумок заняття: значення вдосконалення методу формування шарів для підвищення продуктивності та точності адитивного виробництва, роль цифрового моделювання. Домашнє завдання: підготувати звіт із симуляції процесу виробництва складного виробу, визначити критичні ділянки, запропонувати методи оптимізації траєкторії шарів та параметрів друку.

Висновки до розділу 6

Розроблений дидактичний проєкт факультативного заняття засвідчив актуальність і необхідність цілеспрямованої професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі до роботи з адитивними технологіями нового покоління, що передбачають формування виробів зі складною просторовою геометрією. У процесі створення проєкту було доведено, що ефективна організація навчального заняття, орієнтованого на вдосконалення методу формування просторових криволінійних шарів, сприяє розвитку у студентів цілісного розуміння технологічних, інженерних і цифрових аспектів адитивного виробництва.

Структура заняття, побудована на послідовності етапів — від актуалізації

знань до формування професійних компетентностей, — забезпечує логічний перехід від теоретичної підготовки до практично орієнтованих дій. Використання симуляцій, цифрового моделювання, аналізу траєкторій шарування та оптимізації параметрів процесу дозволяє студентам усвідомити зв’язок між якістю цифрової підготовки та продуктивністю виробництва.

У межах дидактичного проєкту особливу увагу приділено практичним вправам, що формують професійні вміння майбутніх фахівців: аналіз моделі виробу, пошук технологічних ризиків, вибір оптимальної стратегії друку та параметрів адитивного процесу. Це сприяє розвитку здатності приймати технологічно обґрунтовані рішення, що є ключовою компетентністю в умовах сучасного машинобудівного виробництва.

Проєкт факультативного заняття довів, що поєднання традиційних методів навчання з цифровими інструментами, інтерактивними моделями та елементами інженерного аналізу підвищує ефективність засвоєння матеріалу та сприяє формуванню глибокої професійної підготовки. Застосування практикоорієнтованих підходів дозволяє студентам не лише опанувати технологічні основи адитивного виробництва, а й розвинути навички оптимізації процесу виготовлення виробів складної геометрії.

Отже, запропонований дидактичний проєкт є ефективним інструментом підготовки фахівців машинобудівних підприємств до роботи в умовах цифрової трансформації виробництва. Він сприяє підвищенню їхньої здатності забезпечувати високу продуктивність адитивного процесу, мінімізувати технологічні помилки та впроваджувати інноваційні методи виготовлення виробів із просторових криволінійних шарів. Реалізація такого навчального підходу підвищує конкурентоспроможність майбутніх спеціалістів і відповідає вимогам сучасної промисловості.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження досягнуто підвищення міцності (ударної в'язкості, міцності на розтягування та стиснення) та зниження матеріалоємності виробів, що виготовляються в рамках FDM-технології за рахунок формування виробів з просторових криволінійних шарів на п'ятиосьових адитивних пристроях.

Запропоновано новий метод адитивного виготовлення виробів складної форми шляхом їх формування із просторових криволінійних шарів на основі FDM-технології, що відрізняється заповненням внутрішніх шарів виробу по спіралеподібній траєкторії та формуванням поверхні з кільцеподібних шарів. У цьому випадку неминуче усадка матеріалу призводить до щільнішого прилягання наступного шару до попереднього. Напруга, що виникає при цьому, за рахунок сил внутрішнього стиснення дозволяє отримати більш міцний виріб і одночасно зменшити ймовірність появи тріщин в процесі виробництва виробу.

Формування виробів з криволінійних шарів підвищує їхню ударну в'язкість по Ізоду до 4 разів, міцність на стиск підвищується до 10%, міцність на розтяг до 4 разів у поперечному напрямку порівняно з аналогічним виробами, надрукованими з плоских шарів. До 2-х разів знижується час виробничого процесу та його матеріаломісткість. Виходячи з цього метод дозволяє виробляти вироби з характеристиками міцності, порівнянними з виробами, виробленими методами лиття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Головенкін В. П. Інженерна педагогіка [Електронний ресурс] : підруч. / В. П. Головенкін. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. Режим доступу: http://psy.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/02/Injenerna_pedagogika.pdf
2. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: дидактичне проектування: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УІПА, 2019. – 204 с.
3. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: основні технології навчання: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УІПА, 2019. – 174 с.
4. Лебедик Л.В., Стрельніков В.Ю., Стрельніков М.В. Сучасні технології навчання і методики викладання дисциплін: Навчально-методичний посібник для слухачів курсів підвищення кваліфікації педагогічних працівників закладів середньої, професійної (професійно-технічної), фахової передвищої та вищої освіти / Л. В. Лебедик, В. Ю. Стрельніков, М. В. Стрельніков. – Полтава : АСМІ, 2020. – 303 с.
5. Методика професійної освіти : навч. посібник для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 015 «Професійна освіта» галузі знань 01 «Освіта / Педагогіка» / Д. О. Чернишев, К. І. Почка, Г. Л. Корчова, Ю. С. Красильник, М. В. Руденко. – Київ : Компринт, 2024. – 224 с.
6. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи для здобувачів освіти другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальністю 015 Професійна освіта (за спеціалізацією) / Укр. інж.-пед. акад.; упоряд.: О. Е. Коваленко, Н. О. Брюханова, Н.В. Божко, Н.В. Корольова – Харків: УІПА, 2024. – 82 с.

7. Освітньо-професійна програма «Професійна освіта (Машинобудування)» першого (бакалаврського) рівня. Затверджена вченою радою Української інженерно-педагогічної академії від 28.06.2024 року №13.

8. Освітньо-професійна програма «Професійна освіта (Машинобудування)» другого (магістерського) рівня. Затверджена вченою радою Української інженерно-педагогічної академії від 28.06.2024 року №13.

9. Семенова А.В. Професійна педагогіка: Підручник. / Авт. : О.В. Грабовський, Л.В. Коломієць, О.С. Савєльєва, А.В. Семенова, В.Ф. Яні; за заг. ред. А.В. Семенової. – Одеса: Бондаренко М.О., 2020. – 575 с.

10. Сайт дистанційної освіти Університету – Режим доступу: https:// moodle.karazin.ua

11. EdEra – студія онлайн-освіти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ed-era.com/

12. Український освітній онлайн-портал для вчителів «На Урок» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://naurok.com.ua/

13. «Освіторія Медіа» – онлайн медія про освіта та виховання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://osvitoria.media/

14. Освіта.UA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://osvita.ua

15. Всеосвіта – освітня платформа для професійного зростання педагогічних працівників та підвищення їх педагогічної майстерності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://vseosvita.ua/

16. Eryildiz, Meltem. Effect of Build Orientation on Mechanical Behaviour and Build Time of FDM 3D-Printed PLA Parts: An Experimental Investigation. 2021, 5. 116- 120. 10.26701/ems.881254.

17. Wei Gao, Yunbo Zhang, Diogo C. Nazzetta, Karthik Ramani, and Raymond J. Cipra. 2015a. RevoMaker: Enabling Multi-directional and Functionally-embedded 3D Printing using a Rotational Cuboidal Platform. In Proceedings of the 28th

Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology (UIST ’15). ACM, New York, NY, USA, 437–446. https://doi.org/10.1145/2807442.2807476

18. Eryildiz, Meltem. Effect of Build Orientation on Mechanical Behaviour and Build Time of FDM 3D-Printed PLA Parts: An Experimental Investigation. 2021, 5. 116- 120. 10.26701/ems.881254.

19. Ke Xu, Yingguang Li, Lufeng Chen, Kai Tang, Curved layer based process planning for multi-axis volume printing of freeform parts, Computer-Aided Design, Vol-ume 114, 2019, Pages 51-63, ISSN 0010-4485

20. ISO 3592:2000. Industrial automation systems - Numerical control of ma chines - NC processor output - File structure and language format.

21. Cuan-Urquizo, E., Barocio, E., Tejada-Ortigoza, V., Pipes, R. B., Rodriguez, C. A., & Roman-Flores, A. (2019). Characterization of the Mechanical Properties of FFF Structures and Materials: A Review on the Experimental, Computational and Theoretical Approaches. Materials (Basel, Switzerland), 12(6), 895. doi:10.3390/ma12060895

22. Guan, H.W.; Savalani, M.M.; Gibson, I.; Diegel, O. Influence of Fill Gap on Flexural Strength of Parts Fabricated by Curved Layer Fused Deposition Modeling. Pro-cedia Technol. 2015, 20, 243–248.

23. Jo, W.; Kwon, O.C.; Moon, M.W. Investigation of influence of heat treat ment on mechanical strength of FDM printed 3D objects. Rapid Prototyping J. 2018, 24, 637–644.