

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний
(повне найменування факультету)

Технологія машинобудування
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

другий (магістерський)
(ступінь вищої освіти)

на тему «Постобробка деталей методом фрезерування на верстаті з ЧПК після
FDM друку »

Виконав: студент(ка) II курсу, групи M-122м

Спеціальності 131 Прикладна механіка
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Технології машинобудування

КОМІСАРОВ О.О.
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ПУХАЛЬСЬКА Г.В.
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент ФРОЛОВ М.В.
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Машинобудівний
 Кафедра «Технологія машинобудування»
 Ступінь вищої освіти другий (магістерський)
 Спеціальність 131 «Прикладна механіка»
(код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Технології машинобудування
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Сергій ДЯДЯ
 « » 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

КОМІСАРОВ Олександр Олександрович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Постобробка деталей методом фрезерування на верстаті з ЧПК після FDM друку»

керівник проєкту (роботи) к.т.н., доц. ПУХАЛЬСЬКА Гульнара Вікторівна
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «14» 11 2023 року № 436

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 02.12.2023 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) робоче креслення ; досліджувальні матеріали; річна програма випуску N=100 шт

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Огляд існуючих досліджень. 2. Методика досліджень. 3. Дослідницька частина по друку 4. Дослідницька частина по фрезеруванню. 5. Економічний розрахунок 6. Охорона праці та безпека

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

Креслення деталі, заготовки; плакат 3D-моделі деталі та заготовки; результати 3д друку; плакат зображення траєкторії обробки для ЧПК ; плакат дослідження зразків під мікроскопом; таблиця вимірювань точності. Кількість слайдів - 11

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4	к.т.н., доц. ПУХАЛЬСЬКА Г.В.		
5	к.т.н., доц. ШМИРКО В.І.		
нормоконтроль	к.т.н., доц. ДЯДЯ С.І.		

7. Дата видачі завдання 04 вересня 2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Огляд існуючих досліджень	18.09.2023	
2	Методика досліджень	02.10.2023	
3	Дослідницька частина по друку	09.10.2023	
4	Дослідницька частина по фрезеруванню	23.10.2023	
5	Економічний розрахунок	06.11.2023	
6	Охорона праці	13.11.2023	
7	Оформлення пояснювальної записки, креслень, карт	27.11.2023	
8	Нормоконтроль	04.12.2023	
9	Рецензія	07.12.2023	
10	Захист дипломного проєкту	19.12.2023	

Студент(ка)

_____ Олександр КОМІСАРОВ
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

_____ Гульнара ПУХАЛЬСЬКА
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 90 с., 11 табл., 15 рис., 5 дод., 24 джерела.

3D ДРУК, ЧПК, ПОСТОБРОБКА, ФРЕЗЕРУВАННЯ ПЛАСТИКА, FDM-ДРУК.

Об'єктом дослідження є процес постобробки фрезеруванням деталей після 3D-друку на FDM-принтері з використанням верстатів з ЧПК.

Предметом дослідження є вплив режимів фрезерування на шорсткість поверхні та розмірну точність.

Метою роботи є дослідження процесу постобробки фрезеруванням деталей після 3D-друку для збільшення точності розмірів та якості поверхні.

Методи дослідження – експериментальний та науково-дослідний.

Проведено дослідження можливості використання механічної обробки методом фрезерування різних матеріалів, які використовуються для 3D-друку. Проведений аналіз фрез для обробки і проведено тестування можливості їх використання для деталей, надрукованих FDM методом. Рекомендовані оптимальні режими фрезерування для матеріалів, які використовуються для 3D-друку, які значно поліпшують якість поверхні та точність розмірів. Дані рекомендації для подальшого використання цих методів. Ці методи в подальшому можливо використовувати в лабораторіях прототипування для виготовлення макетів та мастер-моделей.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	6
ВСТУП.....	7
1 ІСТОРІЯ ВИНИКНЕННЯ, КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ.....	8
1.1 Основні технології 3D-друку.....	8
1.2 Матеріали для 3D-друку та аналіз методів пост обробки.....	19
2 МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБЛАДНАННЯ.....	31
3 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	32
3.1 Визначення режимів 3D друку.....	32
3.2 Обробка різних типів пластиків.....	36
3.3 Визначення оптимальних режимів фрезерування.....	38
3.4 Визначення точності розмірів.....	42
4 ОЦІНКА ОЧІКУВАНОЇ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБКИ.....	44
5 РОЗРАХУНОК ПРИРОДНОГО ОСВІТЛЕННЯ В ЛАБОРАТОРІЇ.....	50
ВИСНОВКИ.....	56
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	58
ДОДАТКИ.....	61

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ABS - Acrylonitrile butadiene styrene

PLA - Polylactic acid

FDM - Fused Deposition Modeling (моделювання плавленого осадження)

SLA - Stereolithography (стереолітографія)

MJS - Multiphase Jet Solidification (багатофазне затвердіння струменя)

FFF - Fused Filament Fabrication (виробництво способом наплавлення)

SLM - Selective Laser Melting (вибіркове лазерне плавлення)

DMLS - Direct Metal Laser Sintering (метод прямого лазерного спікання)

ПО - Програмне забезпечення

ЧПК - Числове програмне керування

дод. - додаток

рис. - рисунок

КПО - Коефіцієнт природного освітлення

ТП - Технологічний процес

ВСТУП

Адитивні технології – одна з форм технологій виробництва, де тривимірний об'єкт створюється шляхом накладання послідовних шарів матеріалу (друку, вирощування) за даними цифрової моделі. Друк здійснюється спеціальним пристроєм – 3D-принтером, який забезпечує створення фізичного об'єкта шляхом послідовного накладання пластичного матеріалу на основі віртуальної 3D-моделі. 3D-принтери, як правило, швидші, більш доступні і простіші у використанні, ніж інші технології адитивного виробництва. 3D-принтери пропонують розробникам продуктів можливість друку деталей і механізмів з декількох матеріалів та з різними механічними і фізичними властивостями за один процес складання. Кілька десятиліть тому адитивні технології застосовувалися виключно для прототипування, а нині використовуються під час виробництва високоточних надсучасних приладів і систем. Різноманітність методів тривимірного друку, широка номенклатура використовуваних матеріалів і вражаючі можливості такої техніки дозволили залучити 3D-друк у багатьох сферах життєдіяльності людини. Розвиток адитивних технологій вже нині дає змогу створювати деталі й конструкції надзвичайно складної форми з високою точністю, водночас собівартість певних моделей 3D-принтерів створює передумови для поширення такої техніки серед усіх бажаючих. Натепер 3D-друк уже знайшов застосування в медицині, освіті, харчовій і навіть військовій промисловості. Основними напрямками вдосконалення методів і технологій тривимірного друку є підвищення точності і швидкості виготовлення деталей, розширення номенклатури застосовуваних і використовуваних одночасно матеріалів, усунення дефектів друкованої продукції. Концентрація наукових зусиль у таких напрямках дозволить незабаром впровадити адитивні технології в серійне виробництво, що відкриє перед людством нові перспективи [1].

1 ІСТОРІЯ ВИНИКНЕННЯ, КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ

1.1 Основні технології 3D-друку

Перші технології 3D-друку з'явилися в кінці 1980-х років. Їх називали швидке прототипування (Rapid Prototyping). Це тому, що дані процеси спочатку були задумані, як швидкий і більш ефективний метод для створення прототипів. Найперший патент заявка на технологію RP була подана Кодама, Японія, у травні 1980 року.

У 1986 році, був виданий перший патент на апарат стереолітографії (SLA). Цей патент належав Чарльзу Халл, який вперше винайшов свою машину SLA в 1983. Халл став співзасновником компанії «3D систем». Ця корпорація – одна з найбільших і найбільш плодovitих організацій, що працюють в 3D поліграфічному секторі до сьогоднішнього дня [2].

У 1987 році, Карл Декард, який працював в Техаському університеті, подав патент в США на процес селективного лазерного спікання (SLS) швидкого прототипування. Цей патент був випущений в 1989 і SLS пізніше був ліцензований DTM Inc, яка пізніше була придбана «3D Systems». У тому ж 1989 року Скотт Крамп, співзасновник компанії Stratasys Inc. подав патент на «моделювання методом наплавлення» (FDM). Патент на технологію FDM був виданий компанії Stratasys в 1992 році [3].

У 2000 році була впроваджена технологія «Селективного лазерного спікання» (SLM). Хон Корпорація та Sciaky Inc були першопрохідцями в цій технології.

Відправною точкою для будь-якого 3D-друкування є 3D цифрова модель, яку можна створити, використовуючи різноманітне програмне забезпечення, наприклад 3D CAD системи. Етап STL, готова модель нарізається на шари в окремій програмі, тим самим перетворений файл читається на 3D-принтері. Матеріал обробляється на 3D-принтері, після цього нашаровується, згідно з

конструкцією деталі та процесу печаті. Існує ряд різних типів технологій 3D-друку, кожен процес відрізняється матеріалами, способом створення кінцевого об'єкта. Функціональні пластмаси, метали, кераміка і пісок, тепер все це зазвичай використовується для промислового прототипування. Пластмаса в даний час широко використовуваний матеріал – зазвичай ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) або PLA (lactic acid або polylactic acid), але зростає і кількість альтернативних, включаючи нейлон [4].

Організація ASTM, що займається розробкою галузевих стандартів, розділяє 3D-адитивні технології на 7 категорій.

1. Витискання матеріалу. В точку побудови по підігрітому екструдеру подається пастоподібний матеріал, що представляє собою суміш сполучного і металевих порошків. Побудована сира модель поміщається в піч для того, щоб видалити сполуку і спекти порошок – так само, як це відбувається в традиційних технологіях. Ця адитивна технологія реалізована під марками MJS (Multiphase Jet Solidification, багатофазне затвердіння струменя), FDM (Fused Deposition Modeling, моделювання методом пошарового напрямку), FFF (Fused Filament Fabrication, виробництво способом наплавлення ниток).

2. Розбризкування матеріалу. Наприклад, в технології Polyjet віск або фотополімер по багатоструменевій голівці подається в точку побудови. Ця адитивна технологія також називається Multi Jetting Material.

3. Розбризкування сполучного. До них відносяться струменеві Ink-Jet-технології вприскування в зону побудови не модельного матеріалу, а сполучного реагента (технологія адитивного виробництва ExOne).

4. З'єднання листових матеріалів. Будівельний матеріал являє собою полімерну плівку, металеву фольгу, аркуші паперу та ін. Використовується, наприклад, в технології ультразвукового адитивного виробництва Fabrisonic. Тонкі пластини з металу зварюються ультразвуком, після чого надлишки металу видаляються фрезеруванням.

5. Фотополімеризація у ванні. Технологія використовує рідкі модельні матеріали - фотополімерні смоли. Прикладом можуть служити SLA-технологія

компанії 3D Systems і DLP-технологія компаній Envisiontec, Digital Light Procession.

6. Плавка матеріалу в заздалегідь сформованому шарі. Використовується в SLS-технологіях, що використовують як джерело енергії лазер або термоголовку (SHS компанії Blueprinter).

7. Пряме підведення енергії в місце побудови. Матеріал і енергія для його плавлення надходять в точку побудови одночасно. В якості робочого органу використовується головка, обладнана системою підведення енергії і матеріалу. Енергія надходить у вигляді сконцентрованого пучка електронів (Sciaky) або променя лазера (POM, Optomes,). Іноді головка встановлюється на робот-маніпулятор [5].

FDM (Fused Deposition Modeling) - моделювання методом пошарового наплавлення, популярна технологія адитивного виробництва. Застосовується для створення тривимірних моделей, макетів, виробів до яких не пред'являються особливі вимоги до якості поверхні і точності виготовлення. Технологія FDM має на увазі створення тривимірних об'єктів за рахунок нанесення послідовних шарів матеріалу, які повторюють контури цифрової моделі. Матеріалом для друку виступають термопластики, що поставляються у вигляді котушки ниток різних кольорів. Виробничий цикл починається з обробки тривимірної цифрової моделі. Модель у форматі STL ділиться на шари і орієнтується відповідним чином для друку. При необхідності створюються підтримуючі структури, необхідні для друку нависаючих елементів. Деякі пристрої дозволяють використовувати різні матеріали під час одного виробничого циклу. Можливим є друк моделі з одного матеріалу з печаткою опор з іншого, легкорозчинного матеріалу, що дозволяє з легкістю видаляти підтримуючі структури після завершення процесу друку. Альтернативно можливим є друк різними кольорами одного і того ж виду пластику при створенні єдиної моделі [4].

Деталь формується пошарово. Розплавлений пластик укладається по контурах, які утворено цифровою моделлю. Після укладання пластик миттєво охолоджується і твердне. По завершенню одного шару, екструдер переміщається

вертикально вгору на величину товщини нитки розплавленого пластику. Формується другий шар. На рисунку 1.1 схематично показано формування шарів при 3D-друку методом FDM [4, 6].

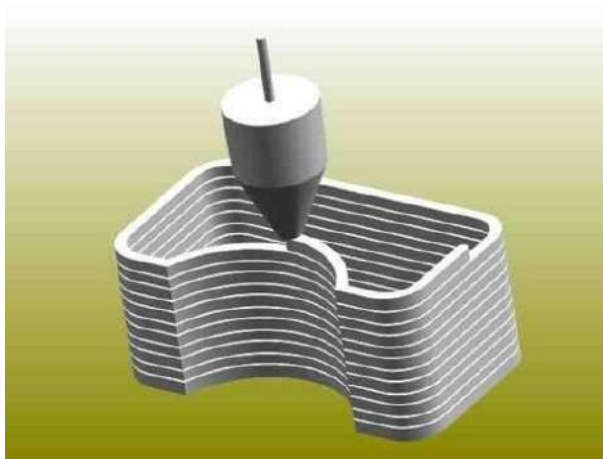


Рисунок 1.1 - Схема формування шарів деталі [4]

Пластикова нитка подається з котушки в екструдер. Екструдер (друкована головка) – це пристрій, обладнаний механічним приводом для подачі нитки, нагрівальним елементом для плавки матеріалу і соплом, через яке здійснюється безпосередньо екструзія. Нагрівальний елемент передає тепло на сопло, яке, в свою чергу, плавить пластикову нитку і подає розплавлений матеріал на той шар, що формується. Температура сопла може регулюватися від 150°C до 310°C для використання різних матеріалів. Як правило, верхня частина сопла навпаки охолоджується за допомогою конвективного кожуха і вентилятора для запобігання передчасного розплавлення пластикової нитки з наступним засміченням друкуючої головки, що в свою чергу призведе до втрати плавності подачі матеріалу, а також до втрати якості друку. Екструдер переміщується в горизонтальній і вертикальній площинах під контролем алгоритмів, аналогічних використуваним в верстатах з ЧПК. Сопло переміщується по траєкторії, заданій системою автоматизованого проектування. Модель будується шар за шаром, від низу до верху. Як правило, екструдер приводиться в рух покроковими моторами

або сервоприводами. Найбільш популярною системою координат, яка застосовується в FDM, є декартова система, побудована на прямокутному тривимірному просторі з осями X, Y і Z [4,7].

Технологія FDM відрізняється високою гнучкістю, але має певні обмеження. Хоча створення нависаючих структур можливо при невеликих кутах нахилу, у випадку з великими кутами необхідне використання штучних опор, які, створюючись в процесі друку, і відокремлюються від моделі по завершенню процесу. В якості витратних матеріалів доступні всілякі термопластики і композити, включаючи ABS, PLA, полікарбонати, поліаміди, полістирол, лігнін та багато інших. Як правило, різні матеріали надають вибір балансу між певними характеристиками міцності і температурними характеристиками. Моделювання методом FDM застосовується для швидкого прототипування і швидкого виробництва. Швидке виробництво слугує недорогою альтернативою стандартним способам при створенні дрібносерійних партій. FDM є одним з найменш дорогих способів друку, що забезпечує зростаючу популярність побутових принтерів, заснованих на цій технології. У побуті 3D-принтери, що працюють за технологією FDM, можуть застосовуватися для створення самих різних об'єктів цільового призначення, а також іграшок, прикрас і сувенірів [4, 8-10].

SLA (Steriolithography Apparatus) – технологія тривимірного друку, при якій рідкий фотополімер під дією світлового випромінювання лазера змінює свої фізичні властивості і твердне, утворюючи тверду поверхню в точці проєкції лазера. У ємність з рідким фотополімером поміщається сітчаста платформа, на ній буде відбуватися вирощування прототипу. Спочатку платформа знаходиться на такій глибині, щоб її покривав найтонший шар полімеру товщиною від 0,05 до 0,15 мм – це і є приблизна товщина шару в стереолітографії. Далі включається лазер, який впливає на ті ділянки полімеру, які відповідають стінкам цільового об'єкта, викликаючи їх затвердіння. Після цього вся платформа занурюється глибше, на глибину, рівну товщині шару. Також в цей момент спеціальна щітка

зрошує ділянки, які могли залишитися сухими внаслідок деякого поверхневого натягу рідини [4,11– 13]. Схема установки представлена на рисунку 1.2.

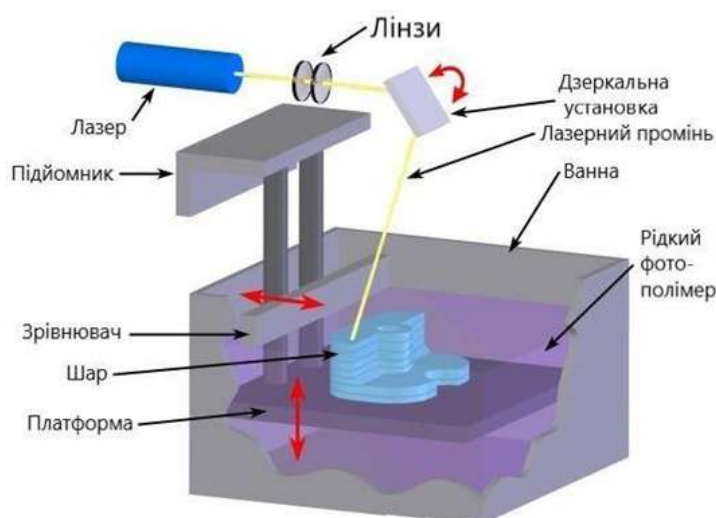


Рисунок 1.2 - Схема установки для стереолітографії [4]

По завершенню побудови об'єкт занурюють у ванну зі спеціальними складами для видалення надлишків і очищення. І, нарешті, фінальне опромінення світлом для остаточного затвердіння. Як і багато інших методів 3D-прототипування, SLA вимагає зведення підтримуючих структур, які вручну видаляються після закінчення будівництва. Не обходиться і без істотних складнощів.

По-перше, вимоги до самого фотополімера досить суперечливі: якщо він буде густим, то його легше полімеризувати, але складніше забезпечити рівну поверхню після кожного кроку занурення; доводиться використовувати спеціальну лінійку, яка на кожному кроці проходить по поверхні рідини і вирівнює її. Велика кількість затверджувача при фіксованій потужності лазера дозволить зменшити необхідний час впливу, проте неминуче фонове засвічення «псує» навколишній обсяг полімеру і скорочує можливий термін його використання [4].

По-друге, повна полімеризація кожного шару зайняла б чимало часу, тому засвічення проводиться до рівня, при якому шар набуває лише мінімально

необхідну міцність, а згодом готову модель, попередньо промивши від залишків рідкого полімеру, доводиться опромінювати потужним джерелом ультрафіолетового світла в спеціальній камері, щоб полімеризація досягла 100% [4, 11– 13].

Переваги технології:

- отримання дуже високої роздільної здатності і високої точності друку;
- отримання дуже великих моделей, розміром до 150×75×55 см і вагою до 150 кг;
- механічна міцність одержуваних зразків досить висока, вони можуть витримувати температуру до 100°C;
- відсутність обмежень на складність моделі і наявність у неї дрібних елементів;
- мала кількість відходів після друку;
- легкість фінішної обробки, якщо така буде потрібною.

Недоліки:

- обмежений вибір матеріалів для виготовлення моделей;
- неможливість кольорового друку і поєднання різних матеріалів в одному циклі;
- мала швидкість друку, максимум 10-20 мм на годину по вертикалі;
- дуже великі масогабаритні характеристики 3D-принтерів.

Незважаючи на обмеженість спектра видаткових матеріалів, вибір є, і можна отримувати моделі з різними властивостями: з підвищеною термостійкістю, гнучкі, з високою стійкістю до абразива. Для стереолітографії доступні три кольори: білий, сірий, напівпрозорий [4, 14].

SLM (Selective Laser Melting) - вибіркове лазерне плавлення. Цей метод має багато спільного з методом SLA, тільки замість рідини використовується порошок з діаметром частинок 10-100 мкм, тонкими рівномірними шарами розподіляється в горизонтальній площині, а потім лазерний промінь плавить (рис. 1.3) ділянки, що підлягають затвердінню на даному шарі моделі [4].

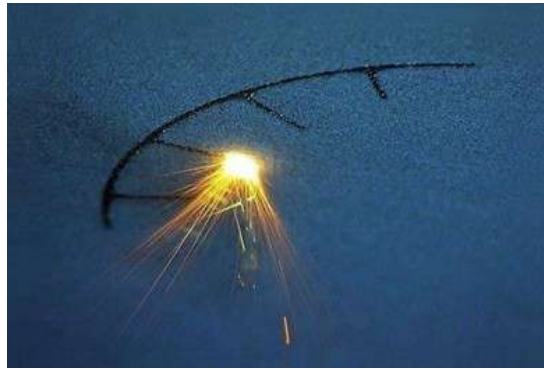


Рисунок 1.3 - Плавлення лазером порошкоподібного металу [4]

Вихідні матеріали можуть бути самі різні: метал, пластик, кераміка, скло, ливарний віск. Порошок наноситься і розрівнюється по поверхні робочого столу спеціальним валиком, який при зворотному проході видаляє надлишки порошку (рис. 1.4). Потім працює потужний лазер, спікаються частки одна з одною і з попереднім шаром, після чого стіл опускається на величину, рівну висоті одного шару для зниження потужності лазера, необхідної для спікання. Порошок в робочій камері попередньо нагрівається майже до температури плавлення, а сам лазер працює в імпульсному режимі, оскільки для спікання важливіша пікова потужність, а не тривалість впливу.



Рисунок 1.4 - Схема установки для SLM [4]

Частки розплавляються повністю. Невикористаний порошок, який залишається навколо отверділих шарів, служить підтримкою при створенні нависаючих елементів моделі, тому немає необхідності у формуванні спеціальних підтримуючих структур. Але цей порошок по закінченні процесу необхідно видалити як з камери, особливо якщо наступна модель буде створюватися з іншого матеріалу, так і з порожнин вже виготовленої моделі, що можна зробити, лише після її повного остигання. Часто потрібна фінішна обробка — наприклад, поліровка, оскільки поверхня може виходити шорсткою або з видимою шорсткістю. Крім того, матеріал може використовуватися не тільки чистий, але і в суміші з полімером або у вигляді часток, покритих полімером, залишки яких потрібно видалити шляхом випалювання в спеціальній печі. Для металів одночасно відбувається заповнення виникаючих пустот бронзою. Оскільки мова йде про високі температури, необхідні для спікання, процес відбувається в азотному середовищі з малим вмістом кисню. При роботі з металами це ще і запобігає окисленню [4].

Установки SLM, які випускаються серійно, дозволяють працювати з досить великими об'єктами, до $55 \times 55 \times 75$ см. Технологія вибіркової лазерної плавки застосовується для побудови об'єктів складної геометричної форми, часто з тонкими стінками і порожнинами. Можливість комбінування гомогенних і пористих структур в одному об'єкті корисна при створенні імплантів з пористою поверхнею, що сприяє остеointegraції (зрощуванню з кістковою тканиною). Крім того, SLM успішно застосовується в аерокосмічній галузі, дозволяючи створювати високоміцні елементи конструкцій, недосяжні за геометричною складністю для традиційних механічних методів виготовлення і обробки (фрезерування, різання тощо). Якість готових виробів настільки висока, що механічна обробка готових моделей майже не потрібна. Позитивним побічним ефектом служить економія матеріалів, бо SLM в силу своєї специфіки є практично безвідходним виробництвом. В ході випробувань NASA було встановлено, що деталі для ракетних двигунів J-2X і RS-25, виготовлені з нікелевих сплавів методом SLM, дещо поступаються по щільності матеріалу аналогам, що

виготовлено литтям з наступним зварюванням компонентів. З іншого боку, відсутність зварювальних швів сприятливо впливає на міцність виробів [4,15,16].

DMLS (Direct Metal Laser Sintering) – метод прямого лазерного спікання – технологія адитивного виробництва металевих виробів, розроблена компанією EOS з Мюнхена. Процес включає використання тривимірних моделей у форматі STL в якості креслень для побудови фізичних моделей. Тривимірна модель підлягає цифровій обробці для віртуального поділу на тонкі шари з товщиною, що відповідає товщині шарів, які наносяться друкарським пристроєм. Готовий файл використовується як набір креслень під час друку. В якості нагрівального елемента для спікання металевого порошку використовуються оптико-волоконні лазери щодо високої потужності – близько 200 Вт. Деякі пристрої використовують більш потужні лазери з підвищеною швидкістю сканування (тобто пересування лазерного променя) для більш високої продуктивності. Як варіант, можливе підвищення продуктивності за рахунок використання декількох лазерів. DMLS дозволяє створювати цілісні металеві деталі складної геометричної форми [4].

Порошковий матеріал подається в робочу камеру в кількостях, необхідних для нанесення одного шару. Спеціальний валик вирівнює поданий матеріал в рівний шар і видаляє зайвий матеріал з камери, після чого лазерна головка спікає частинки свіжого порошку між собою і з попереднім шаром згідно контурам, визначеним цифровою моделлю. Після завершення малювання шару, процес повторюється: валик подає свіжий матеріал і лазер починає спікати наступний шар. Привабливою особливістю цієї технології є дуже високий дозвіл друку - в середньому близько 20 мікрон. Для порівняння, типова товщина шару в аматорських і побутових принтерах, що використовують технологію FDM, становить близько 100 мікрон. Іншою цікавою особливістю процесу є відсутність необхідності побудови опор для нависаючих елементів конструкції. Не спечений порошок не видаляється під час друку, а залишається в робочій камері. Таким чином, кожен наступний шар має опорну поверхню. Крім того, невитрачений матеріал може бути зібраний з робочої камери після завершення друку і

використаний заново. DMLS виробництво можна вважати фактично безвідходним, що важливо при використанні дорогих матеріалів; наприклад, дорогоцінних металів. Технологія практично не має обмежень по геометричній складності побудови, а висока точність виконання мінімізує необхідність механічної обробки надрукованих виробів [4].

Технологія DMLS володіє декількома перевагами в порівнянні з традиційними виробничими методами. Найбільш очевидним є можливість швидкого виробництва геометрично складних деталей без необхідності механічної обробки. Виробництво є практично безвідходним, що вигідно відрізняє DMLS від традиційних технологій. Технологія дозволяє створювати кілька моделей одночасно з обмеженням лише за розміром робочої камери. Побудова моделей займає близько кілька годин, що незрівнянно вигідніше, ніж ливарний процес, який може займати до декількох місяців з урахуванням повного виробничого циклу. З іншого боку, деталі, вироблені лазерним спіканням, не володіють монолітністю, а тому не досягають тих же показників міцності, що і відлиті зразки, або деталі, вироблені традиційними методами.

DMLS активно використовується в промисловості зважаючи на можливість побудови внутрішніх структур цілісних деталей, недоступних за складністю традиційним методам виробництва. Деталі з комплексною геометрією можуть бути виконані цілком, а не зі складових частин, що сприятливо впливає на якість і вартість виробів. Так як DMLS не вимагає спеціальних інструментів (наприклад, ливарних форм) і не виробляє великої кількості відходів, на відміну від традиційних методів, виробництво дрібносерійних партій за допомогою цієї технології набагато вигідніше, ніж за рахунок традиційних методів. Технологія DMLS застосовується для виробництва готових виробів малого і середнього розміру в різних галузях, включаючи аерокосмічну, стоматологічну, медичну та ін. Типовий розмір області побудови існуючих установок становить 250x250x250мм, хоча технологічних обмежень на розмір не існує – це лише питання вартості пристрою. DMLS використовується для швидкого прототипування, знижуючи час розробки нових продуктів, а також у виробництві,

дозволяючи скорочувати собівартість дрібних партій і спрощувати складання виробів складної геометричної форми [4,16].

1.2 Матеріали для 3D друку та аналіз методів постобробки

В українській промисловості дуже різноманітно представлені пластики для 3D-друку.

Україна входить в топ країн з розвиткою структурою послуг 3D-друку. В особливості для FDM-друку промисловість надає дуже різноманітний спектр витратних матеріалів, які представлені трьома виробниками філаменту. Також особливістю ринку філаменту в Україні є різноманіття пластиків, які являються сумішшю декількох полімерів, з торговою назвою яку дав конкретний виробник. Вони мають свої властивості і не співпадають з пластиками, які пропонують інші виробники, а також виробники інших країн. Так, наприклад, назва ABS+ відноситься до пластику ABS, але зі зниженим згоранням при охолодженні. Компонент який додає цю властивість не документован і у різних виробників може відрізнятись.

ABS-пластик, акрилонітрілбутадієнстірол. Це найпопулярніший і один з кращих витратних матеріалів для 3D-друку. ABS не має запаху, не токсичний, ударостійкий і еластичний. Температура плавлення становить від 220°C до 240°C. У продажу зустрічається у вигляді порошку або тонких пластикових ниток, намотаних на котушки, як показано на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 - ABS-пластик для 3D-принтера [4]

3D-моделі, зроблені з ABS-пластика, довговічні і міцні. Асортимент кольорів ниток дуже великий, дозволяє втілити будь-яке кольорове рішення, але за допомогою цього матеріалу неможливо отримати прозорі моделі, адже прозорого ABS-пластика не існує [4].

ABS - пластик має гарну пластичність, рівномірну та однорідну якість поверхні надрукованих виробів. Вироби легко обробляються в етилацетаті, ацетоні, дихлоретані, дихлорметані. Чудово підходить для 3D-друку більшості ненавантажених виробів, до яких не пред'являються високі вимоги. Температура експлуатації від $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ABS - полімерний матеріал, спеціально розроблений для якісного FDM 3D-друку. Модифікована формула матеріалу дозволяє використовувати його для друку різних виробів при температурах нижче звичайного ABS пластику на вищій швидкості 3D-друку, при цьому абсолютно забувши про проблеми з адгезією до платформи, деламінацією та деформацією виробу. Вироби, які надруковані з ABS+ пластику, мають гарну рівномірну та однорідну поверхню. Цей матеріал призначений для 3D-друку великих виробів з можливістю подальшої обробки. Вироби витримують температури до -40°C , а також володіють підвищеною міцністю, внаслідок збільшення міжшарової адгезії. Температура експлуатації від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ [17, 18].

ABS+(plexiwire) – аналог попереднього пластику від виробника plexiwire.

СОРЕТ - більш жорсткий у порівнянні з ABS пластиком. Прозорий в натуральному кольорі, згинається в холодному стані без побіління в місці згину. Володіє високою прозорістю і рівномірним світлорозсіюванням. Для соРЕТ характерні: висока розмірна стабільність, глянцева поверхня; інертність до розчинників; висока адгезія між шарами при друці; відсутність деламінації і деформації при друці. Рекомендується для 3D-друку деталей технічного призначення - втулки, муфти, підшипники, несильно навантажені шестерні тощо. Використовується для 3D-друку прозорих виробів різного призначення - макети, декорації, вивіски. Температура експлуатації від -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$ [17, 19].

PETG(plexiwire)- аналог пластику соРЕТ від виробника plexiwire.

PLA-пластик – це самий екологічно чистий матеріал для 3D-принтерів. Він виготовляється із залишків біомаси, силосу цукрових буряків або кукурудзи.

PLA - пластик є найкращим матеріалом для початку роботи з 3D-принтером. Практично повна відсутність усадки у цього пластика сприяє правильному друку моделі, а також забезпечує високу роздільну здатність друку, що дозволяє створювати моделі геометрично складніші, ніж при використанні ABS. Матеріал призначений для 3D-друку різних виробів з підвищеною деталізацією, макетів, прототипів, іграшок. Температура експлуатації від -10°C до $+60^{\circ}\text{C}$ [17].

Маючи масу позитивних властивостей, PLA має два істотних недоліки. По - перше, виготовлені з нього моделі не- довговічні і поступово розкладаються під дією тепла і світла. По - друге, вартість виробництва PLA дуже висока, а значить і вартість моделей буде значно більшою за вартість аналогічних моделей, виготовлених з інших матеріалів. За зовнішнім виглядом PLA нитка не відрізняється від ABS нитки [4].

PC - прозорий матеріал для 3D-друку, з характерною високою жорсткістю і одночасно високими характеристиками міцності. Стійкий до високих температур. Використовується для 3D-друку деталей різного призначення: корпусів, кріплень з температурою експлуатації до 120°C .

PET - прозорий матеріал для 3D-друку, має високу механічну міцність і ударну стійкість. Стійкий до стирання і багаторазовим деформаціям при розтягуванні і згині, можливе гартування. Використовується для 3D-друку різних виробів, що експлуатуються при високих температурах. Температура експлуатації від -60 до $+220^{\circ}\text{C}$. Найчастіше після друку може з'явитися необхідність провести допоміжну обробку здобутої деталі (постобробка). В цьому випадку усі вище наведені пластики в практичному застосуванні мають деякі особливості, котрі у більшості випадків не описані виробником. Так пластики ABS та ABS+ при побудові на принтері у зв'язку з усадкою мають ефект відриву від платформи, а також підгинання краю на великих деталях. Але ці пластики мають найліпший показник для механічної обробки після друку, тому незважаючи на недоліки вони дуже часто використовуються [17, 18].

Нейлон. Друк нейлоном (рис. 1.6) схожий з печаткою ABS- пластиком. Але для друку нейлоном потрібна вища температура друку, що знаходиться в діапазоні від 260°C до 280°C та закриту камеру, що підігрівається. У нейлону висока здатність вбирати воду, а також більш тривалий період застигання. Великі незручності викликає необхідність відкачки повітря з екструдера через токсичність компонентів нейлону, або друк під потужною вентиляційною системою. Через низький коефіцієнт тертя нейлону в екструдері необхідно замінити механізм на спеціальний, з великим коефіцієнтом зацепу. Незважаючи на перераховані недоліки, нейлон з успіхом використовують в 3D друку, адже деталі з даного матеріалу виходять не такими жорсткими, як з ABS-пластика, і його можна використовувати в шарнірах ковзання.



Рисунок 1.6 - Нейлон для 3D-друку [4]

PLA пластик дуже жорсткий і погано обробляється механічно, хоча і не має недоліків типу усадки і відривання, тому частіше його використовують без подальшої обробки.

SOPET(PETG) має найбільшу жорсткість, але в процесі побудови з'являється дуже багато напливів у зв'язку з високою плинністю у розплавленому стані, які потім важко видалити, тому що пластик дуже жорсткий.

PC пластик жорсткий, не має усадки, але у зв'язку з високою температурою друку і поверхні платформи (110-120°C), його можливо використовувати тільки на принтерах, які підтримують ці параметри. Дослідження властивостей пластиків, які пропонують українські виробники дуже актуально, тому що вони дають можливість здобути найвищий показник якості і ціни на сучасному індустріальному просторі.

На сьогоднішній час технологія 3D-друку не завжди дозволяє нам отримати виріб готовий до використання відразу після друку. Після 3D-друку (зокрема FDM методом) досить часто стає проблема додаткової обробки деталі для поліпшення якості поверхні, а також зменшення відхилень розмірів від 3D-моделі.



Рисунок 1.7 - Слої надрукованої деталі FDM методом

І з цього погляду відмінність між технологіями лише в тому, що після одних потрібно більше часу на постобробку, а після інших менше, але факт залишається фактом, постобробка – це невід'ємний етап виготовлення виробу методом адитивного виробництва. Також при побудові деталей досить часто використовуються підтримуючі структури, які після друку потрібно видалити, і цей процес також негативним чином відзеркалюється на якості поверхні. В більшості випадків для постобробки використовується ручна механічна обробка, піскоструминна обробка, хімічна обробка. Дані методи використовують багато ручної праці або не дозволяють точно витримати розміри.

Розглянемо основні методи обробки друкованих деталей.

Хімічна обробка. Хімічна обробка в парах ацетона найбільш популярний метод. Принцип його полягає в тому, що деталь розміщується в замкненому просторі, де є пари якогось розчинника пластику (для ABS найчастіше використовується ацетон або етілацетат, для PLA - діхлорметан) та залишається на деякий час (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 - Хімічна обробка

Пари розчинника підплавляють поверхню деталі і таким чином усі нерівності згладжуються. Для прискорення цієї операції іноді ще додають підігрів внутрішнього простору (рис. 1.9).

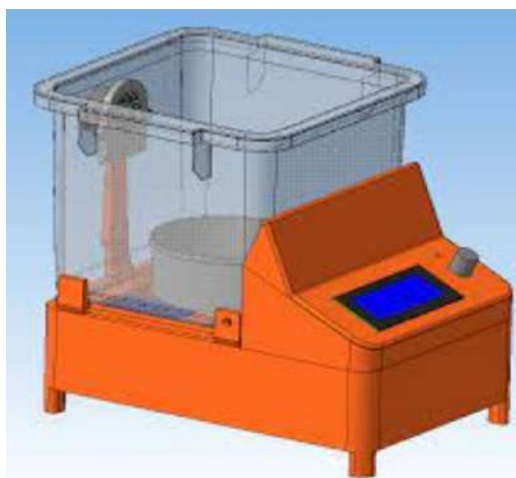


Рисунок 1.9 - Конструкція парової камери

Але цей метод має недоліки. Так великі за розміром деталі сглажуються нерівномірно, у зв'язку з тим що пари у камері розповсюджуються теж нерівномірно. Цей недолік можливо компенсувати примусовим потоком повітря в камері, а також обертанням платформи з деталлю. Другий недолік хімічного методу полягає в тому, що сглажуються усі гострі грані та дрібні елементи, тому він може застосовуватися лише для дизайнерських макетів, но не для технічних деталей.

Третій недолік з'являється при обробці серії деталей, при цьому неможливо досягнути повторюваності, у зв'язку з тим що неможливо кожного разу витримати однакову щільність розчиненого у повітрі розчинника при кожному запуску процесу обробки.

Ручне шліфування. Шліфування робиться ручним методом або за допомогою наждачного папіру або ручними електроінструментами. Шліфування починається спочатку наждачним папіром з низькою зернистістю (200-250), потім потрібно переходити на більш високу - 600, 1000, 2000. Недоліки методу в тому, що на це витрачається дуже багато часу ручної праці, також немає повторюваності деталей, окрім того матеріал видаляється нерівномірно на деталях з великою кількістю поверхонь.

Шпаклювання. Для позбавлення щілин на бічних поверхностях використовують затирання спеціальною шпаклевкою для пластику (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Шпаклювання поверхні

Шпаклювання ефективно заповнює щілини, але після цього все одно потрібно шліфуванням вирівняти поверхню. Також цей метод псує естетичний вигляд виробу, тому його найчастіше використовують для подальшої ґрунтовки та фарбування.

Ґрунтовка та фарбування. Ґрунтовка – це процес покриття деталі спеціальним матеріалом. В основному він служить основою для подальшої фарбувальної роботи. Ґрунтовка може бути виконана тільки після того, як деталь відшліфована наждачним папіром з помірною зернистістю (близько 600). Після

грунтування деталей фарбується. Процес фарбування використовується для покращення естетичного вигляду деталі. Коли потрібна точність розмірів, дана методика не може бути використана.

Піскоструминна обробка. Цей метод більш продуктивний по часу і дає якісну поверхню. Суть методу в тому, що деталь розміщується у закритій камері і на неї спрямовується потік дрібних частинок, які знімають поверхневий шар та залишають рівномірну матову поверхню. Не висока повторюваність, хоч і більша за попередні методи. Даний метод найбільш часто використовують для обробки поверхні під фарбування (рис. 1.11).

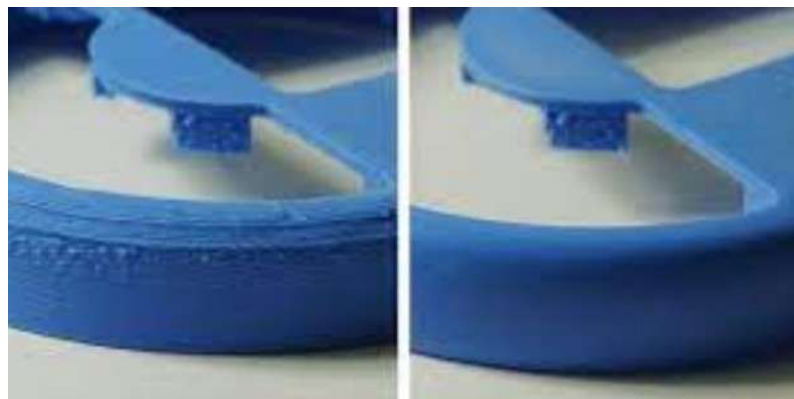


Рисунок 1.11 - Піскоструминна обробка

Галтування. Метод полягає у тому, що виріб розміщується у барабані, заповненому пластиковими кульками. Він здійснює вібраційний рух, а також обертання. При терті виробу о кульки нерівності деталей згладжуються (рис. 1.12).



Рисунок 1.12 - Галтувальний барабан

Цей метод є повністю автоматичним. Але у нього багато недоліків. По-перше, це дрібні елементи, які на моделі можуть бути відірвані від поверхні. Також неможливо контролювати зменшення розмірів. Цей метод залишає полоси від 3 D-друку, хоча робить їх менш помітними (рис. 1.13).



а)

б)

Рисунок 1.13 - Деталь до галтування (а) та після нього (б)

Фрезерування після FDM- друку є додатковим процесом обробки для покращення якості або досягнення певних характеристик у 3D-друкованих деталях. Після завершення процесу FDM- друку, отримана деталь може мати невеликі недоліки, сліди шарів або інші недосконалості, пов'язані з самим процесом друку. Для фрезерування після FDM-друку потрібен спеціалізований фрезерний верстат, обладнаний відповідними налаштуваннями та інструментами. Фрезерування після друку може бути особливо корисним для створення прототипів, функціональних моделей або деталей, які вимагають більш високої точності та якості поверхні, ніж може надати сам процес друку. Якість поверхні після фрезерування залежить від декількох факторів, включаючи вихідну якість FDM-друку, матеріал, що використовується для 3D-друку, параметри фрезерування та якість фрезерного верстата. Якщо деталь, отримана в результаті FDM-друку, має нерівності, сліди шарів або інші дефекти поверхні, то фрезерування може не повністю усунути ці недоліки. Чим гладкіша і точніша стартова поверхня, тим кращий результат фрезерування.

Різні матеріали, що використовуються в процесі FDM-друку, можуть мати різні властивості і поведінку при фрезеруванні. Деякі матеріали можуть бути більш придатні для фрезерування, так як вони легше обробляються, мають меншу схильність до задирок і пропонують кращу якість поверхні. Налаштування та параметри, що використовуються при фрезеруванні, такі як подача, глибина різання, тип фрези тощо, впливатимуть на якість поверхні. Належне налаштування параметрів фрезерування допоможе досягти оптимальних результатів. Використання високоякісного фрезерного верстата з точними двигунами та надійним керуванням дозволяє досягти більш гладкої та точної обробки поверхні.

Шорсткість поверхні після фрезерування залежить від декількох факторів, включаючи тип використовуваного матеріалу, якість та налаштування фрезерного верстата, а також якість та точність вихідного FDM-друку. Відсутність високої якості у будь-якому з цих етапів може призвести до більш шорсткої поверхні

після фрезерування. Важливо відзначити, що шорсткість відрізнятиметься в залежності від складності геометрії деталі, а також використовуваного інструменту та налаштувань фрезерного верстата. Сам процес FDM-друку може залишити сліди шарів і невеликі нерівності на поверхні деталі. Якість фрезерування і, отже, шорсткість поверхні залежить від точності руху інструменту, його гостроти та швидкості, а також особливостей матеріалу, з яким працюють. Якщо матеріал надто м'який або має нерівномірні властивості, фрезерування може спричинити відколи або інші неоднорідності. Для досягнення найкращої якості поверхні після фрезерування слід звернути увагу на такі аспекти.

Якість та налаштування FDM-друку. Чим краща якість друку, тим менше потрібно видаляти матеріалу під час фрезерування.

Вибір відповідного матеріалу: Деякі матеріали можуть надати гладку поверхню після фрезерування, ніж інші.

Правильні налаштування фрезерного верстата. Оптимальні швидкості та подачі інструменту, а також правильне закріплення деталі на верстаті допоможуть досягти кращого результату.

Фрезерування після FDM-друку є актуальним та привабливим для багатьох сфер застосування. Вивчення фрезерування після FDM- друку залишається важливим, оскільки може надати безліч переваг у виробництві чи прототипуванні:

- покращення якості поверхні; фрезерування може усунути сліди шарів та інші недоліки, що особливо корисно, якщо потрібна висока точність та гладкість поверхні;
- точність, що досягається; комбінування FDM-друку з фрезеруванням дозволяє досягти більш високої точності деталей, ніж може забезпечити тільки 3D-друк.

Комбінування різних методів обробки може надати додаткові можливості у створенні складних деталей та виробів з покращеними характеристиками.

2 МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБЛАДНАННЯ

Методи проведення дослідження - експериментальний та науково-дослідний.

Для FDM-друку використовувався 3D-принтер RepSystem V2.1 (дод.А, рис. А1). Особливість даної моделі полягає в тому, що він має дві незалежні каретки, на яких встановлені різні сопла. Таким чином, можливо друкувати соплами різних діаметрів та різними пластиками одночасно. Усі дані принтера зведені в таблиця А1 (додаток А).

При фрезеруванні після FDM-друку використовувались два ЧПК верстати: Profi+ PCB та Profi+ Wood (дод. А, рис. А.2, таблиця А.2). Profi+ PCB - це настільний верстат для обробки неметалевих деталей. В даній роботі він використовувався для обробки різних матеріалів в першій частині експериментів.

Для виконання другої частини експериментів (визначення оптимальних подач та швидкості різання) даного верстата недостатньо, у зв'язку з тим що у нього максимальні подачі 600 мм/хв та максимальні оберти 12000 об/хв. Тому в даній роботі використовувався ще один ЧПК верстат с більш потужними характеристиками - Profi+Wood. Його зовнішній вигляд зображений на рис. А.3 (додаток А) та характеристики в таблиця А.3 (додаток А).

Висоту мікронерівностей R_{a1} вимірювали на профілографі-профілометрі 171621 на зразках після FDM-друку та фрезерування. Точність розмірів досліджували за допомогою механічного мікрометра з точністю 0,01 мм. Для дослідження зразків використовували цифровий мікроскоп MikroView 500х.

3 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Визначення режимів 3D друку

При використанні 3D-друку для здобуття кінцевого виробу високої якості, використовують друк з соплами малого діаметру: від 0,4 до 0,2 мм, а також зменшують висоту шару до 0,1 і навіть до 0,05 міліметрів. Але при цьому час друку може дуже збільшитися, і одна деталь середнього розміру може друкуватися більше доби. Також сопла малих діаметрів мають схильність забиття фракціями, які можуть бути у пластику для принтера і тому вірогідність успішного друку зменшується. Також деталі, здобуті друком соплами малого діаметру, мають меншу міцність в порівнянні з деталями, надрукованими великими соплами. Так як метою дослідження є обробка друкованих деталей на ЧПК верстаті, то потрібно забезпечити максимальну міцність, максимальну швидкість та відсутність пор. Зведемо у таблицю умови досягнення високої якості друку і умови потрібні для подальшої постобробки фрезеруванням (дод. Б, таблиця Б1).

Виходячи з цього, проведемо більш детальний аналіз усіх факторів та умов друку, які будуть тим чи іншим способом оказувати вплив на послідовую обробку.

1. Час друку. Як було сказано вище, на час впливає якість, чим вона краще тим вище час. Для послідущої обробки якість не важна, але час є важливим критерієм. Якщо ми говоримо про обробку на ЧПК, то зазвичай розуміємо не одиничну деталь, а партію. Тому час виготовлення деталей повинен бути як можливо меншим.

2. Діаметр сопла та висота шару. Висота шару та діаметр сопла пов'язані параметри. Зазвичай не рекомендують перевищувати висоти шару на одну третину від діаметру сопла. При збільшенні висоти шару пластик буде менше прогріватися і буде зменшуватися міжшарова адгезія, а також будуть з'являтися пори у внутрішній структурі (дод. Б, рис. Б.1). Так на рис. Б.1 можна побачити,

що при збільшені висоти шару пори стають більш великими, що буде негативно впливати на фрезеруванні. Але більша висота шару зменшує час друку. І цю залежність потрібно дослідити експериментальним шляхом та вибрати оптимальний варіант. Подивимось залежність часу від діаметра сопла та висоти шару для експериментальної заготовки: прямокутник розміром 15x15x50 мм (дод. Б, таблиця Б.2).

3. Пустоти та заповнення. Пустоти в деталі позначаються дуже негативним чином на подальшому фрезеруванні. Якщо при 3D-друці щілини можливо закрити заповненням, то при знятті шару фрезою вони усі вийдуть на поверхню. Так на рис. Б.2 синім обведена поверхня після друку, а червоним – пори, які з'явилися після фрезерування. Дана деталь була надрукована зі 100% заповненням, але в неї все одно є внутрішні пустоти.

Для роботи з 3D-принтером необхідна програма-слайсер для створення коду друку деталі. Є багато програм-слайсерів для підготовки G-коду програми для друку. Найбільш поширені з них це: PrusaSlicer; Simplify3d; Cura. PrusaSlicer та Cura є відкритими, а Simplify3d - пропріетарною. Принтер, який використовується для друку найбільш оптимізований під налаштування PrusaSlicer, тому ця програма і буде використовуватися для створення коду. Для здійснення нарізки деталі в PrusaSlicer використовується більше 100 налаштувань. Перерахуємо основні з них та виділимо ті, які здійснюють безпосередній вплив на наш експеримент.

Налаштування програми складаються з трьох вкладок. Перша відповідає безпосередньо за режими друку, друга - за матеріал, третя – за фізичні налаштування принтера. Найбільш цікавою для нас є перша вкладка - шари та периметри (дод. Б, рис. Б.3). Тут важливими параметрами є «висота шару» та «кількість периметрів» (дод. Б, рис. Б.4). На рис. Б.4 результат слайсингу з одним (праворуч) та трьома (ліворуч) периметрами. При послідовної обробці зовнішній шар буде знятий фрезою, тому для забезпечення однорідної структури периметри краще зробити як більше тонше, тому вибираємо цей параметр рівним одиниці.

Заповнення (дод. Б, рис. Б.5) - це є шаблон та щільність матеріалу, яким заповнюється внутрішній об'єм 3D моделі. В налаштуваннях є параметри як і шаблонів, (дод. Б, рис. Б.6) так і щільності (дод. Б, рис. Б.7). Для обробки потрібно найбільше заповнення для уникнення пор в процесі фрезерування, тобто це буде 100%. Заповнення з параметром «100%» підтримує тільки один із шаблонів «rectilinear», тому він і буде використовуватися в процесі експерименту. Заповнення з параметром 100% може бути недостатньо для повної відсутності пор, тому що розробники програм-слайсерів не розраховували, що шари в процесі постобробки можуть зніматися більше за внутрішній периметр. Тому цього параметру недостатньо. Щоб виправити це, будемо користуватися ще одним параметром друку - «потік». Цей параметр вказує, наскільки пластика буде видаватися більше, ніж розраховано програмою. Але сильно його збільшувати не можна, тому що зайвий пластик буде заважати переміщенню головки принтеру, і її можна поламати. Максимум даного параметру будемо з'ясовувати експериментальним шляхом.

В таблиці Б.2 (Додаток Б) була приведена залежність часу друку від висоти шару та діаметра сопла. Так як нам не потрібна високоякісна поверхня, то основним критерієм вибору режимів виберемо час друку. Тому не враховуємо в результатах досліджень сопла малих діаметрів від 0,2 до 0,6 мм. Але з висотою шару так зробити не можливо, так як є нюанс, який необхідно дослідити. При друку FDM методом пластик наноситься шарами, і щоб шари спікалися між собою, потрібна гарна міжшарова адгезія. Коли сопло наносить верхній шар, воно прориває також шар, який знаходиться нижче, таким чином запікаючи їх між собою. При збільшенні висоти шару сопло знаходиться далі і видає більше нового пластика, тому нижній шар прогрівається гірше і міжшарова адгезія теж погіршується. Також, як було показано на рис. Б.1, дод. Б при збільшенні висоти шару збільшується розмір пор, а як наслідок зменшується розмір площини контакту. Так на рис. Б.8 [20], дод. Б червоним кольором показана область контакту, де потрібна адгезія, а бузковим пори, які погіршують контакт. Цей процес і потрібно дослідити. Виходячи з цього вибираємо для дослідів друк

соплами 0,8 та 1,2 мм, а також висоти шарів від 0,2 (мінімально рекомендованого для цих сопел) до 0,5 мм. Тепер зведемо всі параметри друку, які не будуть змінюватися в процесі експерименту, а також зведемо в таблицю змінні параметри (дод. Б, таблиця Б.3), які потрібно дослідити.

Постійні параметри: програма для створення коду - PrusaSlicer; кількість периметрів - 1; шаблон заповнення - Rectilinear; щільність заповнення - 100%.

Для друку вибираємо пластик PC, як найбільш ефективний по обробці і який не має усадки при друці. Для максимальної адгезії робочу температуру друку краще поставити максимальну для матеріалу, щоб шари краще склеювалися в шкodu якості. Тому для друку вибираємо температуру сопла 250°C, а температуру столу - 120°C. На рис. Б.9 та Б.10, дод. Б, показані результати друку соплами 1,2 та 0,8 мм з висотою шару від 0,2 до 0,5 мм. В результаті виявилось, що зразки з більшою висотою шару мають погану адгезію між шарами, а на шарі товщиною 0,5 мм легко розколюються навіть гострим ножом. При фрезеруванні також було виявлено поява сколів та відшаровування шарів (дод. Б, рис. Б.11). В протипагу цьому зразки з шаром 0,2 мм як для сопла 1,2 так і для 0,8 мм показали дуже високу міцність при обробці. Таким чином, зразки шаром 0,2 мм найбільше задовольняють умовам міцності. Тому з цим параметром продовжуємо дослідження внутрішніх пор. Для цього знов надрукуємо зразки, тільки тепер будемо збільшувати потік для зменшення пор, використовуючи шар 0,2 мм. Дані зведені в дод. Б, таблиця Б.4 Також добавлено заповнення 90% для порівняння розміру пор. В процесі друку було виявлено, що при збільшенні екструзії більш ніж 115%, на поверхні з'являється дуже багато зайвого пластика, що привело до руйнування нагрівальної голови принтера. Тому друк виконувався з максимальною екструзією 115% (дод. Б, рис. Б.12). Для подальшого дослідження пор було проведено зняття верхніх шарів методом фрезерування (дод. Б, рис. Б.13). Після фрезерування зразки були переглянуті на мікроскопі (дод. Б, рис. Б.14- Б.21).

Як можна побачити на рисунках, при заповненні 90% є дуже багато порожнин (дод. Б, рис. Б.14, Б.19) - виділені синім. При заповненні 100% їх

значно менше, при потоку 105% вони носять одиничний характер. Таким чином, на заповненні 100% та вище повністю зникають. При потоку 115% пластику видається настільки багато, що шари кладуться зі спотвореннями, особливо зі соплом 1,2 мм (дод. Б, рис. Б.21). Це додає міцність і можливо використовувати для отримання більш міцнішої моделі, але потрібно враховувати, що тоді збільшується навантаження на нагрівальну голову принтера і є вірогідність руйнування.

По результатам проведених досліджень можна сказати, що сопла діаметром як 1,2 так і 0,8 мм показали приблизно однакові результати по наповненню. Для друку з найменшою кількістю пор найбільш придатні режими з екструзією 105 та 110%. З екструзією більше 115% друкувати не можливо у зв'язку з великою вірогідністю збою процесу друку. Як було сказано вище, сопло 1,2 мм дає менший час друку у порівнянні з соплом 0,8 мм, тому оптимальним режимом можна виділити друк соплом 1,2 мм з заповненням 100% і екструзією 105 або 110%.

3.2 Обробка різних типів пластиків

Пластики, які використовуються для 3D-друку мають неоднорідну структуру. Це може погіршити якість механічної обробки друкованих деталей. Крім того різні типи пластиків можуть по різному оброблятися, тому потрібно дослідити можливість обробки найбільш використовуваних матеріалів.

Для експерименту вибрали шість найбільш популярних матеріалів для 3D-друку: ABS, PLA, PC, CoPET, PBT, PA(Nylon). Тест на можливість обробки робили на трьохвимірних рельєфах контурними фрезами. Це найбільш складний тест у зв'язку з тим, що фреза виконує траєкторію в усіх напрямках по всім трьом координатам. Для цього тесту була створена 3D-модель деталі, яка має криві першого та другого порядку (дод. В, рис. В.1). На ній є плоскі поверхні (прямі та

під кутом), заокруглення, а також сферична вибірка. Для 3D-друку потрібно цю модель збільшити на величину припуску під фрезерування. На рис. В.1 цей припуск зображений помаранчевим кольором. Для обробки 3D-рельєфів використовували конічні фрези зі спіральною канавкою. Ці фрези найбільш оптимальні для даного метода фрезерування. Програма для обробки деталі була створена в програмі Mecsoft VisualCAM. Траєкторія обробки та симуляція приведені на дод. В, рис. В.2 та В.3. Траєкторія зроблена таким чином, щоб оброблялась лише половина деталі для порівняння того, що було після друку та після фрезерування. Перед фрезеруванням були роздруковані деталі на принтері з налаштуваннями, які були досліджені в п. 3.1, тобто вибраним режимом друку з соплом 1,2 мм, висотою шару 0,2 мм та посиленням потоком в 115%. Були надруковані шість деталей з різних матеріалів (дод. В, рис. В.4; на фото відсутній пластик PC). Фрезерування проводилося на режимах: частота обертання 12000 об/хв, подача від 100 до 400 мм/хв. Ці значення вибрані з характеристик обладнання.

ABS пластик показав дуже гарні результати як по якості, так і по процесу обробки. Зміна подачі не давала вплив на результати обробки. Після обробки була дуже чиста якісна поверхня (дод. В, рис. В.5). CoPET пластик показав гірші результати ніж ABS. В процесі фрезерування було незначне налипання стружки на поверхню матеріалу, через що погіршувалася якість поверхні (дод. В, рис. В.6). PLA пластик не вдалося обробити ніякими способами. При фрезеруванні матеріал налипав на фрезу таким чином, що подальше фрезерування було неможливим. Зміна обертів або подачі не змінювали результату, також було налипання, тому на цьому пластику не вдалося здобути хоч якусь фрезеровану поверхню (дод. В, рис. В.7). Nylon і PBT дали однаковий результат при процесі фрезерування стружка повністю не відділялась від деталі, та залишалася у вигляді лохміття, яке важко було повністю відділити (дод. В, рис. В.8). На PBT за допомогою гострого ножа можливо зняти цю розкуйовджену стружку, ця ділянка на дод. В, рис. В.8 обведена жовтим кольором, але це повністю скасовує переваги автоматичної обробки, тому деталь потрібно доводити до якісного стану. PC пластик показав

також гарні результати, як і ABS пластик. Процес фрезерування йшов чисто і була отримана якісна поверхня. Результати фрезерування зведені в таблиці В.1 (Додаток Б). Як видно таблиці В.1 (Додаток Б) найгірший результат показав PLA пластик. Його зовсім не можливо фрезерувати. Кращі результати фрезерування у Nylon, PBT та CoPET, але поверхня не достатньої якості. ABS і PC показали найкращі результати фрезерування.

3.3 Визначення оптимальних режимів фрезерування

В попередньому експерименті обробка здійснювалася так званим 3D фрезеруванням для отримання тривимірної поверхні другого або вищих порядків. Але частіше в промисловості використовуються площини першого порядку і для цього використовують так зване 2,5D фрезерування. Відмінність від повноцінної 3D обробки є у тому, що інструмент більшу частину часу рухається тільки по двом координатам X та Y, а рухи по Z використовуються для зміни шару або для підводу/відведення інструменту (дод. Г, рис. Г.1). Як можна побачити на рис. Г1 праворуч траєкторія інструменту постійно змінюється по всім трьом координатам, а ліворуч обробка виконується пошарово. При 2,5D обробці використовуються прямі фрези, які дають кращу якість поверхні, ніж конусні з радіусом. Також радіусні фрези залишають полоси на поверхні, і для того щоб їх позбутися, потрібно зменшувати шаг проходів до 0,1 мм, що дуже збільшує час обробки. Прямі кінцеві фрези можуть працювати з шагом до $\frac{2}{3}$ від діаметру, що значно покращує продуктивність процесу фрезерування.

Для даного експерименту будемо використовувати чистові пазові фрези. Ці фрези можуть бути з прямими ножами та гвинтовими ножами, а також відрізняються кількістю ножів (дод. Г, рис. Г.2). Фреза спіральна однозуба використовується для обробки пазів, уступів, обрізки матеріалу та чорнової обдирки рельєфів. Для обрізання матеріалу та обробки глибоких пазів за рахунок

одного зуба канавка для виведення стружки істотно збільшується, не порушуючи жорсткості фрези. Фреза спіральна тризуба за рахунок трьох зубів забезпечує тиху роботу і більш високу чистоту оброблюваної поверхні. Фреза двозуба з прямими канавками чудово працює на прямолінійне врізання в матеріал (засвердлювання), так як два робочі зуби сходяться в центрі і мають гарну канавку для виведення стружки. Використовується для обрізання матеріалу і обробки глибоких пазів за рахунок невеликої кількості зубів виготовляються більш глибокі канавки для виведення стружки [21].

Для наступного тесту розробимо деталь під фрезерування. В деталі необхідно поєднати декілька конструктивних елементів, щоб одночасно на усіх виявити спроможність кожної з типів фрез вести обробку. Трьохвимірною моделлю тестової деталі представлена дод. Г, рис. Г.3. В даній деталі є верхня плоска поверхня для торцевого фрезерування, отвір для спірального розточування, карман з тонкою стінкою (товщина 1 мм) та зовнішня вертикальна поверхня із заокругленням та прямими кутами. На моделі для друку додані фланці для закріплення та вся модель збільшена. Далі зробимо програму обробки деталі. Програму створюємо у програмі Mecsoft RhinoCam [22]. Етапи обробки представлені у дод. Г, рис. Г.4 – Г.9.

В процесі обробки виявилися такі особливості: фрези з гвинтовою канавкою добре виконали усі операції, а на фрезі з прямими зубами обробка не вдалася з причини налипання пластику на фрезу і неможливістю продовження обробки без очищення фрези (дод. Г, рис. Г.10). На фрезах зі спіральними зубами в процесі обробки була також виявлена особливість: при прямолінійному врізанні було невелике підпалення пластику, але при зміні траєкторії на кутову, підпалення не з'являлось (дод. Г, рис. Г.11).

Наступний етап - це визначення оптимальних режимів швидкості різання та подачі. Як показано вище, фреза з прямими ножами не дає можливості неперервної обробки, тому в цій частині експерименту будемо використовувати першу та другу фрези із представлених на дод. Г, рис. Г.2. Створимо тестову модель для обробки на якій буде декілька однакових поверхонь, щоб на одній

деталі можна було тестувати декілька режимів (дод. Г, рис. Г.12). Модель, представлена дод. Г, рис. Г.12 має 5 поверхонь розміром 10x15 мм. Зробимо програму обробки поверхонь (дод. Г, рис. Г.13) та виберемо режими.

В сучасній технології ЧПК обробки дуже велику долю займають верстати з високошвидкісними шпинделями. Ці шпинделі оснащені інтегрованими безколекторними (BLDC) моторами з частотним регулювання. У цих двигунів особливість в тому, що вони не можуть працювати на обертах нижче 6000 а деякі навіть нижче 8000 обертів за хвилину. Але на більшості виробництв встановлені верстати з силовими асинхронними двигунами, які працюють на обертах нижче 3000 або нижче 1500. Так як ці верстати використовуються більший період часу, ніж високошвидкісні, більшість рекомендованих режимів обробки розраховані як раз на них, і не можуть бути використані для високошвидкісної обробки. Тому вибір режимів в більшості джерел зводяться до робочих характеристик конкретного інструмента, а виробник інструмента вказує лише приблизні рекомендовані параметри. Так для фрез від виробника ukr-tool [21], які використовуються в цієї роботі, дані режими без прив'язки до матеріалу, хоча фреза, по даним виробника, може використовуватись по дереву, акрилу, капроніту, капролону, композиту та alucobond.

Виходячи з усього перерахованого, виберемо діапазон параметрів, які задовольняють характеристикам верстата та інструмента. Вибрані параметри фрезерування: верстат: Profi+ Wood; діапазон подач : від 480 до 2800 мм/хв.; діапазон частот: від 15000 до 24000 об/хв.; фреза - діаметр 3 мм кінцева пазова одно- та трьохзуба; кількість проходів – 2; глибина різання чорнового проходу - 1 мм; глибина різання чистового проходу – 0,3 мм; ширина фрезерування – 1 мм.

Після фрезерування на отриманих зразках було проведено вимірювання шорсткості поверхні. У зв'язку з тим, що пластик після друку був в процесі усадки сильно вигнутим, було потрібно використати додатковий притиск для вирівнювання і вимірювання шорсткості на приладі (дод. Г, рис. Г.14). Всі отримані дані зведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати вимірювання шорсткості

Номер оброблюваної заготівлі	Номер поверхні обробки	Подача, мм/хв	Частота обертання, об/хв	Ra, мкм	Середнє значення Ra, мкм
Вихідна шорсткість Ra 17,6					
Однозуба фреза					
2	1	480	15000	2,51; 2,43	2,47
	2	840	15000	2,32; 2,25	2,29
	3	1200	15000	2,14; 2,06	2,10
	4	1800	15000	1,83; 1,81	1,82
	5	2700	15000	1,97; 2,08	2,03
3	1	1800	18000	1,75; 1,71	1,73
	2	1800	19000	1,65; 1,60	1,63
	3	1800	20000	1,55; 1,39	1,47
	4	1800	22000	1,23; 1,18	1,21
	5	1800	24000	1,29; 1,35	1,32
Тризуба фреза					
4	1	480	15000	1,11; 1,05	1,08
	2	840	15000	0,95; 1,08	1,02
	3	1200	15000	0,92; 1,05	0,98
	4	1800	15000	0,91; 0,82	0,87
	5	2700	15000	0,93; 0,95	0,94
5	1	2700	18000	0,90; 0,81	0,86
	2	2700	19000	0,82; 0,85	0,84
	3	2700	20000	0,80; 0,78	0,79
	4	2700	22000	0,63; 0,65	0,64
	5	2700	24000	0,70; 0,79	0,75

Як ми бачимо із таблиці 3.1 фрезерування кардинально поліпшило якість поверхні. Для однозубої фрези можна рекомендувати режим: числа обертів - 22000 об/хв та подача - 1800 мм/хв., який приводить до зниження шорсткості Ra 1,21 мкм. Для тризубої фрези можна рекомендувати режим: числа обертів – 22000 об/хв та подача 2700 об/хв., який приводить до зниження шорсткості Ra 0,64 мкм.

3.4 Визначення точності розмірів

Окрім шорсткості поверхні, параметр який є дуже важливим для моделей в промисловості - це точність розмірів. Одна з проблем 3D-друку є в тому, що точність не може бути вищою, ніж діаметр сопла. Крім того точність дуже залежить від типу поверхні та величини розміру. Так, наприклад, отвори до 3 мм при 3D-друці можуть бути менше 1 мм, а отвори більше 20 мм можуть бути з відхиленням мінус 1 мм. Особливості FDM-друку дають те, що отвори завжди мають відхилення в мінус від базового розміру, а лінійні розміри можуть мати відхилення як в плюс, так і в мінус. ЧПК фрезерування повинно дати результат з більшою точністю.

Також FDM-друк не дає можливості виготовити деталь зі стінкою товщиною 1 мм. Більшість програм-слайсерів або роблять код, де цієї стінки зовсім нема або роблять її товще, чим потрібно. Причина цього захована у тому що в налаштуваннях програми є параметр ширина екструзії, і вона зазвичай ставиться трохи більше діаметра сопла, а товщина стінки повинна бути кратно цьому значенню. Для розмірів більше 5-ти діаметрів сопла, цей ефект не спричиняє великого відхилення, але розміри близькі до 1 мм друкуються дуже погано. Окрім того із за недостатньої адгезії стінки будуються не дуже міцними.

Перевіримо на практиці наскільки фрезеруванням можна покращити ці параметри. Зробимо дві деталі для друку: одну з розміром стінки 20 мм, другу 3 мм та обробимо кінцевою фрезою їх до розміру 18 мм та 1 мм (припуск 1 мм з кожної сторони). Кожної моделі зробимо по 5 екземплярів і зробимо проміри в трьох точках для розміру 18 мм та двох точках для розміру 1 мм на кожній моделі. Дані зведені в таблиць 3.2 та 3.3.

Таблиця 3.2 - Вимірювання деталі з контрольним розміром 18 мм

Номер зразка	Замір №1, мм	Замір №2, мм	Замір №3, мм	Середнє значення округлене, мм	Відхилен-ня, мм
1	18,06	18,05	18,05	18,05	+0,05
2	18,05	18,04	18,04	18,04	+0,04
3	18,07	18,06	18,07	18,07	+0,07
4	18,07	18,07	18,07	18,07	+0,07
5	18,06	18,05	18,06	18,06	+0,07
Середнє значення				18,06	+0,06
Розбіг значень					0,03

Таблиця 3.3 - Вимірювання деталі з тонкою стінкою розміром 1 мм

Номер зразка	Замір №1, мм	Замір №2, мм	Середнє значення округлене, мм	Відхилення, мм
1	1,16	1,17	1,17	+0,17
2	1,16	1,16	1,16	+0,16
3	1,15	1,15	1,15	+0,15
4	1,15	1,16	1,16	+0,16
5	1,16	1,16	1,16	+0,16
Середнє значення			1,16	+0,16
Розбіг значень				0,03

За результатами таблиць 3.2 та 3.3 можна зробити висновки, що обробка фрезеруванням дає значне підвищення точності готової моделі. Також можна помітити, що усі відхилення розмірів ідуть в плюс, та самі відхилення мають між собою розбіг усього 0,03 мм. Це значить, що неточність з'явилась або в системі керування ЧПК, або в програмі підготовки коду (САМ модуль), та за допомогою корекції в системі САМ-ЧПК можливо досягнути значень відхилення 0,03 мм, що дорівнює 8-му квалітету точності.

4 ОЦІНКА ОЧІКУВАНОЇ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБКИ

Для підвищення продуктивності, якості поверхні, точності та стабільності розмірів в якості постобробки після FDM-друку замість ручного шліфування запропонована обробка фрезеруванням на верстатах ЧПК. Вхідні дані зведені в таблиці 4.1. Розрахунок економічної ефективності буде зводитись до визначення технологічної собівартості річного випуску деталі та вибору найбільш економічного варіанта.

Таблиця 4.1 – Вхідні дані

Розрахункові параметри	Варіанти технологічного процесу	
Річна програма випуску деталей N_p , шт	100	100
Тип операції	Ручне шліфування	Обробка фрезеруванням на верстаті з ЧПК
Модель верстата	-	ProfiPlus PCB
Штучний час $T_{шт}$, хв.	120	15
Розряд основного робітника	5	4
Розряд наладчика	-	-
Число верстатів, що обслуговуються за зміну верстатником	-	3
Тарифна ставка основного робітника, грн/год	65,1	57,5
Маса заготовки для однієї деталі, грам	40	20
Цена матеріала грн за кг	250	250
Число змін m	1	1
Ціна верстата F , грн	-	70000
Сервісний термін обслуговування верстата n , років	-	6
Норма амортизаційних відрахувань H_a %	-	15
Потужність верстата N	-	0,8

Заробітну плату основних виробничих робітників розрахуємо за формулою (4.1) [23, с.13]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^{m_{on}} t_{um_i} \cdot C_{тар} \cdot K_o \cdot k_{доп.} \cdot k_{соц.}, \quad (4.1)$$

де m_{on} - кількість операцій у технологічному процесі (таблиця 4.1);

t_{um_i} - норма штучного часу виконання i -ої операції, год (таблиця 4.1);

$C_{тар}$ - годинна тарифна ставка виробничого робітника на операції, грн.
[23, таблиця А.1(Додаток А), с.33];

K_o - коефіцієнт, що враховує оплату основного робітника при багатOVERSTATному обслуговуванні [23, таблиця 2.1, с.13];

$k_{доп.}$ - коефіцієнт, що враховує додаткову заробітну плату [23, с.13];

$k_{соц}$ - коефіцієнт, що враховує страхові внески [23, с.13].

Дані по заробітній платі по техпроцесам зведені в таблицях 4.2 та 4.3

Таблиця 4.2 - Заробітна плата основного робітника за першим ТП

Найменування операції	$T_{шт}$, хв.	$C_{тар}$, грн	$k_{доп}$	$k_{соц}$	Z_o , грн
Ручне шліфування	120	65,1	1,2	1,4	208,7

Таблиця 4.3 - Заробітна плата верстатника за другим ТП

Найменування операції	$T_{шт}$, хв.	$C_{тар}$, грн	$k_{доп}$	$k_{соц}$	Z_o , грн
Фрезерна з ЧПК	15	57,5	1,2	1,4	11,6

Затрати на матеріали за обома варіантами розраховуємо за формулою (4.2):

$$Z_m = G \cdot C_m, \quad (4.2)$$

де G - витрати матеріалу на одиницю виробу, кг;

C_m - ціна одиниці виміру маси матеріалу, грн/кг.

$$Z_{m \text{ руч. шліф}} = 250 \cdot 0,04 = 10 \text{ грн}$$

$$Z_{m \text{ фрезер}} = 250 \cdot 0,02 = 5 \text{ грн}$$

Витрати на інструмент:

- для ручного шліфування;

витрати наждачного папіру на 10 деталей 220 зерн. - 1шт; 600 зерн. - 1 шт;
1000 зерн.- 1 шт.

Вартість одного листа 17 грн [24].

Загальні витрати на 1 деталь = $17 \cdot 3 / 10 = 5,1$ грн

- для ЧПК обробки твердосплавні фрези при роботі по пластику дозволяють без переточки обробити всю партію деталей, тому в розрахунках використовуємо тільки вартість фрези.

Вартість фрези - 150 грн.

Витрати на технологічну електроенергію розраховуємо за формулою (4.3) [23, с.15] та зведені в таблицю 4.4:

$$S_e = \frac{N_e \cdot k_N \cdot k_{\eta} \cdot k_{od} \cdot k_w \cdot t_{umk}}{\eta \cdot k_{\epsilon}} \cdot C_e, \quad (4.3)$$

де N_e - встановлена потужність головного електродвигуна, кВт;

k_N - середній коефіцієнт завантаження електродвигуна за потужністю (для верстатів з ЧПК прийняти рівним 0,9, для решти обладнання - 0,8);

k_{η} - середній коефіцієнт завантаження електродвигуна за часом (для верстатів з ЧПК прийняти рівним 0,7, для решти обладнання - 0,6);

k_{od} - середній коефіцієнт одночасності роботи всіх електродвигунів верстата (для верстатів з ЧПК прийняти рівним 1, для решти обладнання - 0,6);

k_w - коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі заводу (прийняти рівним 1,08);

η - коефіцієнт корисної дії обладнання (початкові дані);

k_{ϵ} - коефіцієнт виконання норм часу;

C_e - вартість 1 кВт×год електроенергії (тариф для підприємств становить 3,45 грн. за 1 кВт×год).

Таблиця 4.4 - Витрати на силову електроенергію за другим ТП

Найменування операції	$T_{шт, хв.}$	$C_e,$ грн./кВт·год	$N_e,$ кВт	k_N	k_q	$k_{од}$	k_W	η_e	k_b	$S_e,$ грн
Фрезерна з ЧПК	15	3,45	0,8	0,9	0,7	1	1,08	0,8	1,1	0,53

Інші загальновиробничі витрати розрахуємо за формулою (4.4) [23, с.16]:

$$I_n = 3_o \cdot k_{zag}, \quad (4.4)$$

де k_{zag} - коефіцієнт, що враховує інші загальновиробничі витрати, віднесені до заробітної плати основних виробничих робітників, або до суми основної заробітної плати основних виробничих робітників та витрат, пов'язаних з роботою обладнання відповідно; $k_{zag} = 0,20 \dots 0,25$.

$$I_{n \text{ шліф}} = 0,2 \cdot 208,7 = 41,7 \text{ грн};$$

$$I_{n \text{ фрез}} = 0,2 \cdot 11,6 = 2,32 \text{ грн}.$$

Витрати на обслуговування та ремонт обладнання розрахуємо за формулою (4.5) [23, с.16] та зведені в таблицю 4.5:

$$S_p = \frac{C_{mo} \cdot K_p \cdot C_p}{N}, \quad (4.5)$$

де C_{mo} - залишкова вартість обладнання, грн

K_p - коефіцієнт відрахувань до ремонтного фонду ($K_p \approx 0,02 \dots 0,04$).

Таблиця 4.5 – Витрати на ремонт та обслуговування обладнання по другому ТП

Найменування операції	Коефіцієнт відрахувань до ремонтного фонду, K_p	C_p	S_p , грн
Фрезерна з ЧПК	0,02	0,78	10,92

Амортизаційні відрахування на обладнання розрахуємо за формулою (4.6) [23, с.14] та зведені в таблицю 4.6:

$$A_{\text{вiд}} = \sum_{i=1}^{m_{\text{оп}}} \frac{K_i \cdot H_{\text{ai}} \cdot t_{\text{oi}}}{100 \cdot F_{\text{д}} \cdot 60}, \quad (4.6)$$

де K_i - первісна вартість обладнання (оснащення) на i -ої операції, грн.;

H_{ai} - річна норма амортизаційних відрахувань на обладнання (оснащення) на i -ої операції (%);

t_{oi} - основний (машинний) час на i -ої операції, хв;

$F_{\text{д}}$ - дійсний (ефективний) фонд часу роботи устаткування (оснащення), год.

Таблиця 4.6 - Відрахування на амортизацію обладнання за другим ТП

Найменування операції	$T_{\text{шт}}$, хв.	K , грн	$H_{\text{а}}$, %	$F_{\text{д}}$	$A_{\text{вiд}}$, грн.
Фрезерна з ЧПК	15	70000	15	2007	1,31

Узагальнені результати розрахунку технологічної собівартості обробки за варіантами наведено у таблиці 4.7

Таблиця 4.7 - Розрахунок елементів технологічної собівартості, грн.

Елементи собівартості		Варіанти ТП	
		Перший	Другий
Заробітна плата основного робітника	$З_{\text{о}}$	208,7	11,6
Затрати на матеріали	$З_{\text{м}}$	10	5
Відрахування на амортизацію обладнання	$A_{\text{вiд}}$	-	1,31
Витрати на ремонт та обслуговування обладнання	$S_{\text{р}}$	-	10,92
Витрати на різальний інструмент	$S_{\text{ін}}$	5,1	150
Витрати на електроенергію	$S_{\text{е}}$	-	0,53
Витрати інші	$I_{\text{н}}$	41,7	2,32
Технологічна собівартість	$C_{\text{т}}$	265,5	181,7

Розрахуємо умовний економічний ефект за формулою (4.7) [23, с.6]:

$$E_{\text{yp}} = (C_1 - C_2) \cdot N \quad (4.7)$$

$$E_{\text{yp}} = (265,5 - 181,7) \cdot 100 = 8380 \text{ грн}$$

Таким чином, річна економія від впровадження другого варіанту ТП за статтею собівартість може становити 8380 грн., що свідчить про ефективність запропонованої технологічної інновації.

5 РОЗРАХУНОК ПРИРОДНОГО ОСВІТЛЕННЯ В ЛАБОРАТОРІЇ

Природне освітлення - освітлення приміщень прямим або відбитим денним світлом (видима частина променевої енергії сонця). Організація раціонального природного освітлення на робочих місцях - одне з умов забезпечення нормальної виробничої діяльності людини. Недостатня освітленість робочого місця може спричинити професійне захворювання або виробничий травматизм. Продуктивність праці знижується при зорових роботах середньої важкості на 5... 6%, при важкій зоровій роботі на 15%, а при роботі в межах зорового сприйняття – на 40%.

Приміщення з постійним перебуванням людей повинні мати природне освітлення, яке забезпечується бічним, верхнім та комбінованим світлом. Бічне природне освітлення - освітлення приміщення через світлові прорізи у зовнішніх стінах. Верхнє природне освітлення - освітлення приміщень через світлові ліхтарі, прорізи у покритті або у стінах місць перепаду висот будівлі. Комбіноване освітлення - поєднання верхнього та бічного природного освітлення.

Основним нормативним документом, що визначає вимоги до організації освітлення в Україні є ДБНВ.2.5–28–2006 “Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення”.

Вхідні дані для розрахунку взяті з плану лабораторії та приведені на рисунках 5.1 і 5.2 та у таблиці 5.1

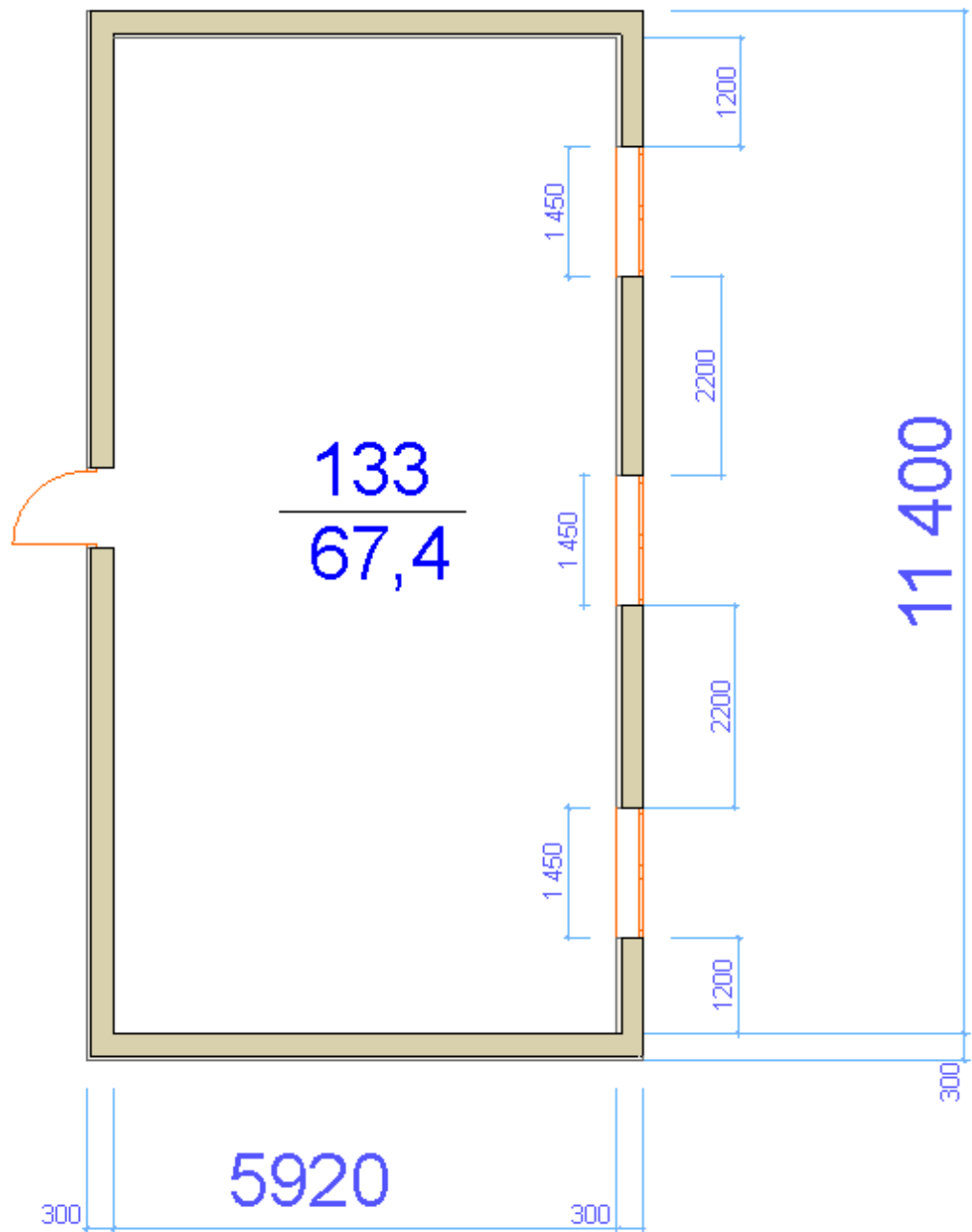


Рисунок 5.1 - Схема розміщення вікон

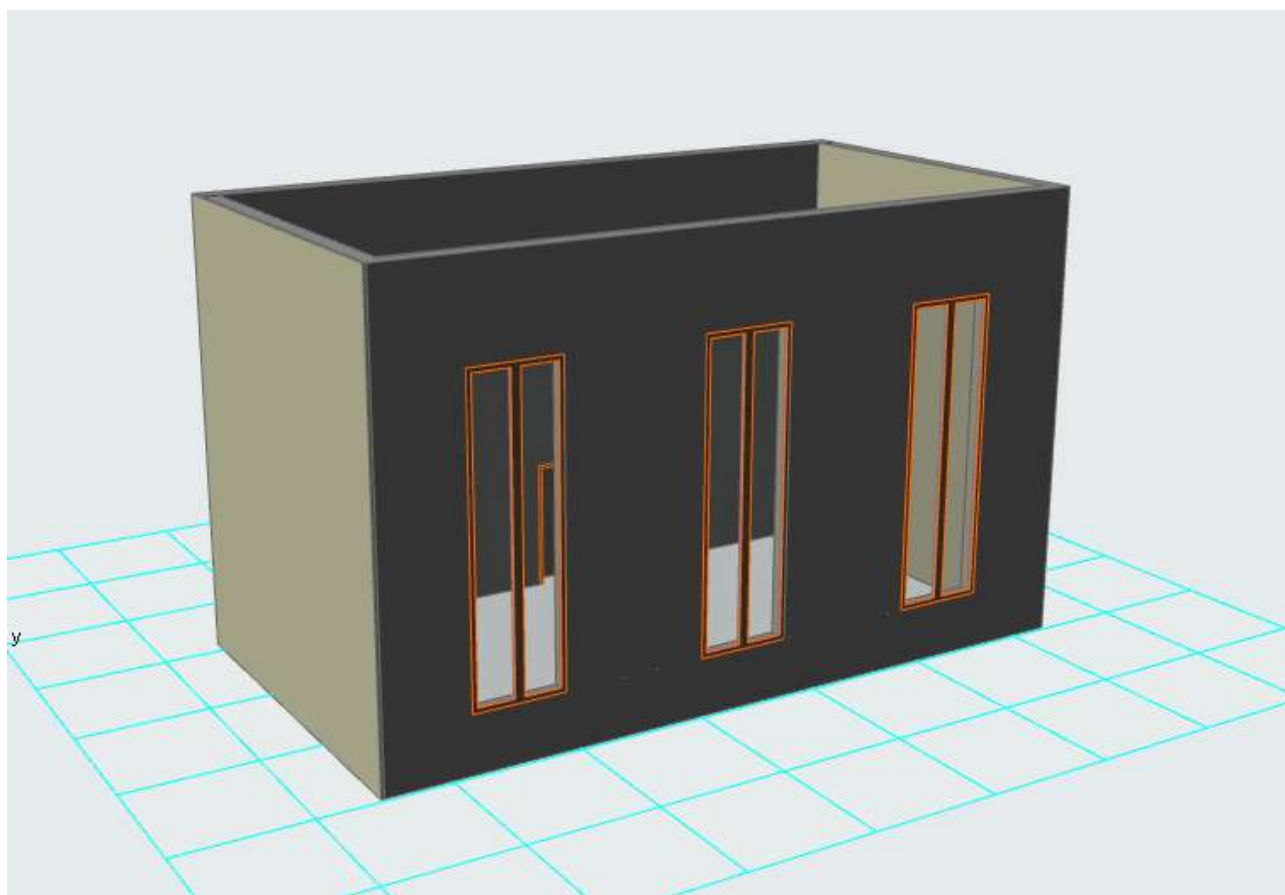


Рисунок 5.2 - Тривимірний вид розміщення вікон

Таблиця 5.1 Вхідні данні приміщення

Параметр	Умовне позначення	Значення
довжина виробничого приміщення, м;	A	11,4
ширина виробничого приміщення, м;	B	5,92
висота виробничого приміщення, м;	H	4,2
висота робочої поверхні, м;	h _p	1,1
Ширина вікон , м	H	1,45
Висота вікон , м	W	2,9

Розрахунок природного освітлення полягає у визначенні площі світлових прорізів за формулою:

$$S_v = (e_H \cdot K_{\text{буд}} \cdot K_z \cdot \eta_v \cdot S_{\text{п}}) / (\tau_0 \cdot r_1 \cdot 100)$$

де S_v – площі вікон, м²;

e_H – нормоване значення КПО, % визначається за формулою:

$$e_H = e_m$$

e – значення КПО за таблицею (дод. Д, таблиця Д.1);

m – коефіцієнт світлового клімату за таблицею (дод. Д, таблиця Д.2);

$S_{\text{п}}$ – площа підлоги, м²;

$K_{\text{буд}}$ – коефіцієнт, що враховує затінення вікон напроти стоячими будівлями, приймається в межах $1 \dots 1,5$;

K_3 – коефіцієнт запасу, приймається $1,5 \dots 2$;

τ_0 – загальний коефіцієнт світлопропускання

$$\tau_0 = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 \cdot \tau_5;$$

де τ_1 – коефіцієнт світлопропускання матеріалу (дод. Д, таблиця Д.3);

τ_2 – коефіцієнт, що враховує втрати світла у віконній рамі (дод. Д, таблиця Д.4);

τ_3 – коефіцієнт, що враховує втрати світла у несущих конструкціях (при боковому освітленні $\tau_3=1$; при верхньому – $\tau_3=0,8-0,9$);

τ_4 – коефіцієнт, що враховує втрати світла у сонцезахисних пристроях (дод. Д, таблиця Д.5);

τ_5 – коефіцієнт, що враховує втрати світла у захисній сітці, яка встановлюється під ліхтарями (приймається рівним $0,9$);

r_1, r_2 – коефіцієнти, що враховують підвищення КПО за рахунок відбиття відповідно при боковому і верхньому освітленні;

Значення коефіцієнта r_1 визначається за таблицею Д.6 (Додаток Д) в залежності від параметрів приміщення тарср.

Розрахунок:

Визначаємо нормоване значення КПО:

$$e_H = 0,5 \cdot 0,85 = 4,25;$$

Визначаємо загальний коефіцієнт світлопропускання

$$\tau_0 = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,8;$$

Визначаємо площу підлоги

$$S_{\text{п}} = 11,4 \cdot 5,92 = 67,5 \text{ кв.м};$$

Розрахуємо потрібну площу вікон

$$S_B = (4,25 \cdot 1,3 \cdot 1,5 \cdot 12,5 \cdot 67,5) / (0,8 \cdot 2,1 \cdot 100) = 41,62 \text{ кв.м};$$

Реальна загальна площа вікон

$$S = 1,45 \cdot 2,9 \cdot 3 = 12,6 \text{ кв.м};$$

По даним розрахунків у приміщенні природного освітлення недостатньо, потрібно додати штучне освітлення.

ВИСНОВКИ

По результатам проведених експериментів можна зробити такі висновки.

1. Для друка з використанням постобробки фрезеруванням рекомендовано використовувати наступні режими: діаметр сопла 1.2 мм, збільшення потіка 110-115%, висота шару 0.2 мм.

2. Різні матеріали, які використовуються для 3D-друку обробляються по різному. Так, PLA пластик зовсім не обробляється, він має відносно невисоку температуру плавлення, а в розплавленому стані дуже високу в'язкість, тому при фрезеруванні налипає на інструмент, цим самим блокую можливість обробки. Пластики PBT та PA можуть оброблятися, але стружка повністю не відокремлюється від обробленої поверхні, і після цього поверхню потрібно ще очищати гострим ножом. Тому ці пластики також не рекомендовані для постобробки фрезеруванням. CoPET(PETG) пластик гарно обробляється, але теж має підвищену в'язкість і іноді при деяких операціях може бути налипання на інструмент, але це має не системний характер, тому цей пластик можна рекомендувати до обробки. Пластики PC та ABS показали відмінні результати і можна рекомендувати для обробки.

3. При обробці поверхонь різними фрезами, було виявлено, що фрези з прямими лезами не рекомендовано використовувати по пластику, на них відбувається постійне налипання стружки, у зв'язку з чим процес доводиться припиняти. Фрези одно та триножові зі спіральною канавкою показали непогані результати по обробці. Із мінусів виявлено налипання стружки при прямому врізанні в матеріал, але це не носило системний характер. Рекомендується використовувати діагональне або радіальне врізання в матеріал.

4. Рекомендовані режими обробки для однозубої фрези складають: числа обертів - 22000 об/хв та подача - 1800 мм/хв. Таким чином швидкість різання складає 210 м/хв і подача 0,08 мм/зуб. Для тризубої фрези: числа обертів – 22000 об/хв та подача 2700 об/хв, швидкість різання 210 м/хв і подача 0,04 мм/зуб.

5. При обробці пластиків є можливість досягти точності 40-50 мкм та таким чином здобути 8 квалітет точності. Також при обробці двовимірних площин можливо здобути шорсткість поверхні $Ra = 5$ мкм.

6. Дану технологію обробки рекомендовано використовувати для виготовлення точних макетів, мастер-моделей для лиття, форм для формування деталей вакуумом і як закінчену пластикову деталь для одиничного та дрібносерійного виробництва.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Муравйов О.В. Сучасний стан та перспективи розвитку адитивних технологій / О.В. Муравйов, Ю.М. Нижник, В.Ф. Петрик, А.Г. Протасов, К.М. Сєрий // Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського; серія: Технічні науки, Том 32. – 2021. - № 5 – с. 114-119.
2. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing / S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl et al. // Chem. Rev., 2017. 117, 15 C. 10212– 10290. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>.
3. Адитивна технологія: опис, визначення, особливості застосування та відгуки. Адитивні технології в промисловості Режим доступу:<http://poradu.pp.ua/tehnka-tehnologyi/35539-aditivna-tehnologya-opis-viznachennya-osoblivost-zastosuvannya-ta-vguki-aditivn-tehnologyi-v-promislovost.html>.
4. 3D друк в умовах біомедичного використання [Електронний ресурс] : конспект лекцій з дисципліни «3D друк в умовах біомедичного використання» для студентів спеціальності 163 «Біомедична інженерія» денної та заочної форм навчання / уклад. Б. В. Єфременко. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – 56 с.
5. Кузнецов, В. Е. CAD/CAM/CAE / В. Е. Кузнецов. Observer, 2003. №4 (13).С. 2-7.
6. 3D Printing: Understanding Additive Manufacturing, Andreas Gebhardt, Julia Kessler, Laura Thurn, Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2018. – 204 p.
7. Komisarov O. FDM 3D-printing // G. Pukhalska / Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма X Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 18–21 квітня 2023 р.) – Суми: Сумський державний університет, 2023. –с. 57-59.
8. Williams, L. Additive Manufacturing or 3D Scanning and Printing, Manufacturing Engineering Handbook, 2nd ed. / L. Williams. McGraw-Hill Education. 2016. 459 p.

9. Turner, B. N. A review of melt extrusion additive manufacturing processes / B. N. Turner, R. Strong, A. Scott // *Gold Rapid Prototyping Journal*, 0(3), 2014. p. 192–204.
10. A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead / L. David, Joseph Bourella, Jr.a, Beaman, C. Leub, Ming, W., David. RosencRapidTech US-Turkey Workshop on Rapid Technologies, 2009. Istanbul.
11. Kazemi, M. Supports effect on tensile strength of the stereolithography parts / M. Kazemi, A. Rahimi // *Rapid Prototyping*, 21, 2015, p. 79–88.
12. Jacobs, P.F. Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography / P.F. Jacobs. Society of Manufacturing Engineers, New York, U.S. 1993. 434 p.
13. Zhang, X. Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructures / X. Zhang, X. Jiang, C. Sun // *Sensor Actuat A–Phys.*, 2009. p. 77–149.
14. 3D Printing: Technology, Applications, and Selection, Rafiq Noo- rani, CRC Press, 2017. – 271 p.
15. Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies, David Ian Wimpenny, Pulak M. Pandey, L. Jyothish Kumar, Springer, 2016. – 186 p.
16. Mandrycky c. Et al. 3D bioprinting for engineering complex tissues // *biotechnology advances*. – 2016. – т. 34. – №. 4. – с. 422-434.
17. Комісаров О.О. Матеріали для FDM-друку в Україні [Електронний ресурс] // О.О. Комісаров, Г.В. Пухальська / Тиждень науки-2023. Машинобудівний факультет. Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 24-28 квітня 2023 р., НУЗП. – Запоріжжя, 2023. – С. 43-45 - 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM).- Електронне видання комбінованого використання на DVD-ROM.
18. Електронний ресурс: <https://monofilament.com.ua/ua/products/>
19. Електронний ресурс: <https://shop.plexiwire.com.ua/abs-plus-filament/>

20. https://www.researchgate.net/figure/Geometries-of-the-extrudate-shapes-and-layer-in-layer-adhesion-a-If-the-layer-height_fig1_349683307

21. <https://ukr-tools.com/>

22. <https://mecsoft.com/products/rhinocam/rhinocammill/>

23. Методичні рекомендації для дипломного проектування “Оцінка економічної ефективності технічних рішень” для студентів зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» усіх форм навчання / Укл. Г.В. Пухальська - Запоріжжя: НУ«Запорізька політехніка», 2023 - 43 с.

24. https://rozetka.com.ua/ua/370087596/p370087596/?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIo-ezsqHiggMVNpRoCR3P4gq_EAQYCyABEgIVQvD_BwE

Додаток А

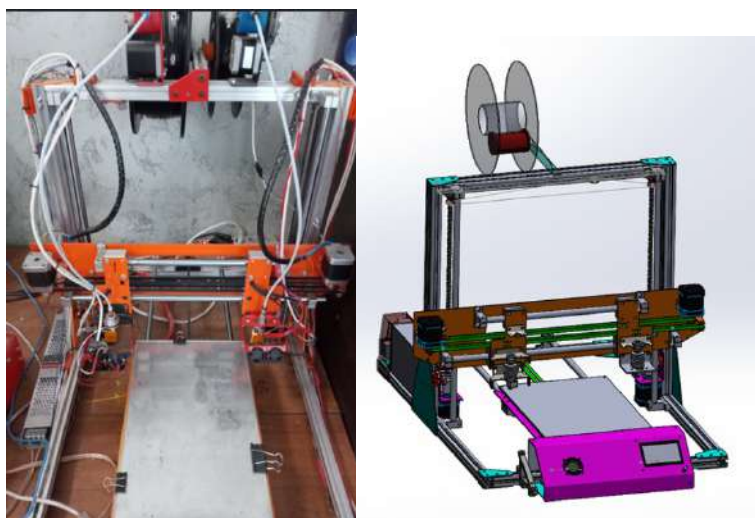


Рисунок А1 - Фото та 3D-модель принтера RepSystem V2.1

Таблиця А.1 - Загальні характеристики принтера RepSystem V2.1

Характеристики принтера	Значення
Область друку	150x250x300 мм
Матеріал корпусу	Алюмінієвий профіль, сталь
Діаметр пластикового прутка	1,75 мм
Діаметр сопла	0.8 та 1.2 мм
Рекомендована висота шару друку	0.2-0.5 мм
Типи пластику для друку	Усі види пластику діаметром 1,75 мм
Стіл, що нагрівається	да
Система обдування деталей під час друку	да
Тип камери друку	відкрита
Автономний друк	Да (с CD карти)
Інтерфейс передачі даних	usb
Елементи керування принтером	LCD-дисплей, ПК
Програмне забезпечення	Repetier-Server
Підтримуване програмне забезпечення	PrusaSlicer, Cura, Simplify 3D(вимагає покупки ліцензії)
Операційні системи	Windows, Linux



Рисунок А.2 - Фото та 3D-модель ЧПК верстата Profi+ PCB

Таблиця А.2 – Загальні характеристики ЧПК верстата Profi+ PCB

Загальні характеристики верстата	Значення
Розміри робочого поля	350x250 мм
Матеріал корпусу	Алюмінієвий профіль, сталь
Переміщення по осі Z	90 мм
Швидкість робочого та холостого ходу	600 мм/хв
Частота обертання шпинделя	8000-12000 об/хв
Потужність шпинделя	300 Вт
Тип цанги	ER11
Напруга живлення	220В
Тип приводів	крокові двигуни
Тип двигунів	Nema17
Тип ЧПК	Grb1, ПЗ на комп'ютері UGS

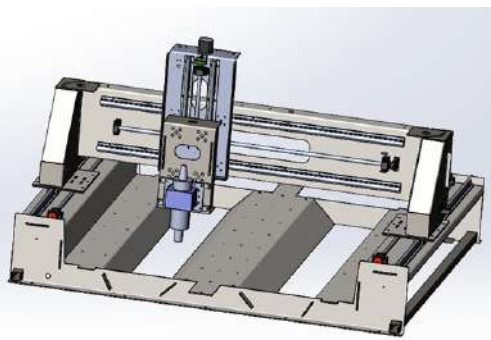


Рисунок А.3 - Фото та 3D-модель ЧПК верстата Profi+ Wood

Таблиця А.3 - Загальні характеристики ЧПК верстата Profi+ Wood

Загальні характеристики верстата	Значення
Розміри робочого поля	1050x900 мм
Матеріал корпусу	сталь
Переміщення по осі Z	250 мм
Швидкість робочого та холостого ходу	3500 мм/хв
Частота обертання шпинделя	6000-24000 об/хв
Потужність шпинделя	2,2 кВт
Тип цанги	ER20
Напруга живлення	220 В
Тип приводів	крокові двигуни
Тип двигунів	Nema 23
Тип ЧПК	Контролер DDCS 3.1

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Порівняння вимог до друку з постобробкою та без неї

Параметри друку	Друк без обробки	Друк під фрезерування
Якість поверхні	Дуже висока	Не важливо
Час друку	Збільшується при збільшенні якості	Можливо зменшувати в шкоду якості
Внутрішня структура	Може бути сітчастою	Тільки суцільна
Міцність виробу	Не важна , залежить від конкретної деталі	Максимальна
Точність друку	Висока	Низька

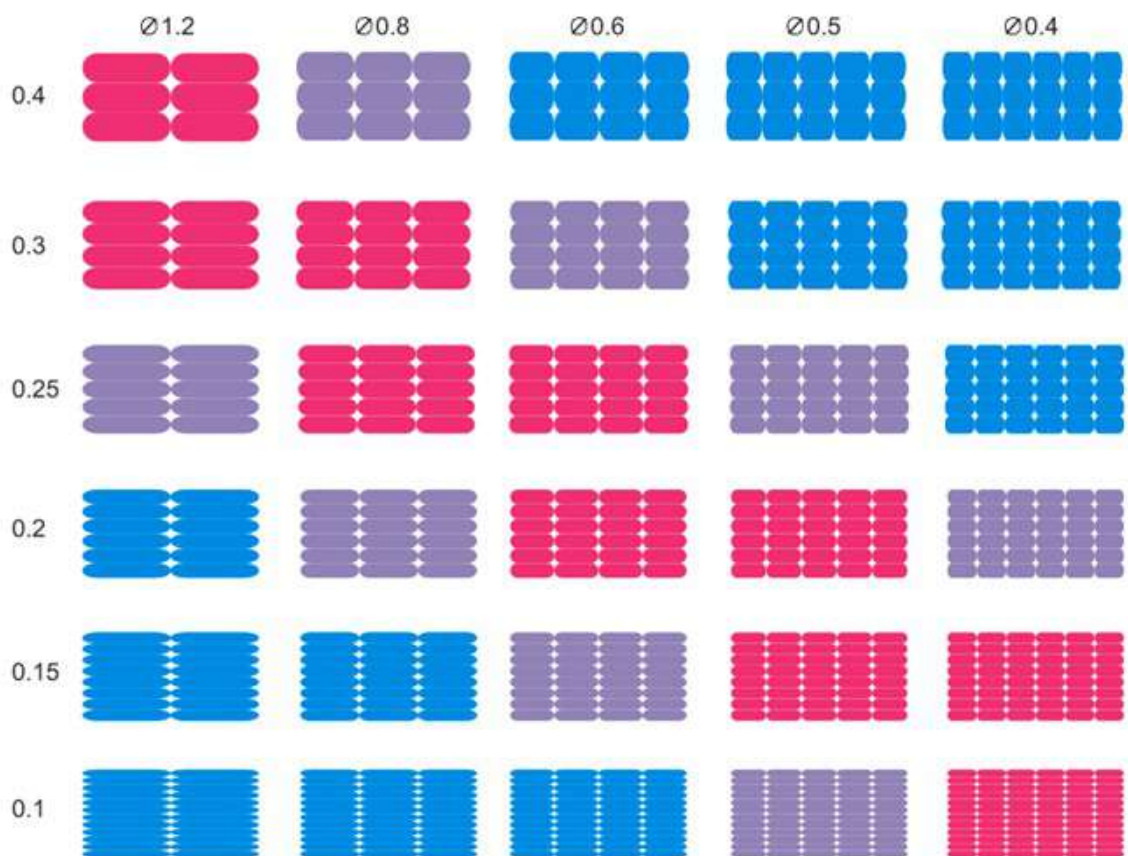


Рисунок Б.1 - Залежність діаметра сопла і висоти шару

Таблиця Б.2 - Час друку в залежності від діаметру сопла та висоти шару, хв

Висота шару, мм	Діаметр сопла, мм				
	1,2	0,8	0,6	0,4	0,2
0,1	-	-	-	103	263
0,15	-	39	45	71	-
0,2	10	30	35	56	-
0,25	8	24	28	-	-
0,3	7	20	-	-	-
0,4	6	16	-	-	-

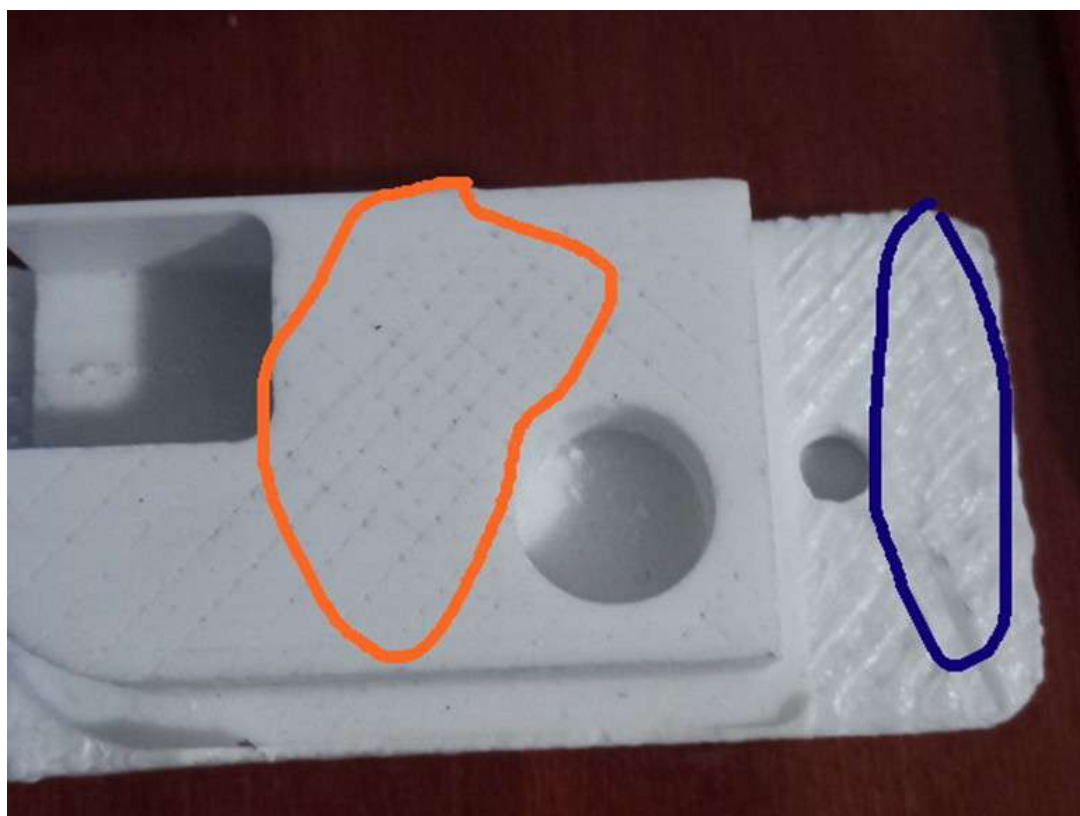


Рисунок Б.2 - Пори на матеріалі

Шари та периметри
Заповнення
Плітус та край
Підтримка
Швидкість
Кілька екструдерів
Розширений
Параметри виводу
Примітки
Залежності

Висота шару

Висота шару: мм
Висота першого шару: мм

Вертикальні оболонки

Периметри: (мінімум)
Спіральна ваза: ☐

Рекомендована товщина стінки об'єкту для висоти шару 0.30 та 2 рядків: 1.29 мм

Горизонтальні оболонки

Сучільні шари: Верхні: Нижні:
Мінімальна товщина оболонки: Верхні: мм Нижні: мм

Верхня оболонка має товщину 0.9 мм для висоти шару 0.3 мм. Мінімальна товщина верхньої оболонки становить 0.51 мм.
Нижня оболонка має товщину 0.9 мм для висоти шару 0.3 мм. Мінімальна товщина нижньої оболонки становить 0.51 мм.

Рисунок Б.3 - Шари та периметри

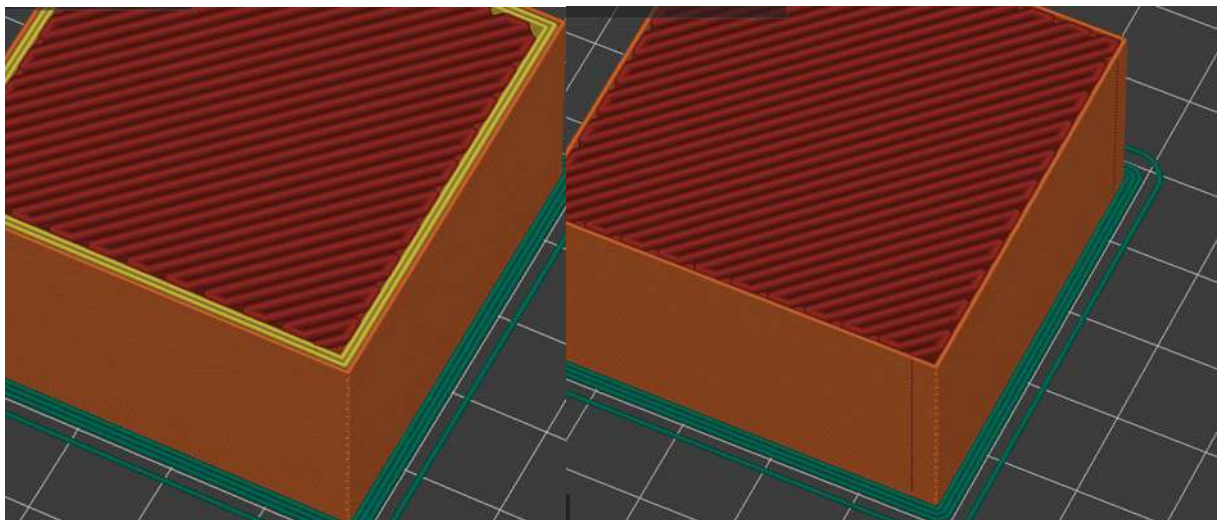


Рисунок Б.4 - Результат слайсингу з різними периметрами

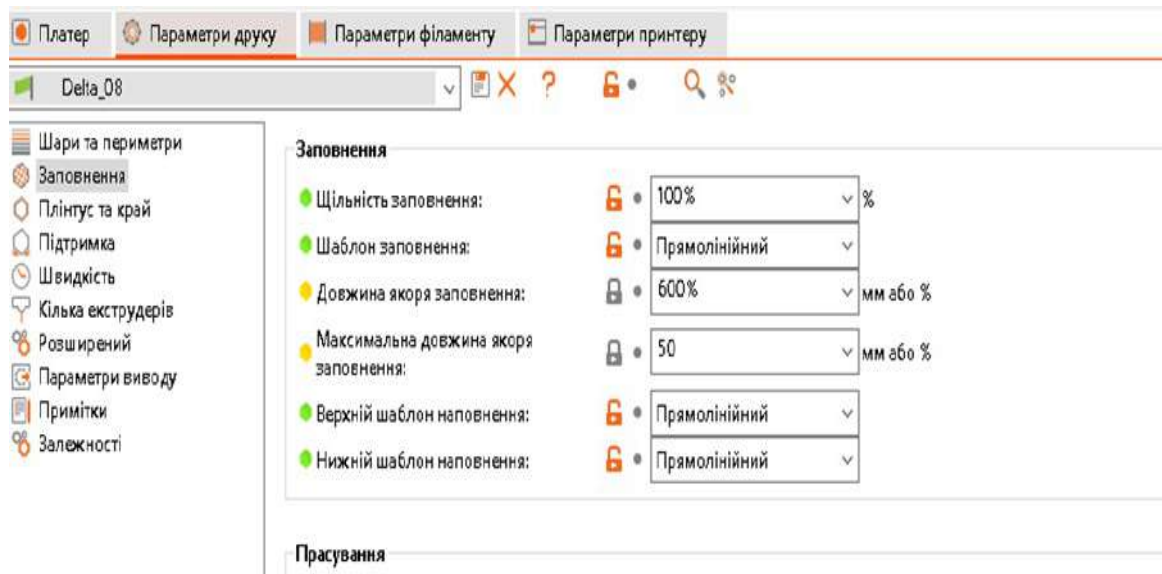


Рисунок Б.5 – Параметри заповнення

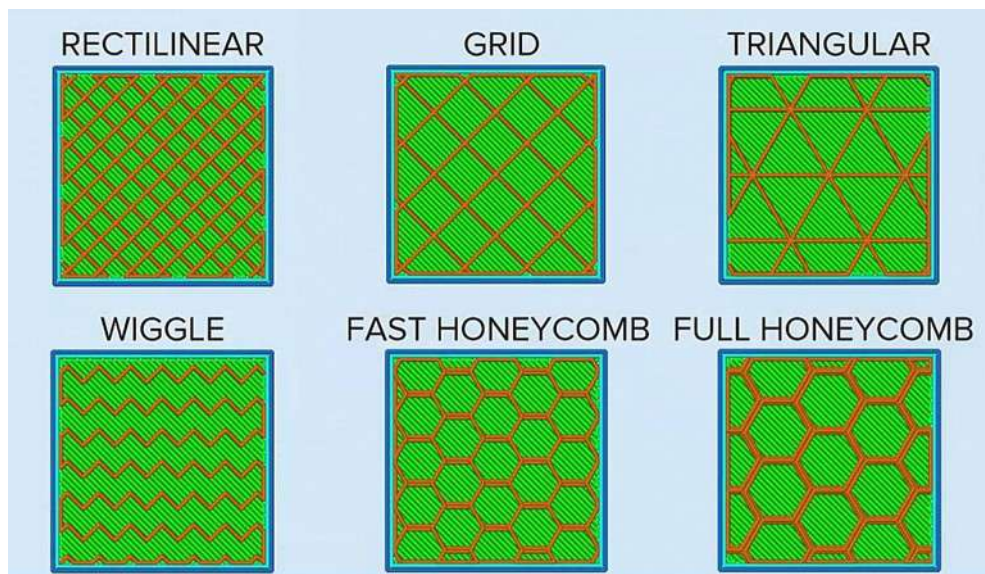


Рисунок Б.6 – Види шаблонів

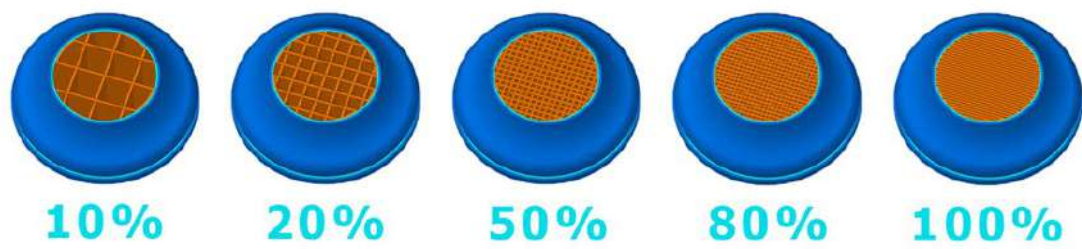


Рисунок Б.7 – Варіанти щільності

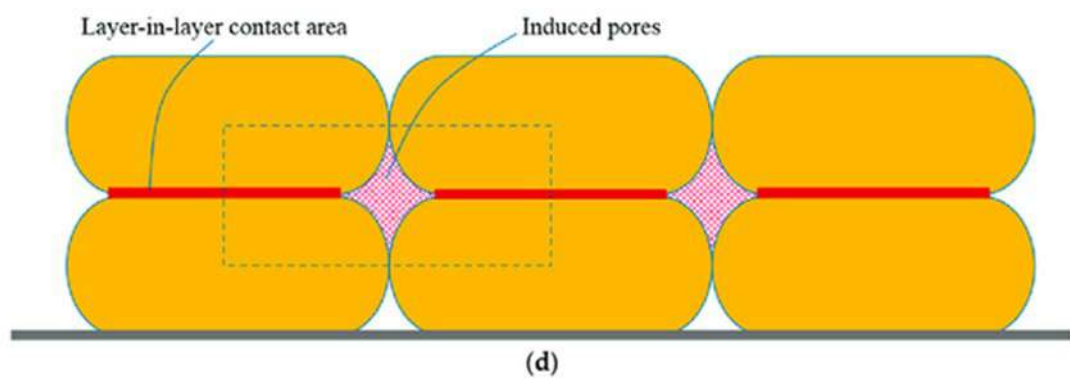


Рисунок Б.8 - Пори та площа контакту [20]

Таблиця Б.3 - Змінні параметри друку

№	Діаметр сопла, мм	Висота шару, мм	Заповнення, %	Збільшення потоку, %
1	0,8	0,2	100	100
2	0,8	0,25	100	100
3	0,8	0,3	100	100
4	1,2	0,2	100	100
5	1,2	0,3	100	100
6	1,2	0,4	100	100
7	1,2	0,5	100	100



Рисунок Б.9 - Результати друку соплом 1,2



Рисунок Б.10 - Результати друку соплом 0,8



Рисунок Б.11 – Скол, який виник при фрезеруванні

Таблиця Б.4 - Змінні параметри друку

№ зразка	Діаметр сопла, мм	Висота шару, мм	Заповнення, %	Збільшення потоку, %
21	0,8	0,2	90*	100
22	0,8	0,2	100	100
23	0,8	0,2	100	105
24	0,8	0,2	100	110
25	0,8	0,2	100	115
26 *	0,8	0,2	100	120
31	1,2	0,2	90*	100
32	1,2	0,2	100	100
33	1,2	0,2	100	105
34	1,2	0,2	100	110
35	1,2	0,2	100	115

* - Виявлено руйнування систему нагріву принтера



Рисунок Б.12 - Нашарування пластику при перебільшеній екструзії



Рисунок Б.13 - Відфрезеровані зразки

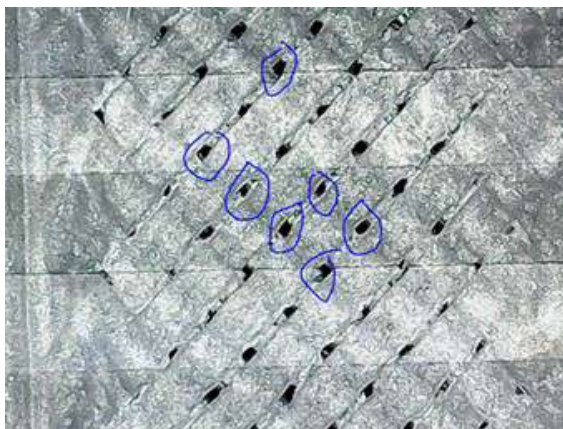


Рисунок Б.14 - Зразок №21

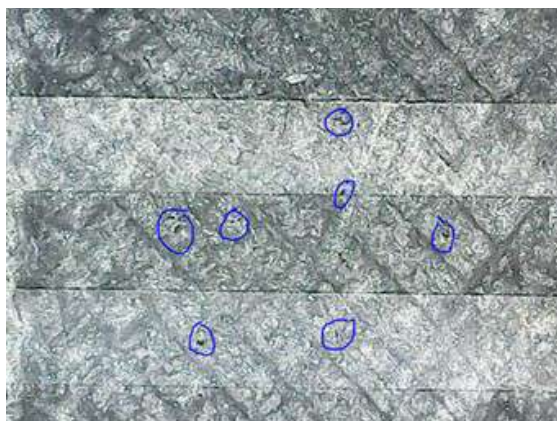


Рисунок Б.15 - Зразок №22

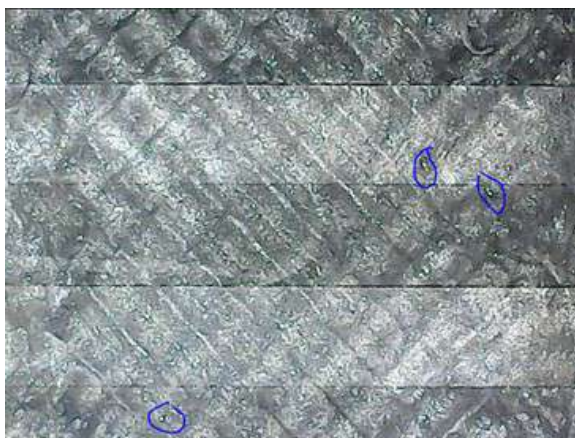


Рисунок Б.16 - Зразок №23



Рисунок Б.17 - Зразок №24



Рисунок Б.18 - Зразок №25



Рисунок Б.19 - Зразок №31

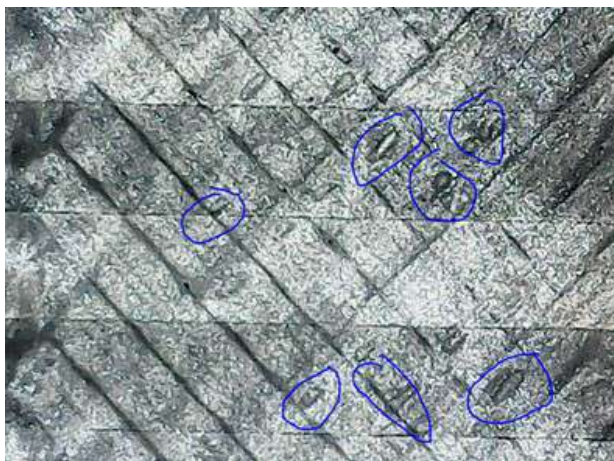


Рисунок Б.20 - Зразок №32



Рисунок Б.21 - Зразок №35

Додаток В

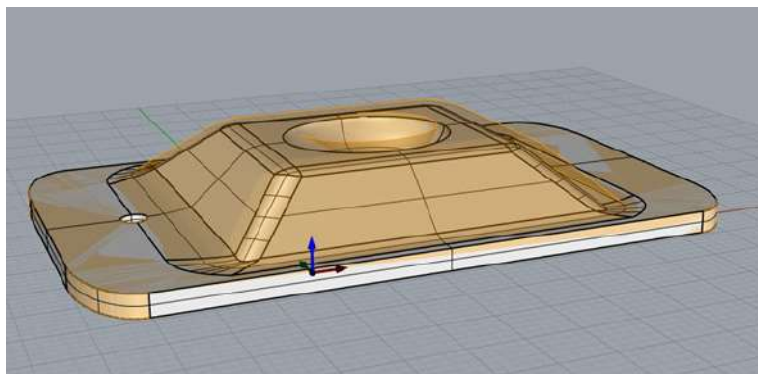


Рисунок В.1 - Модель для першого тесту з припуском

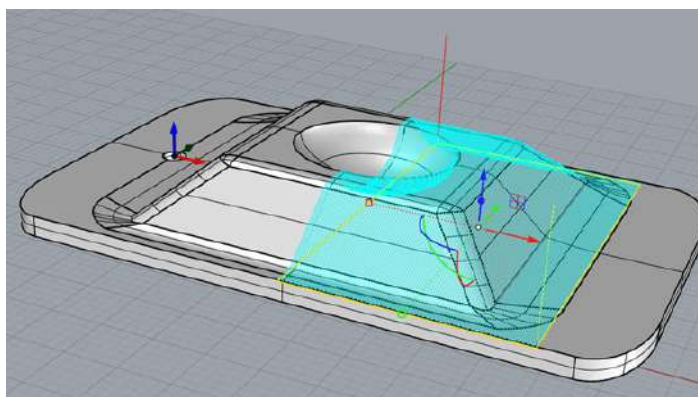


Рисунок В.2 - Траєкторія обробки

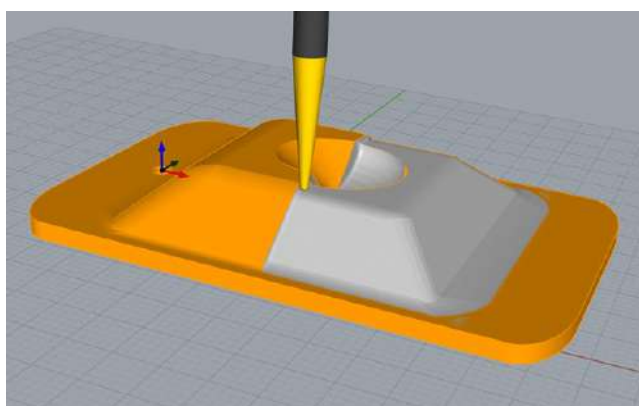


Рисунок В.3 - Симуляція обробки



Рисунок В.4 - Друковані деталі з різних матеріалів



Рисунок В.5 – Поверхня ABS-пластика

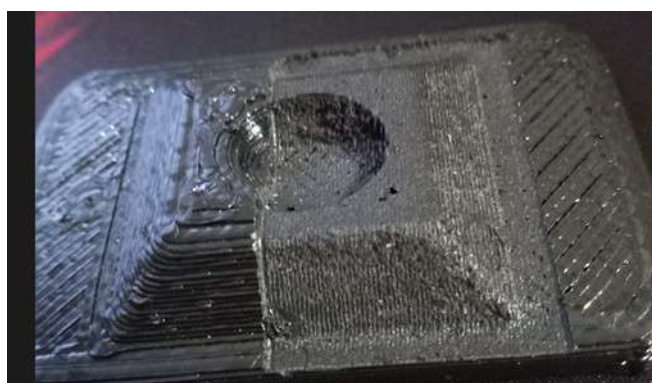


Рисунок В.6 - Поверхня CoPET пластика

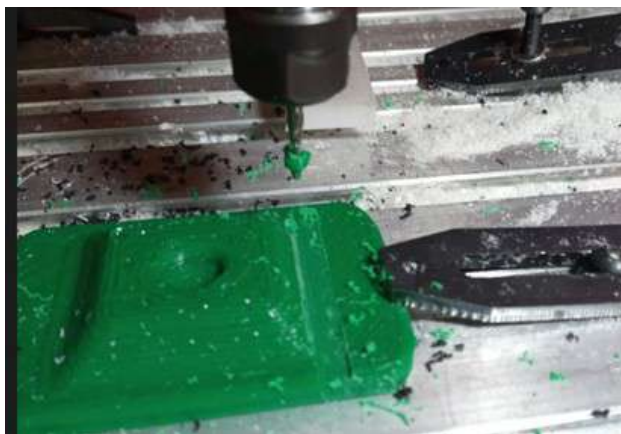


Рисунок 3.7 - Наліплений на фрезу пластик



Рисунок В.8 - Nylon(ліворуч), РВТ(праворуч)

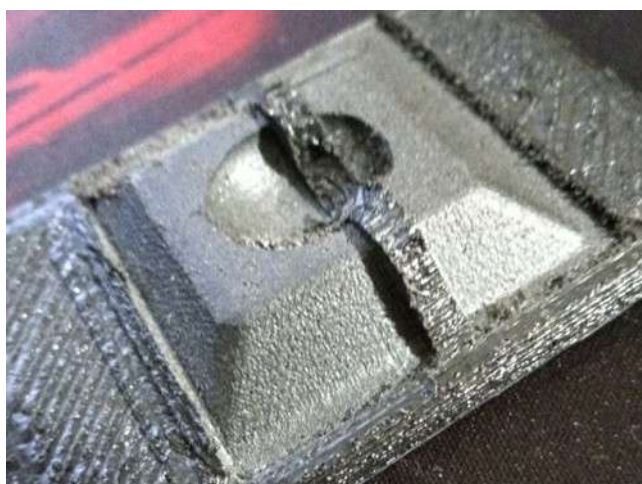


Рисунок В.9 - РС пластик

Таблиця В.1 – Результати фрезерування різних матеріалів

Матеріал	Можливість фрезерування	Якість поверхні, візуально по шкалі від 1 до 5	Доречність використання
ABS	+	5	так
PLA	-	-	ні
Nylon	+	1	ні
PBT	+	1	ні
CoPET	+	3	ні
PC	+	5	так

Додаток Г

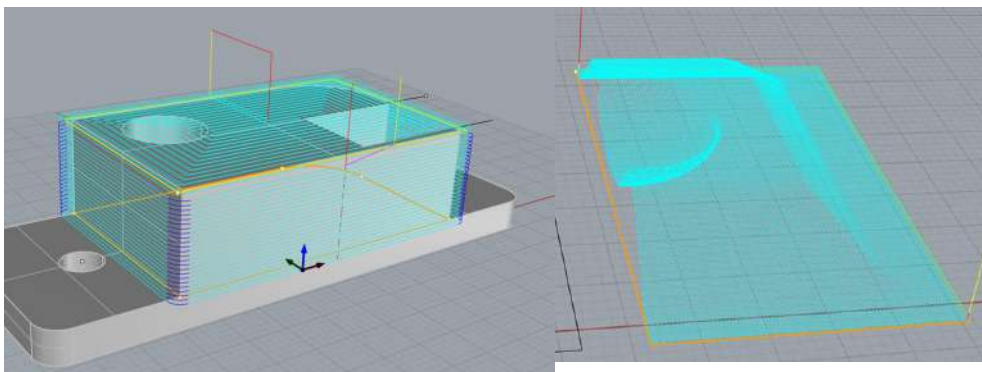


Рисунок Г.1 - Обробка 2,5D та 3D



Рисунок Г.2 - Кінцеві фрези: спіральна однозуба ,спіральна тризуба та пряма двозуба [21]

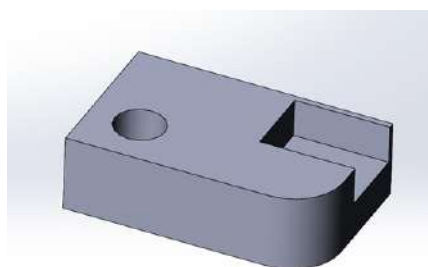


Рисунок Г.3 - Тестова модель

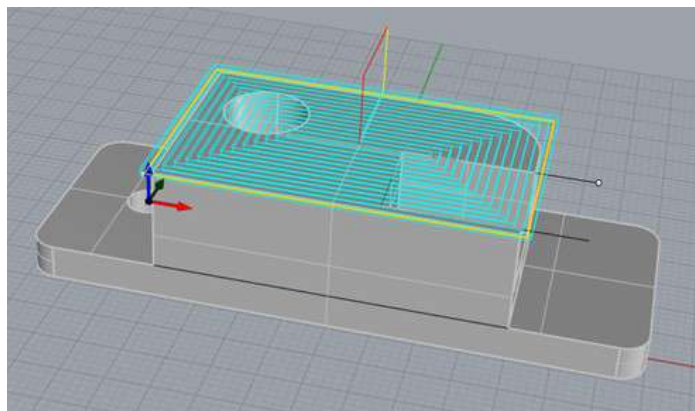


Рисунок Г.4 - Обработка верхней плоскости (Axis Facing)

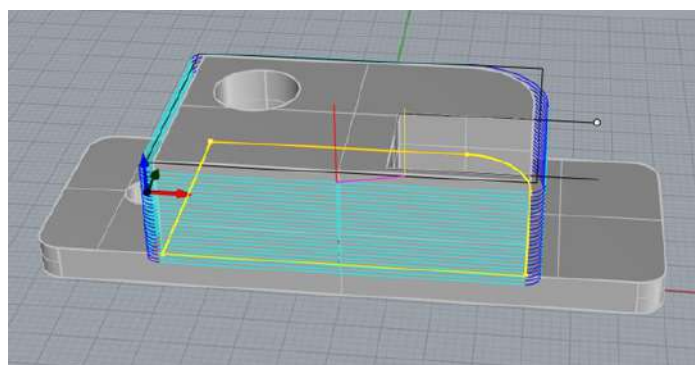


Рисунок Г.5 - Обработка профиля (Axis Profiling)

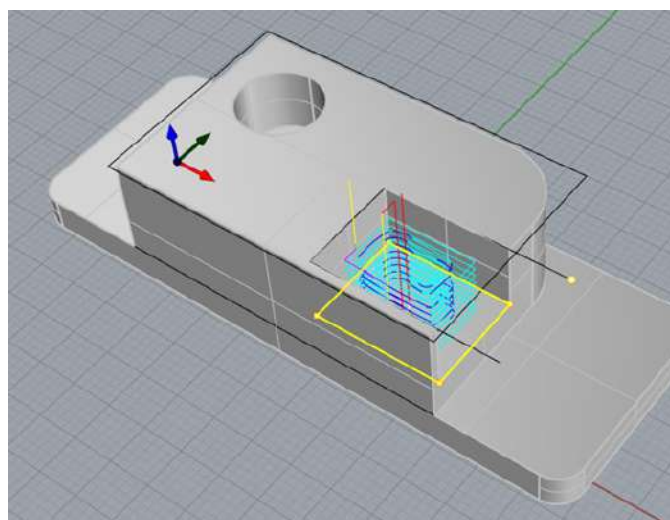


Рисунок Г.6 - Обработка кармана (Axis Pocketing)

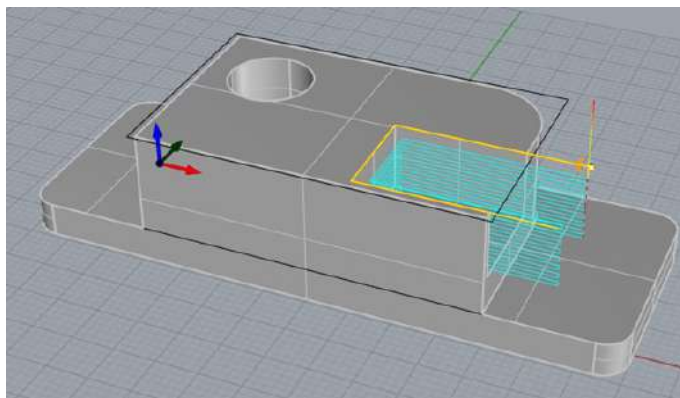


Рисунок Г.7 - Обработка внутреннего профиля (Axis Profiling)

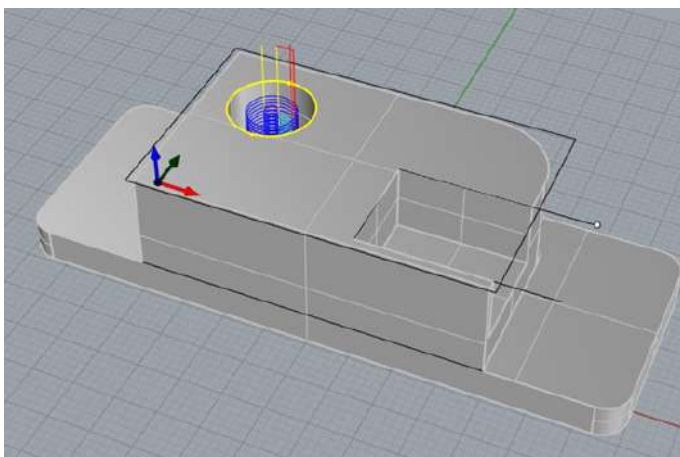


Рисунок Г.8 - Вибірка отвору (Axis Poking)

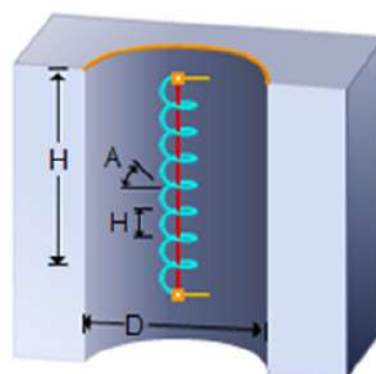
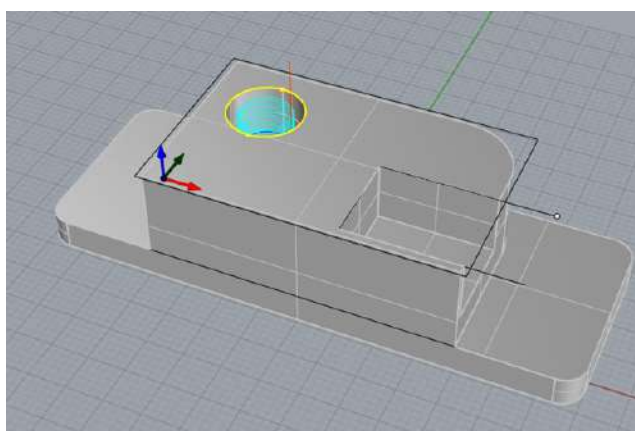


Рисунок Г.9 - 6. Спіральне профілювання отвору (hole profiling)

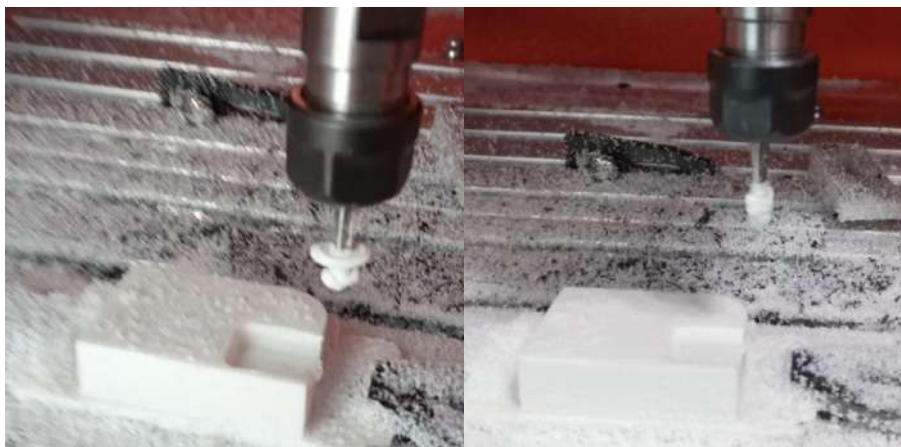


Рисунок Г.10 - Пластик налиплий на фрезу

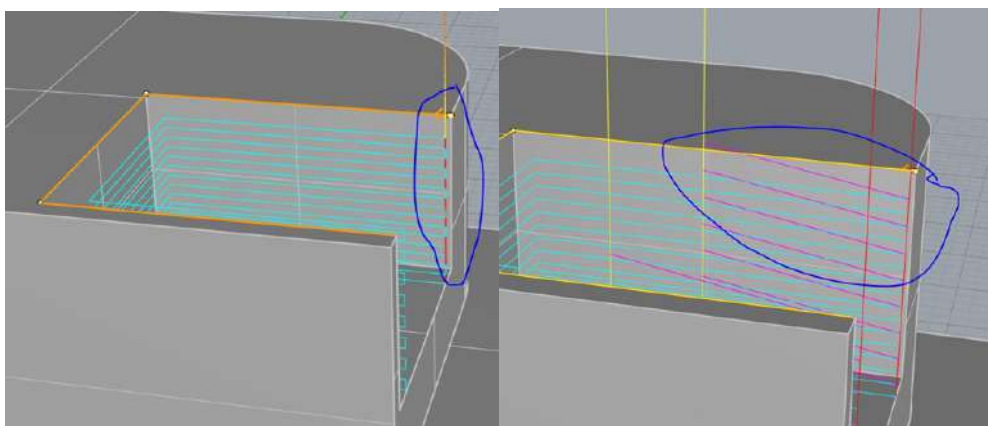


Рисунок Г.11 - Пряме врізання та під кутом

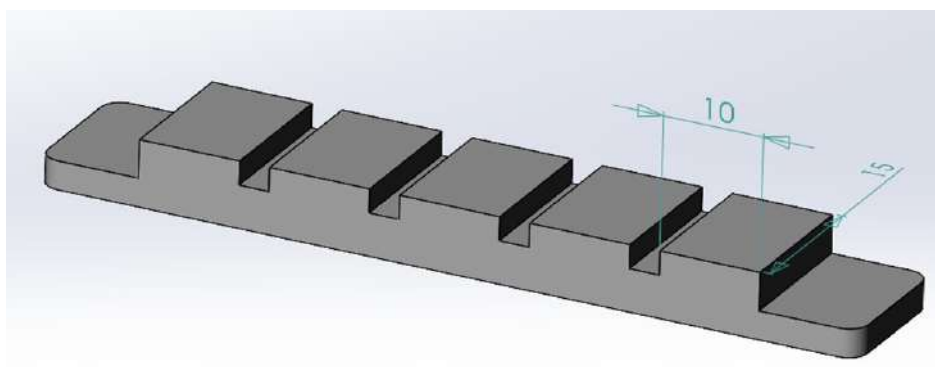


Рисунок Г.12 - Модель для тестування режимів фрезерування

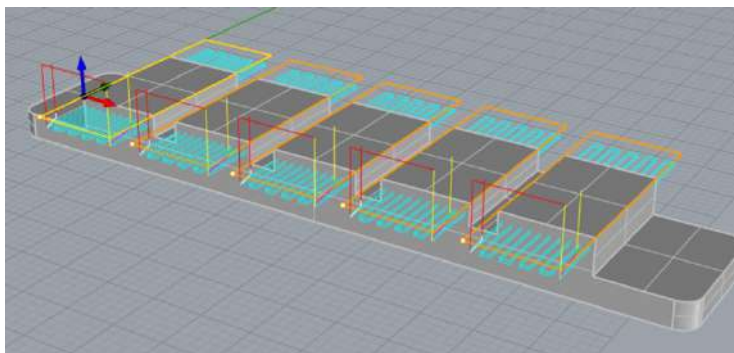


Рисунок Г.13 - Траєкторії фрезерування



Рисунок Г.14 - Оснастка та процес вимірювання

Додаток Д

Таблиця Д.1 – Норми штучного та природного освітлення виробничих приміщень (витяг з ДБН В. 2.5–28–2006)

Характеристика зорових робіт	Найменший розмір об'єкта розпізнавання, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Штучне освітлення	Природне освітлення
				Освітленість, лк	КПО, %
				загальне освітлення	бокове освітлення
Середньої точності	0,5-1	IV	а	300	1,5
			б	200	
			в	200	
			г	150	
Малої точності	1-5	V	а	200	1,0
			б	150	
			в	150	
			г	100	
Груба	Більше 5	VI	—	150	0,5

Таблиця Д.2 – Значення коефіцієнта світлового клімату

Світлові прорізи	Орієнтація світлових прорізів за сторонами горизонту	Коефіцієнт світлового клімату, т	
		Автономна республіка Крим, Одеська область.	Решта території України
В зовнішніх стінах будинків	ПН	0,85	0,90
	ПНС, ПНЗ	0,85	0,90
	З, С	0,80	0,85
	ПДС, ПДЗ	0,80	0,85
	ПД	0,75	0,85
Примітка. ПН - північ; ПНС - північ-схід; ПНЗ - північ-захід; С - схід; З - захід; ПД - південь; ПДС - південь-схід; ПДЗ - південь-захід			

Таблиця Д.3 – Значення коефіцієнтів τ_1 τ_2 τ_4

Вид світло пропускнуго матеріалу	Значення τ_1	Вид віконної рами	Значення τ_2	Сонцезахисні пристрої	Значення τ_4
Скло віконне листове:		Віконні рами для		Регульовані жалюзі та штори (внутрішні, зовнішні)	1
одинарне	0,9	промислових			
подвійне	0,8	будівель:			
потрійне	0,75	а) дерев'яні:		Стаціонарні жалюзі	
Скло листове:		одинарні	0,75	та екрани з захисним кутом не більше 45°:	
армоване	0,6	спарені	0,7		
з візерунком	0,65	подвійні окремі	0,6		
сонцезахисне	0,65	б) металеві:		- горизонтальні	0,65
контрастне	0,75	одинарні		- вертикальні	0,75
Органічне скло:		(відкриваються)	0,75	Горизонтальні	
прозоре	0,9	одинарні (глухі)	0,9	козирки:	
молочне	0,6	подвійні		- з захисним кутом не більше 30°	
Пустотілі скляні блоки:		(відкриваються)	0,6		0,8
світлорозсіюючі	0,5	подвійні (глухі)		- з захисним кутом від 15 до 45° (багатоступеневі)	0.6-0,9
прозорі	0,55		0,8		
Склопакети	0,8				

Таблиця Д.4– Орієнтовні значення коефіцієнтів відбиття стелі (ρстелі) та стін (ρстін)

Стан стелі	ρстелі, %	Стан стін	ρстін, %
Свіжовибілена	80–65	Свіжовибілені з вікнами * закритими білими шторами	75–65
Побілена в сирих приміщеннях	65–40		
Бетонна чиста	55–45	Свіжовибілені з вікнами без штор	55–45
Бетонна брудна	35–25		
Світла дерев'яна (полакована)	60–45	Бетонні з вікнами	35–25
		Обклеєні світлими шпалерами	40–25
Темна дерев'яна (нефарбована)	30–25	Обклеєні темними шпалерами	15–5
		Цегляні не штукатурені	15–10
Брудна (кузні, склади вугілля)	20–10		

Таблиця Д.5 – Значення світлової характеристики вікон (η_B при боковому освітленні)

Відношення довжини приміщення (L) до його глибини (B)	Відношення глибини приміщення (B) до висоти від рівня робочої поверхні до верхнього краю вікна (h)							
	1	1,5	2	3	4	5	7,5	10
4 і більше	6,5	7	7,5	8	9	10	11	12,5
3	7,5	8	8,5	9,6	10	11	12,5	14
2	8,5	9	9,5	10,5	11,5	13	15	17
1,5	9,5	10,5	13	15	17	19	21	23
1	11	15	16	18	21	23	26,5	29
0,5	18	23	31	37	45	54	66	—

Таблиця Д.6 – Значення коефіцієнта r_l

В/н	l/B	Значення r при боковому освітленні								
		Середній коефіцієнт відбиття ρср стелі, стін і підлоги								
		0,5			0,4			0,3		
		Відношення довжини приміщення L до його глибини B								
		0,5	1	2 i >	0,5	1	2 i >	0,5	1	2 i >
Від 1 до 1,5	0,1	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1	1,05	1	1
	0,5	1,4	1,3	1,2	1,2	1,15	1,1	1,2	1,1	1,1
	1,0	2,1	1,9	1,5	1,8	1,6	1,3	1,4	1,3	1,2
> 1,5 до 2,5	0,1	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1	1
	0,3	1,3	1,2	1,1	1,2	1,15	1,1	1,15	1,1	1,05
	0,5	1,85	1,6	1,3	1,5	1,35	1,2	1,3	1,2	1,1
	0,7	2,25	2	1,7	1,7	1,6	1,3	1,55	1,35	1,2
	1,0	3,8	3,3	2,4	2,8	2,4	1,8	2	1,8	1,5
> 2,5 до 3,5	0,3	1,2	1,15	1,1	1,15	1,1	1,1	1,1	1,1	1,05
	0,5	1,6	1,45	1,3	1,35	1,25	1,2	1,25	1,15	1,1
	0,7	2,6	2,2	1,7	1,9	1,7	1,4	1,6	1,5	1,3
	0,9	5,3	4,2	3	2,9	2,45	1,9	2,2	1,85	1,5
	1,0	7,2	5,4	4,3	3,6	3,1	2,4	2,6	2,2	1,7

Продовження таблиці Д.6

> 2,5 до 3,5	0,1	1,1	1,05	1,05	1,05	1	1	1	1	1
	0,3	1,2	1,15	1,1	1,15	1,1	1,1	1,1	1,1	1,05
	0,5	1,6	1,45	1,3	1,35	1,25	1,2	1,25	1,15	1,1
	0,7	2,6	2,2	1,7	1,9	1,7	1,4	1,6	1,5	1,3
	0,9	5,3	4,2	3	2,9	2,45	1,9	2,2	1,85	1,5
	1,0	7,2	5,4	4,3	3,6	3,1	2,4	2,6	2,2	1,7
	0,1	1,2	1,15	1,1	1,1	1,1	1,05	1,05	1,05	1
	0,2	1,4	1,3	1,2	1,2	1,15	1,1	1,1	1,05	1,05
	0,3	1,75	1,5	1,3	1,4	1,3	1,2	1,25	1,2	1,1
	0,4	2,4	2,1	1,8	1,6	1,4	1,3	1,4	1,3	1,2
	0,5	3,4	2,9	2,5	2	1,8	1,5	1,7	1,5	1,3
	0,6	4,6	3,8	3,1	2,4	2,1	1,8	2	1,8	1,5
	0,7	6	4,7	3,7	2,9	2,6	2,1	2,3	2	1,7
	0,8	7,4	5,8	4,7	3,4	2,9	2,4	2,6	2,3	1,9
	0,9	9	7,1	5,6	4,3	3,6	3	3	2,6	2,1
	1,0	10	7,3	5,7	5	4,1	3,5	3,5	3	2,5