

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет (ННІ) конструювання та дизайну

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

Конструювання машин і обладнання
(назва кафедри)

_____ Ловейкін В.С.
(підпис) (ПІБ)

“ _____ ” _____ 2025 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ БАКАЛАВРА)

на тему : Вдосконалення конструкції 3D принтера для збільшення швидкості
серійного друку

Спеціальність 133 – «Галузеве машинобудування»
(код і назва)

Гарант освітньої програми

Доктор технічних наук, професор
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ Булгаков В.М.
(підпис) (ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи
(Керівник дипломного проєкту бакалавра)

Кандидат технічних наук, доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ Крушельницький В.В.
(підпис) (ПІБ)

Виконав

_____ Клименко А.А.
(підпис) (ПІБ студента)

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет (ННІ) конструювання та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н. професор

Ловейкін Вячеслав Сергійович

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПШБ)

“ ” 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

**на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту
(на виконання дипломного проєкту бакалавра студенту)**

Клименко Антон Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проєкту бакалавра)

Вдосконалення конструкції 3D принтера для збільшення швидкості серійного друку

затверджена наказом ректора НУБіП України від “ 16 ” грудня 2024 р. № 2265 “С”

Термін подання завершеної роботи (проєкту) на кафедру

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проєкту бакалавра)

Перелік питань, які потрібно розробити:

Провести аналіз літератури

Запропонувати вдосконалення конструкції

Техніко економічне обґрунтування

Розглянути охорону праці

Висновки

Перелік графічних документів (за потреби)

Загальний вигляд вдосконалення конструкції 3D принтера

Деталювання

Дата видачі завдання “ 20 ” грудня 2024 р.

**Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи
(Керівник дипломного проєкту бакалавра)**

Крушельницький В. В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

Клименко А. А.

(підпис)

(прізвище та ініціали студента)

Зміст

РЕФЕРАТ	5
ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ.....	7
1.1. Технології 3D друку	7
1.2. Будова та принцип роботи 3D принтера FDM	15
1.2.1. Кінематика.....	16
1.2.2. Робоча платформа.....	18
1.2.3. Екструдер.....	20
1.2.4. Система приводу.....	23
1.3. Матеріали для 3D друку.....	24
1.4. Способи підвищення продуктивності друку 3D принтера	26
1.5. Обґрунтування вдосконалення 3D принтера.....	28
2. ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ 3D ПРИНТЕРА	30
2.1. Розробка каретки 3D принтера.....	30
2.2. Механізм подачі матеріалу	35
2.3. Вдосконалення системи керування 3D принтера.....	39
3. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	43
3.1. Розрахунок витрат на оплату праці	43
3.2. Розрахунок витрат на вдосконалення конструкції 3D принтера.....	44
3.3. Розрахунок строку окупності	46

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Клименко А.А			Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Крушельницький В.			3	54	
Н. Контр.					<i>НУБіП України</i>		
Затверд.							

4.	ОХОРОНА ПРАЦІ	49
4.1.	Заходи безпеки при роботі з 3D принтером	49
4.2.	Огляд обладнання перед початком роботи з 3D принтером.....	50
4.3.	Вимоги безпеки після завершення роботи з 3D принтером.....	50
	ВИСНОВОК.....	52
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	53

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РЕФЕРАТ

Метою кваліфікаційної роботи є вдосконалення конструкції 3D принтера для збільшення швидкості серійного друку. Робота складається з пояснювальної записки обсягом 54 сторінок та графічної частини. Пояснювальна записка містить чотири основних розділи.

У першому розділі проведений огляд літератури, а саме розглянуто технології 3D друку, описано будову і принцип роботи 3D принтера, розглянуто кінематику 3D принтера, конструкцію екструдера, приводу, нагрівальної платформи, а також матеріали для друку. Окрема увага приділена методам підвищення продуктивності друку та обґрунтуванню необхідності удосконалення 3D-принтера.

У другому розділі запропоновано вдосконалення 3D принтера, зокрема описано процес розробки каретки 3D принтера, здійснені основні розрахунки каретки та нагрівальної платформи 3D принтера, запропоновано конструкцію механізму подачі пластикового прутка та розглянуто вдосконалення системи керування.

Економічна частина проекту розглядає обґрунтування економічної доцільності запропонованих удосконалень і містить основні розрахунки.

У розділі охорона праці наведено основні вимоги безпечної роботи з 3D принтером.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Клименко А.А			Реферат	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		Крушельницький В.					5	54
<i>Н. Контр.</i>						НУБіП України		
<i>Затверд.</i>								

ВСТУП

Упродовж останніх десятиліть технології 3D друку набули значного поширення та знайшли широке застосування у таких сферах, як промисловість, медицина, дизайн та освіта. Завдяки таким технологіям стало можливим швидко та економічно ефективно виготовлення складних деталей і моделей, які раніше були складним або неможливими для реалізації традиційним методом. Водночас для підвищення якості та швидкості друку постійно проводяться дослідження направлені на вдосконалення 3D принтерів.

У кваліфікаційній роботі розглянуто сучасні рішення, зокрема ті, що реалізовані у принтерах Prusa та запропоновано вдосконалення для моделей принтерів з кінематикою CoreXY, яке дозволить реалізувати дублюючий 3D друк без суттєвого ускладнення конструкції

Таке вдосконалення конструкції 3D принтера забезпечує збільшення швидкості друку шляхом встановлення двох екструдерів на одній каретці, в результаті чого друк моделей буде дубльованим. Це конструкторське рішення дозволяє розширити функціональні можливості принтера та значно скоротити час друку моделей, що важливо для серійного друку, де продуктивність має ключове значення.

В умовах зростаючого попиту на багатофункціональні 3D принтери та необхідність скорочення часу виготовлення деталей, такий підхід набуває особливої актуальності.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Клименко А.А			Вступ	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		Крушельницький В.					6	54
<i>Н. Контр.</i>						НУБіП України		
<i>Затверд.</i>								

РОЗДІЛ 1

1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Технології 3D друку

3D друк хоча й використовується як синонім до адитивного виробництва, в свою чергу поділяється на сім типів залежно від методу виготовлення шарів. Окремі процеси відрізняються залежно від використовуваного матеріалу та машинної технології.

Американське товариство з тестувань і матеріалів в 2010 році затвердило набір стандартів Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, які класифікують процеси адитивного виробництва на сім категорій, 2012 [1]. Серед них наступні:

- Фотополімеризація
- Струменеве нанесення матеріалу
- Струменеве зв'язування
- Спінання в порошковому шарі
- Листове ламінування
- Пряме осадження енергії
- Витискування матеріалу

Фотополімеризація метод який також відомий як стереолітографія. Назва походить від того, що для друку використовується контейнер з рідкою фотополімерною смолою.

Під час друку робоча зона опускається та підіймається в закритий резервуар з рідкою смолою (рис. 1.1). В процесі використовується дзеркало, яке опромінює поверхню смоли ультрафіолетовим світлом. Під час його роботи відбувається затвердіння верхнього шару смоли середня товщина якого становить від 0.025 до 0.5 мм [2].

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Клименко А.А			Розділ 1	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Крушельницький В.					7	54
Н. Контр.								
Затверд.								
						НУБіП України		

Основна перевага фотополімерного друку це точність виготовленої моделі, а недоліки це дороговизна друку та шкідливість газоподібних виділень полімеру.

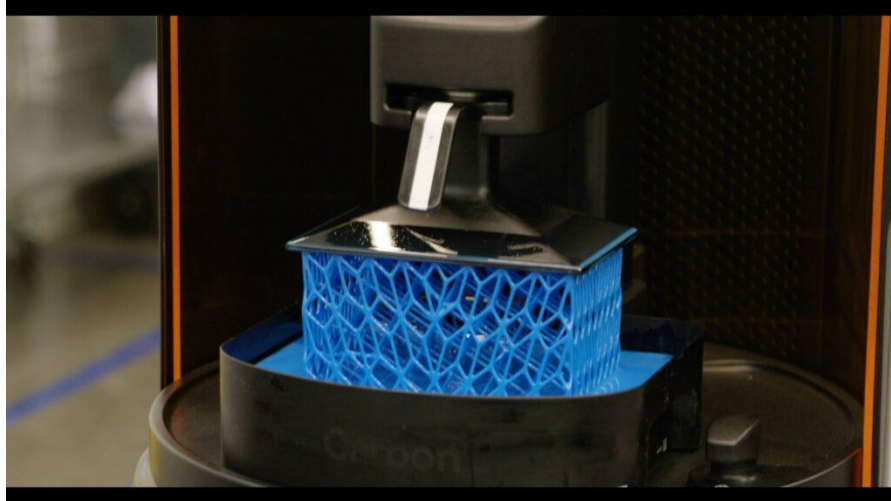


Рис. 1.1. Фотополімерний 3D друк [27]

Струменеве нанесення матеріалу (Material Jetting) передбачає, що 3D друк виконується методом, схожим на двовимірний друк. Матеріал наносять струменем на робочу зону (рис. 1.2), затвердіння відбувається шляхом опроміненням ультрафіолетовим світлом.

Через те що матеріали наносяться струменем є обмеження в їх використанні. Зазвичай використовують полімери або віск, які широко використовуються через їх природню в'язкість та здатність утворювати краплі.

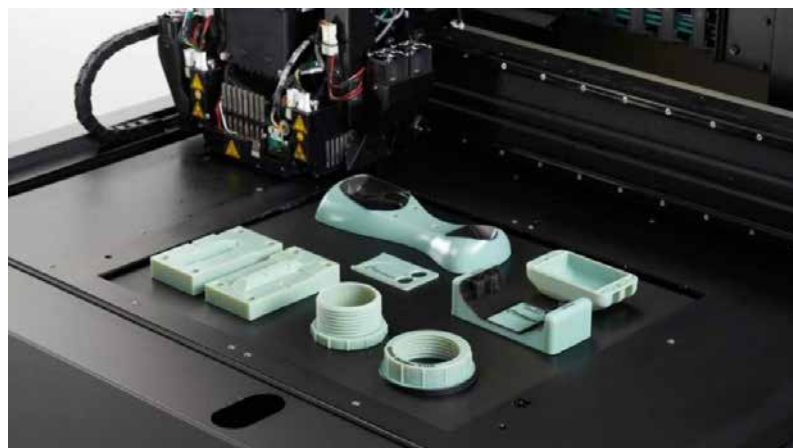


Рис. 1.2. Струменеве нанесення матеріалу [28]

Струменеве зв'язування (Binder Jetting) вважається найбільш економічним. Для цього використовуються зв'язуючі речовини і порошкові матеріали такі, як кераміка, метали і полімери.

За допомогою ролика на робочу платформу наноситься матеріал, поверх якого через сопло накладається сполучник, цей цикл повторюється поки друк не буде закінчений (рис. 1.3).

Недоліки цього методу є не найкращий вибір для друку конструкційних деталей та збільшений час кінцевої обробки через сполучні матеріали.



Рис. 1.3. Струменеве зв'язування [29]

Розплавлення матеріалу в сформовану шарі, в цьому методі використання порошку для друку.

Селективне лазерне спікання (SLS) – це процес, який працює з порошками на основі полімерів (нейлон, PEKK) які створюють тверді, шар за шаром компоненти, шляхом спікання частинок порошку за допомогою лазера. Металеві порошки в цьому методі не використовуються.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сплавленням металевого порошку можуть виконуватися методами: 3D-друк лазерним променем (LPBF) та електронним променем (EPBF). В такому випадку розплавлення матеріалу відбувається в ізольованому просторі з використанням азоту або аргону. Інертна атмосфера запобігає окисленню порошку під час плавлення.

Електронне променеве плавлення (EBM) виконується подібно до EPBF. Однак замість лазера в процесі друку використовується електронний промінь. Плавлення здійснюється у вакуумній камері (рис. 1.4), що дозволяє запобігати окислення металевому матеріалу, які чутливі до взаємодії з киснем при високих температурах. Додатково це знижує ризик отруєння шкідливими парами. Крім того, це дозволяє покращити точність та контроль над електронним променем.



Рис. 1.4. Електронне променеве плавлення [1]

До переваг такої технології 3D друку можна віднести:

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

- Можливість друку виробів зі складною геометрією.
- Створення цілого об'єкта, а не окремих компонентів, що дозволяє зменшити витрати на виробництво [4].

Листове ламінування (Sheet Lamination) – метод який дозволяє з'єднувати шари за допомогою ультразвукового зварювання або клею.

Процес ламінування включає ультразвукове адитивне виробництво та виробництво ламінованих об'єктів. Різниця полягає у використаному матеріалі та процесі склеювання.

Ультразвукове адитивне виробництво використовує листи або стрічки з металу, які скріплюються разом за допомогою ультразвукового зварювання. Виробництво ламінованих об'єктів використовує подібний пошаровий підхід, у якості матеріалу використовується папір, а замість зварювання листи склеюються.

Через особливості застосовуваних матеріалів та методів склеювання цей спосіб не підходить для виготовлення конструкційних деталей і в основному використовується для візуально привабливих виробів.



Рис. 1.5. Листове ламінування [1]

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Пряме осадження енергії (Directed Energy Deposition) зазвичай використовується у відновленні та ремонті деталей, інколи і для виготовлення нових компонентів.

В такій технології розплавлений матеріал наноситься на певну поверхню, де він твердне за допомогою сфокусованого джерела тепла (рис. 1.6), сплавляючи матеріали разом, утворюючи структуру. Для подачі матеріалу машина використовує сопло, встановлене на багатоосьовому кронштейні, який може рухатися в різних напрямках.

Робота виконується в спеціальних камерах зі зниженням рівнем кисню. При використанні систем на основі електронного променя процес виконується у вакуумі, лазерні системи використовують повністю інертну камеру бо для роботи використовуються реактивні матеріали.

Пряме осадження енергії також відоме під іншими назвами такими, як виготовленням за допомогою спрямованого світла, лазерне формування сітки, пряме металеве осадження, електронно-променево адитивне виробництво.

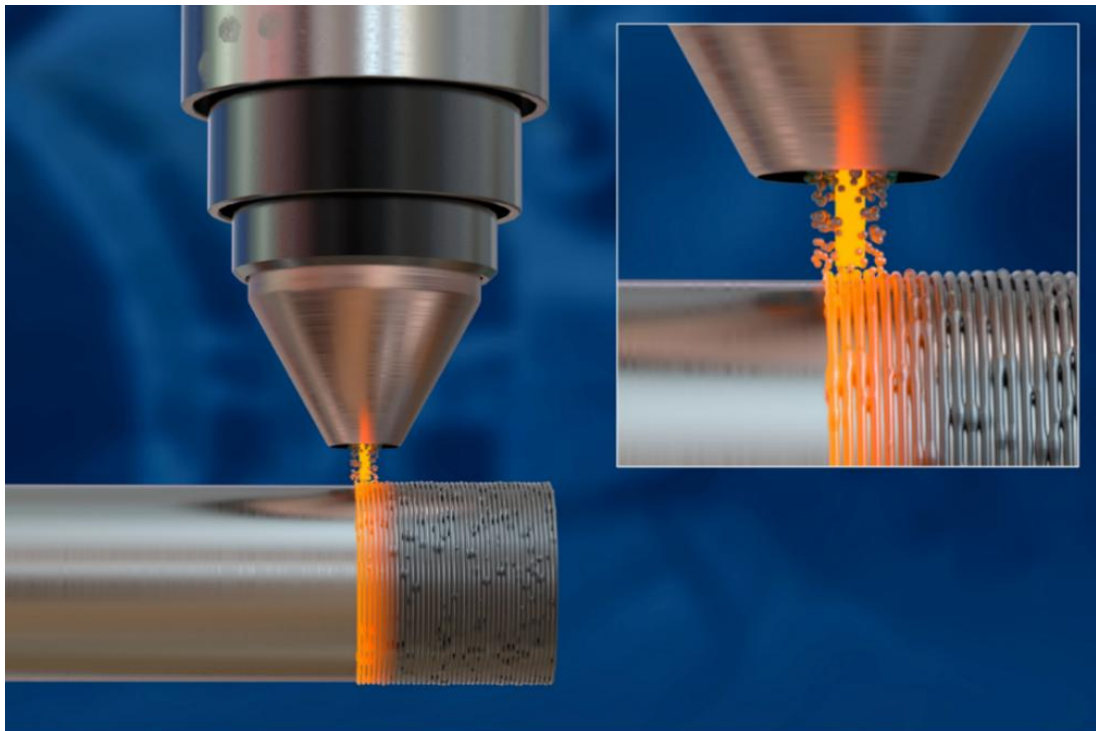


Рис. 1.6. Пряме осадження енергії [30]

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

До переваг такої технології можна віднести:

- Висока швидкість осадження матеріалу
- Майже відсутність відходів, що сприяє зниженню зайвих витрат
- Повний контроль над структурою зерна, що в свою чергу дає можливість для високоякісного ремонту деталей
- Для виготовлення великогабаритних деталей потрібна мінімальна кількість оснащення.
- Можливість створення гібридних структур, використовуючи декілька матеріалів з різним складом.

Окрім того, існує низка недоліків:

- Потреба в обробці готового виробу.
- Обмежена кількість матеріалів, які придатні для використання,
- Процеси потребують додаткових досліджень та вдосконалення для повноцінного впровадження у масове виробництво.

Витискування матеріалу (Material Extrusion) – метод, який часто зустрічається в домашніх 3D принтерах. Він є найдешевшим та простим в освоєнні для користувача.

Технологія FDM (Fused Deposition Modeling), як і інші методи адитивного виробництва, базується на принципі пошарового друку на основі 3D моделей. Матеріалом для друку використовують спеціальні пластикові нитки, що в діаметрі можуть бути від 1.75 мм до 2.85 мм.

Для початку друку цифрову модель об'єкту підготовлюють за допомогою спеціальних програм, таких як Repetier Host (рис. 1.7), OrcaSlicer, CreatWare. В цих програмах тривимірна модель розрізається по шарам, в результаті створюється G-код.

У процесі 3D друку пластиковий пруток безперервно подається в екструдер. Під впливом температури пластик плавиться і подається через сопло на робочу платформу (рис. 1.8). Екструдер рухається по координатах отриманих з G-коду формуючи нові шари поверх попередніх.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

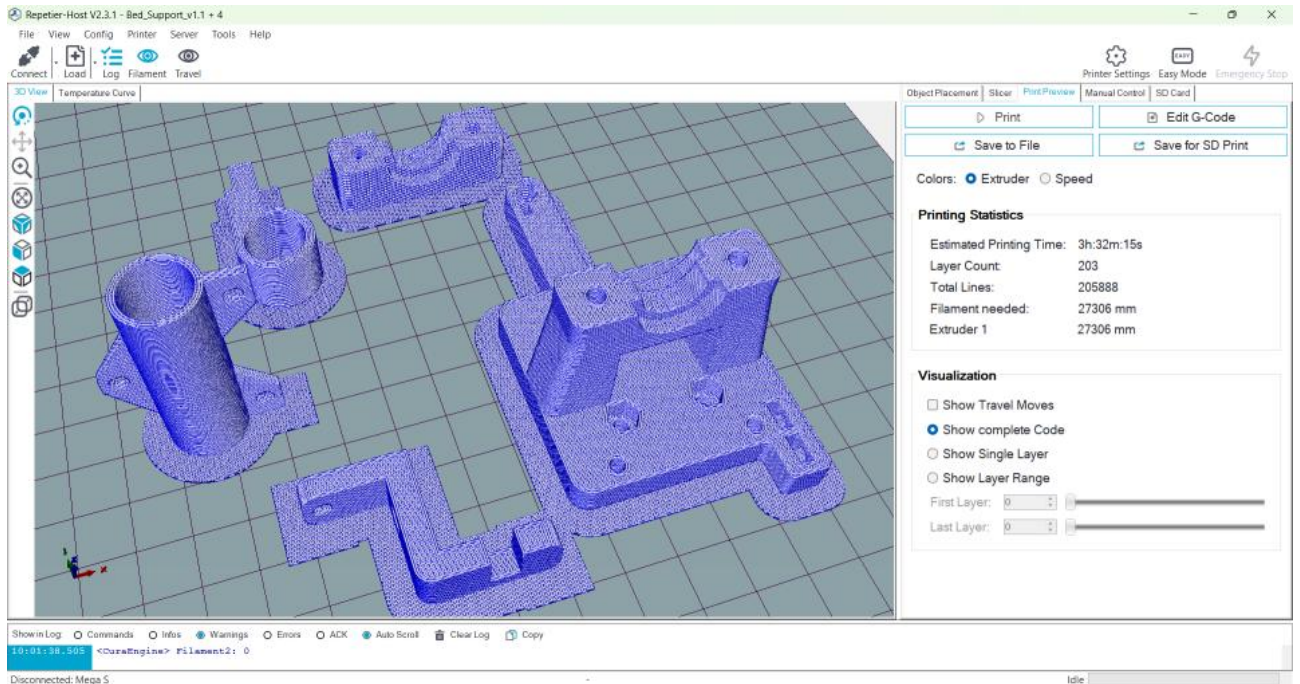


Рис. 1.7. Інтерфейс програми Repetier Host

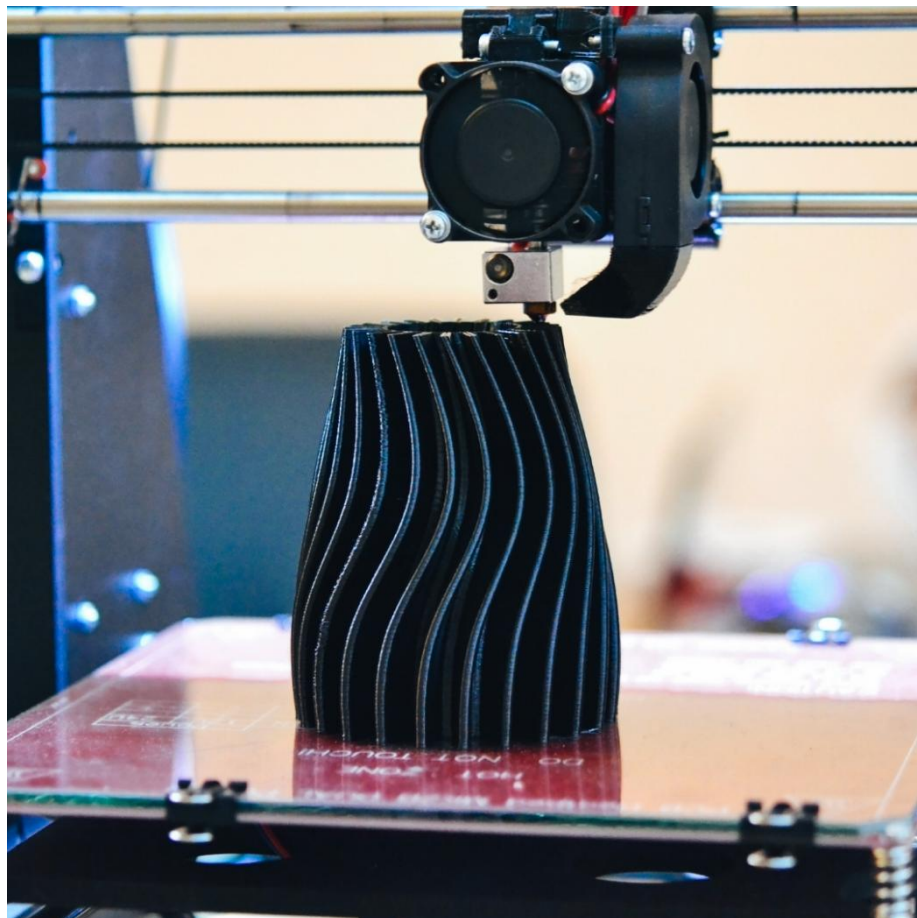


Рис. 1.8. Друк методом наплавлення [31]

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Для даного методу 3D друку можна виділити такі переваги: простота експлуатації, низька вартість обладнання та матеріалів, великий вибір матеріалу для друку, підходить для швидкого створення прототипів. Також є недоліки даної технології, серед них низька точність, потреба у підтримках, низька деталізація під час друку.

1.2.Будова та принцип роботи 3D принтера FDM

FDM 3D принтер (рис. 1.9), це пристрій, що дозволяє створювати об'ємні об'єкти шляхом поступового нашарування матеріалу відповідно до CAD моделі. Принцип дії подібний на роботу верстатів з числовим програмним керуванням, але замість зняття матеріалу, використовується адитивна технологія нанесення матеріалу шарами. Конфігурація принтерів відрізняється залежно від моделі, проте кожен можна класифікувати за кінематикою, типом рами, типом та розміром нагрівальної платформи, типом екструдера, системою приводу та системою керування [8].

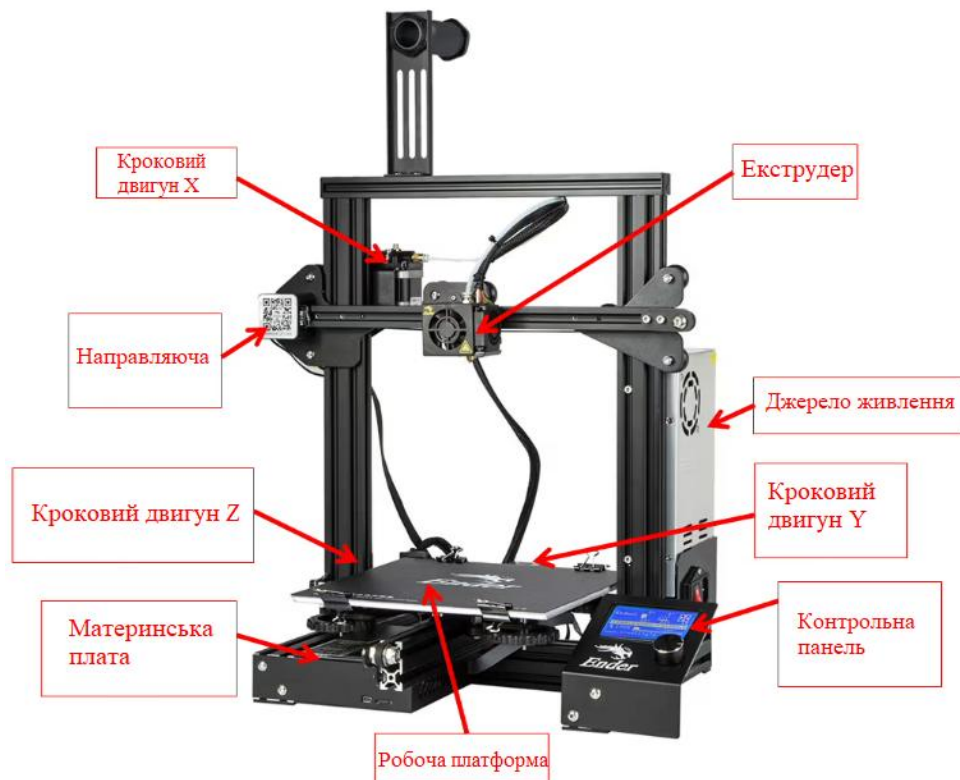


Рис. 1.9. FDM 3D принтер [32]

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1.2.1. Кінематика

Кінематика 3D принтерів – траєкторія по якій рухається платформа з екструдером. Можна виділити три основні схеми, це дельта принтери, кінематика Prusa, декартова.

Особливістю дельта принтерів є нерухома платформа для друку та рухомий екструдер закріплений на вертикальних напрямних (рис. 1.10). На кожній встановлено кроковий двигун, що дозволяє вільно пересуватися у трьох площинах.

До переваг дельта принтера відносять:

- Висока швидкість друку
- Компактність в ширину
- Низькі енерговитрати

До недоліків відносять:

- Низька точність друку, через переміщення незалежних приводів
- Складний для самостійної збірки та калібрування
- Висока вартість компонентів



Рис. 1.10. Дельта 3D принтер

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Найпопулярніша кінематика Prusa при якому робочий стіл переміщується вперед – назад, а екструдер рухається вправо – вліво та вгору – вниз (рис. 1.11).

До переваг відносять:

- Дешевість компонентів.
- Відкрита конструкція, що дозволяє легко дістатися елементів конструкцій.
- Легка збірка, більшість саморобних конструкцій зібрані за даною схемою.

Недоліками являється:

- Низька жорсткість конструкції, що призводить до погіршення якості друку через вібрації.
- Висока чутливість до калібрування.
- Через відкритість конструкцій, можливість протягів або перепадів температур, що негативно впливає на адгезію шарів.

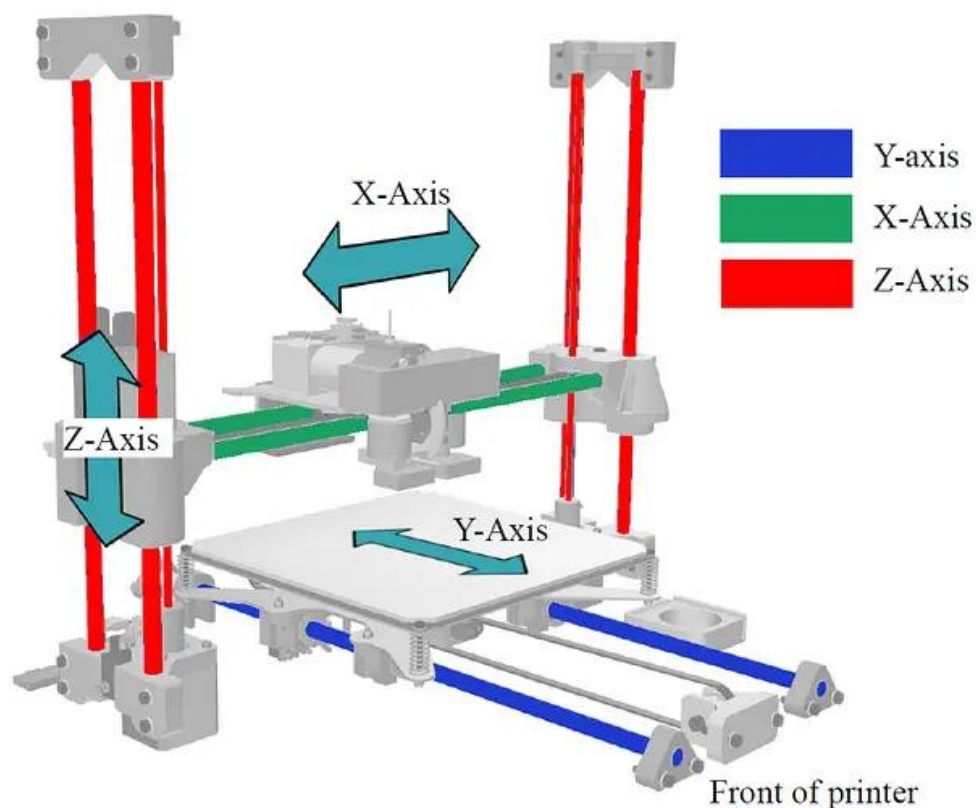


Рис. 1.11. Кінематика Prusa [33]

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Також можна виділити одну з найпоширеніших кінематичних схем це декартова кінематика. У таких принтерах екструдер виконує переміщення по осях X та Y, а друкована платформа рухається по вісі Z. Ця кінематика забезпечує високу стабільність і точність.

Дана конструкція характеризується міцністю, та жорсткістю конструкції, що мінімізує вібрації та забезпечує чітке нанесення шарів. Виділяють високу швидкість друку та можливість масштабування не втрачаючи точності. Саме тому декартові принтери вважають оптимальним вибором.

З недоліків - складність складання, що призводить до підвищення вартості обслуговування та виробництва.

1.2.2. Робоча платформа

В 3D принтерах, для побудови об'єкта використовується робоча платформа. Вона може бути стаціонарною або рухомою, залежно від конструкції пристрою. Основа платформи виготовляється з алюмінію або композитних матеріалів, на яку накладається робоча пластина. При виборі пластини звертається увага на сумісність філаменту з верхнім покриттям, бо від поверхні залежить адгезії першого шару.

Скляні платформи(загартоване або карборундове скло) є універсальними для PLA, PETG чи нейлону за рахунок рівної, термостійкої основи (рис. 1.12). Для друку складних матеріалів потребує додаткового нанесення клею або лаку.

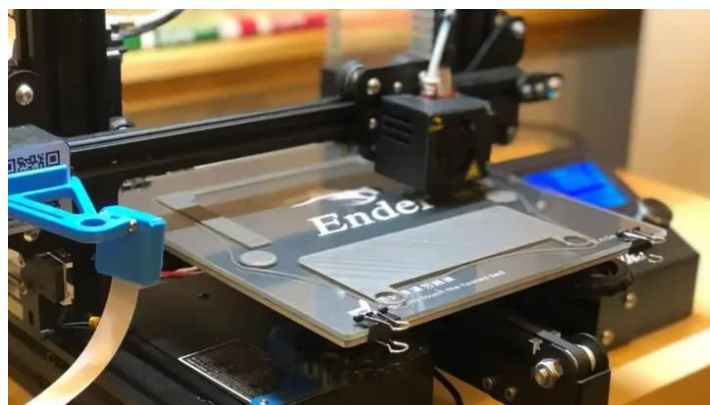


Рис. 1.12. Скляна поверхня [10]

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Альтернативною склу може бути пружина сталь із покриттям PEI, яка поєднує міцну, але гнучку основу з глянцевою або текстурованою шаром термопластику. При використанні гладкого PEI нижня частина виробу стає блискучою, що іноді ускладнює відділення готової деталі. Використання текстурованого PEI спрощує зняття, оскільки модель прилипає лише у виступах. Через магнітні властивості пружинної сталі спрощується заміна платформи.

Менш розповсюдженим, але перспективним варіантом є композитний матеріал G10 (Garolite, FR4). Відомий своєю жорсткістю та відмінним зчепленням з PLA, PETG та нейлоном, що є гарним рішенням для складних інженерних деталей (рис. 1.13) [9].

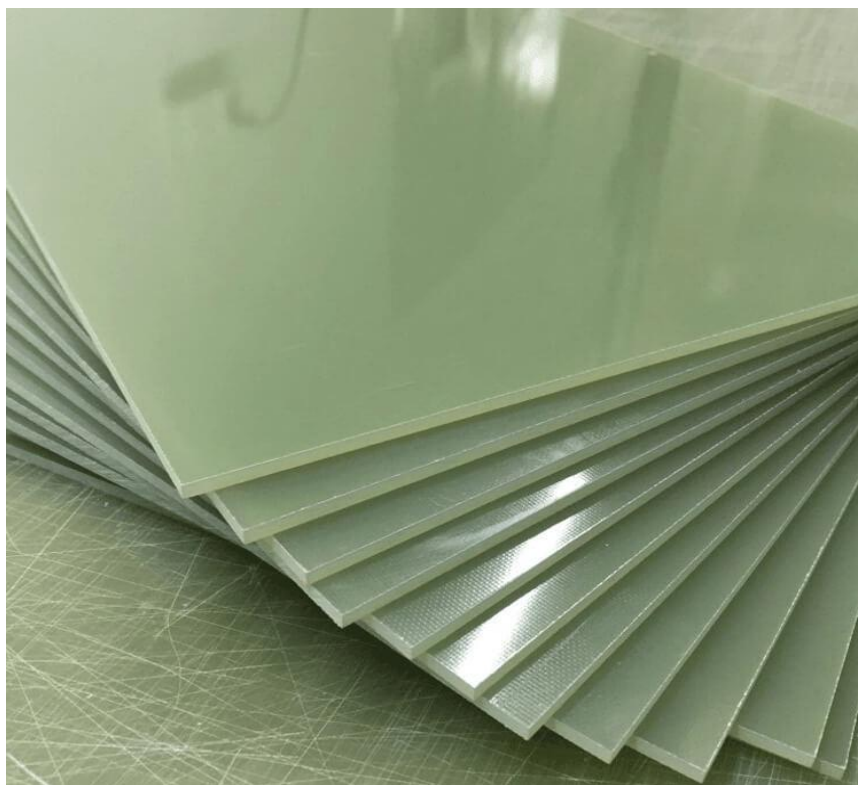


Рис. 1.13. Листи композитного матеріалу G10 [34]

Для швидкого оновлення робочої поверхні використовують каптонову стрічку (рис. 1.14) – тонку поліімідну плівку з клейовою основою, яка витримує

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

температуру до 280°, має хорошу адгезію з PLA та ABS пластиком і не потребує довгих налаштувань.

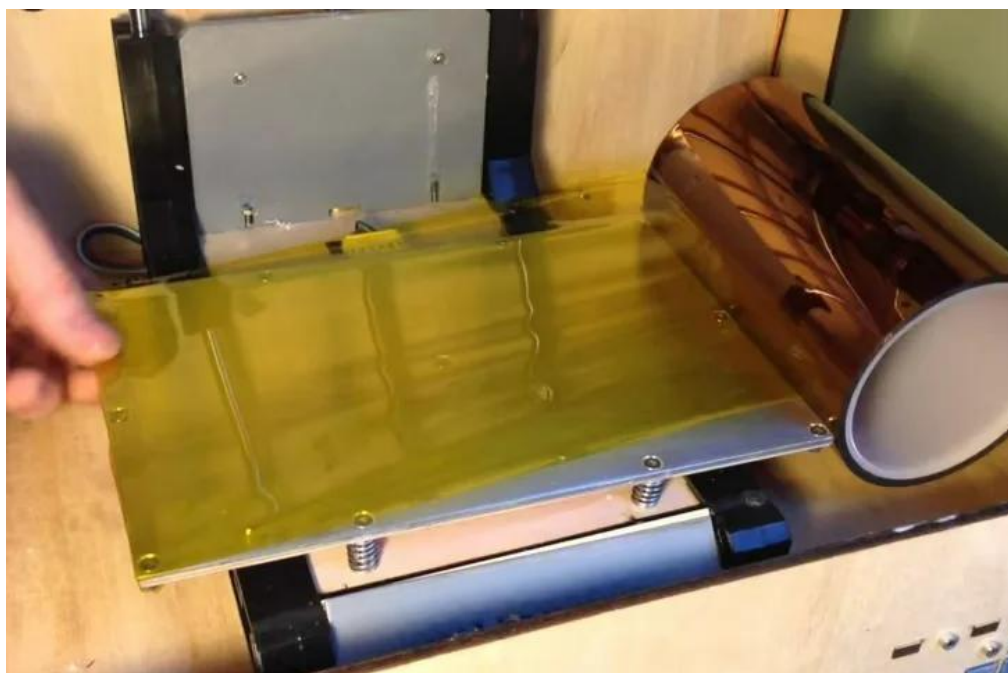


Рис. 1.14. Нанесення капронової стрічки на робочу платформу [10]

1.2.3. Екструдер

Екструдер – ключовий елемент 3D принтера, який подає, нагріває та видавлює пластиковий філамент для створення тривимірних об’єктів. Від його якості залежить точність, і стабільність процесу друку.

Роботу екструдера можна поділити на три етапи. Спочатку пластиковий пруток захоплюється механізмом передаючи його у нагрівальну частину, де розплавляючи передається до сопла. Потім через сопло наноситься на робочу платформу або вже надрукований шар.

Механізм подачі пластикового прутка слугує для точного проштовхування матеріалу до гарячої частини, за допомогою крокових двигунів, що обертають шестерні та ролики. В залежності від матеріалу, притискання роликів можна регулювати, надмірне зусилля призводить до деформації.

У гарячій частині пластиковий пруток переходить від твердого у рідкий стан. У ній розташовані нагрівальний елемент, терморезистор для вимірювання температури та сопло. Важливою складовою є теплова ізоляція або термобар'єр, який розмежовує зони, не допускаючи теплопередачі.

Стабільність роботи екструдера залежить від правильної синхронізації подачі матеріалу та його плавлення. При надто низькій температурі або швидкій подачі матеріал не встигатиме плавитися, що призводить до пропусків або забитого сопла. Перегрівання викликає деградацію пластику – появи бульбашок або ниток

Залежно від розміщення подаючого механізму, екструдери поділяють на два типи – прямий та боуден.

У прямому екструдері (рис. 1.15) двигун розташовується біля гарячої частини, тому філамент долає мінімальну відстань перед плавленням. Це забезпечує високу точність й особливо корисно при друці гнучкими матеріалами типу TPU. Однак недоліком є більша вага, яка може вплинути на динаміку руху принтера.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

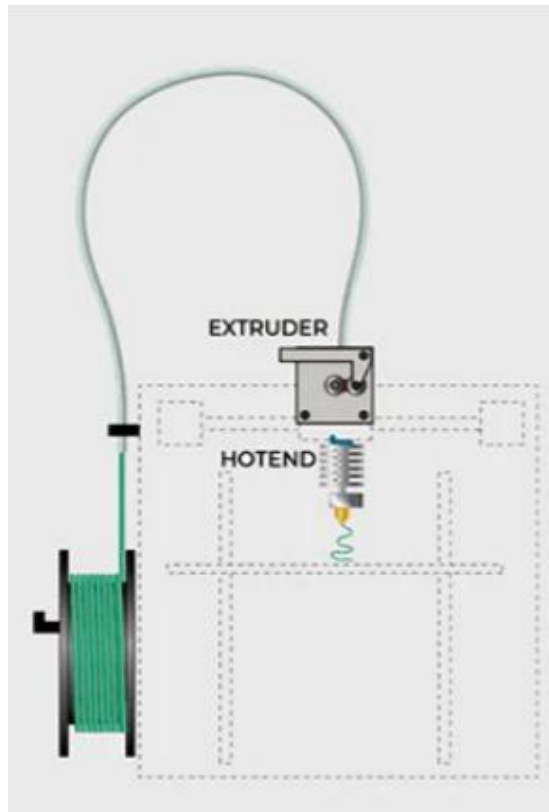


Рис. 1.15. Прямий екструдер [35]

Боуден система (рис. 1.16), має віддалений механізм подачі. Філамент передається до гарячої частини через тefлонову трубку. Це забезпечує зменшення маси друкуючої голівки і забезпечує вищу швидкість та плавність руху. Недоліком є менша ефективність з гнучкими або ламкими філаментами через підвищене тертя в трубці.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

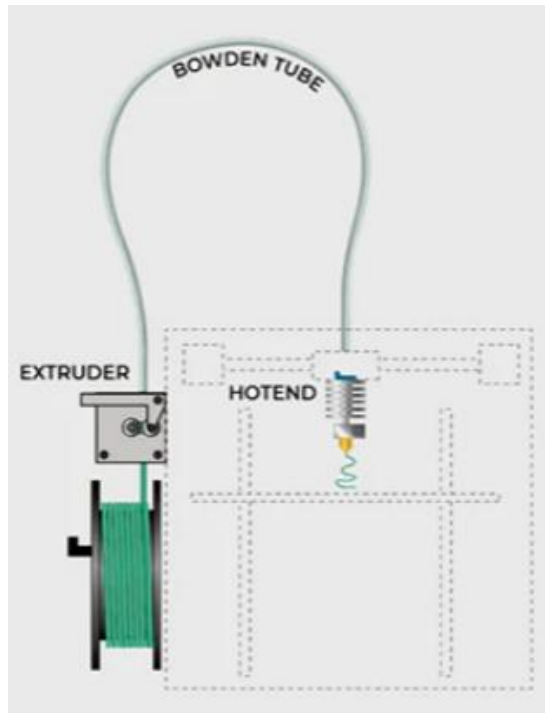


Рис. 1.16. Екструдер Боудена [35]

1.2.4. Система приводу

В 3D принтерах для приводу механізмів використовуються крокові двигуни, це електродвигун, який здійснює обертальний рух не плавно, а дискретно, тобто окремими кутовими кроками. Це забезпечує точне позиціонування, що є критично важливим для пристроїв, де потрібна висока точність, зокрема для 3D принтерів, лазерних граверів та верстатів із числовим програмним керуванням.

У 3D принтері крокові двигуни встановлюють на осях – X, Y та Z. Осі X та Y зазвичай використовують ремінну передачу, Z в свою чергу на гвинтову щоб витримувати вагу платформи. Окремий двигун в екструдері відповідає за подачу пластикового прутка.

До переваг крокового двигуна відносять:

- Надійність, через відсутність щіток
- Висока точність позиціонування
- Простота інтеграції з драйверами та контролерами 3D принтерів

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Часто використовують класифікацію NEMA (рис. 1.17), яка встановлює стандартні розміри фланця двигуна. Найпоширенішими є NEMA 17 і NEMA 23.



Рис. 1.17. Кроковий двигун NEMA 42 [36]

При виборі крокового двигуна звертають на габарити, кількість кроків на оберт, номінальний струм та крутний момент. Останній показник визначає силу, з якою двигун обертається.

1.3. Матеріали для 3D друку

Стрімкий розвиток 3D друку, зокрема, завдячує розширенню спектра доступних матеріалів. Якщо на початку тривимірне моделювання обмежувалось пластмасами, то на сьогодні в друці використовують не лише полімери, а й порошки, смоли, метали та композити на основі вуглецевого волокна або графену. Завдяки такій різноманітності матеріалів друк використовується майже у всіх сферах життя.

Найпоширенішим матеріалом залишається пластик, що використовується переважно у FDM – технологіях. Серед найбільш популярних полімерів – PLA (рис. 1.18), який є екологічним та біорозкладним, добре підходить як для домашнього, так і для навчального друку. Наступним за популярністю є ABS, що відомий своєю міцністю та еластичністю. Його часто застосовують при виготовленні іграшок, зокрема для деталей LEGO. Також PVA, він розчинний у воді часто використовуються для друку підтримок.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24



Рис. 1.18. Котушка PLA пластику [37]

У промисловому друці популярності набуває друк із порошкових матеріалів. Технології типу селективного лазерного спікання дають змогу створювати об'єкти з високим рівнем деталізації. Порошки виготовляють з нейлону, який забезпечує еластичність і міцність та алюміду – суміші поліаміду з алюмінієм, який дозволяє отримати вироби з шорсткою поверхнею.

Також використовується металеві порошки, які можуть бути з нержавіючої сталі, бронзи, алюмінію. Це дає змогу отримати складні конструкції з меншою кількістю складових частин, що є вирішальним для авіації та автомобілебудуванню.

Для задач, де важливо висока деталізація особливо при невеликих розмірах застосовується фотополімерні смоли. Прозорі, структурні та фарбовані смоли забезпечують добру механічну якість.

Крім традиційних матеріалів, активний розвиток у напрямку застосування композитів. Вуглецеві волокна дедалі частіше використовуються як армувальний компонент у пластикових вікнах, що дає підвищення міцності без суттєвого збільшення ваги. Графен надзвичайно електропровідний та гнучкий, що робить його ідеальним для сенсорних елементів та мікроелектроніки.

Нітинол, це сплав нікелю з титаном, має ефект пам'яті форми. Даний матеріал деформується і відновлює первісний вигляд без руйнування

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

структурної цілісності, що робить його ідеальним вибором в медичних імплантатах.

1.4.Способи підвищення продуктивності друку 3D принтера

Незважаючи на те, що принтери використовуються в більшості сферах життя та промисловості, традиційні принтери із одним екструдером – досі мають низку суттєвих обмежень. Одним з основних недоліків є тривалий час друку при масовому виготовленні ідентичних деталей. Дані обмеження стимулюють розробку нових рішень, серед яких привертають увагу конструкції з кількома друкуючими головками.

Для вирішення цієї проблеми дослідниками було запропоновано модифікацію загально доступного принтера Prusa i3MK2S шляхом інтеграції двох друкуючих головок (рис. 1.19) [16].

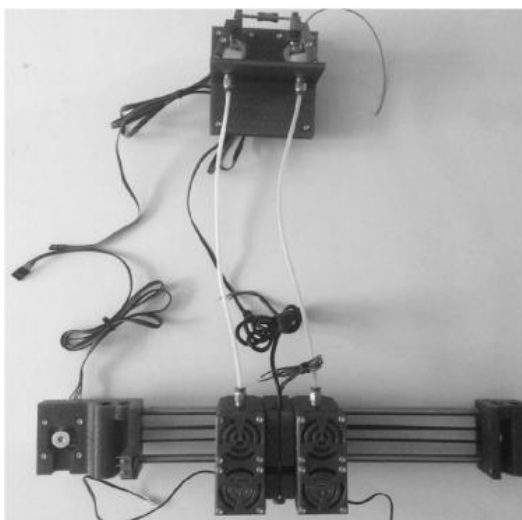


Рис. 1.19. Прототип двох друкуючих головок [16]

Дана система дозволяє використовувати одночасно два різних матеріали без потреб в дорогому обладнанні. Ключовим є те, що при цьому було збережено максимальну площу друку, що важливо для сумісності пристрою з базових платформ.

Також запропоноване рішення головки з подвійним екструдерами, які працюють на одному приводному двигуні (рис. 1.20). Конструкція передбачає наявність двох окремих блоків подачі матеріалу, кожен з яких функціонує

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

незалежно й містить власне сопло. Загальний двигун керує обома системами подачі, забезпечуючи роботу. Даний підхід дозволяє зменшити кількість рухомих частин і підвищити надійність конструкції [15].

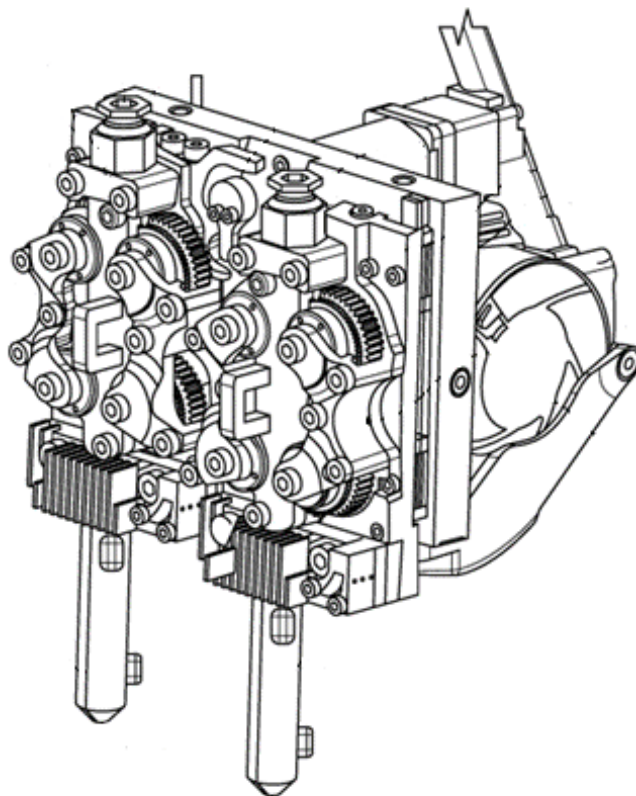


Рис. 1.20. Конструкція з подвійними екструдерами на одному двигуні [15]

Перспективним напрямком розвитку стала технологія IDEX (Independent Dual Extruder), яка базується на тому, що обидва екструдери можуть рухатися незалежно один від одного (рис. 1.21). Це забезпечує можливість одночасного дзеркального друку або повного дублювання, синхронного створення двох ідентичних моделей. Під час роботи один екструдер перебуває в активному стані, інший перебуває поза зоною друку. Даний підхід підвищує продуктивність і зменшує час на виготовлення партій деталей [13].

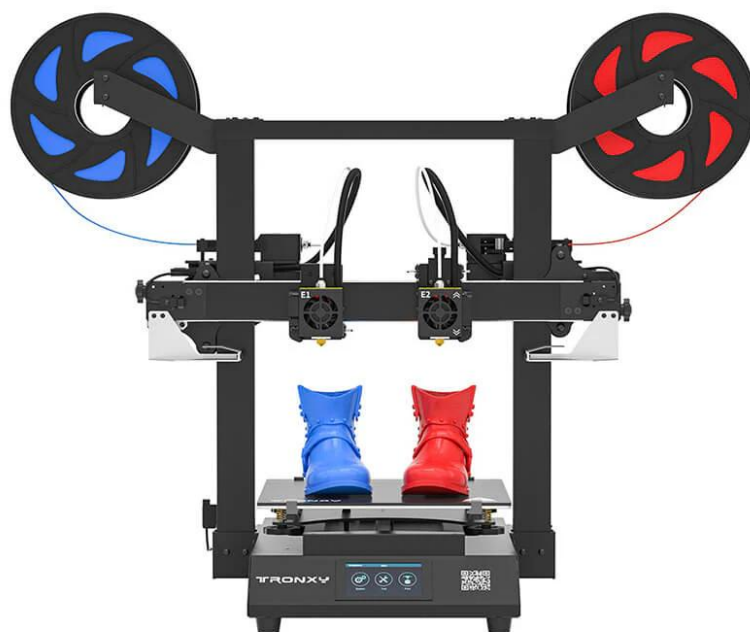


Рис. 1.21. 3D принтер зі встановленою системою IDEX [38]

Серед новітніх розробок привертає увагу промисловий 3D принтер OrangeStorm Giga, який підтримує чотири друкуючі голівки. Попри очевидні переваги, така система має недолік – складне та тривале калібрування, оскільки кожен екструдер потребує окремого налаштування. Це збільшує підготовчий час і створює додаткове навантаження на оператора.

1.5. Обґрунтування вдосконалення 3D принтера

В умовах зростаючого попиту на багатофункціональні 3D принтери увагу заслуговує ідея розміщення двох екструдерів на одній каретці. Такий підхід дозволяє значно розширити функціональність принтера, зберігаючи компактність конструкції та керованість процесом друку.

Дане вдосконалення відкриває можливість одночасного використання різних матеріалів або кольорів без необхідності зупинки друку для заміни філаменту. Порівняно з конфігураціями, де екструдери працюють автономно на

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

хокремих напрямних, система з двома соплами на одній платформі є простішою та легшою в налаштуванні. Вона не вимагає складного механічного узгодження між екструдерами, що зменшує кількість помилок.

Особливої актуальності ця архітектура набуває в умовах обмеженої зони друку в бюджетних моделях. При закріпленні обох екструдерів на одній каретці не відбувається зменшення площі платформи, що характерно при встановленні механізмів типу IDEX.

Окрім цього, розміщення обох екструдерів на суцільній каретці дає змогу встановлення спільної системи терморегуляції, або вентилятора, що спрощує обслуговування та кількість рухомих частин.

Загалом, така конструкція забезпечує не лише розширення функціональних можливостей принтера, а й оптимізує процес друку, покращує продуктивність та підвищує якість друку.

Проаналізувавши сучасні технічні рішення, зокрема покращення, реалізовані для моделей Prusa, пропонується адаптувати подібну конструкцію для 3D принтерів типу CoreXY. Це дозволить отримати переваги двоекструдного друку без значного ускладнення конструкції та підвищити загальну продуктивність.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

2. ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ 3D ПРИНТЕРА

2.1. Розробка каретки 3D принтера

У 3D принтері HyperCube, використовується високопродуктивний екструдер E3D V6 (рис. 2.1) з віддаленою системою подачі через трубку, соплом діаметром 0,4 мм та термобар'єром під пластиковий пруток діаметром 1,75 мм. Живиться напругою 12 В та оснащений вентилятором. Має класичну боуден конфігурацію, що дозволяє зменшити масу рухомої частини друкувального блоку, це забезпечує вищу швидкість та стабільність під час друку.



Рис. 2.1. Будова екструдера E3D V6 [39]

Екструдер виготовлений з металевих елементів – зокрема з нержавіючої сталі та алюмінію, що гарантує термостійкість і довговічність під час тривалої роботи на високих температурах.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Клименко А.А			Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Крушельницький В.				30	54
Н. Контр.					НУБіП України		
Затверд.							

Особливістю конструкції E3D V6 є її модульність – доступна велика кількість змінних сопел, блоків нагріву та сенсорів, що дозволяє адаптувати систему до друку різноманітними матеріалами.

Завдяки ефективній системі охолодження, екструдер підтримує стабільну температуру навколо зони плавлення, запобігаючи передчасному розм'якшеному пластиковий прутку у боуден трубці, що важливо при роботі з гнучкими або чутливими до перегріву матеріалами.

Простота монтажу і обслуговування також робить його зручним у використанні: його компоновка дозволяє швидко встановити або замінити окремі частини без значних зусиль чи спеціального інструменту.

Оскільки стандартна каретка (рис. 2.2) підтримує встановлення лише одного екструдера, пропонується спроектувати модель каретки (рис. 2.3), яка забезпечує можливість розміщення двох екструдерів. Це рішення дозволяє розширити функціональність 3D принтера, зокрема реалізувати друк із двох різних матеріалів або кольорів та збільшити саму продуктивність принтера.

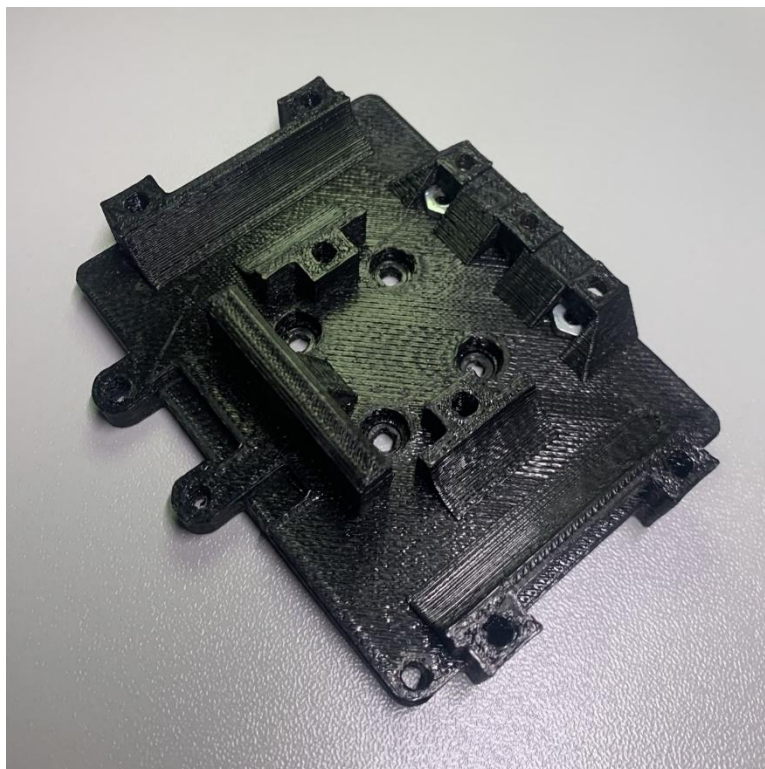


Рис. 2.2. Стандартна каретка 3D принтера HyperCube

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

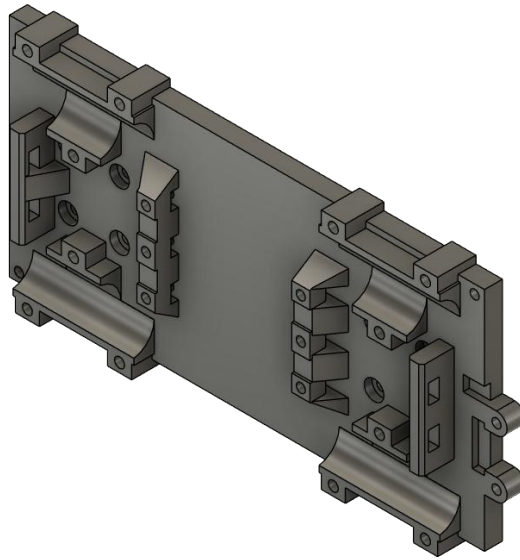


Рис. 2.3. Створена модель каретки для встановлення двох екструдерів

Каретка нового зразка була розроблена з урахуванням розмірів нагрівальної платформи, оскільки даний параметр визначає допустиму відстань між екструдерами без зменшення допустимої площі для друку.

Розрахунок відстані між двома екструдерами, які встановлені на одній спільній каретці. Основою даного розрахунку є розмір нагрівальної платформи 200x200 мм. З метою оптимального використання площі друку пропонується умовно поділити на дві робочих зони (рис. 2.4), кожна з яких буде закріплена за відповідним екструдером.

Визначення відстані між центрами екструдерів:

$$L_{\text{центра}} = \frac{W}{2},$$

де: $L_{\text{центра}}$ - відстань між центрами екструдерів;

W – ширина робочої платформи.

Підставляємо значення у формулу з урахуванням що ширина платформи 200 мм:

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

$$L_{\text{центра}} = \frac{200}{2} = 100 \text{ мм}$$

Кожен екструдер обслуговує половину площі, тому площа однієї робочої зони вираховується так:

$$S_{\text{екст}} = W_{\text{зони}} \times H_{\text{зони}},$$

де: $S_{\text{екст}}$ – площа робочої зони одного екструдера;

$W_{\text{зони}}$ – ширина зони яка становить 100 мм;

$H_{\text{зони}}$ - висота зони яка становить 200 мм;

Підставляємо значення у формулу:

$$S_{\text{екст}} = 200 \times 100 = 20000 \text{ мм}^2$$

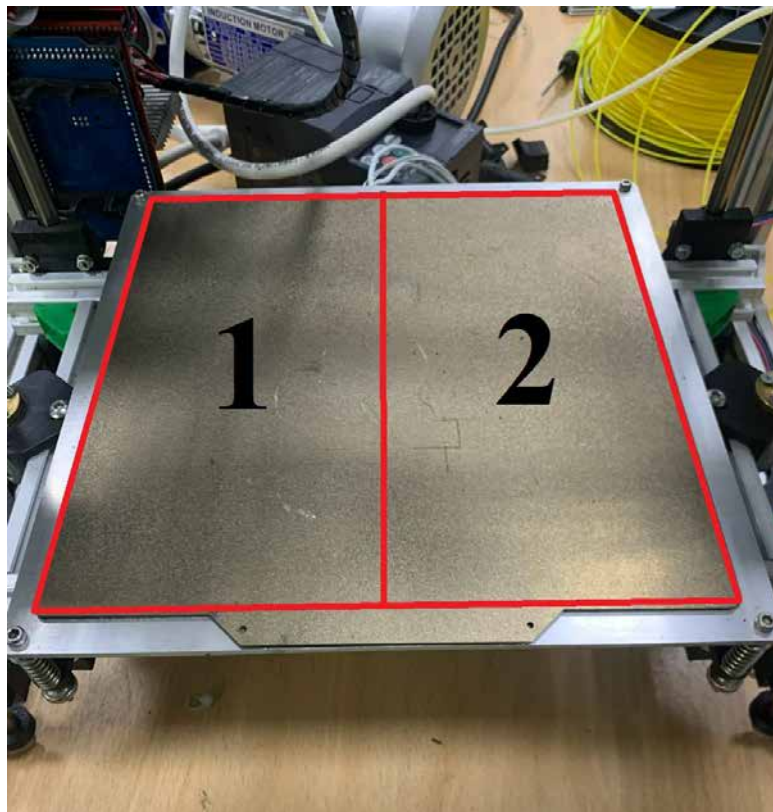


Рис. 2.4. Нагрівальна платформа з поділом на дві зони

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Для точного моделювання необхідно провести вимірювання габаритних розмірів оригінальної каретки, після чого ці значення використовуються для створення оновленої версії. Це дає змогу забезпечити відповідність між конструкцією та геометрією рухомого модуля, уникнути механічних конфліктів і зберегти кінематичну точність.

Розрахунок геометрії оновленої каретки виконується на базі старої каретки, де екструдер розміщуються по центру платформи. У новій конфігурації, де планується встановлення двох екструдерів, необхідно спроектувати каретку, щоб відстань між їхніми центрами становила 100 мм.

$$l_{\text{центра}} = 100 - l_{\text{кар}} \times 2,$$

де: $l_{\text{центра}}$ – необхідна додаткова відстань між центрами екструдерів для досягнення розміру 100мм;

$l_{\text{кар}}$ – відстань від центру оригінальної каретки до її краю;

В результаті отримаємо:

$$l_{\text{центра}} = 100 - 28 \times 2 = 44 \text{ мм}$$

Цей розрахунок дозволяє визначити, наскільки необхідно змінити розміри конструкції, щоб забезпечити симетричне розташування обох екструдерів при цьому уникаючи перекриття зон друку.

На основі проведених розрахунків було розроблено 3D модель каретки, яка забезпечує розташування двох екструдерів на необхідній відстані. Після чого виготовлена за допомогою 3D друку технологією FDM (рис. 2.5) та встановлена на принтер HyperCube (рис. 2.6).

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

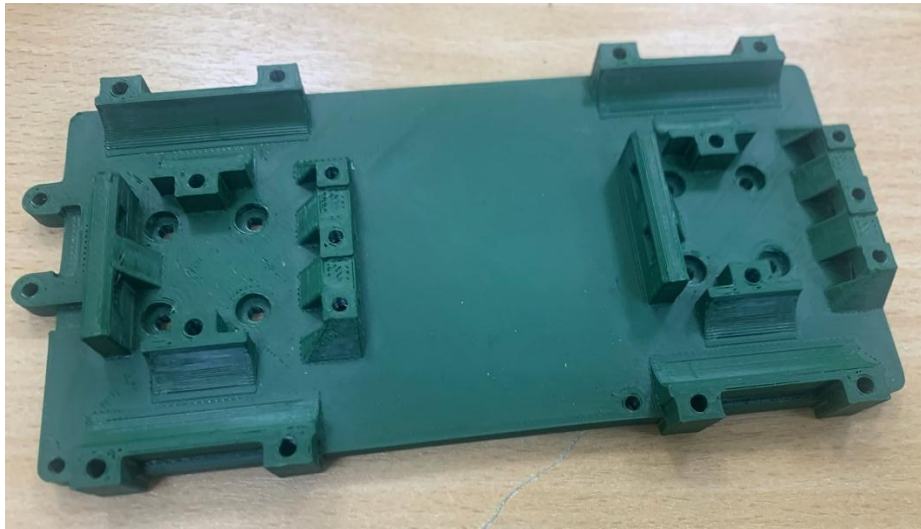


Рис. 2.5. Роздрукована каретка для двох екструдерів

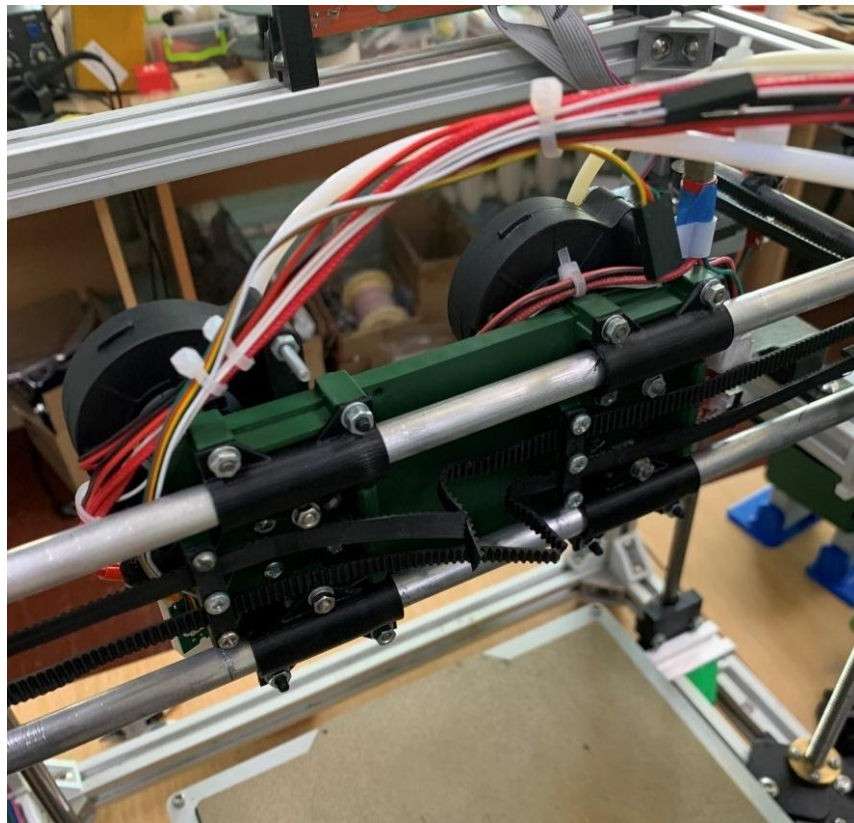


Рис. 2.6. 3D принтер NureCube з вдосконаленою кареткою

2.2.Механізм подачі матеріалу

У конструкції подачі філаменту, на 3D принтері NureCube, використовується кроковий двигун 17HS4401. Цей тип двигуна є один з

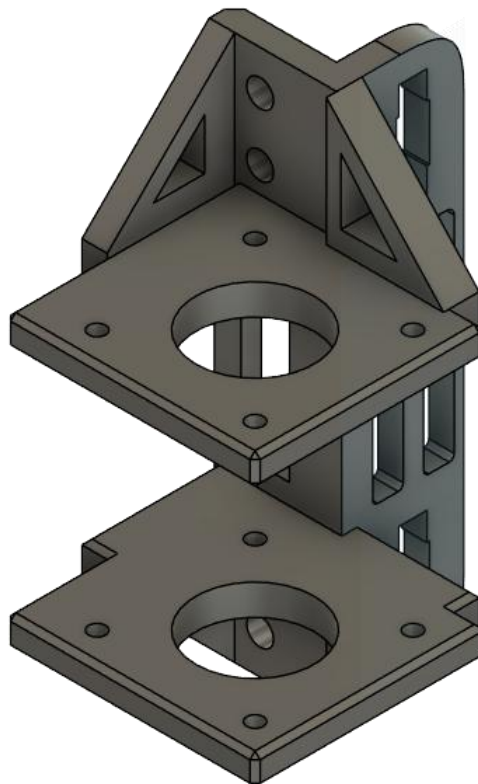
					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

найпоширеніших у сфері 3D друку та застосовується також у компактних верстатах з числовим програмним керуванням.

Модель 17HS4401 характеризується високою точністю позиціонування – $1,8^\circ$ на один крок, що дозволяє забезпечити плавний контрольований рух у процесі подачі пластикового прутка. Двигун працює при струмі 1.7 А, а внутрішні електричні характеристики - опір 1.5 Ом і індуктивність 2.8 мГн – забезпечують хорошу реакцію при використанні драйверів DRV8825 або A4988.

Підключення двигуна здійснюється через шести піновий конектор. Для стандартної схеми під'єднання використовується чотири дроти – два крайніх та два центральних.

З метою реалізації подвійної подачі філаменту, виникла необхідність встановлення другого двигуна. Для цього було розроблено нове кріплення, яке забезпечує одночасне закріплення двох крокових двигунів та механізмів подачі на одному кріпленні.



					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис 2.7. Створена модель подвійного кріплення двигунів

Подача прутку пластику відбувається за допомогою механізму МК8 (рис. 2.8), який відзначається надійністю та сумісністю з різноманітними типами пластику. Основою механізму подачі є цільнометалева алюмінієва платформа з гвинтовим регулюванням сили притиску. Має посадкове місце для встановлення крокового двигуна стандарту NEMA 17, що жорстко з'єднаний з притискним зубчастим колесом, який забезпечує захоплення та транспортування пластикового прутка.

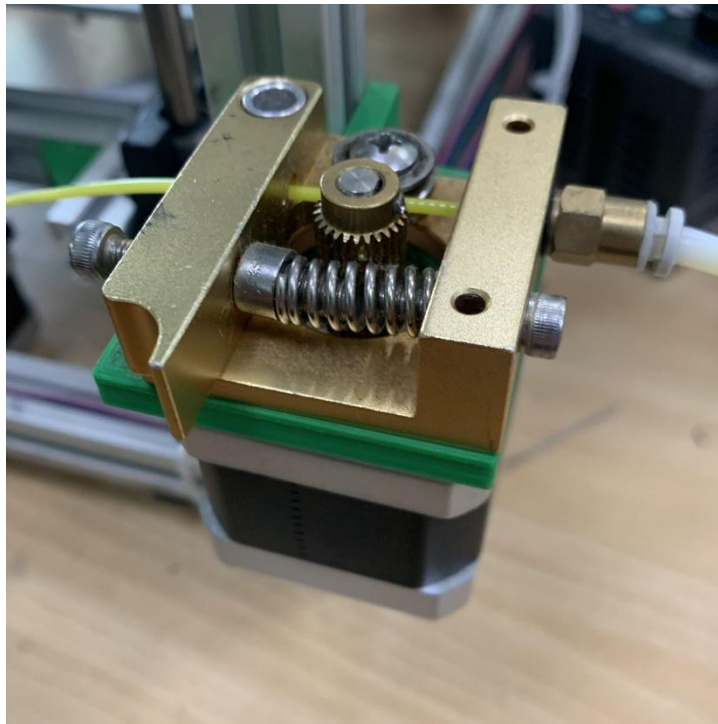


Рис. 2.8. Механізм подачі МК8

Притискна система включає важіль із вбудованим роликотідишпником типу «U», що забезпечує стабільний тиск на нитку діаметром від 1.75 мм до 3 мм, незалежно від її жорсткості. Завдяки простій, але ефективній конструкції, цей механізм сумісний як з прямою подачею, так і з віддаленою подачею. Геометрія механізму складає 42×42×18 мм, що відповідає габаритам більшості популярних екструдерів.

Для точного керування видавлювання матеріалу у 3D – принтері типу HyperCube, необхідно правильно налаштувати параметр S_6 , який визначає,

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

скільки електричних імпульсів має отримати кроковий двигун, щоб подати 1 мм пластикового прутка до екструдера.

Для коректного розрахунку слід враховувати:

- Кількість кроків на повний оберт двигуна, який можна знайти в його технічній документації;
- Передаточне число редуктора та геометрію привода, зокрема кількість зубців на шестернях;
- Режим мікрокрокування драйвера – найчастіше використовується 1/16 кроку для підвищення точності подачі;
- Діаметр філаменту, від якого залежить об'єм матеріалу, що подається на кожному етапі;
- Переміщення екструдера при переміщенні 100 мм матеріалу.

Розрахунок для визначення кількості кроків на мм:

$$S_t = \frac{S_r \cdot S_m}{(\pi \times d_{sc})}$$

де: S_t – кількість кроків на міліметр;

S_r – кількість кроків за один оберт двигуна;

S_m – кількість мікрокроків на один крок;

d_h – діаметр гвинта екструдера, мм.

У конструкції екструдера E3D V6 використовується кроковий двигун із значенням 200 кроків на один повний оберт. Привід реалізовано через двоступеневу систему передачі, в якій застосовані дві шестерні: менша з діаметром 11 мм і більша – 21 мм. Кроковий драйвер налаштований на режим 16 мікрокроків.

З урахуванням цієї конфігурації формула для обчислення кількості кроків на міліметр, яку повинен пройти екструдер для подачі матеріалу:

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

$$S_t = \frac{(s_r \cdot s_m)}{(\pi \times (d_s + d_b) \div 2)}$$

де: S_t – кількість кроків на міліметр;

s_r – кількість кроків за один оберт двигуна;

s_m – кількість мікрокроків на один крок;

d_s – діаметр меншої шестерні;

d_b – діаметр більшої шестерні.

Підставивши значення у формулу отримаємо:

$$S_t = \frac{(200 \cdot 16)}{(\pi \times (11 + 21) \div 2)} = 63,66 \text{ кроків/мм}$$

Щоб забезпечити коректну подачу пластику в екструдер E3D V6, необхідно встановити параметр кроків на міліметр у програмному забезпечення принтера на 63,66. Це значення гарантує точну довжину подачі матеріалу відповідно до заданих координат моделі. Важливо періодично перевіряти точність даної величини шляхом калібрування, адже навіть незначні відхилення можуть призвести до помилок у розмірах надрукованих деталей.

2.3. Вдосконалення системи керування 3D принтера

У 3D принтері HyperCube, для керування кроковим двигуном механізму подачі використовуються драйвер A4988, це компактний контролер, що забезпечує точне позиціонування та плавне подавання матеріалу.

Цей драйвер сумісний з живленням у межах 8 – 35 В постійного струму та здатен забезпечувати струм до 2 А на фазу. Особливістю є підтримка п'яти режимів мікрокрокування: повний крок, 1/2, 1/4, 1/8, та 1/16, що дає змогу досягати високої роздільної здатності.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39



Рис. 2.9. Драйвер крокового двигуна A4988 [23]

У моделі реалізовано захист від перегріву та перевантаження, що дозволяє уникнути виходу з ладу при інтенсивній експлуатації. Для керування двигуном використовується два сигнали STEP – задає імпульси переміщення, DIR – визначає напрямок обертання.

У принтері HyperCube керування реалізовано на платі RAMPS 1.4, яка є розширювальною платою для мікроконтролера Arduino RAMPS 1.4 має вже виведенні контакти для драйверів крокових двигунів, кінцевих вимикачів, підігріву робочої платформи, нагрівача екструдера, датчиків температури, а також для дисплея з картою пам'яті SD. На платі є можливість змінити мікрокрокування за рахунок з'єднання відповідних контактів.

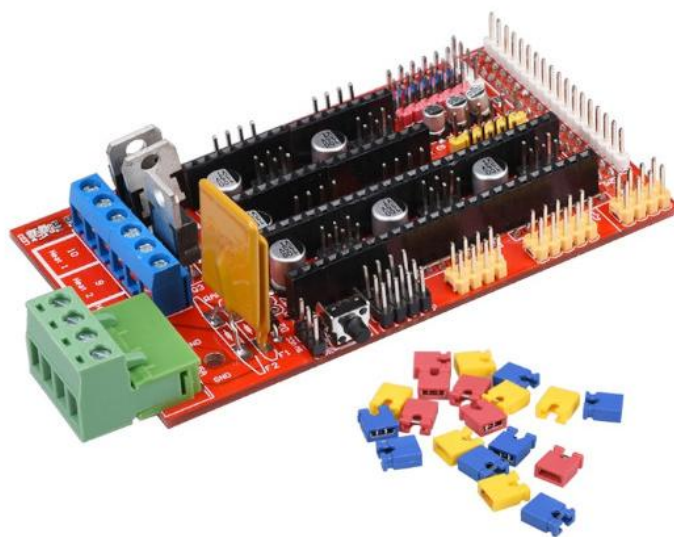


Рис. 2.10. Плата розширення RAMPS 1.4 [40]

Оскільки в конструкції принтера передбачено використання однакових екструдерів, а також реалізується технологія дублюючого 3D друку, є необхідність у синхронізації керуючих сигналів. Для цього сигнали STEP і DIR, що формуються контролером, підключаються одночасно до двох драйверів крокових двигунів. Це дозволяє обом екструдерам працювати ідентично, повторюючи рух з високою точністю.

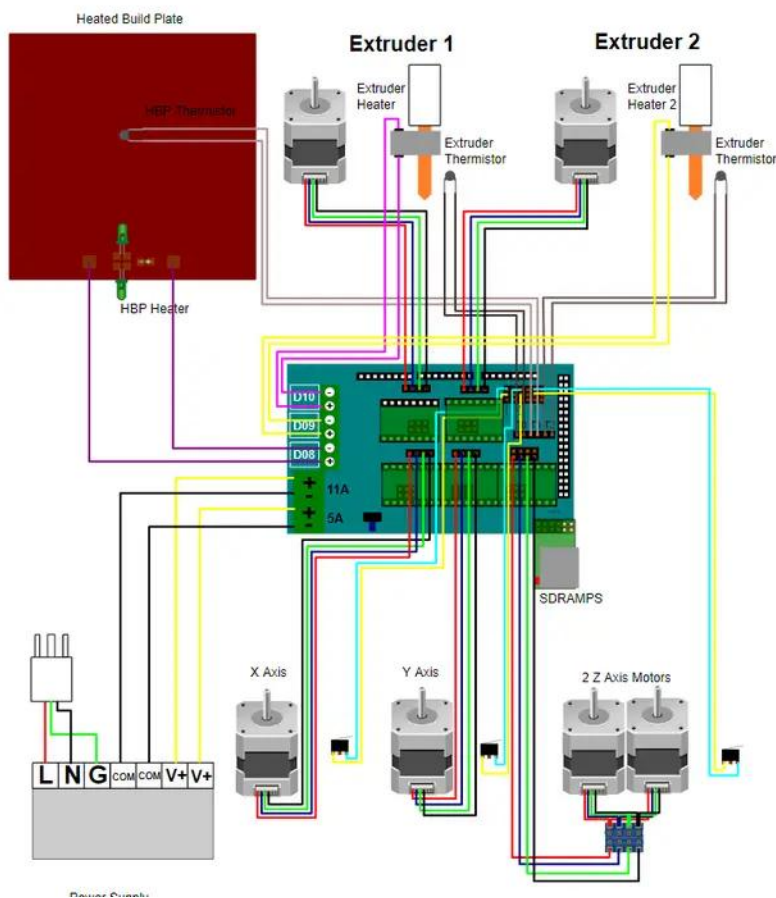


Рис. 2.11. Схема підключення для плати RAMPS 1.4 [41]

Для забезпечення роботи двох екструдерів, а також синхронного керування обома кроковими двигунами та драйверами, необхідно внести зміни у програмне забезпечення 3D принтера. Така модифікація дозволяє реалізувати дублюючий 3D друк та синхронізацію взаємодії з драйверами. Одним з найпопулярніших інструментів для налаштування програмного забезпечення є веб-конфігуратор Repetier (рис.2.12). Цей ресурс дозволяє сформувати і

завантажити оновлене програмне забезпечення відповідно до індивідуальних потреб принтера, включаючи можливість активувати підтримку другого екструдера.

The screenshot displays the 'Extruder' configuration page in Repetier-Firmware. At the top, there are buttons for '+Add extruder' and 'Remove last extruder'. Below, the configuration is for 'Extruder 0'. The settings include:

- Extruder stepper:** A dropdown menu set to 'Extruder 1'.
- Motor options:** Three checkboxes: 'Invert motor direction', 'Invert enable signal', and 'Enable motor mirroring', all of which are currently unchecked.
- Offsets:** Input fields for 'Offset X', 'Offset Y', and 'Offset Z', all set to '0' with units in '[mm]'.
- Speeds:** Input fields for 'Start speed' (20 [mm/s]), 'Maximum speed' (50 [mm/s]), and 'Resolution' (370 [steps per mm]).
- Acceleration:** Input field set to 5000 [mm/s²].
- Temperature sensor:** A dropdown menu set to '100k Epcos B57560G0107F000'.
- Temperature sensor pin:** A dropdown menu set to 'Temp 0 normally used for extruder 0'.
- Heater pin:** A dropdown menu set to 'Heater 0 normally used for extruder 0'.
- Temperature manager:** A dropdown menu set to 'Dead time control - easy to understand, stable'.
- Max PWM value:** Input field set to 255, with a note: '[0-255] Determines maximum power for heater.'
- Decouple test period:** Input field set to 12, with a note: '[s] > Maximum time required to rise temperature by DECOUPLING_TEST_MIN_TEMP_RISE = 1. If rising is slower, heaters will be disabled for safety.'
- Power when on:** Input field set to 230, with a note: '[0-255] Increase when target temperature can not be reached.'
- Dead time lag:** Input field set to 7, with a note: '[seconds] Time between heater on and temperature rise.'
- Extruder cooler pin:** A dropdown menu set to 'Disabled / No pin assigned'.

Рис. 2.12. Налаштування екструдера у конфігураторі Repetier-Firmware [24]

РОЗДІЛ 3

3. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

3.1. Розрахунок витрат на оплату праці

Станом на 2025 рік середня заробітна плата оператора 3D принтера на виробництві в Україні становить близько 25000 грн на місяць. Такі дані взяті з порталу work.ua [25].

Щоб оцінити погодинну оплату праці, треба знати місячну заробітну плату, кількість робочих годин на день та кількість робочих днів на місяць. Розрахунок проводиться за наступною формулою:

$$S_H = \frac{S_M}{Q_H \times Q_D},$$

де: S_H – погодинна оплата праці;

S_M – місячна заробітна плата;

Q_H – кількість годин у робочому дні;

Q_D – кількість робочих днів у місяці.

Прийнявши, що в місяці 20 робочий день, а тривалість робочого дня – 8 годин. Тоді маємо:

$$S_H = \frac{25000}{8 \times 20} = 156,25 \text{ грн/год}$$

Далі визначимо витрати на працю, необхідні для виготовлення деталі.

Розрахунок проводимо за даною формулою:

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Клименко А.А			Розділ 3	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Крушельницький В.					43	54
Н. Контр.								
Затверд.								
						НУБіП України		

$$S_w = Q_s \times S_H,$$

де: S_w – витрати на працю;

Q_s – кількість годин проекту;

S_H – погодинна оплата праці;

Розрахунок витрати на працю для проекту який займає 8 годин:

$$S_w = 8 \times 156,25 \approx 1250 \text{ грн.}$$

Отже, витрати на працю для цього проекту становлять приблизно 1250 грн.

Також для оцінки трудомісткості проекту використовується поняття людино-годин. Загальна кількість людино-годин розраховується, як добуток кількості відпрацьованих днів на тривалість робочого дня:

$$H_p = Q_D \times Q_H,$$

де: H_p – загальна кількість людино-годин;

Q_H – кількість годин у робочому дні;

Q_D – кількість відпрацьованих днів;

Якщо робота проводиться 20 днів по 8 годин на день, тоді маємо:

$$H_p = 20 \times 8 = 160 \text{ люд/год}$$

3.2. Розрахунок витрат на вдосконалення конструкції 3D принтера

Для вдосконалення модернізації 3D принтера було придбано низку додаткових компонентів. Зокрема, закуплено екструдер E3D V6, кроковий двигун NEMA 17, механізм подачі МК8, а також драйвер для керування двигуна А4988. Вартість покупки наведено у таблиці 3.1.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Таблиця 3.1

Вартість закуплених компонентів

Компонент	Вартість
Екструдер E3D V6	355 грн
Кроковий двигун NEMA 17	320 грн
Механізм подачі МК8	200 грн
Драйвер A4988	50 грн
Всього:	925 грн

Окремо виготовлено необхідні пластикові елементи, такі як каретка, повітропровід, кріплення екструдера та кріплення механізму подачі. Розраховуємо вартість матеріалу за 1 грам:

$$P_g = \frac{S_p}{M}$$

де: P_g – ціна пластику за грам;

S_p – ціна котушки пластику;

M - маса котушки пластику.

Для друку використовували пластик PETG, придбаний за ціною 500 грн за 0,9 кг. Підставивши у формулу маємо:

$$P_g = \frac{500}{900} = 0,55 \text{ грн/г}$$

Таблиця 3.2

Розрахована вартість видруківаних деталей

Деталь	Маса, г	Ціна, грн
Повітропровід	4	2
Кріплення екструдера	17	8,5
Каретка	48	24
Кріплення механізму подачі	55	27,5

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Всього:	124	62
---------	-----	----

Загальну вартість вдосконалення з урахуванням монтажних робіт та всіх компонентів для покращення, які були закуплені та роздруковані розраховуємо за формулою:

$$S_{\text{заг}} = S_{\text{куп}} + S_{\text{друк}} + (S_{\text{монтаж}} \times t),$$

де: $S_{\text{заг}}$ – загальна вартість вдосконалення;

$S_{\text{куп}}$ – ціна куплених деталей;

$S_{\text{друк}}$ – ціна роздрукованих деталей;

$S_{\text{монтаж}}$ – ціна монтажу за годину;

t – час затрачений на монтаж.

Підставивши дані у формулу з монтажними роботами які тривали 4 години за ціною 500 грн/год, маємо:

$$S_{\text{заг}} = 925 + 62 + (500 \times 4) \approx 2987 \text{ грн}$$

Отже, орієнтовна вартість вдосконалення 3D принтера становить приблизно 2987 грн.

3.3. Розрахунок строку окупності

Після проведення модернізації у конструкції 3D принтера постає питання економічної доцільності проведених робіт. Для цього необхідно визначити, скільки часу знадобиться для відшкодування витрат, понесених під час модернізації.

Основні витрати на покращення конструкції складаються з повних витрат на компоненти та їх встановлення і вартість самого принтера. Повну вартість обладнання розраховуємо за формулою:

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

$$S_{\text{пов}} = S_{\text{заг}} + S_{\text{прин}},$$

де: $S_{\text{пов}}$ – повні витрати;

$S_{\text{заг}}$ – загальна вартість вдосконалення;

$S_{\text{куп}}$ – вартість принтера.

Для розрахунку вважаємо, що вартість принтера HyperCube на 2025 рік становить 13000 грн. Підставивши значення, отримаємо:

$$S_{\text{пов}} = 2987 + 13000 = 15987 \text{ грн}$$

Завдяки встановленню двох екструдерів принтер може одночасно друкувати дві деталі це означає, що продуктивність зростає вдвічі. Таким чином, час виконання одного замовлення скорочується в два рази, або виконаних замовлень подвоюється. Для оцінки строку окупності використаємо наступну формулу з урахування подвійного друку:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{S_{\text{пов}}}{P \times 2}$$

де: $T_{\text{окуп}}$ – термін окупності;

$S_{\text{пов}}$ – повні витрати;

P – прибуток за одне замовлення.

Прийmemo, що середня вартість одного замовлення становить 250 грн. У такому випадку строк окупності становить:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{15987}{250 \times 2} \approx 32$$

Розрахунок часу окупності у годинах, якщо кожне замовлення виконується 8 годин:

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_{\text{год.окуп}} = 32 \times 8 \approx 256 \text{ год}$$

Розрахунок часу окупності в місяцях:

$$T_{\text{міс.окуп}} = \frac{T_{\text{год.окуп}}}{T_{\text{роб.год}}},$$

де: $T_{\text{міс.окуп}}$ – термін окупності в місяцях;

$T_{\text{год.окуп}}$ – термін окупності в годинах;

$T_{\text{роб.год}}$ – робочі години на місяць;

Приймемо, що принтер працюватиме по 160 годин на місяць, маємо:

$$T_{\text{міс.окуп}} = \frac{256}{160} = 1,6 \text{ міс.}$$

Отже, з урахуванням повної вартості 3D принтера та вдосконалень окупність досягається після виконання приблизно 32 замовлень або 1,6 місяці роботи.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Заходи безпеки при роботі з 3D принтером

Під час роботи з 3D принтером важливо дотримуватися техніки безпеки. До друку допускаються особи які пройшли інструктаж техніки безпеки з роботою на 3D принтері.

При отриманні травм або знаходженні несправностей приладу друк зупиняється та повідомляється керівнику.

Приміщення в якому знаходиться 3D принтер повинно мати гарну природню або штучну вентиляцію, через шкідливі випари, які утворюються при плавленні пластику. Якщо таких умов неможливо досягнути, конструкція 3D принтера повинна передбачати закритий корпус.

Через можливість займання, робоче місце слід обладнувати пожежною сигналізацією та мати вогнегасник

Оскільки процес друку передбачає нагрівання філаменту, є високий ризик отримання опіків на відкритих частинах тіла. Тому контроль за температурою здійснюються виключно за вбудованими датчиками. Категорично забороняється перевіряти температуру дотиком або сторонніми предметами. Для роботи з гарячими деталями використовується засоби індивідуального захисту або спеціальні інструменти.

3D принтер працює від електричної мережі, недотримання правил техніки безпеки може призвести до ураження електричним струмом. Тому перед увімкненням пристрою перевіряються ізоляція дротів та відсутність відкритих контактів. При необхідності маніпуляцій з внутрішніми компонентами обладнання від'єднується від мережі.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Клименко А.А			Розділ 4	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		Крушельницький В.					49	54
<i>Н. Контр.</i>						НУБіП України		
<i>Затверд.</i>								

Через наявну велику кількість рухомих частин таких як шківни, вали, ремені, вентилятори та двигуни при роботі рекомендується мати щільний одяг без вільних частин, а довге волосся слід заховати. Оскільки рухомі деталі можуть зачепитися за частини одягу, волосся або шкіру, що призводить до травм.

4.2.Огляд обладнання перед початком роботи з 3D принтером

Перед початком роботи необхідно оглянути обладнання, щоб переконатися в його справності, а також перевірити стан електропроводки. Якщо виявлені пошкодження чи дефекти, роботу заборонено починати до повного усунення ушкоджень і отримання дозволу від керівника.

Також перевіряються:

- наявність та правильність підключення захисного заземлення;
- електричний шнур та вилку на відсутність механічних пошкоджень;
- справність вимикачів та елементів керування 3D принтером.

Важливо забезпечити належну вентиляцію приміщення, де розташований 3D принтер. Перед початком друку слід упевнитися, що параметри мікроклімату відповідають встановленим нормам – температура повітря взимку в межах 22 - 24 °С, влітку 23 - 25 з відносною вологістю – у діапазоні 40 – 60%.

4.3.Вимоги безпеки після завершення роботи з 3D принтером

Після закінчення роботи необхідно відключити 3D принтер від мережі електропостачання. Для цього вимикається тумблер, розташований на задній панелі пристрою, потім виймається вилка з розетки.

Далі необхідно зняти робочий стіл 3D принтера, переконавшись, що він охолонув до кімнатної температури. Поверхню столу протерти чистою вологою ганчіркою або промити проточною водою, після чого витерти насухо, після чого робочий стіл встановлюється на місце.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Решта пластику та браковані деталі необхідно скласти в окремий пакет для подальшої переробки.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

ВИСНОВОК

У межах даної роботи було проведено детальний аналіз застосування 3D принтерів у різних галузях та проаналізовано технології тривимірного друку. Було обґрунтовано доцільність внесення змін у конструкцію 3D принтера, зокрема впровадження системи з двома екструдерами на одній каретці. Це рішення дозволяє розширити функціональні можливості принтера, а також підвищити швидкість та ефективність процесу друку.

У результаті виконання роботи встановлено, що подальші зусилля мають бути спрямовані на покращення методів калібрування системи, а також на вдосконалення алгоритмів керування екструдерами.

Під час аналізу виявлено недоліки конструкції, зокрема неповне використання площі друкувальної платформи. Рекомендовано внести зміни у конструкцію за рахунок заміни профілю рами для повноцінної реалізації робочої площі.

Також доцільно розглянути використання більш сучасного програмного забезпечення для автоматизації керування подвійною системою видавлювання, що дозволить оптимізувати процес друку та мінімізувати похибки.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Клименко А.А			Висновок	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		Крушельницький В.					52	54
<i>Н. Контр.</i>						<i>НУБІП України</i>		
<i>Затверд.</i>								

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. About Additive Manufacturing. *Loughborough University*. URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>
2. 7 Types of Additive Manufacturing. *Applied Engineering*. 22.01.2021. URL: <https://www.appliedengineering.com/blog/2021/1/22/7-types-of-additive-manufacturing>.
3. 3D-друк металу. *FacFox*. 03.2022. URL: <http://ua.insta3dm.com/info/metal-3d-printing-what-is-direct-energydepos71998983.html>.
4. Powder Bed Fusion. *2onelab*. 30.01.2025. URL: <https://2onelab.com/newsandmore/blog/what-is-powder-bed-fusion/>.
5. FDM 3D-технологія друку. *Diykonstruktor.in.ua*. 3D ДРУК. URL: <http://diykonstruktor.in.ua/content/8-fdm-tekhnologiya-druku>.
6. 3D printers. *Prusa research*. URL: <https://www.prusa3d.com/category/3d-printers/>.
7. 3D-друк FDM. Пояснення простими словами.. *3D FOR YOU*. 10.01.2022. URL: https://3d4u.com.ua/uk/blog/post/103-3d-printing-fdm-explained-in-simple-words?srsId=AfmBOorqWVYfKN8MrM9I9scIWvefY3d9U4piF6RmNAKhXxjZ0CaH2g8u#toc103_3.
8. Як влаштований 3D-принтер: основні деталі та принцип роботи. *Easy3dprint*. 21.11.2024. URL: <https://easy3dprint.com.ua/uk/yak-vlashtovaniy-3d-printer/>.
9. How to Choose the Right 3D Printing Build Plate for Perfect Prints. *FormFutura*. 14.03.2025. URL: <https://formfutura.com/blog/3d-printer-build-plates/#:~:text=Glass%20build%20plates%2C%20often%20coated,adhesive%20aids%20for%20certain%20filaments>.
10. Як вибрати робочу пластину для 3D принтера. *ARTLINE*. 11.01.2023. URL: <https://artline.ua/uk/blogs/kak-vybrat-rabochuyu-plastinu-dlya-3d-printera>.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Список використаної літератури					
Розроб.		Клименко А.А						Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Крушельницький В.							53	54
Н. Контр.								НУБіП України		
Затверд.										

11. Extruder: essential part of a 3D Printer. *sculpteo*. URL: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/extruder-definition/>.
12. Екструдер у 3D-принтері: принцип роботи та види. *Easy3dprint*. 28.02.2025. URL: <https://easy3dprint.com.ua/uk/shho-take-ekstruder-u-3d-printeri/>.
13. Подвійний друк IDEX. *Modix*. URL: <https://www.modix3d.com/uk/product/idex-dual-printing-bigmeter/>.
14. OrangeStorm Giga – новий FDM 3D-принтер. *Monofilament*. 18.11.2023. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/blog-novini-3d-druku-ta-additivnih-tehnologij/orangestorm-giga-novij-fdm-3d-printer-promislovogo-rivnja-elego-dlja-masshtabnogo-druku>.
15. Three-dimensional printer head having dual extruders sharing a common drive motor : пат. WO2023086921A1 French. заявл. 11.11.2022.
16. Design of Dual-Head 3D Printer : пат. ISSN 1213–2489 : ISSN 2787–9402. заявл. 04.2023.
17. Guide to Materials Used in 3D Printing. *SPC*. URL: <https://www.sharrettsplating.com/blog/materials-used-3d-printing/>.
18. Петришина А. А. Тенденції розвитку тривимірного друку, обладнання та матеріалів для нього. *Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій – Тернопіль 25-26 листопада 2015.*, Тернопіль, Україна, 25–26 листоп. 2015.
19. Хотенд E3D V6 вулкан, боуден 12В. *ScrewMaker*. URL: <https://screwmaker.com.ua/hotend-e3d-v6-vulkan-bouden-12v>.
20. HyperCube 3D Printer/CNC. *Thingiverse*. URL: <https://www.thingiverse.com/thing:1752766>.
21. Кроковий двигун NEMA17 17HS4401. *ScrewMaker*. URL: <https://screwmaker.com.ua/krokovyj-dvygun-nema17-17hs4401-1-5-a-38mm>.
22. Механізм, система подачі пластику (філаменту) MK8. *Ardushop*. URL: <https://ardushop.in.ua/cnc-3d/mechanism-plastic-feed-system-filament-mk8>.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

23. Драйвер крокового двигуна A4988. *Mini-Tech*. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/drayer-shagovogo-dvigatelya-a4988>.
24. Repetier-Firmware configuration tool for version 0.92.9 version. *Repetier*. URL: <https://www.repetier.com/firmware/v092/>.
25. *Work.ua*. URL: <https://www.work.ua/>.
26. Нагорно Н. О. Техніка безпеки при роботі з 3D принтером під час вивчення основ проектування і моделювання. *Безпека життя і діяльності людини: теорія та практика : збірник наук. Праць Всеук. Наук.-практ. Конф., присвяченої Всесвітньому Дню цивільної оборони та Всесвітньому Дню охорони праці.*, Полтава, Україна, 25 квіт. 2019.
27. All About Vat Photopolymerization. *Sybridge*. URL: <https://sybridge.com/vat-photopolymerization/>.
28. *Beamlr*. URL: <https://www.beamlr.com/3d-printing-capabilities/processes/material-jetting/>.
29. *ExOne*. URL: <https://www.exone.com/en-US/Resources/case-studies/what-is-binder-jetting>.
30. Directed Energy Deposition. *Nist*. URL: <https://www.nist.gov/additive-manufacturing/research-areas/technologies/directed-energy-deposition>.
31. FDM-друк: переваги, етапи, нюанси. *Polydream*. URL: <https://polydream.com.ua/blog/fdm-druk-perevagi-etapi-nyuansi/>.
32. FDM 3D printing. *FabAcademy*. URL: https://fabacademy.org/2021/labs/lamachinerie/students/jules-topart/assignments/6a_fdm/.
33. Кінематика 3D-принтера: переваги і недоліки всіх варіантів. *3Dplast*. URL: <https://3dplast.biz/ua/a398991-kinematika-printera-preimuschestva.html>.
34. *indiamart*. URL: <https://www.indiamart.com/proddetail/fr4-glass-epoxy-sheet-2851919439591.html>.
35. Direct extrusion vs. bowden type. *Recreus*. URL: <https://recreus.com/en/blogs/learn-with-recreus-1/direct-extrusion-vs-bowden-type>.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

36. *Beegreen.com.ua*. URL: <https://beegreen.com.ua/ru-ru/krokovij-dvigun-42hb34f08ab-17a-dlya-3d-printera-chpu-12107>.

37. *U3DF - Ukrainian 3D Factory*. URL: <https://u3df.com.ua/ua/p833009285-nit-pla-pla.html>.

38. *TronxyFactory*. URL: <https://www.tronxy3dprinter.com/products/tronxy-gemini-xs-2022-new-diy-idex-3d-printer-kit-two-head-multicolor-independent-dual-extruder-3d-printer-255x255x260mm?variant=43204347003100>.

39. *Joom*. URL: <https://www.joom.com/uk/products/650c38b0c44a5e01a990ee36>.

40. RAMPS 1.4 плата розширення для 3D принтера. *Mini-Tech*. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/ramps-v14>.

41. Плата керування Ramps 1.4 для Arduino Mega 2560 Детальніше: <https://arduinokit.com.ua/ua/p1293624013-plata-upravleniya-ramps.html>. *Arduinokit*. URL: <https://arduinokit.com.ua/ua/p1293624013-plata-upravleniya-ramps.html>.

					17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56