

**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)

“ ___ ” _____ 2025р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРСЬКА
(ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ БАКАЛАВРА)**

на тему : Вдосконалення конструкції 3D принтера для покращення якості друку

Спеціальність 133 – «Галузеве машинобудування»

(код і назва)

Гарант освітньої програми

Доктор технічних наук, професор

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Булгаков В.М.

(ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

(Керівник дипломного проєкту бакалавра)

Кандидат технічних наук, доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Крушельницький В.В.

(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Данілов А.В.

(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) (ПІБ)
— ” _____ 2024 р.

З А В Д А Н Н Я

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

Данілов Андрій Владиславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проєкту бакалавра) _____

Вдосконалення конструкції 3D принтера для покращення якості друку

затверджена наказом ректора НУБіП України від —16 ” грудня 2024 р. № 2265 –Є”

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

Розрахункова частина

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

Данілов А. В.

(підпис)

(прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	6
1.1. Історія розвитку 3D-друку.....	6
1.2. Сфери застосування	9
РОЗДІЛ 2. ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ 3D-ПРИНТЕРА.....	16
2.1. Принцип роботи будова та конструкція 3D-принтера FDM.....	16
2.2. Основні компоненти 3D-принтера	19
2.2. Обґрунтування вдосконалення конструкції 3D-принтера	38
2.4.Вдосконалення 3D-принтера	43
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК МЕХАНІЗМІВ 3D-ПРИНТЕРА.....	47
3.1 Розрахунок кутового перекосу столу.....	47
3.2. Розрахунок прогину рами нагрівальної платформи	49
3.3. Розрахунок люфтів і їх вплив на точність друку	50
3.4. Розрахунок режиму роботи крокового двигуна.....	51
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ	54
4.1. Розрахунок витрат на працю	54
4.2. Розрахунок витрат на 3D-друк.....	55
4.3 Розрахунок вартості вдосконалення	57
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ	59
5.1. Техніка безпеки під час роботи з 3D-принтером.....	59
5.2. Вимоги безпеки перед початком роботи з 3D-принтером.....	60
5.3. Вимоги під час роботи з 3D-принтером та після її закінчення	61
ВИСНОВОК.....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	63

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Данілов А.В.</i>			<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушіє</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Крушельницький В.В.</i>			3	63	
<i>Н. Контр.</i>					Зміст		
<i>Заверд.</i>					НУБіП України		

РЕФЕРАТ

Метою даної кваліфікаційної роботи є вдосконалення конструкції 3D-принтера для покращення якості друку.

Дипломний проєкт складається з п'яти розділів, що розміщені на шістдесяти чотирьох (63) сторінках друкованого тексту, шістдесяти шести (66) рисунків, п'яти (5) таблиць, тридцяти шести (36) літературних джерел, додатків та графічної частини.

У першому розділі розглянуто історію виникнення 3D-друку, його види та сфери застосування.

У розділі вдосконалення конструкції 3D-принтера розглянуто конструкцію і будову 3D-принтера технології FDM. Проведений аналіз компонентів принтера, їх види, переваги і недоліки, обґрунтовано вдосконалення конструкції, розроблено деталі для вдосконалення, наведено покрокове виконання робіт по вдосконаленню конструкції 3D-принтера. Також здійснено розрахунок механізмів 3D-принтера розписані розрахунки кутового перекошу столу, прогину рами нагрівальної платформи, люфтів та їх вплив на точність друку, характеристики крокового двигуна та гвинтової передачі.

В економічній частині розраховано вартість та доцільність вдосконалення 3D-принтеру.

У розділі охорона праці представлено основні правила та вимоги при роботі з 3D-принтером.

Ключові слова: 3D-принтер, 3D-друк, лінійні напрямні, ходовий гвинт, нагрівальна платформа, рама.

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>Реферат</i>	Літ.	Арк.	Акрушіє
Розроб.		Данілов А.В.					4	63
Перевір.		Крушельницький В.В.						
Н. Контр.								
Затверд.								
						НУБіП України		

ВСТУП

За останні роки 3D-друк набув значної популярності і став невід'ємною частиною багатьох сфер діяльності, включаючи медицину, освіту, промисловість, будівництво, дизайн. Він надає можливість швидко та дешевого виготовлення прототипів як простих так і дуже складних форм і конструкцій, які можна краще роздивитися та дослідити. Раніше це було можливо тільки традиційними методами виробництва, що було довго, економічно не вигідно для прототипів та залучало велику кількість майстрів та персоналу.

Один з найважливіших елементів 3D-принтера – це рама та кінематика нагрівальної платформи, вона відповідальна за базування моделі, отже якщо вона має зайву вібрацію, змінний прогин рами під час друку, це все впливає на якість друку об'єктів.

Нові дослідження та інновації у сфері кінематики приводять до появи нових елементів, які покращують конструкцію. Головною проблемою будь якої кінематики є жорсткість елементів, люфти у приводних та напрямних механізмах.

Проблему у люфті гвинтової пари вирішує підпружинена ходова гайка, її принцип роботи це дві ходові гайки, які обертаються разом і розклинюються пружиною, це забезпечує постійний натяг між витками гвинта і гайки, у результаті люфт значно зменшується.

Зменшення люфтів напрямних елементів можна реалізувати встановленням гідростатичних або аеростатичних напрямних. Їх принцип роботи полягає у заповненні пустого простору між елементами оливою або повітрям під тиском. У звичайних 3D-принтерах таку технологію використовувати недоречно через складну конструкцію та велику вартість. На даний момент часто застосовують рейкові напрямні. У них порівняно мінімальний люфт та гарна жорсткість системи. Наука не стоїть на місці, кожного дня вчені удосконалюють та пропонують нові конструкції.

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Данілов А.В.			Вступ	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушіє</i>
<i>Перевір.</i>		Крушельницький В.В.					5	63
<i>Н. Контр.</i>					НУБіП України			
<i>Затверд.</i>								

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Історія розвитку 3D-друку

Зазвичай 3D-друк вважають новою «футуристичною» концепцією, але вона насправді існує вже понад 30 років.

Чарльз Халл винайшов перший процес 3D-друку під назвою «стереолітографія» ще 1983 року. У патенті він визначив стереолітографію як «Спосіб та пристрій для створення твердих об'єктів шляхом послідовного друку тонких шарів ультрафіолетового затверділого матеріалу один поверх іншого». У цьому патенті основна увага приділяється друку світловою рідиною, що перетворюється у твердий стан, але після заснування компанії «3D Systems», Халл незабаром зрозумів, що його техніка не обмежується тільки рідинами, розширюючи визначення до «будь-якого матеріалу, здатного тверднути або здатного змінювати його фізичний стан». Сьогодні називається як виробництво присадок (AM) або 3D-друк завдяки його винаходу.

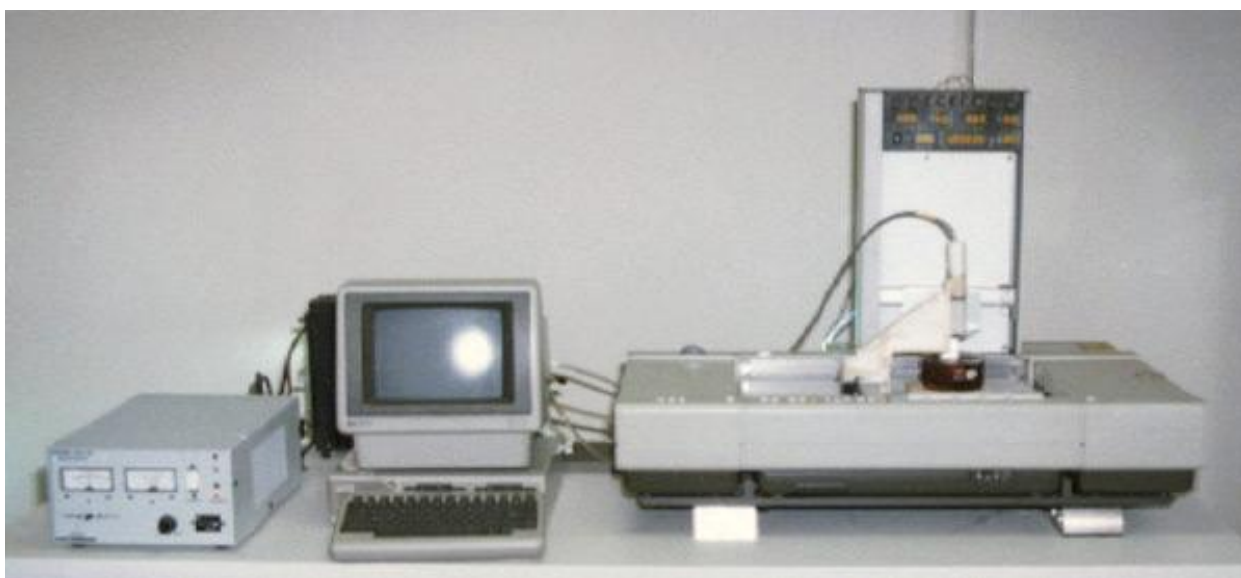


Рис. 1.1. Перший 3D-принтер SLA-1 [1]

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Данілов А.В.</i>			<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушіє</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Крушельницький В.В.</i>			6	63	
<i>Н. Контр.</i>					Розділ 1		
<i>Затверд.</i>					НУБіП України		

Після отримання патенту на винахід Чак Халл заснував компанію «3D Systems» і розробив перший промисловий верстат для 3D-друку. Терміну «3D принтер» на той час ще не існувало, тому верстат називався «Апарат для стереолітографії». Технологія була досить нова на той час, і компанія «3D Systems» виготовила та установила першу модель верстата кільком обраним замовникам з метою перевірки даної системи. У 1988 р., спираючись на відгуках клієнтів про верстат, компанія розробила вдосконалену модель SLA-250 і розпочала виробляти його серійно.



Рис. 1.2. Модель 3D-принтера SLA-250 [2]

У 1988 р. технології 3D-друку набули широкої популярності, з'явилися нові, зокрема друк методом наплавлення (Fused Deposition Modeling (FDM)) та метод селективного лазерного спікання (Selective Laser Sintering (SLS)). Технологію моделювання методом наплавлення винайшов Скот Крамп у 1988 р. У наступному році він заснував компанію Stratasys і налагодив промислове виробництво верстатів.

У 1992 р. компанія продала свій перший верстат «3D Modeler». Того ж року компанія DTM випустила верстат, що працює за технологією селективного лазерного спікання (SLS). У 1993 р. в Массачусетському

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ

технологічному

інституті (MIT) було винайдено та запатентовано ще одну технологію 3D-друку. Вона отримала назву «Технології тривимірного друку» і була подібна до технології струминного друку, яка використовується в 2D-принтерах. У 1995р. компанія «Z Corporation» отримала від Массачусетського технологічного інституту патент на використання технології та розпочала виробництво 3D-принтерів, на базі 3DP технологій.

У 1996 р. було вироблено верстати «Genisys» від компанії «Stratasys», «Actua 2100» – від «3D Systems», і «Z402» – «Z Corporation». Протягом цього часу вперше з'явився термін «Тривимірний друк» для позначення верстатів швидкого моделювання. Тільки наприкінці 1990-х – на початку 2000 рр., у продажу з'явилися кілька моделей верстатів за відносно низькими цінами. У 2005 р. компанія «Z Corporation» випустила на ринок революційно-нову модель «Spectrum Z510» – верстат 3D-друку з високою роздільною здатністю кольорів.

Ще один прорив у галузі тривимірного друку стався у 2006 р. зі створенням загальнодоступного проекту RepRap, націленого на виробництво 3D-принтера, здатного відтворювати деталі власної конструкції. Перша модель RepRap, вироблена в 2008 р., може виготовити приблизно 50% своїх власних частин. До 2009 року 3D-друк в основному обмежувався промисловим використанням. Але потім минув термін дії патенту на моделювання методом пошарового наплавлення (FDM) – однієї з найпоширеніших технологій 3D-друку.

Завдяки місії проекту RepRap зі створення машини, народився перший настільний 3D-принтер. Оскільки на ринку почали з'являтися все більше нових виробників 3D-машин, їхня вартість різко впала з \$200,000 до \$2000. Саме тому 3D-принтери стали доступними для більшості користувачів і споживчий ринок 3D-друку злетів у 2009 році.

З того часу продаж 3D-принтерів зростає. У міру того, як патенти на адитивне виробництво продовжують закінчуватися, найближчими роками

									Арк.
									8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ				

очікується більше інновацій. В даний час у світі налічується близько 300 000 користувачьких 3D-принтерів, і ця цифра щорічно подвоюється.

1.2. Сфери застосування

3D-друк – це процес пошарового нарощування (виготовлення) об'єкта на основі створеної його тривимірної моделі з наступних матеріалів – пластик, фотополімер, бетон, гіпс, метал, папір, шоколад, карамель та інші.

Доступність друку на 3D-принтері дає можливість здійснювати експерименти майже у всіх сферах життя, наприклад у будівельній, архітектурній, освіті, медицині, кондитерстві, поліграфії, рекламі та ювелірній майстерності.

3D-принтер дозволяє створювати архітектурні макети будівель практично будь-якої складності. Такі макети наочно демонструють об'єкт архітектури та максимально вигідно презентують його замовнику. Готові моделі будинків та споруд користуються не малою популярністю ще й у зв'язку зі своєю низькою собівартістю.



Рис. 1.3 Макети архітектурних споруд [3]

Друк на 3D-принтері просунув сучасну медицину на крок уперед, дозволяє рятувати людські життя. За допомогою 3D-принтера друкують протези, суглоби, зубні коронки, штучну нирку, клітини шкіри, органи та тканини людини.

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9



Рис. 1.4. Медичні протези [3]

Тривимірний друк макетів для класів та лабораторій університетів. Зрозуміло, що краще пояснювати принцип роботи на 3D-моделі у розрізі якоїсь деталі, ніж на зображеннях. Наочне навчання краще сприймається учнями та студентами.



Рис. 1.5. Прикладні моделі [3]

Створення прототипу для нового виробу, виробництво якого планується запустити з метою презентації його замовнику та остаточного затвердження форми. Виготовлення деталей механізмів – відтворення втрачених чи поламаних деталей. Друк прототипу, з якого створюється силіконова форма для лиття невеликих партій продукції.

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10



Рис. 1.6. Дрібносерійне виготовлення деталей [3]

Тривимірні об'єкти, надруковані для кіно набагато реалістичніше та економічно вигідніше, ніж комп'ютерна графіка та справжній декор – автомобілі, коштовності, антикварні вироби, елементи оформлення інтер'єру тощо.



Рис. 1.7. Декор для кіно [3]

У теперішній час на 3D-принтері виготовляються нові та неординарні моделі одягу для високої моди, зокрема сукні, шуби, сорочки. Крім того, тривимірний друк дозволяє виготовити абсолютно незвичайні моделі взуття з поліуретану, пластику та гуми.

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11



Рис. 1.8. Одяг надрукований на 3D-принтері [3]

Сьогодні на 3D-принтері можна виготовити демонстраційний варіант упаковки або пляшки тощо. Такі макети можуть бути кольоровими та зберігати всі елементи дизайну – штрих-код, етикетку, торговий знак та ін.



Рис. 1.9. Форми майбутніх упаковок [3]

Під час виготовлення ювелірних прикрас найскладніший процес – створення воскового прототипу, зараз воскову модель набагато простіше виготовити за допомогою 3D-друку.

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12



Рис. 1.10. Ювелірні прикраси [3]

Виготовлення іграшок, аксесуарів та сувенірів. За допомогою 3D-принтера можна виготувати практично будь яку іграшку чи аксесуар у себе вдома.



Рис. 1.11. Сувеніри та іграшки [3]

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

У кондитерській справі 3D-принтер має не аби-які можливості для створення справжніх солодких шедеврів у будь-якому кольоровому варіанті, а також можна надавати їм різноманітні смаки – м'ята, ваніль, фруктові аромати.

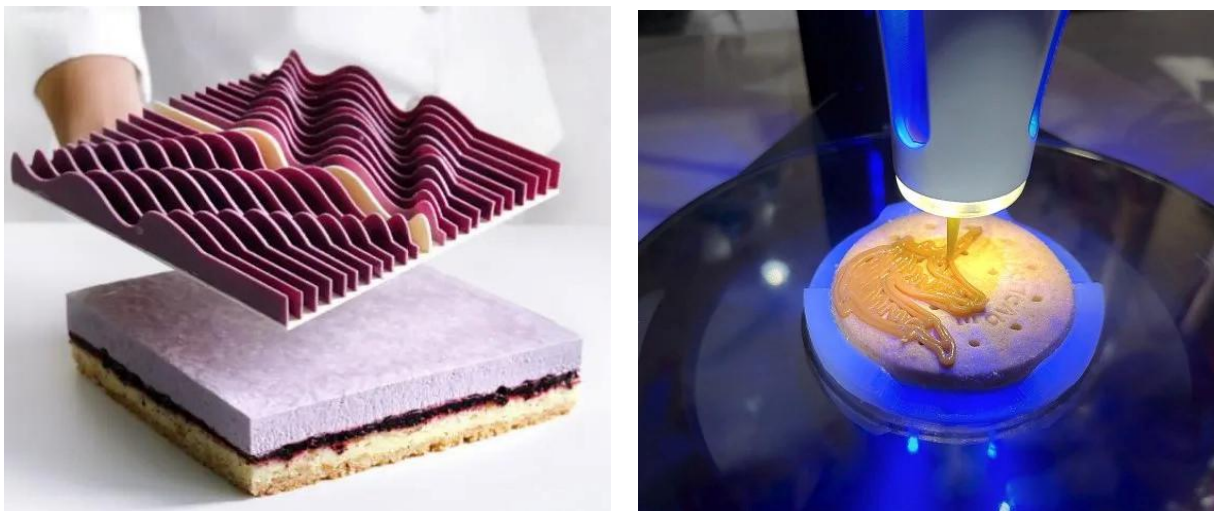


Рис. 1.12. Надруковані солодощі [3]

Дизайнерська компанія Emerging Objects випустила футуристичні меблі, надруковані на основі тривимірних технологій, наприклад лава із суміші цементу.



Рис. 1.13. Лава виготовлена на 3D-принтері [3]

У Новій Зеландії було випущено лінійку так званих ODD-гітар. Крім того, вже створено «штучну» скрипку та справжню акустичну гітару.



Рис. 1.14. Гітара створена за допомогою 3D принтера [3]

Отже, 3D-друк використовується майже у всіх сферах життєдіяльності. Перетворив складні затратні процеси у те, що доступне майже кожному.

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

РОЗДІЛ 2

ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ 3D-ПРИНТЕРА

2.1. Принцип роботи будова та конструкція 3D-принтера FDM

3D-принтер це сучасний пристрій, який перетворює цифрові моделі на реальні об'єкти шляхом пошарового нанесення матеріалу. Ця технологія зробила революцію у світі виробництва. Вона дозволяє створювати вироби з різних матеріалів різної складності. На відміну від традиційних методів виробництва, де матеріал виточується чи вирізається для досягнення потрібного розміру, 3D-друк використовує принцип нашарування, будуючи об'єкт шар за шаром, зазвичай з пластику, металу, смоли, бетону або інших матеріалів.

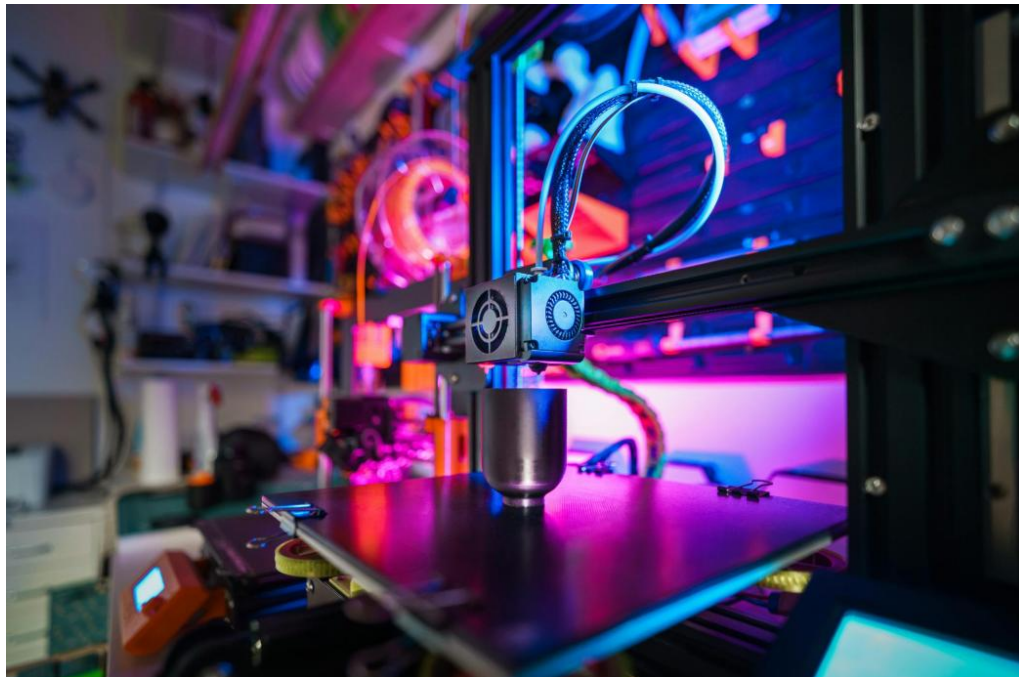


Рис. 2.1. Загальний вигляд 3D-принтера [4]

Для того щоб виготовити якийсь виріб на 3D-принтері потрібно створити модель у будь якій CAD програмі. Я продемонструю приклад створення деталі, яка зламалася (рис. 2.2.).

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Данілов А.В.			Розділ 2	Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевір.		Крушельницький В.В.					16	64
Н. Контр.						НУБіП України		
Затверд.								



Рис. 2.2. Зламана деталь.

Спочатку треба створити 3D-модель, для цього можна використати Autodesk Fusion 360 (рис. 2.3.)

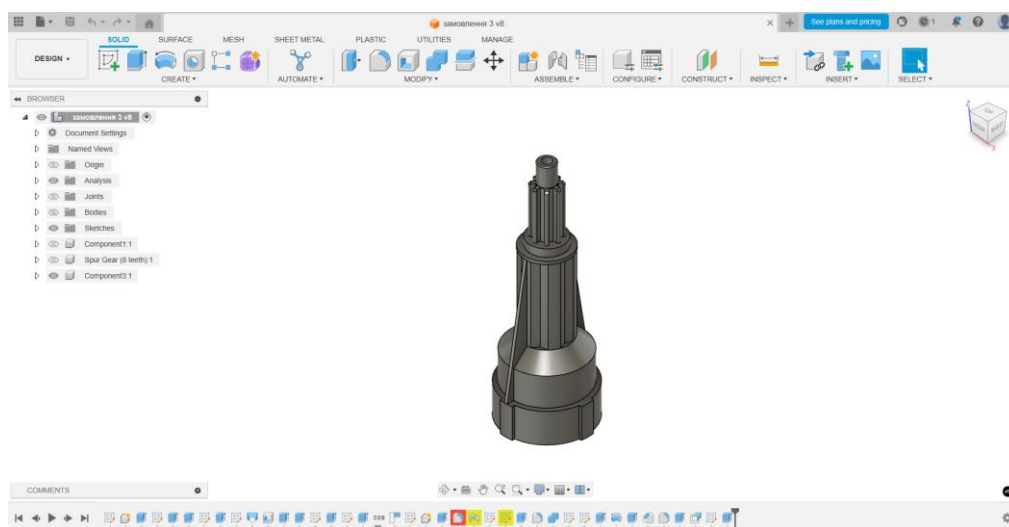


Рис. 2.3. 3D-модель проміжного валу у кухонний комбайн.

Потім модель переноситься у програму слайсер у нашому випадку Ultimaker Cura, яка буквально ріже модель на шари (рис. 2.4.). Для того щоб принтер «розумів» модель. У цій програмі генерується G-code – код, який вказує принтеру всі його переміщення екструдером, температури, куди і скільки подавати пластику та інша важлива для друку інформація.

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

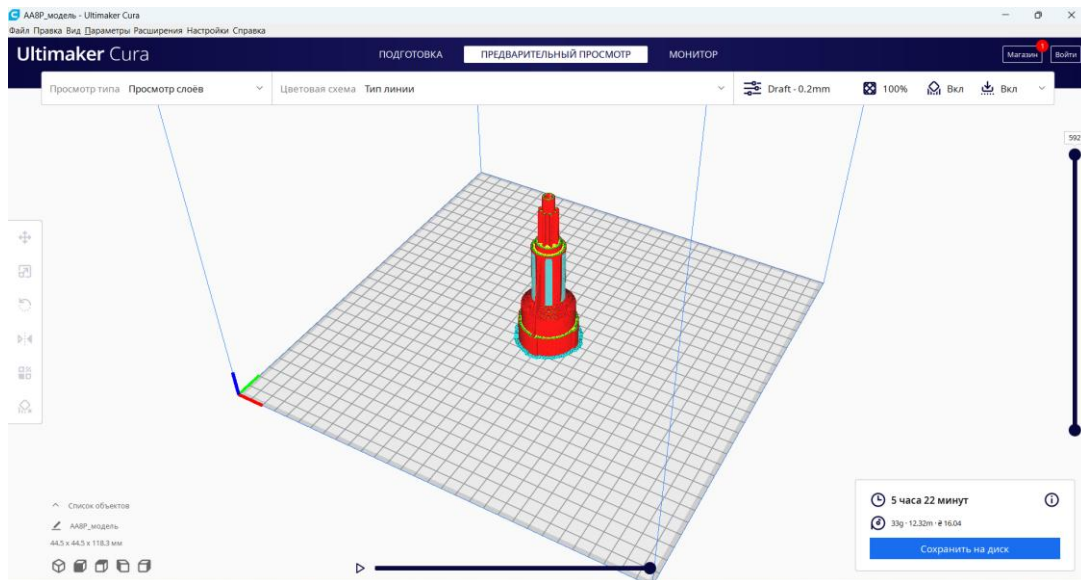


Рис. 2.4 Деталь підготована до друку



Рис. 2.5. Надрукована деталь

Існує кілька основних технологій 3D-друку, різняться вони тільки типом використовуваних матеріалів та методом побудови об'єктів.

Найпоширенішою і досить доступною технологією вважається FDM (Fused Deposition Modeling), що перекладається з англійської мови як моделювання плавненого осадження. Вона широко використовується як у промислових так і у домашніх 3D-принтерах. Вона ґрунтується на екструзії термопластичного матеріалу, який нагрівається, розплавляється, проходить через екструдер і наноситься на робочу область пошарово. Кожен шар застигає, утворюючи частину об'єкта, і так шар за шаром сформується повна модель.

Існує широкий вибір матеріалів для друку, серед них:

									Арк.
									18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ				

PLA (полілактидна кислота) — біорозкладний пластик, який часто використовується для домашніх принтерів завдяки простоті у використанні та екологічності.

ABS (акрилонітрилбутадієнстирол) — дешевий, ударостійкий, міцний пластик, ідеально підходить для виготовлення промислових деталей, а також користується популярністю серед домашніх принтерів.

PETG (поліетилентерефталат-гліколь) — пластик, що має високу міцність і гнучкість. Аббревіатура «PETG» вказує на додавання гліколю до основного складу, це робить матеріал еластичнішим, а в результаті стійкішим до ударів. Він чудово придатний для 3D-друку. Цей пластик широко використовується в будівельній, медичній, рекламній та харчовій галузях.

TPU (термопластичний поліуретан) — гнучкий матеріал, який використовується для виробництва об'єктів, що потребують еластичності.

FDM технологія завдяки своїй простоті та доступності широко застосовується для створення прототипів, функціональних деталей, а також різноманітних предметів домашнього вжитку.

2.2. Основні компоненти 3D-принтера

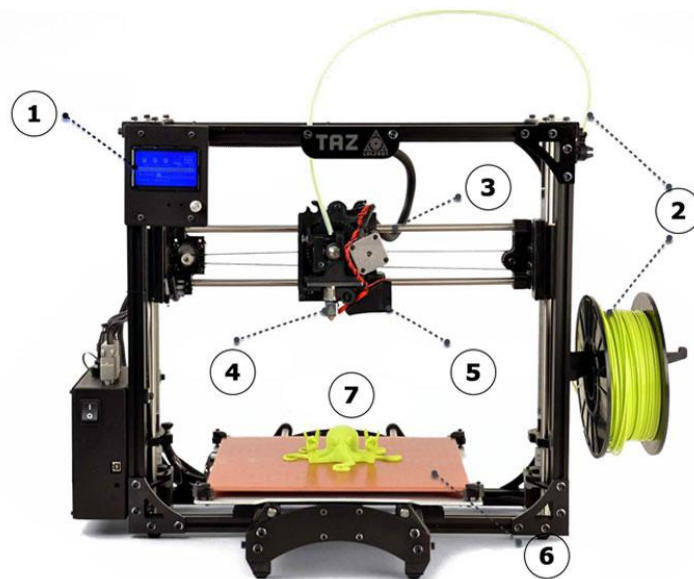


Рис. 2.6. Основні компоненти 3D-принтера [27]

На (рис. 2.6) зображено 3D-принтер, який друкує технологією FDM, він складається з наступних компонентів: 1 - Інтерфейс управління 3D-принтера, 2 - пластик для 3D-друку (філамент), 3 – лінійна напрямна, 4 – хотенд (гарячий кінець), 5 – система охолодження пластика, 6 – нагрівальна платформа, 7 – надрукована модель.

Рама є основою 3D-принтера, яка утримує всі інші компоненти. Вона повинна бути міцною і стабільною, щоб уникнути вібрацій під час друку. Найпоширенішими матеріалами для рами є алюмінієві профілі, сталь або пластик.

Існує багато їх видів наприклад принтер з рухомим столом по вісь Y (рис. 2.7.) є найпростішою та дешевою, недоліками такої конструкції є швидкість друку.



Рис. 2.7. 3D принтер з рухомим столом по вісь Y [5]

На даній рамі відбувається погіршення якості друку під час збільшення швидкості, тому що стіл має велику масу у наслідку кінематичну енергію, яка у свою чергу робить велике навантаження на приводні механізми та двигуни. Вони не можуть витримати такий крутий момент у наслідок кроковий двигун

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

пропускає декілька кроків. Після цього фактична і програмна системи координат не відповідають одна одній і деталь можна вважати не правильно надрукованою.

Core XY і H-Bot принтери з схожим типом рами, але з різним принципом натяжки та руху ремня (Див. рис. 2.8. і рис. 2.9).

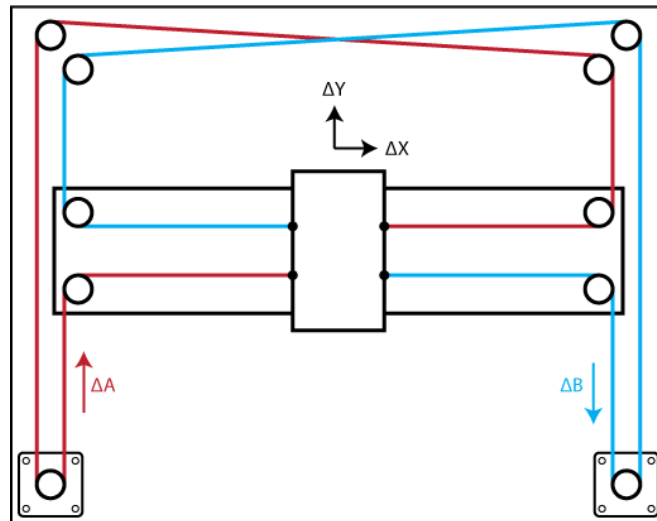


Рис. 2.8. Схема запасовування кінематики принтера Core XY [6]

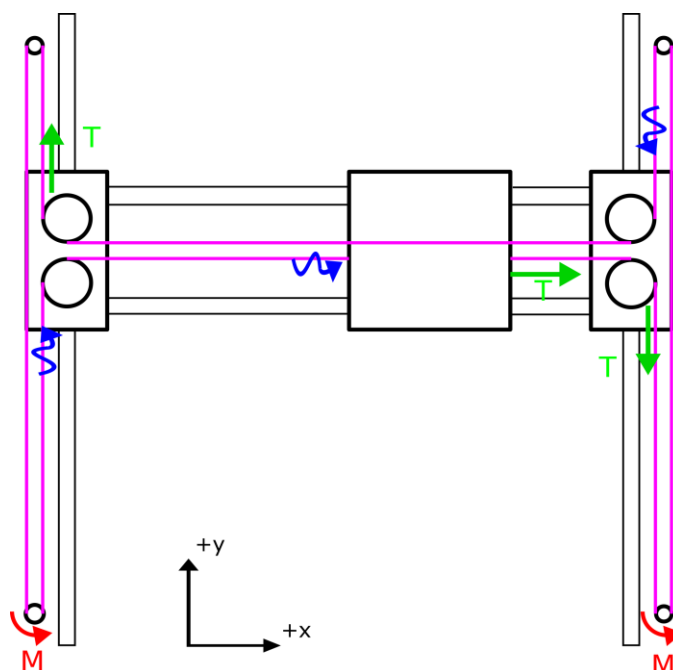


Рис. 2.9. Схема запасовування кінематики принтера H-bot [7]

Перевагами таких принтерів є швидкість та якість друку, недоліками: складність конструкції та вартість. Стіл на даному типі рам рухається по вісь Z.

Delta принтер використовує три незалежні вертикально рухомі каретки, які переміщуються по напрямних. За допомогою їх друкуючі головка може потрапити у будь яку точку координат у робочій області. Дельта-принтери використовують тригонометричні функції для координації цих головок. Рухомі частини, які складають механізм друку, є легшими та рухаються у більшому просторі, ніж стандартна декартова модель.

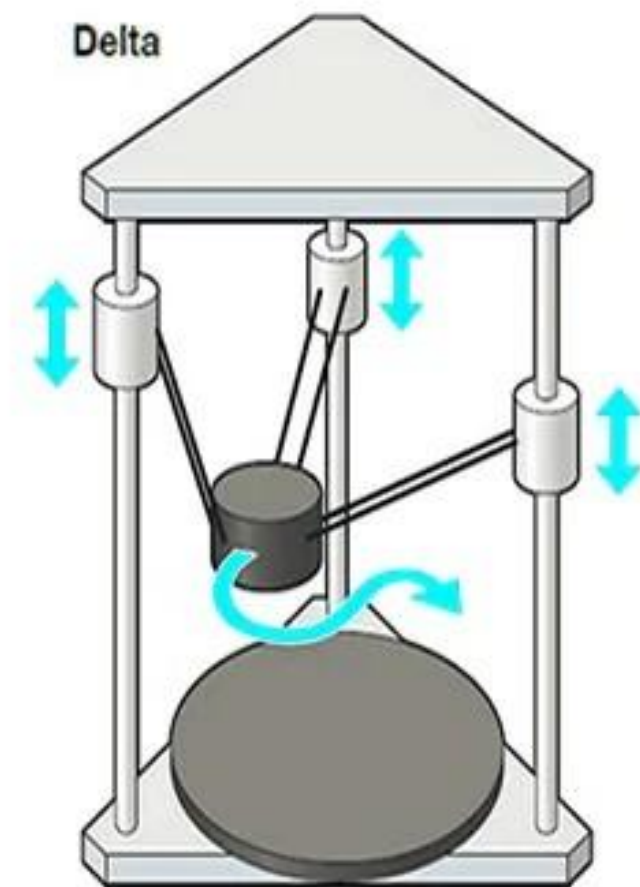


Рис. 2.10. Схема кінематики delta принтера [8]

Конвеєрний 3D-принтер використовує трикутно подібну раму завдяки якій вісь X і Z розташовані під кутом до горизонту це зроблено для того щоб кожен шар пластику примикав до конвеєрного стола. По вісь Y обертається стрічка, яка проходить над нагрівальним елементом (столом). Така кінематика

						01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			22

забезпечує майже безкінечний друк по вісь Y, довжина деталі обмежується лише кількістю пластика на катушці.



Рис. 2.11. Конвеєрний 3D принтер [9]

Нагрівальна платформа - поверхня, на якій створюється об'єкт. Вона виготовляється з скла, алюмінію та інших матеріалів. Платформи мають нагрівач, що покращує адгезію пластику до поверхні та запобігає деформаціям під час друку. Важливим фактором є матеріал поверхні, яка знаходиться на платформі. Від нього залежить наскільки добре модель буде триматися до платформи. Зазвичай матеріал поверхні однаковий по всьому тілу, наприклад скляна платформа. Однак на складальних пластинах, таких як листи PEI із пружинної сталі, використовується наклейка або спеціальне покриття з одного матеріалу для верхнього шару та іншого матеріалу для решти столу. Також важливо з якого матеріалу зроблена основна робоча поверхня. Вона хоч і не впливає на адгезію першого слою, але визначає характеристики верхнього шару нагрівальної поверхні, його температуру, швидкість нагрівання та охолодження.

Найпоширенішою є алюмінієва платформа з склом закріпленим зажимами (рис. 2.12). Перевагами є невелика вартість, можливість згладити нерівності друкованої платформи. Недоліками є неможливість зняти модель

									Арк.
									23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ				

одразу після друку (потрібно чекати остигання платформи), погана адгезія порівняно з іншими покриттями, але це можна виправити адгезивними матеріалами які намащуються на скло і модель буквально приклеюється.

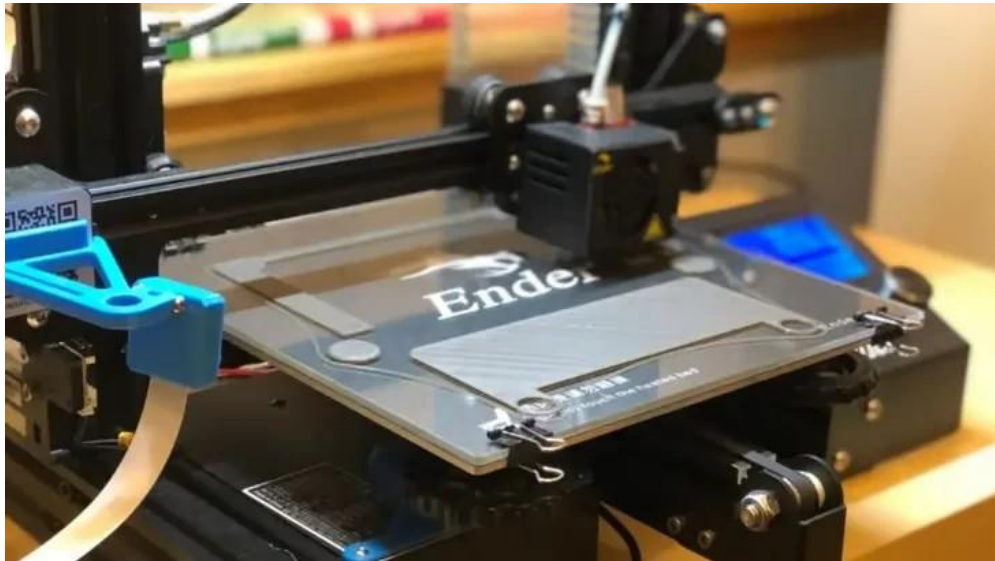


Рис. 2.12. Скляна нагрівальна платформа [10]

Досить зручною поверхнею є пружинна сталь PEI. Вона розділяється на два види: текстуровану (Рис. 2.13.) і гладку (Рис. 2.14.). Їх перевагами є чудова адгезія до PLA, ABS, PETG, TPU, нейлон. Вони гнучкі це дозволяє нам без проблем відділяти деталь від столу. Їх магнітність грає важливу роль у кріпленні до столу, взагалі для встановлення цього покриття на нагрівальний стіл потрібно приклеїти так звану магнітну підкладку, а вже потім пластина кріпиться до неї за рахунок своєї магнітності.

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

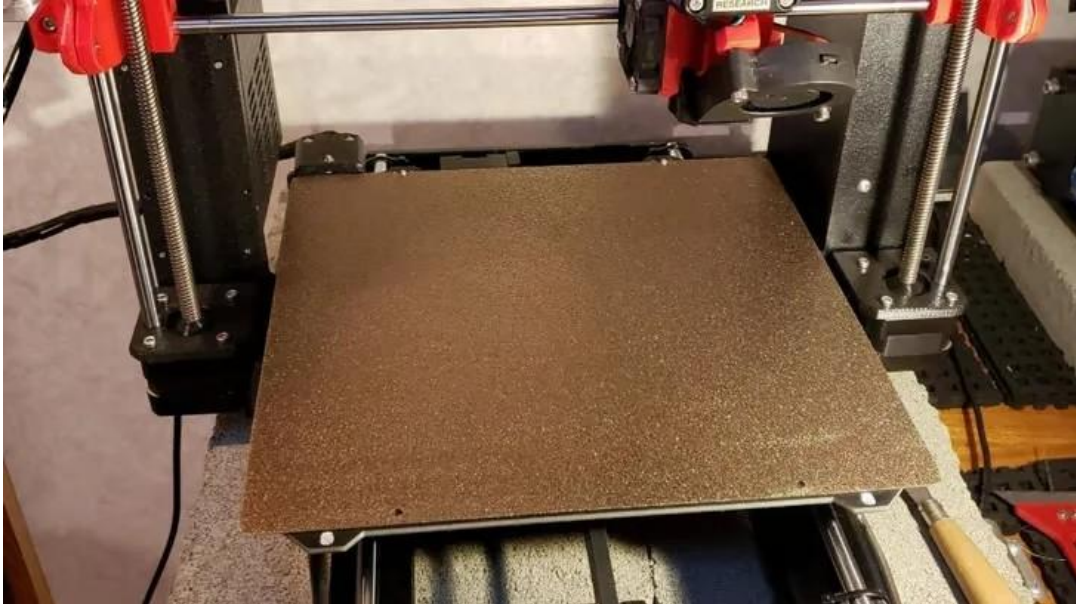


Рис. 2.13. Платформа із текстурованої пружинної сталі PEI [10]

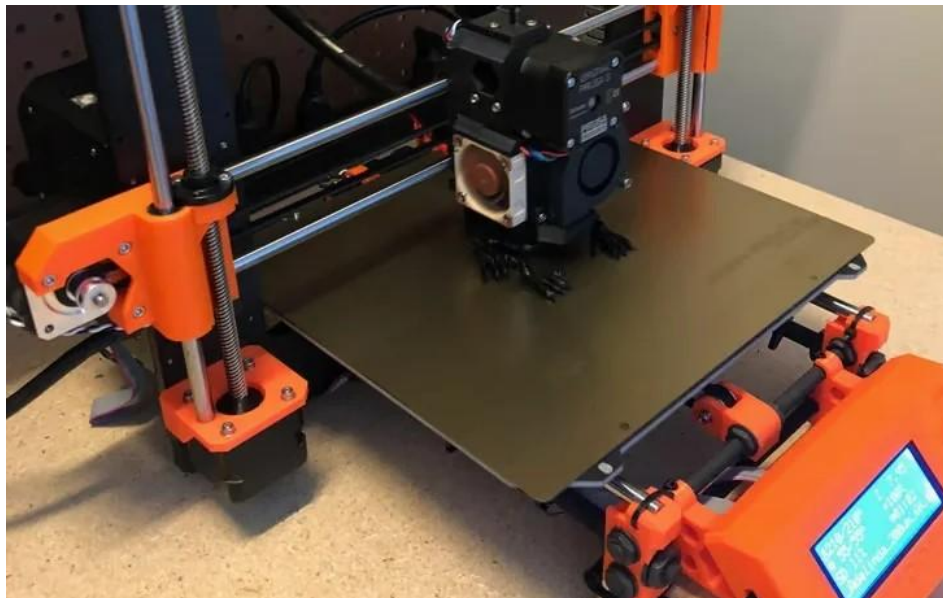


Рис. 2.14. Платформа із гладкої пружинної сталі PEI [10]

Ще один вид покриття нагрівальної платформи це поліпропілен (скорочено ПП) (Рис. 2.15) це тонкий, напівпрозорий, термостійкий пластик, з таким покриттям нагрівальну платформу можна нагрівати до 120 градусів за Цельсієм. Поліпропіленове покриття має дуже міцні зв'язки з такими пластиками PLA, ABS, PETG, PC, TPU, нейлон, поліпропілен. Також його можна згинати, що забезпечує легке відокремлення моделі від столу. Недоліком

його є вразливість до механічних пошкоджень, наслідком всі подряпини буде видно на нижній поверхні надрукованої деталі.



Рис. 2.15. Нагрівальна платформа покрита поліпропіленовою пластиною [10]

Головним елементом який перетворює твердий прут пластика у рідкий, є екструдер. Він складається з механізму подачі та гарячого кінця (hotend). Екструдер відповідає за подачу матеріалу, плавлення (наприклад, пластику) і точне нанесення його на нагрівальну платформу. У моделях SLA або DLP замість екструдера використовуються джерела світла або лазери.

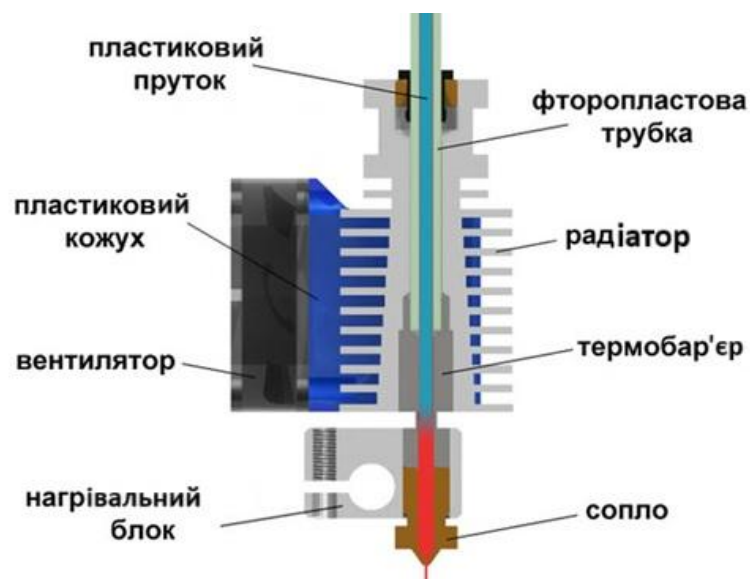


Рис. 2.16. Принципова схема Bowden hotend [11]

									Арк.
									26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ				

На рисунку 2.16 можемо досконало роздивитися принцип роботи екструдера технології друку FDM. Hotend розділяється на дві основні зони: гарячу (нагрівальний блок, сопло) і холодну (термобар'єр, вентилятор, радіатор, пластиковий кожух, фторопластова трубка). На цій схемі їх можна відрізнити орієнтуючись на колір пластикового прутка (червоний – гаряча, синій – холодна). Ця вся система працює таким чином: пластиковий пруток проходить через механізм подачі, потім попадає у фторопластову трубку, яка у свою чергу заходить у радіатор до термобар'єра, далі він потрапляє у нагрівальний блок (розплавляється) потім через сопло потрібного нам діаметра формує нитку розплавленого пластику, з якої у подальшому буде формуватися модель. Вентилятор відіграє також важливу роль у цій конструкції, він через пластиковий кожух направляє потік холодного повітря на радіатор, який у свою чергу охолоджує пластиковий пруток та термобар'єр, для того щоб пруток не плавився у холодній зоні. Це ускладнить друк, тому що якщо пруток розплавиться у холодній зоні механізм подачі може створити там пробку, яка унеможливить проходження прутка у нагрівальний елемент, у результаті зупинить друк. Показано схему bowden екструдера, але вони майже однакові з direct екструдером, вони відрізняється тільки розміщення механізму подачі пластику, а також фізичні характеристики. У direct екструдера кроковий двигун з роликками, які подають пластик, розміщені прямо на каретці, яка друкує, а у bowden механізм подачі пластику знаходиться десь на рамі, далі пластиковий пруток проходить по фторопластовій трубці до гарячого кінця. Роздивитися їх конструктивну відмінність можна на (рис. 2.17.), а також переваги і недоліки конструкцій у (таблиця 1.).

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

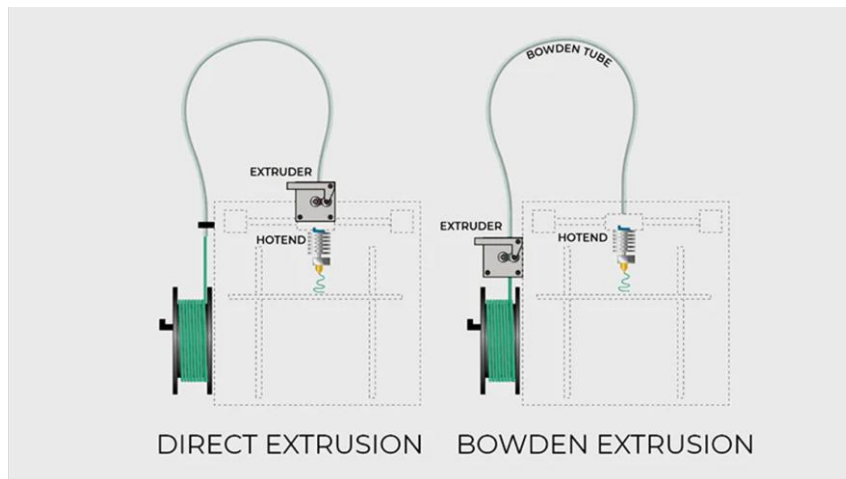


Рис. 2.17. Два основні види екструдерів у 3D-принтері [12]

Таблиця 2.1

Порівняння типів екструдерів

Види екструдерів	переваги	недоліки
Direct	<ul style="list-style-type: none"> - друкує пластиками будь якої м'якості, у тому числі силіконоподібними пластиками (наприклад TPU, FLEX тощо). - відсутність затримок при подачі матеріалу. 	<ul style="list-style-type: none"> - більш важча друкуюча головка, що не дає принтеру розвивати високі швидкості друку. - вібрації від екструдера можуть впливати на якість друкованих ліній.

Продовження таблиця 2.1

Порівняння типів екструдерів

Види екструдерів	переваги	недоліки
Direct	<ul style="list-style-type: none"> - можна встановлювати легший двигун із меншою потужністю, тому що фторопластова трубка коротка (до 50 мм) і сильного тертя філаменту в ній не відбувається. 	<ul style="list-style-type: none"> - демонтаж і обслуговування складніше і дорожче. - вартість екструдера дорожче, якщо параметри у їх однакові.
Bowden	<ul style="list-style-type: none"> - легка друкуюча головка, що дозволяє друкувати на високих швидкостях не втрачаючи якість; - відсутність вібрацій від 	<ul style="list-style-type: none"> - відносно велика затримка подачі пластику, під час друку треба робити довгі ретракти, що робить майже неможливим друк м'якими

	пристрою подачі пластику; - простота обслуговування і ремонту друкуючої головки і самого екструдера.	пластиками; - м'які пластики можуть взагалі застрягти у фторопластовій трубці; - екструдер потребує більш потужного двигуна подачі пластику, для подолання сили тертя у фторопластовій трубці; - неякісний пруток з «плаваючим» діаметром або з будь яким дефектом може застрягти у фторопластовій трубці і перервати друк.
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Механізми руху забезпечують переміщення друкуючої головки або платформи по осях X, Y та Z. Вони складаються з напрямних, крокових двигунів, ходові гвинти з гайками, ременів, шківів та систем передачі руху.

Рейкові напрямні розділяються на три основні типи рейкова лінійна напрямна (рис. 2.18.), вал лінійна напрямна (рис. 2.19.) і їхній гібрид опорна лінійна направляюча (рис. 2.20.).



Рис. 2.18. Рейкова лінійна напрямна [13]



Рис. 2.19. Вал лінійна напрямна [14]

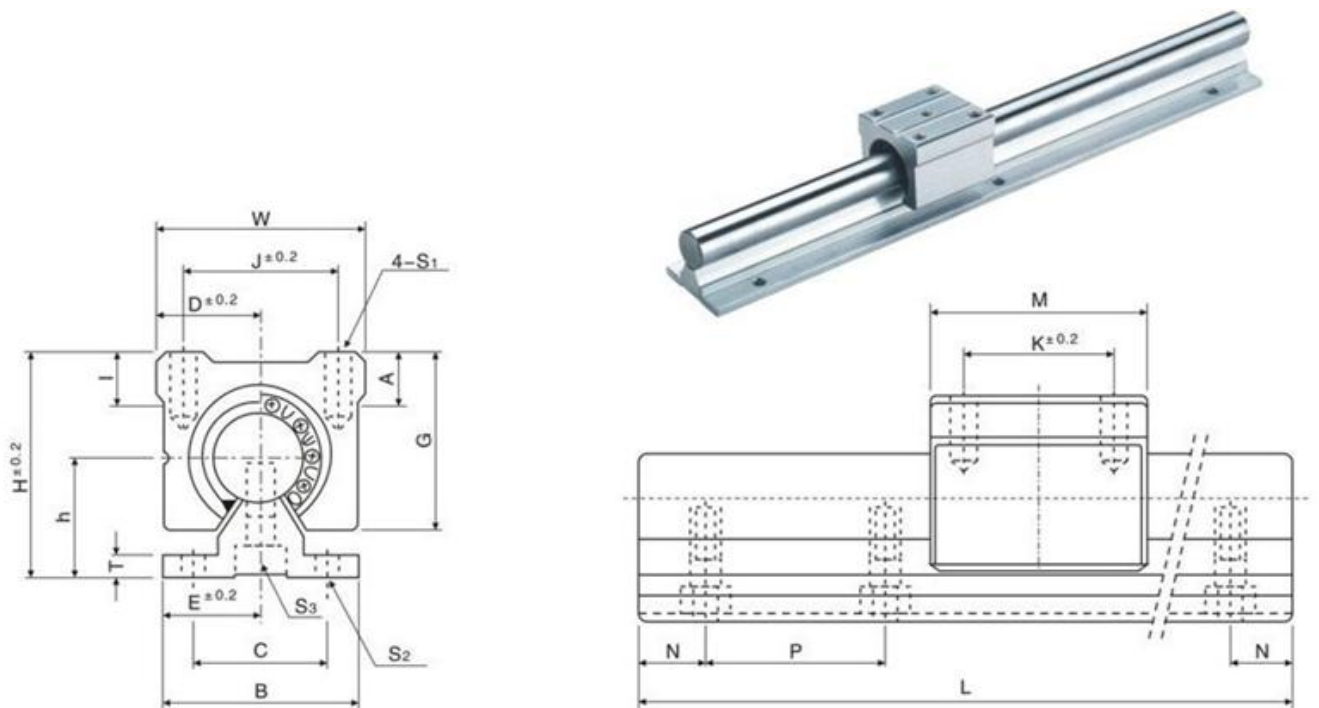


Рис. 2.20. Опорна лінійна направляюча [15]

Таблиця 2.2

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Порівняння рейкових напрямних

	переваги	недоліки
Рейкова лінійна напрямна	<ul style="list-style-type: none"> - висока точність і жорсткість; - низький коефіцієнт тертя; - велика вантажопідйомність; - стійкість до зношування; 	<ul style="list-style-type: none"> - висока ціна; - підвищенні вимоги для встановлення; - чутливість до забруднень; - більша вага;
Вал лінійна напрямна	<ul style="list-style-type: none"> - низька вартість; - простота встановлення; - широка доступність; - стійкість до невеликого перекосу; - легка заміна або ремонт; 	<ul style="list-style-type: none"> - нижча жорсткість; - більше тертя і люфти; - менша вантажопідйомність; - схильність до прогину;
Опорна лінійна напрямна	<ul style="list-style-type: none"> - збільшена жорсткість; - більша вантажопідйомність; - доступна ціна; - просте встановлення; - поширеність; 	<ul style="list-style-type: none"> - більше тертя, ніж у рейкових системах; - наявність люфтів; - габаритність; - обмеження у дизайні;

Основою всіх переміщень є кроковий двигун (рис. 2.21.) це електродвигун, який обертається дискретними кутами (кроками) замість безпосереднього обертання.



Рис. 2.21. Кроковий двигун NEMA 17 [16]

Він перетворює електричні імпульси в точні механічні рухи, що ідеально підходить для 3D-друку, тому що там важлива висока точність позиціонування. Найбільш поширеним у цій сфері є кроковий двигун NEMA 17. У нього досить гарне співвідношення компактності і потужності.

Механізми за допомогою яких двигун передає свою енергію на рухомі частини принтера розділяються на два основних види: ходовий гвинт з ходовою гайкою (рис. 2.22.) та ремінь з шківом (рис. 2.23.). Ходовий гвинт використовується там де потрібно не велике та не швидке переміщення, у більшості випадків встановлюється на вісь Z. Ремінь можна швидше і простіше рухати без великих втрат на тертя, тому він використовується на осях X і Y які відповідають за друк периметрів на нагрівальній платформі.



Рис. 2.22. Ходовий гвинт з ходовою гайкою [17]



Рис. 2.23. Ремінь і шків [18]

Таблиця 2.3

Порівняння ходового гвинта і ременя

	переваги	недоліки
Ходовий гвинт	<ul style="list-style-type: none"> - висока точність руху; - самогальмування; - висока вантажопідйомність; - стабільність положення; - довговічність; 	<ul style="list-style-type: none"> - низька швидкість руху; - висока чутливість до забруднення; - потребує точної співвісності; - вартість; - потенційний люфт у дешевих варіантах.
Ремінь	<ul style="list-style-type: none"> - висока швидкість руху; - низька вага; - дешевизна; - плавний рух; - низьке споживання енергії; - простота обслуговування; 	<ul style="list-style-type: none"> - можливий розтяг ременя; - менша точність; - потреба у натягуванні; - ризик проковзування; - зношення;

Кінцеві датчики. Ці сенсори визначають положення друкуючої головки на платформах та обмежують рух механізмів, запобігаючи їх виходу за межі робочої зони. Поділяються на механічні кінцеві вимикачі, оптичні кінцеві вимикачі, магнітні кінцеві вимикачі (з герконом), холлівські сенсори (датчики Холла), індуктивні або ємнісні датчики.

Контролер та електроніка. Контролер управляє всіма процесами друку, синхронізуючи роботу двигунів, екструдера та платформи. Він обробляє цифрові команди (зазвичай у вигляді G-коду) та перетворює їх у рухи принтера.

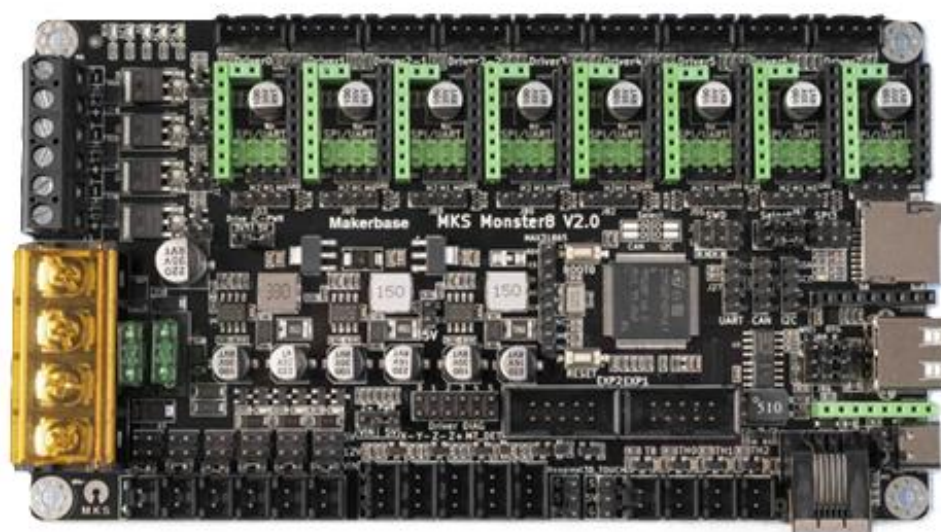


Рис. 2.24. Плата керування 3D-принтером із з'ємними драйверами [19]

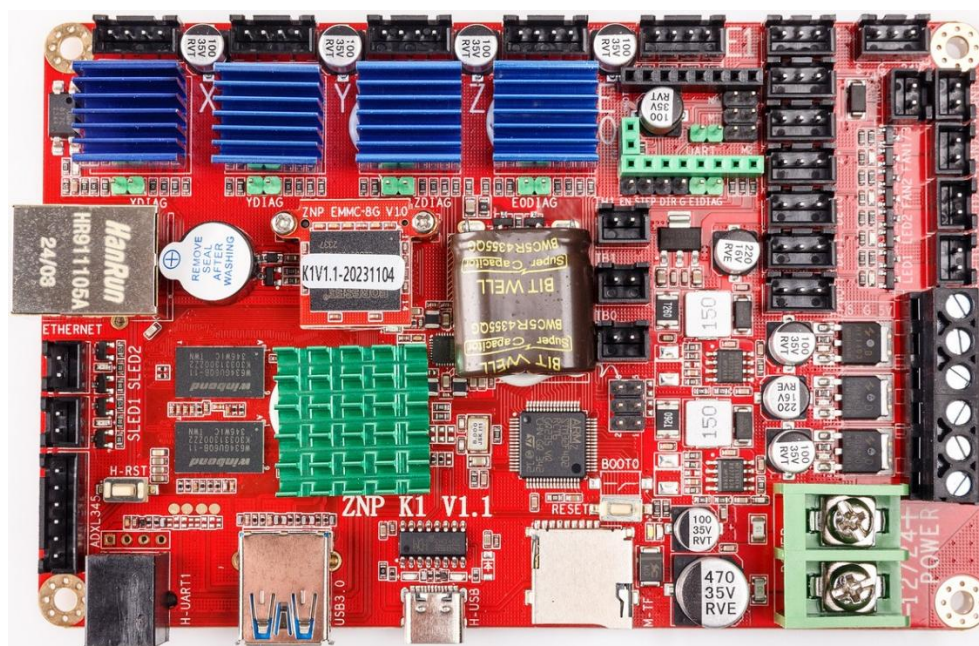


Рис. 2.25. Плата керування 3D-принтером з розпаяними драйверами [20]

						Арк.
					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Драйвер двигуна – це електронний модуль, який керує струмом і напругою, що подається на крокові двигуни принтера, дозволяючи їм плавно і точно рухатися. Найпоширеніші драйвери:

A4988 – базовий драйвер для керування кроковими двигунами (рис. 2.26.).

DRV8825 – покращений варіант замість A4988.

TMC2208 – безшумний драйвер від компанії Trinamic.

TMC2209 – покращений TMC2208 з UART-комунікацією.

TMC5160 – драйвер для великих 3D-принтерів або CoreXY-машин. (рис. 2.27.)

Таблиця 2.4

Порівняння характеристик відомих драйверів

Драйвер	Тишина роботи	Макс. мікрокрок	Струм (А)	Примітка
A4988	Ні	1/16	~1	Бюджетний
DRV8825	Ні	1/32	~2,2	Потужніший за A4988
TMC2208	Так	1/256	~1,4	Дуже тихий
TMC2209	Так	1/256	~2	Тихий, розумне керування
TMC5160	Так	1/256	~3+	Для великих потужних систем



Рис. 2.26. Драйвер A4988 [21]



Рис. 2.27. Драйвер TMC5160 [22]

Блок живлення у 3D-принтері – це пристрій, який перетворює змінний струм (220В або 110В) у постійний струм потрібної напруги (12В або 24В) для забезпечення живлення всіх компонентів принтера, таких як плата керування, крокові двигуни, екструдери, нагрівальні столи тощо. Потужність блока живлення залежить від потужності яка споживається всіма електропристроями одночасно плюс 20-30% запасу по потужності. За таким принципом можна розрахувати потрібну нам потужність для друку.



Рис. 2.28. Блок живлення [23]

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Дисплей – це екран, через який користувач взаємодіє з 3D-принтером. Він дозволяє налаштовувати параметри друку, перевіряти статус пристрою та запускати завдання безпосередньо на принтері. Є три основні типи дисплеїв, які використовуються у 3D-принтерах це текстовий дисплей (LCD 12864) (рис. 2.29.), графічний дисплей (рис. 2.30.), сенсорний дисплей (Touchscreen) (рис. 2.31.).



Рис. 2.29. Текстовий дисплей (LCD 12864) [24]

Маленький монохромний дисплей з кількома рядками виводу тексту, використовується з обертальними енкодерами або кнопками. Він дуже надійний, дешевий, має мінімалістичний вигляд та просте меню.



Рис. 2.30. Графічний дисплей [25]

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Монохромний або кольоровий екран, може показувати прості картинки, значки і розширене меню. Має кращу навігацію між налаштуваннями, інколи можливість попереднього перегляду моделі перед друком.



Рис. 2.31. Сенсорний дисплей (Touchscreen) [26]

Кольоровий сенсорний екран, який має зручне та інтуїтивне керування пальцями. Більш сучасний вигляд і розширені функції (наприклад, калібрування столу, налаштування PID). Підтримує попередній перегляд моделі, можлива зміна налаштувань у реальному часі.

Інтерфейс користувача - це набір меню, кнопок, команд та інформації, яка відображається на дисплеї для керування процесом друку.

Основними елементами інтерфейсу користувача є статус друку (температура, швидкість, час), зміна швидкості друку під час роботи, запуск, пауза і зупинка друку, меню налаштувань (температури, руху осей, вентилятора), завантаження або вивантаження філаменту, налаштування калібрування та автонівелювання столу, оновлення прошивки або зміна профілю принтера.

2.2. Обґрунтування вдосконалення конструкції 3D-принтера

В умовах стрімкого розвитку доступних 3D-принтерів важливою задачею залишається забезпечення стабільної і точної роботи механізмів переміщення, зокрема по осі Z. У більшості бюджетних моделей принтерів реалізовано фіксацію нагрівального столу тільки з одного боку, він спирається на дві

						01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			38

лінійні напрямні, керується однією гвинтовою парою, яка приводиться у рух від крокового двигуна. Ця система створює не потрібні вібрації, перекося, зниження якості друку, особливо при друці високих об'єктів. Суть запропонованого рішення полягає у реалізації симетричного приводу осі Z з двохсторонньою механічною підтримкою друкуючого столу. Замість традиційної односторонньої конструкції, нова система передбачає встановлення ходових гвинтів та лінійних напрямних з обох боків столу, що забезпечує жорстку фіксацію платформи по всій ширині, рівномірне навантаження на підшипникові вузли, зменшення люфту і скручування конструкції. Завдяки цього досягається підвищення точність позиціонування, зменшення вібрацій та однорідна якість друку по всій друкованій деталі. Така модифікація дозволяє перетворити бюджетний 3D-принтер у більш точний та професійний інструмент, який можливо масштабувати до більших розмірів простору для друку без втрати точності. Це рішення є універсальним, сумісним із існуючими механізмами і може бути адаптоване як на етапі розробки так і під час модернізації існуючого принтера.

2.3. Розробка деталей для модернізації 3D-принтера

Для вдосконалення конструкції 3D-принтера потрібно розробити і виготовити такі запчастини, як кріплення крокового двигуна (рис. 2.32.), нижнє (рис. 2.33.) та верхнє (рис. 2.34.) кріплення вал лінійної напрямної, нижнє кріплення лінійних підшипників (рис. 2.35.), верхнє кріплення лінійних підшипників (рис. 2.36), кріплення ходової гайки (рис. 2.37.), кріплення опорного підшипника ходового гвинта (рис. 2.38.). Також потрібно купити ходовий гвинт 500 мм 1 шт, ходова гайка 1 шт, опорний підшипник ходового валу 1 шт, гладкий вал 500 мм. 2 шт, кроковий двигун NEMA 17 1 шт, перехідна гнучка муфта 1 шт, лінійні підшипники LM8UU 4 шт, гвинти та гайки. Всі деталі які потрібні для переобладнання 3D принтера зображено на (рис. 2.39.).

Спочатку деталь проектується у будь якій САD програмі, конвертується у

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

файл зрозумілий для 3D-принтера та друкується. Нижче показано фото розроблених деталей для вдосконалення, зліва зпроектована CAD модель, зправа

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ГОТОВА НАДРУКОВАНА ДЕТАЛЬ.

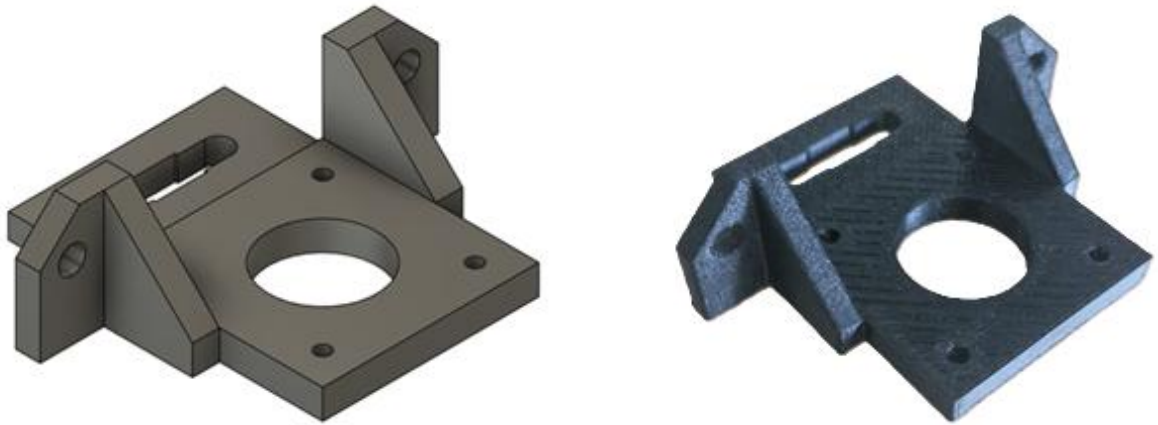


Рис. 2.32. Кріплення крокового двигуна



Рис. 2.33. Верхня опора лінійного валу

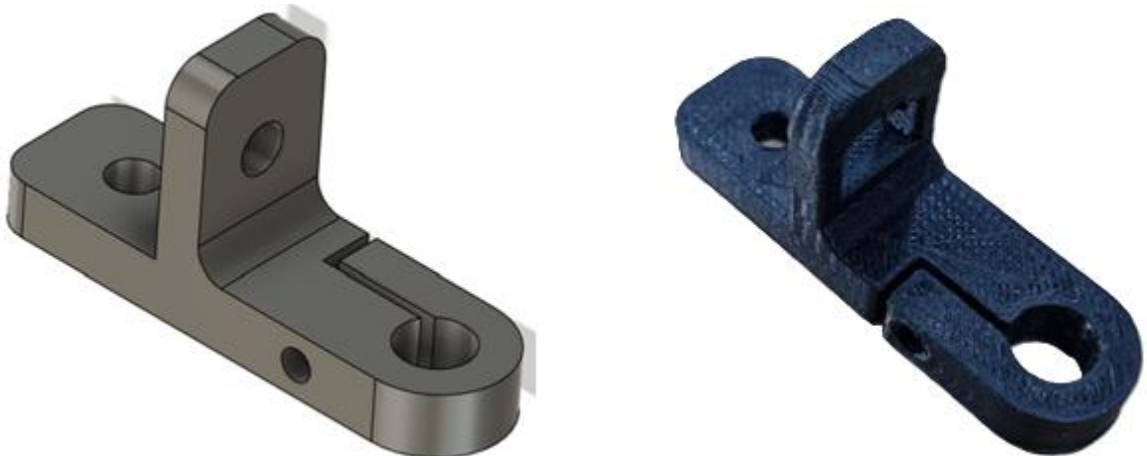


Рис. 2.34. Нижня опора лінійного валу

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

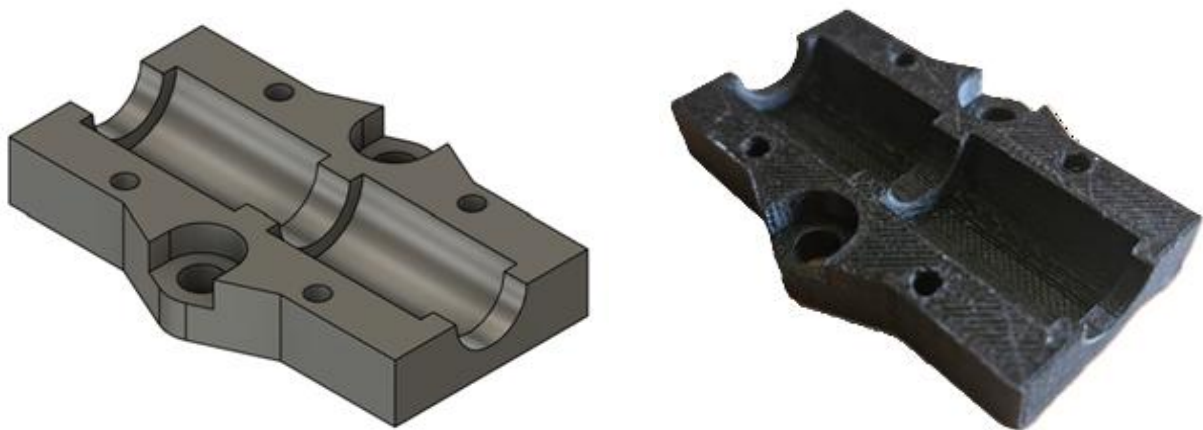


Рис. 2.35. Корпус кріплення лінійних підшипників

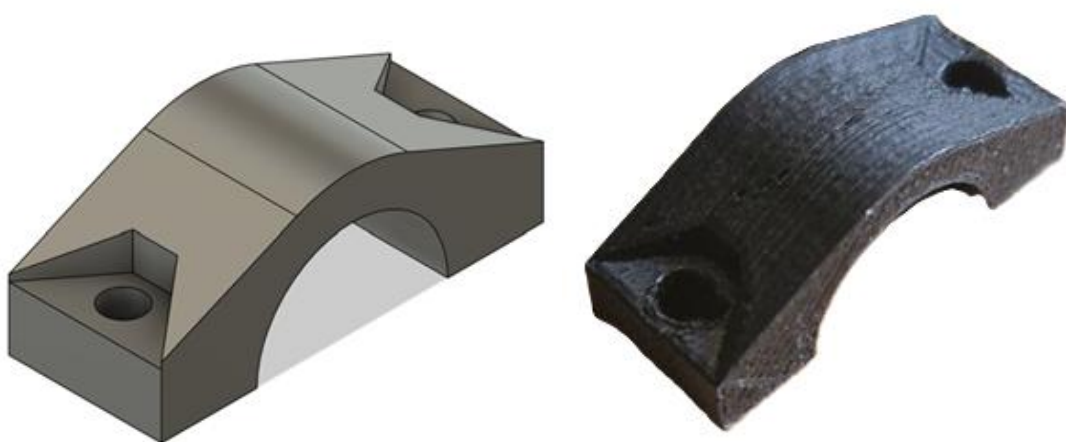


Рис. 2.36. Кришка корпусу кріплення лінійних підшипників

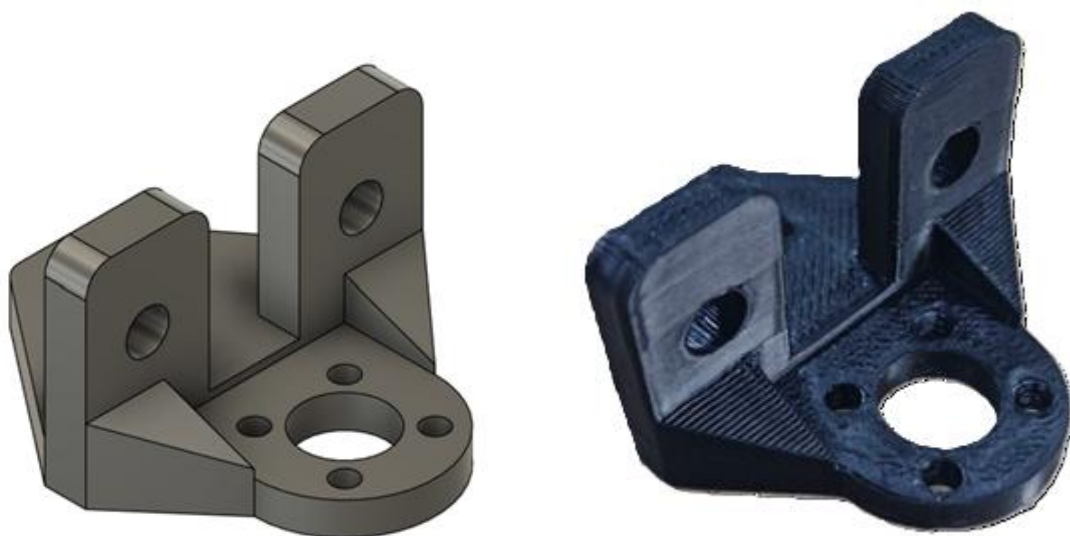


Рис. 2.37. Кріплення ходової гайки

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

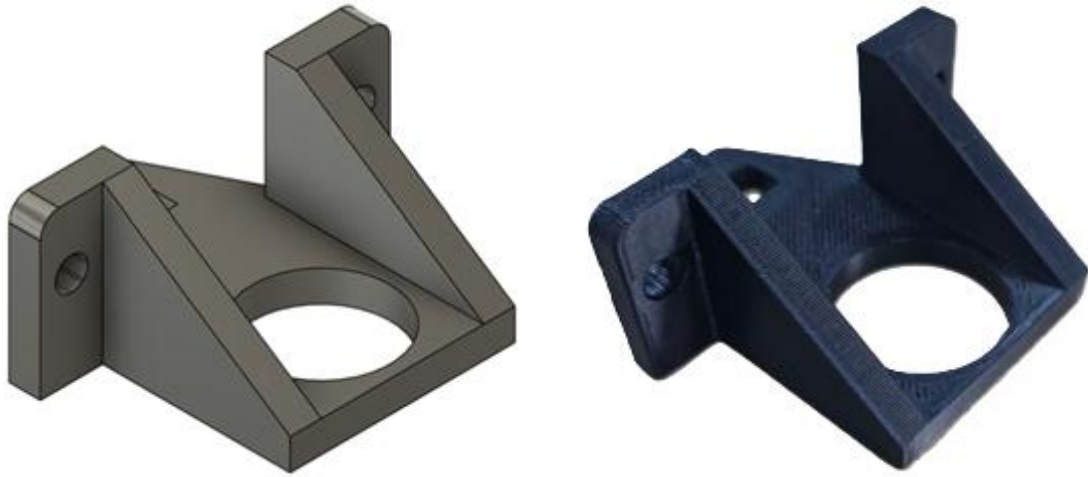


Рис. 2.38. Кріплення опорного підшипника

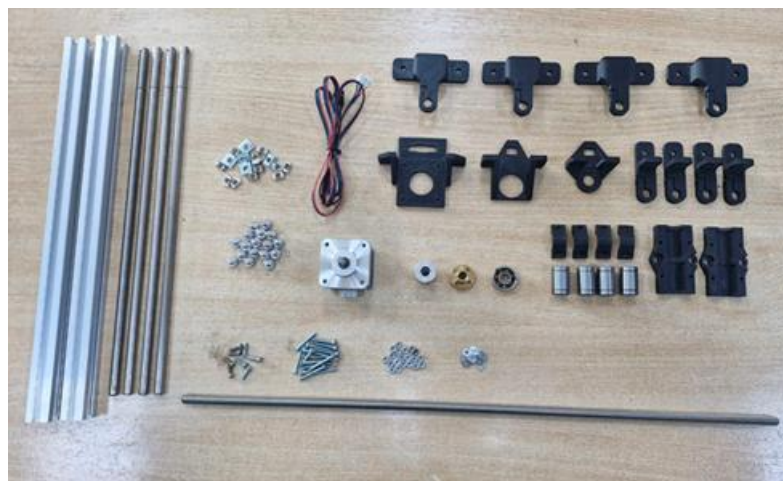


Рис. 2.39. Запчастини для переобладнання

2.4. Вдосконалення 3D-принтера

Вигляд принтера до модернізації показано на (рис. 2.40.), рама нагрівальної платформи кріпиться тільки з одного боку, за допомогою лінійних напрямних з підшипниками, до рами принтера. Детально розглянути конструкцію не допрацьованої рами столу можна на (рис. 2.41.). Такий конструктив рами давав зайві вібрації під час швидкого друку, тому було прийняте рішення модернізації. Для початку розберемо стару раму на запчастини, щоб додати їх до вже спроектованих та зібрати нову. Зберемо модуль приводу (кроковий двигун, кріплення і гнучка перехідна муфта) (рис. 2.42.),

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ

Арк.

43

вузли лінійних підшипників (рис. 2.43.) та ходову гайку прикрутимо до її кріплення (рис. 2.44.). Поперечні профілі залишаємо, а поздовжні замінюємо на довщі, збираємо з них раму, додаємо кріплення нагрівального столу, вузли лінійних підшипників, ходові гайки з кріпленнями. Готова рама зображена на (рис. 2.45.). Потім на раму принтера закріплюються нижні і верхні опори, у які закріплено гладкі вали (напрямні), та закріплюються два крокових двигуна на нижній профіль рами. Співвісно з двигунами заріплюються опорні підшипники з кріпленнями на верхню частину рами принтера, роздивитися детальніше можна на (рис. 2.46.) аналогічно збирається протилежна сторона. Повністю готова кінематика віс Z зображена на (рис. 2.47.).

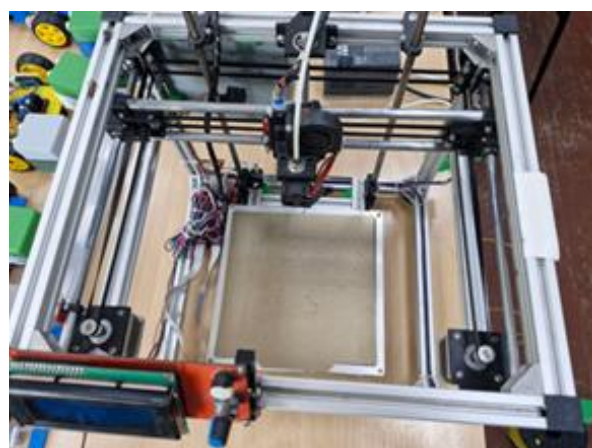
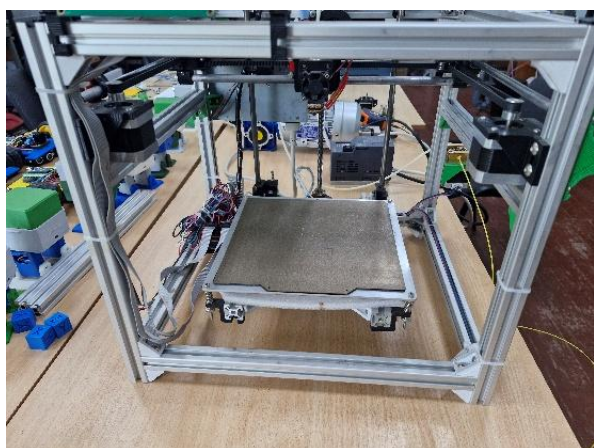


Рис. 2.40. 3D-принтер до вдосконалення

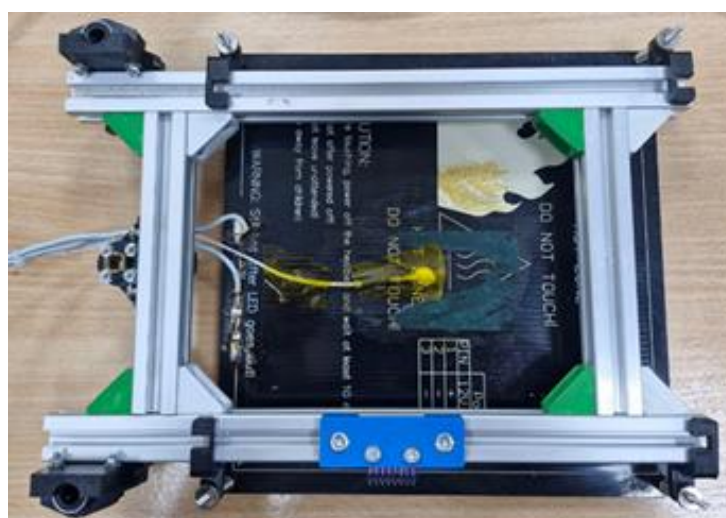


Рис. 2.41. Стандартна рама 3D-принтера

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44



Рис. 2.42. Кроковий двигун з кріпленням та муфтою



Рис. 2.43. Зібрані вузли лінійних підшипників



Рис. 2.44. Ходова гайка з кріпленням

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

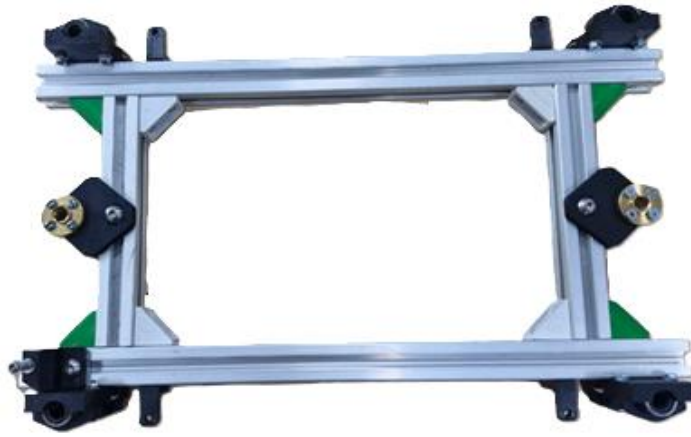


Рис. 2.45. Зібрана рама нагрівальної платформи

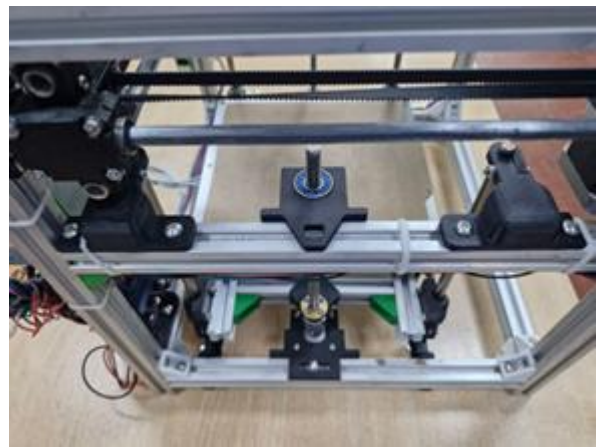
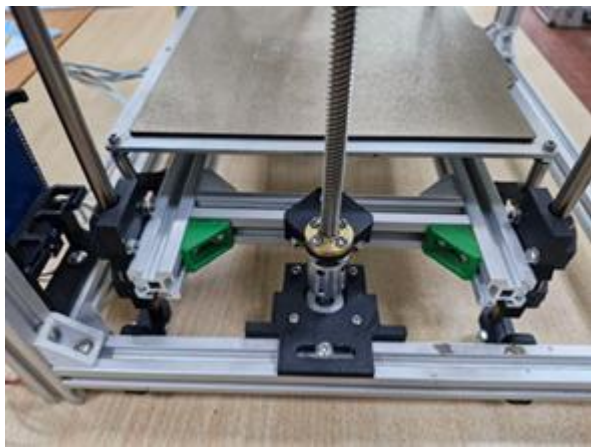


Рис. 2.46. Встановлена рама нагрівальної платформи

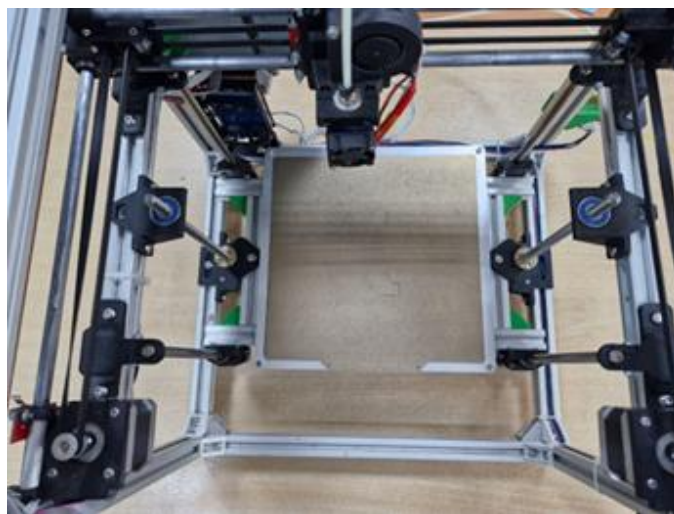


Рис. 2.47. Вдосконалена конструкція 3D принтера

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЗМІВ 3D-ПРИНТЕРА

3.1 Розрахунок кутового перекосу столу

Порівняльний розрахунок кутового перекосу столу у випадку односторонньої та двосторонньої фіксації (до модифікації та після). Нехай маса столу з моделлю в обох випадках дорівнює 1 кг., відстань від точки опори до центру ваги (при одній опорі): d дорівнює половині $l_1 = 270$ мм., відстань між двома гвинтами (при двох опорах): $l_2 = 295$ мм. Для першого випадку уявімо, що стіл має одну точку опори (гвинт), а друга сторона «висить у повітрі» (рис. 3.1). У цьому випадку навантаження створює момент, який спричиняє перекіс столу. Для того щоб розрахувати цей момент M потрібно знайти відстань від точки опори до центру ваги d та навантаження F , яке діє на конструкцію за формулами наведеними нижче:

$$d = l_1/2, \quad (3.1)$$

$$d = \frac{270}{2} = 135 \text{ мм} = 0.135 \text{ м},$$

$$F = m \cdot g, \quad (3.2)$$

$$F = 1 \text{ кг} \cdot 9.81 \text{ м/с}^2 = 9.81 \text{ Н},$$

$$M = F \cdot d, \quad (3.3)$$

$$M = 9.81 \cdot 0.135 = 1.32435 \text{ Н/м}.$$

Цей момент викликає перекіс столу. Якщо матеріал і кріплення недостатньо жорсткі, це може призвести до нахилу столу на кілька кутових хвилин або міліметрів на кінцях. У випадку з двома точковою фіксацією (нова конструкція) (рис. 3.2.) навантаження розподіляється на два гвинти, і кожна

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 3	Літ.	Арк.	Акрушіє
Розроб.		Данілов А.В.					47	63
Перевір.		Крушельницький В.В.						
Н. Контр.								
Затверд.								
						НУБіП України		

точка фіксації бере на себе половину маси. До того ж, жорстка лінійна напрямна з іншого боку повністю усуває вільний перекид. У покращеному варіанті момент перекосу зменшується приблизно у 4-6 разів через симетричний розподіл маси, значно більшу базу опори (295 мм проти 135 мм), усунення важеля з вільним кінцем це забезпечує набагато вищу геометричну стабільність.

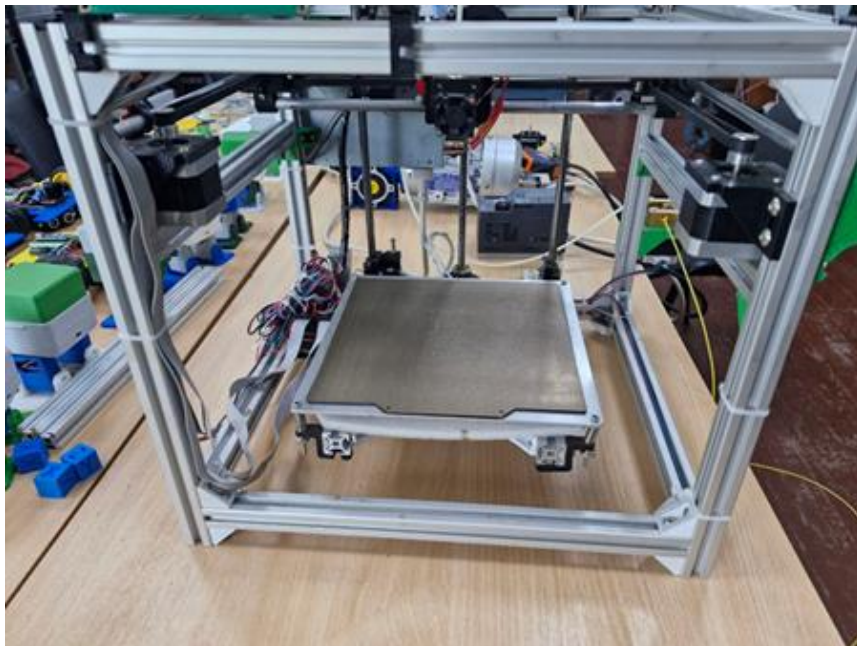
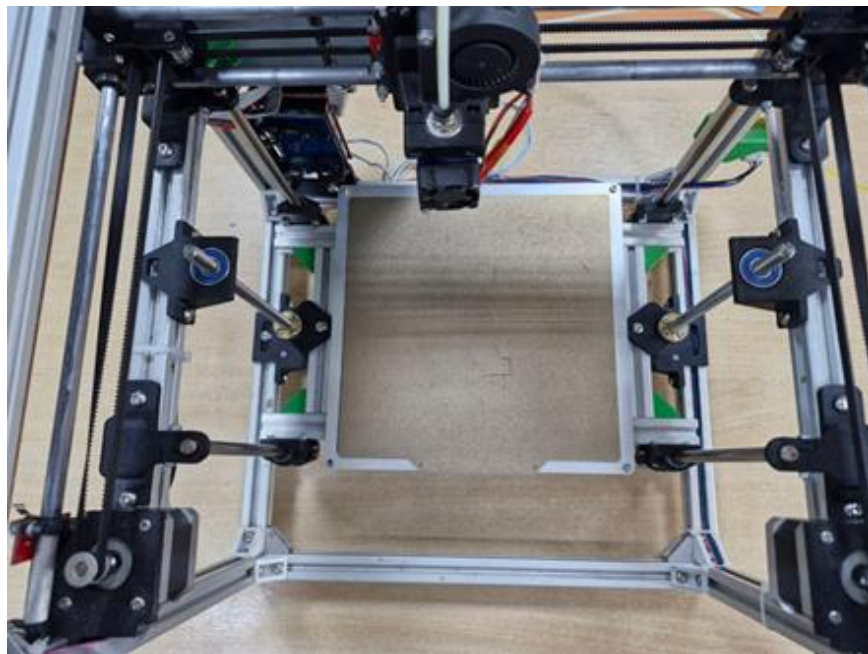


Рис. 3.1. Консольно закріплена рама столу 3D-принтера



					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Рис. 3.2. Двох точкова фіксація рами столу 3D-принтера

3.2. Розрахунок прогину рами нагрівальної платформи

Рама столу виготовлена з алюмінієвого профілю 20×20 мм у метрах ширина поперечного $a = 0,02$ м, модуль Юнга алюмінію $E = 70 \times 10^9$ Па, довжина профілю до модернізації 270 мм (закріплений з одного боку), а після 295 мм (закріплений з двох боків). Загальна маса навантаження 1кг $\rightarrow W = 1 \times 9,81 = 9,81$ Н, навантаження рівномірне. Обчислюємо момент інерції профілю за формулою:

$$I = \frac{a^4}{12}, \quad (3.4)$$

$$I = \frac{(0,02)^4}{12} = 1,333 \times 10^{-8} \text{ м}^4.$$

Розрахуємо рівномірно розподілене навантаження на раму за формулою:

$$q = \frac{F}{l}, \quad (3.5)$$

де: F - сила, яка створює навантаження на раму, Н;

l – довжина рами, м.

Для довжини 0,27 м:

$$q_1 = \frac{9,81}{0,27} = 36,33 \text{ Н/м};$$

Для довжини 0,295 м:

$$q_2 = \frac{9,81}{0,295} = 33,27 \text{ Н/м}.$$

Під час повздовжнього прогину рами навантаження розділяється на два профілі, а отже у перерахунку на один профіль розподілене зусилля ділиться на два. Розраховуємо для довжини 0,27 м:

$$q_{11} = \frac{36,33}{2} = 18,165 \text{ Н/м}.$$

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахуємо для довжини 0,295 м:

$$q_{22} = \frac{33,27}{2} = 16,635 \text{ Н/м.}$$

Розрахуємо максимальний прогин при односторонній фіксації (стара конструкція) за формулою:

$$\delta_1 = \frac{qL^4}{8EI}, \quad (3.6)$$

$$\delta_1 = \frac{18,165 \times (0,27)^4}{8 \times 70 \times 10^9 \times 1,333 \times 10^{-8}} = \frac{18,165 \times 0,005314}{7,466 \times 10^3} = \frac{0,096}{7,466 \times 10^3} = 1,29 \times 10^{-5} \text{ м} = 0,0129 \text{ мм.}$$

Розрахуємо максимальний прогин при двосторонній фіксації рами (нова конструкція) за формулою:

$$\delta_2 = \frac{5qL^4}{384EI}, \quad (3.7)$$

$$\delta_2 = \frac{5 \times 16,635 \times (0,295)^4}{384 \times 70 \times 10^9 \times 1,333 \times 10^{-8}} = \frac{5 \times 16,635 \times 0,007571}{3,578 \times 10^5} = \frac{0,630}{3,578 \times 10^5} = 1,76 \times 10^{-6} \text{ м} = 0,00176 \text{ мм.}$$

Розраховуємо коефіцієнт зміну прогину k рами до і після модернізації за формулою:

$$k = \frac{\delta_1}{\delta_2}; \quad (3.8)$$

$$k = \frac{0,0129}{0,00176} = 7,33.$$

В результаті рама після вдосконалення має прогин у 7 разів менший це означає, що вона стала жорсткішою завдяки переобладнанню.

3.3. Розрахунок люфтів і їх вплив на точність друку

Люфт – це механічний зазор між рухомими елементами, у нашому випадку гайкою і ходовим гвинтом, лінійними підшипниками, напрямними та з'єднаннями конструкції. Люфт призводить до втрати позиційної точності,

									Арк.
									50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ				

особливо при зміні напрямку руху, що впливає на якість шару та точність розмірів деталей. Максимально потенційною похибкою позиціонування є сумарний люфт, який розраховується за наступною формулою:

$$L_{\Sigma} = L_g + L_n + L_k, \quad (3.9)$$

де: L_g – люфт у гайці (осьовий), мм;

L_n – люфт у напрямній, мм;

L_k – люфт у каркасі, мм.

У нашому випадку люфт у гвинтовій парі $L_g = 0,05$ мм, у напрямних $L_n = 0,02$ мм, у каркасі люфт відсутній $L_k = 0$.

$$L_{\Sigma} = 0,05 + 0,02 + 0 = 0,07 \text{ мм.}$$

Розрахований люфт заважав би на практиці за умови швидкого переміщення та зміни напрямку руху конструкції. У даному випадку рама столу постійно притискається гравітацією, під час друку гвинтові пари поступово і повільно опускають платформу у низ постійно переходивши на новий шар друкованої моделі, отже у конструкції майже немає люфту, бо вона працює на низьких швидкостях і в одному напрямку.

3.4. Розрахунок режиму роботи крокового двигуна

Для покращення точності друку кроковий двигун NEMA17 з кроком $1,8^\circ$ замінено на два крокових двигуна NEMA17 з кроком $0,9^\circ$. Щоб розрахувати кількість кроків за один оберт двигуна потрібно розділити 360° на крок. Виконаємо розрахунки за формулою:

$$N_{steps} = 360^\circ / \theta, \quad (3.10)$$

де: θ – кут повороту за один крок (у градусах).

$$N_{steps1} = 360^\circ / 1,8^\circ = 200 \text{ кроків;}$$

$$N_{steps2} = 360^\circ / 0,9^\circ = 400 \text{ кроків.}$$

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це означає, що двигун з кроком $0,9^\circ$ точніший у два рази за $1,8^\circ$. Також можна підвищити точність обертання крокового двигуна за допомогою дроблення кроку (мікрокрок) ця технологія дозволяє ділити повний крок крокового двигуна на менші частини для досягнення більш плавного та точного руху. Детальний принцип роботи показаний на (рис. 3.3.). Мікрокрокування плавно змінює струм у обмотках, створюючи проміжні позиції ротора між повними кроками. Найбільше число розбивання кроку 256, з 200 стандартних кроків утворюється 51200 кроків. Перевагами мікрокрокування є суттєве зменшення вібрацій, плавний і точний рух, менше механічного шуму. До недоліків відноситься зменшення ефективного обертального моменту, вища вимогливість до драйвера, процесор контролера має генерувати більше імпульсів – може знизитись швидкість.

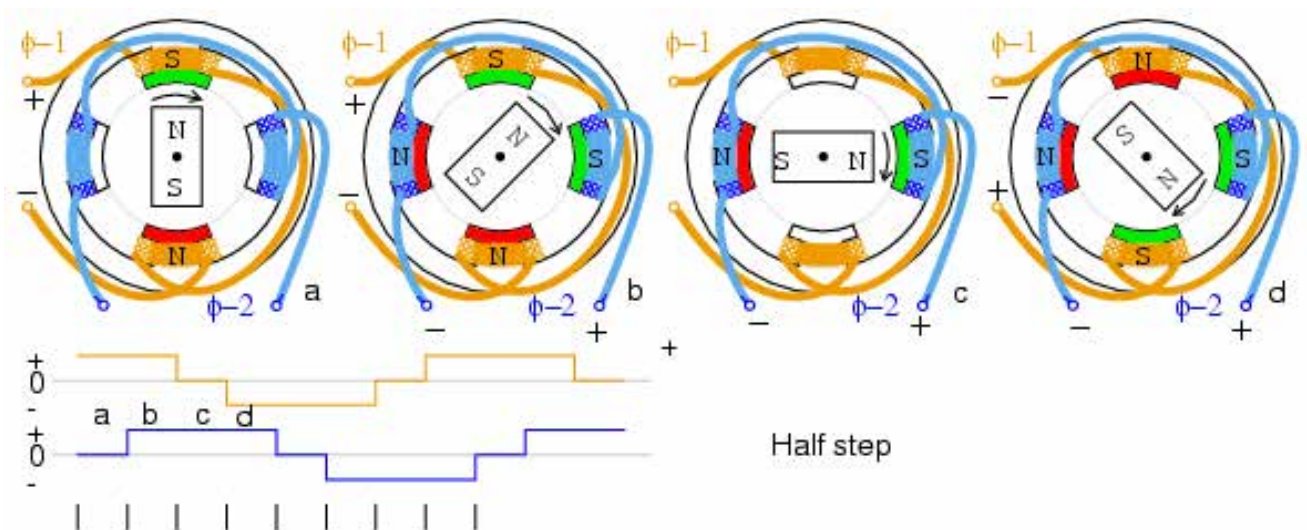


Рис. 3.3. Принцип роботи крокового двигуна [32]

Порахуємо скільки потрібно зробити кроків, щоб перемістити платформу на 1 мм. Використовувався ходовий гвинт TR8x8 чотирьохзаходний, він переміщує ходову гайку на 8 мм за один оберт. Для одного повного оберту двигуна з кроком $0,9^\circ$ потрібно зробити 400 кроків, отже щоб перемістити платформу на 1 мм потрібно розділити кількість кроків на відстань яку проходить гайка за один оберт, розрахуємо за формулою:

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

$$S_{mm} = N_s/L, \quad (3.11)$$

де: N_s – кількість кроків на один оберт;

L – хід гвинта, мм/об.

У нашому випадку $N_s = 400$ кроків, $L = 8$ мм.

$$S_{mm} = 400/8 = 50 \text{ кроків/мм.}$$

Розрахуємо кількість кроків на 1 мм з урахуванням мікрокрокування 1/16, це означає що кожен звичайний крок розділяється на 16 $\rightarrow N_m = 16$.

Розрахуємо за наступною формулою:

$$S_{mm1} = N_s \cdot N_m/L, \quad (3.12)$$

де: N_s – кількість кроків на один оберт;

N_m - кількість мікрокроків у кроці;

L – хід гвинта, мм/об.

$$S_{mm1} = 400 \cdot 16/8 = 800 \text{ мікрокроків/мм.}$$

Таким способом досягається краща точність переміщення, яку розрахуємо за формулою наведеною нижче:

$$\delta' = 1/S_{mm1}, \quad (3.13)$$

$$\delta' = \frac{1}{800} = 0,00125 \text{ мм/крок}$$

За допомогою цих визначаються основні характеристики привода яким керує кроковий двигун. Всі розраховані значення доводять, що переобладнання дійсно вирішило проблему із зайвою вібрацією та підняло точність переміщення нагрівальної платформи, що у свою чергу покращило якість та стабільність друку.

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

4.1. Розрахунок витрат на працю

Станом на 2024 рік середня заробітна плата інженера-конструктора, який пов'язаний з 3D-принтером та спеціалізується на розробці та друку деталей на виробництві, сягає 35000 грн на місяць, згідно сервісу www.work.ua.

Спочатку, необхідно визначити кількість годин, витрачених на проект. Це може бути як реальний час так і базова оцінка, залежить від конкретної ситуації. У даному випадку на проект витрачено 37 годин, а саме:

- розрахунок конструкції, створення ескізів та проектування деталей для друку 18 годин;
- виготовлення деталей на 3D-принтері 7 годин;
- розбирання старої та збирання нової конструкції 10 годин;
- налаштування компонентів системи 2 години.

Далі нам необхідно визначити ставку оплати праці за годину. У нашому випадку, заробітна плата становить 35000 грн на місяць. Розрахуємо оплату праці за годину, за наступною формулою:

$$T_{\Gamma} = \frac{T_{\text{м}}}{(Q_{\text{м}} \cdot Q_{\Gamma})}, \quad (4.1)$$

де: $T_{\text{м}}$ -Заробітня плата за місяць;

$Q_{\text{м}}$ -Кількість робочих днів на місяць;

Q_{Γ} -Кількість годин на робочий день.

Припустимо, що в місяці є 22 робочих дні, а робочий день складає 8 годин, тоді:

$$T_{\Gamma} = \frac{35000}{(22 \cdot 8)} \approx 200 \text{ грн/год}$$

Далі проводимо розрахунок витрат на працю. Після визначення кількості

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Данилов А.В.			Розділ 4	Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевір.		Крушельницький В.В.					54	63
Н. Контр.					НУБіП України			
Затверд.								

годин та оплати праці за годину, ми можемо розрахувати витрати на працю. Використовуємо наступну формулу:

$$T_p = Q_s \cdot T_r, \quad (4.2)$$

де: T_p - витрати на працю;

Q_s - кількість годин;

T_r - оплата праці за годину.

На розрахунок та проектування деталей було витрачено 18 годин:

$$T_{p1} = 18 \cdot 200 \approx 3600 \text{ грн}$$

На розбирання старої та збирання нової конструкції 3D принтера було витрачено 10 годин:

$$T_{p2} = 10 \cdot 200 \approx 2000 \text{ грн}$$

На налаштування компонентів системи було витрачено 2 години:

$$T_{p3} = 2 \cdot 200 \approx 400 \text{ грн}$$

Порахуємо загальні витрати на працю за формулою:

$$T_{\text{заг}} = T_{p1} + T_{p2} + T_{p3}, \quad (4.3)$$

$$T_{\text{заг}} = 3600 + 2000 + 400 = 6000 \text{ грн.}$$

Отже, витрати на працю становлять 6000 грн. Цей розрахунок дозволяє визначити загальні витрати на працю для проєкту з урахуванням кількості годин та оплати праці за годину.

Для модернізації 3D-принтера потрібно затратити 37 людино-годин.

4.2. Розрахунок витрат на 3D-друк

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Всі унікальні деталі були розроблені та надруковані на 3D-принтері.
Сумарний час друку всіх деталей 7 годин. Середнє споживання електроенергії
3D принтера становить 0,2 кВт.

Використану електроенергію розраховуємо за наступною формулою:

$$Q = P \cdot t, \quad (4.4)$$

де: P – Споживання принтера, кВт;

t - Кількість годин роботи принтера, год.

Тобто, якщо принтер працює 7 годин, то

$$Q = 0,2 \cdot 7 = 1,4 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Кошти затрачені на використану електроенергію розраховуємо за
наступною формулою:

$$B = Q \cdot T, \quad (4.5)$$

де: Q – Спожита електроенергія, кВт•год;

T – тариф на електроенергію, грн/кВт•год.

Тобто, якщо принтер працює 7 годин, то

$$B = 1,4 \cdot 10 = 14 \text{ грн.}$$

Розрахуємо затрачені кошти на пластик з якого виготовлено всі
розроблені деталі, загальна маса деталей 180 грамів. Котушка пластику PETG
500 грамів коштує 460 грн. Інформація взята із сайту українського виробника
monofilament.com.ua. Розрахуємо вартість затраченого пластику на проект за
формулою:

$$B_{\text{п}} = \frac{m \cdot B_{\text{к}}}{m_{\text{к}}}, \quad (4.6)$$

де: m – маса використаного пластику, г;

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

m_k – маса нової котушки з пластиком, г;

B_k – вартість нової котушки з пластиком, грн.

У нашому випадку $m = 180$ грамів, $m_k = 500$ грамів, $B_k = 460$ грн.

$$B_{\pi} = \frac{180 \cdot 460}{500} = 165,6 \text{ грн.}$$

4.3 Розрахунок вартості вдосконалення

Порахуємо кошти витрачені на закупку необхідних запчастин для модернізації. В таблиці 4.1 наведено перелік запчастин з їхньою вартістю.

Таблиця 4.1

Перелік компонентів необхідних для вдосконалення 3D принтера

Назва	Кількість, шт.	Вартість, грн.	Загальна Вартість, грн.
Ходовий гвинт THSL-300-8D з гайкою	1	135	135
Підшипник 608	2	26	52
Кроковий двигун 17HS4401S	2	365	730
Пружна муфта 5x8 мм	1	50	50
Лінійний підшипник LM8LUU	4	18	72
Ліна напрямна SFC8 500мм	2	98	196
Верстатний профіль 2020 T 350мм	2	85	170
T-гайка закладна 2020 M5	17	9	153
Болт з напівкруглою шляпкою M5x8мм	17	2	34
Болт M3x10мм	8	1	8
Болт M3x25мм	16	1.5	24
Гайка M3	20	1	20

Загальна вартість компонентів для вдосконалення становить $B_k = 1644$ грн.

Порахуємо загальну вартість переобладнання за формулою:

$$B_{\text{заг}} = T_{\text{заг}} + B + B_{\pi} + B_k, \quad (4.7)$$

$$B_{\text{заг}} = 6000 + 14 + 165,6 + 1644 \approx 7824 \text{ грн.}$$

Всього на проєкт витрачено 7824 грн

									Арк.
									57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ				

З таким вдосконаленням 3D-принтер може друкувати деталі у два рази швидше при цьому ще покращилась якість друку у 1.5 рази. Отже цей проєкт вартий витраченого часу і коштів.

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Техніка безпеки під час роботи з 3D-принтером

Під час роботи з 3D-принтером обов'язково потрібно дотримуватись правил техніки безпеки. Особи, які не досягли 18 років та не вивчили інструкцію роботи на 3D-принтері, до самостійної роботи не допускаються тільки під наглядом спеціалізованого керівника. Інструкція з охорони праці для 3D-принтерів містить обов'язкові вимоги безпеки під час експлуатації пристроїв у навчальних лабораторних і виробничих умовах. Вона служить для забезпечення безпечного процесу друку, запобігання нещасним випадкам і мінімізації небезпеки на робочому місці. До роботи з 3D-принтером допускаються особи, які пройшли відповідне навчання, первинний інструктаж з охорони праці, перевірку знань та медичний огляд.

Основними небезпечними та шкідливими факторами під час роботи на 3D-принтері є:

- випаровування пластику;
- гарячі поверхні;
- шум.

Знак зображений на (рис. 5.1.) попереджає про небезпеку обпекти руку чи щось інше, він клеїться на, або поряд з об'єктами, які нагріваються, у нашому випадку це нагрівальна платформа і гарячий кінець.



Рис. 5.1. Попереджувальний знак «Гаряча поверхня» [35]

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Данілов А.В.</i>			Розділ 5	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушіє</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Крушельницький В.В.</i>					59	63
						НУБіП України		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>								

Робота повинна проводитися в спеціально підготовленому приміщенні, обладнаному ефективною природною або механічною вентиляцією, з відповідним мікрокліматом і з дотриманням норм освітлення. Забороняється наявність відкритого вогню, легкозаймистих матеріалів і води в безпосередній близькості від робочої зони. Прутки для друку (пластик) повинні зберігатися в сухому, темному місці, захищеному від прямих сонячних променів шторами, жалюзі або спеціальними захисними плівками.

5.2. Вимоги безпеки перед початком роботи з 3D-принтером

Перед початком роботи переконайтеся, що 3D-принтер стоїть на рівній стійкій поверхні, перевірте цілісність кабелів живлення, заземлення, кріпильних елементів, захисних кришок та елементів керування. У разі виявлення несправності до роботи не приступати, повідомити про це керівника і тільки після усунення несправностей та дозволу керівника можна починати роботу. Необхідна належна вентиляція, вогнегасники, аптечка та вільні шляхи евакуації. Робоче місце повинно бути охайним і вільним від сторонніх предметів. Оператор повинен носити одяг (рис. 5.2.), що щільно облягає фігуру, без звисаючих предметів і прикрас, волосся повинне бути зав'язане.



Рис. 5.2. Спецодяг [36]

						01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			60

5.3. Вимоги під час роботи з 3D-принтером та після її закінчення

Не залишайте пристрій без нагляду під час роботи, не втручайтеся фізично в процес друку, не пересувайте принтер і не знімайте захисні пристрої.

Також не

кладіть сторонні предмети на принтер або в нього, не їжте і не пийте поблизу з працюючим принтером. Ніколи не намагайтеся самостійно розбирати, ремонтувати або змінювати конфігурацію принтера. Усі роботи з технічного обслуговування та ремонту повинні виконуватися кваліфікованим спеціалістом. Тривалість роботи оператора з 3D-принтером не повинна перевищувати 6 годин на зміну, при цьому необхідно дотримуватися встановлених законодавством перерв.

Після завершення роботи вимкніть принтер у встановленому порядку: спочатку вимкніть мережевий вимикач, а потім витягніть штепсельну вилку з розетки. Після того, як нагрівальні елементи повністю охолонуть, зніміть надруковану модель, очистіть робочу поверхню, очистіть і впорядкуйте інструменти, видаліть бруд і провітріть приміщення.

У разі виникнення аварійної ситуації негайно припиніть роботу, відключіть принтер від електромережі та повідомте про це свого керівника. У разі пожежі вимкніть пристрій, вийдіть з приміщення, викличте національну службу порятунку, якщо можливо, приступайте до гасіння пожежі за допомогою первинних засобів пожежогасіння. У разі ураження електричним струмом: відключіть потерпілого від джерела живлення, огляньте його, надайте першу допомогу та викличте швидку допомогу. У разі травмування працівника або студента надати допомогу, повідомити керівництво та відділ охорони праці і забезпечити збереження ситуації до прибуття комісії, якщо це не загрожує життю оточуючих.

Інструкція є обов'язковою для всіх осіб, які працюють або перебувають у приміщенні з 3D-принтером. Контроль за дотриманням вимог здійснюється керівниками підрозділів, службою охорони праці та керівництвом підприємства, компанії або закладу.

									Арк.
									61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ				

ВИСНОВОК

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було проведено аналіз літератури, зокрема аналіз сфер застосування 3D-принтера. Обґрунтовано та запропоновано вдосконалення кінематики вертикальної вісь, що збільшило жорсткість конструкції 3D принтера.

Запропоноване конструкторське рішення для вдосконалення 3D-принтера, також розраховані механізми 3D-принтера та економічна ефективність.

Отже, дане вдосконалення конструкції 3D-принтера забезпечує збільшення якості друку та економічно доцільне, так, як з'явилася можливість збільшити швидкість друку. Таке рішення може бути використано і в інших моделях 3D принтерів.

Подальший розвиток даної теми може включати дослідження інших аспектів конструкції кінематики вертикальної вісь, таких як механічна синхронізація ходових гвинтів для стабільнішої роботи привода у 3D-принтері та уникнення перекосів під при калібруванні нагрівальної платформи принтера.

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Данілов А.В.			Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевір.		Крушельницький В.В.				62	63
Н. Контр.					Висновок		
Затверд.							
					НУБіП України		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Коротка історія виникнення 3D-друку. 3dprinter. URL: <https://www.3dprinter.ua/korotka-istoriya-vynykennya-3d-druku/>.
2. Коробка для снастей зберігає спогади про перший досвід виробництва добавок. The fabricator. URL: <https://www.thefabricator.com/additive-report/blog/additive/tackle-box-holds-memories-of-first-additive-manufacturing-experience>.
3. Сфери застосування тривимірного друку. Klona. URL: <https://klona.ua/uk/blog/3d-printing-and-prototyping-uk/shho-mozhna-nadrukuvaty-na-3d-prynteri-sfe>.
4. Як влаштований 3D-принтер: основні деталі та принцип роботи. Easy3dprint.com.ua. URL: <https://easy3dprint.com.ua/uk/yak-vlashtovaniy-3d-printer/>
5. Настільний 3D-принтер Anet A8 Plus Semi DIY FDM. Amazon. URL: <https://www.amazon.ca/ANET-Printer-Ultimate-Anet-Desktop/dp/B0922K1FJD>.
6. Corexy. URL: <https://corexy.com/theory.html>.
7. Як створити машину для малювання Arduino?. Arnabkumardas. URL: <https://www.arnabkumardas.com/topics/cnc/how-to-make-an-arduino-drawing-machine/>.
8. Corexz. URL: <https://www.corexz.com/theory.html>.
9. 3D принтер Creality CR-30: The 3DPrintMill, фото 7. Indikator. URL: https://indikator.com.ua/ua/p1707824346-printer-creality-the.html?srsId=AfmBOorgvck0NRjY6FUPjdVDn0Ck3koo1klm1eDMpDF5ismhOMl_Rm_q.
10. Як вибрати робочу пластину для 3D принтера. Artline. URL: <https://artline.ua/uk/blogs/kak-vybrat-rabochuyu-plastinu-dlya-3d-printera>.
11. Екструдер E3D V6 Пряма подача. 3dreams. URL: <https://surl.li/jzghqx>.
12. У чому перевага екструдера з прямим приводом?. Kingroon. URL: <https://surl.li/amnyrl>.

<i>01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ</i>				
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Данілов А.В.</i>		
<i>Перевір.</i>		<i>Крушельницький В.В.</i>		
<i>Н. Контр.</i>				
<i>Затверд.</i>				
Список використаних джерел				
			<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>
				<i>Акрушів</i>
				63
			<i>НУБіП України</i>	

13. Рейкова направляюча MGN7 100 мм з кареткою MGN7H / MGN7C. Ardushop.in.ua. URL: <https://ardushop.in.ua/cnc-3d/rail-guide-mgn7-100-mm-with-carriage-mgn7h-mgn7c>.

14. Комплект лінійних напрямних VEVOR, SFC20 1200 мм, 2 шт. 39,4 дюйма/1000 мм. Sigma-market. URL: <https://sigma-market.com.ua/ua/p242271912-3-komplekt-linijnih-napryamnih.html>.

15. Опорна напрямна SBR20*2500L. Voron. URL: <https://voron.ua/catalog/040490--opornaya-napravlyayushchaya-sbr20-2500l?lang=uk>.

16. Кроковий двигун NEMA 17 17HS4401. Mini-tech. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/17hs4401-nema17-shagoviy-motor>.

17. Ходовий гвинт T8, трапецієподібний стрижень, 3D-принтер з ЧПУ, 1/2/4/8/10/12/14 мм, довжина 100 мм, 200 мм, 250 мм, 300 мм, 350 мм, 400 мм з мідними гайками. Vamplaza. URL: <https://vamplaza.com.ua/magazine/obladnannya/khodoviy-gvint-t8-trapetsiepodibniy-strizhen-3d-printer-17347447.html>.

18. Arc HTD 3M Зубчастий ремінь C=186 189 192 195 198 201 204 207 210 213 ширина 6/9/10/12/15/20 мм Rubbe замкнутий контур Синхронний крок. Familystore. URL: <https://familystore.com.ua/shop/aparatne-zabezpechennya/arc-htd-3m-zubchastiy-rem-in-c-186-189-192-195-341ab-p66272267/>.

19. Контролер 3D принтера Makerbase MKS Monster 8 V2.0. Mehanika. URL: <https://mehanika.net.ua/product/kontroler-makerbase-mks-monster-8-plata-keruvannya-dlya-3d-printera/>.

20. Материнська плата ZNP K1 v1.1 для 3Д-принтера Elegoo Neptune 4/4 Pro. Ua3d. URL: <https://ua3d.pro/ua/p2334393755-materinskaya-plata-znp.html>.

21. Драйвер крокового двигуна A4988 Arduino. Arduinokit. URL: <https://arduinokit.com.ua/ua/p1281840357-drajver-shagovogo-dvigatelya.html>.

22. Контроллер крокового двигуна TMC5160. Kosmodrom. URL: <http://www.kosmodrom.com.ua/el.php?name=TMC5160>.

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

23. Блок живлення 24V 30A METAL АТАВА. T2-dnepr. URL: <https://t2-dnepr.com.ua/ua/p1768256988-blok-pitaniya-24v.html>.
24. Панель управління 12864 LCD для RAMPS (3D принтер / ЧПУ). Mini-tech. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/panel-upravleniya-12864-lcd-dlya-ramps-3d-printer>.
25. Рама 3D-принтера CORE XY. ScrewMaker Home Pro-4. Screwmaker. URL: <https://screwmaker.com.ua/rama-3d-pryntera-core-xy-screwmaker-home-pro-4-1>.
26. Сенсорный экран для 3D принтера Ender-5 S1. Artline. URL: <https://artline.ua/product/sensornyy-ekran-dlya-3d-printera-ender-5-s1>.
27. 3D-друк для початківців: початок роботи з 3D-друком. 3d4u.com.ua. URL: <https://3d4u.com.ua/uk/blog/post/88-3d-printing-for-beginners-getting-started-with-3d-printing>.
28. РОЗРАХУНОК СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ ВІДПОВІДНО ДО ЄВРОКОДУ 3 ТА НАЦІОНАЛЬНИХ ДОДАТКІВ УКРАЇНИ. Uscc.ua. URL: <https://uscc.ua/uploads/page/images/publications/eurocodes/eurocode3in1.pdf?utm>.
29. ОПП МАТЕРІАЛІВ. Btpm.nmu. URL: <https://btpm.nmu.org.ua/ua/download/lecture-course/Мильніков.ОМ.Конспект.pdf>.
30. Розрахунок передач гвинт – гайка. Elib.lntu.edu. URL: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/Деталі%20машин%20ЕЛП%202016/page25.html.
31. Як розрахувати кількість кроків за оберт у кроковому двигуні?. Lunyee. URL: <https://www.lunyee.com/news/faq/how-to-calculate-steps-per-revolution-in-stepper-motor.html>.
32. Крокові двигуни. Ukrayinska.libretexs. URL: https://ukrayinska.libretexs.org/Робоча_сила/Технологія_електроніки/Книга%3А_Електричні_ланцюги_II_-_змінний_струм_%28Курпхалдт%29/13%3А_Двигуни_змінного_струму/13.05%3А_Крокові_двигуни.

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

33. Калькулятор кроків на мм - ходовий гвинт та зубчастий ремінь GT2. Circuitist. URL: <https://www.circuitist.com/how-to-calculate-steps-per-mm-lead-screw-and-gt2-timing-belt/>.

34. Валентина К. ІНСТРУКЦІЯ З ОХОРОНИ ПРАЦІ №99 ПРИ РОБОТІ НА 3D ПРИНТЕРІ. КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ, 2025. 7 с.

35. Знак Обережно. Гаряча поверхня Арт. 2.05-ОПЗ. Evgplus. URL: <https://evgplus.com.ua/ua/p660651361-znak-ostorozhno-goryachaya.html>.

36. Комбінезон робочий. Eurosiz. URL: <https://eurosiz.ua/uk/product/kombinezon-rabochij-hlopkovyj-reis-bomull-o-2/>.

					01.09-КР.2265«С»2024.12.16.017 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66