Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

Розробка 3D-принтера за кінематикою Core-XY для серійного виробництва
(тема)

Виконав:
студент 3 (прискоренного) курсу, групи
АКТАКІТу-21-1

Політучий Максим Ігорович
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва освітньої програми)
Керівник ас. Нікітін Д. О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР _____ Невлюдов І. Ш.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2024 р.

Я, Політучий Максим Ігорович як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надав і не одержув недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Дата	ПІБ
_____	Політучий М.І.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет АКТ
Кафедра КІТАР
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програм освітньо-професійна
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)
«__»_____2024р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Політучий Максим Ігорович.
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка 3D-принтера за кінематикою Core-XY для серійного виробництва
Затверджена наказом по університету від 20.05.2024 №477Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 07.06.2024р
3. Вихідні дані до роботи:
3.1 Розміри конструкції – не більше 500×500×600 мм;
3.2 Вага макету – не більше 20 кг;
3.3 Кількість екструдерів – 1 шт;
3.4 Максимальна швидкість друку – не менше 100 мм/с;
3.5 Тип подачі матеріалу - пряма (Bowden)

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
4.1 Вступ;
4.2 Аналіз предметної області;
4.3 Методи виготовлення корпусів;
4.4 Розробка 3D-моделі принтера;
4.5 Охорона праці;
4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал у вигляді презентації формату PowerPoint (*.ppt) – 12 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	08.04.2024-09.05.2024	виконано
2	Збір матеріалів для розробки	09.04.2024-12.04.2024	виконано
3	Розробка розділу «Аналіз предметної області»	12.04.2024-17.04.2024	виконано
4	Розробка розділу «Методів формоутворення корпусів»	19.04.2024-22.04.2024	виконано
5	Розробка розділу «Розробка 3D-моделі»	22.04.2024-27.04.2024	виконано
6	Розробка розділу Охорона праці	07.05.2024-14.05.2024	виконано
7	Оформлення кваліфікаційної роботи	16.05.2024-22.05.2024	виконано

Дата видачі завдання 8 квітня 2024р.

Студент _____ Політучий М.І.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ ас. Нікітін Д. О.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 68 с., 3 табл., 41 рис., 27 джерел.

3D-ПРИНТЕР, FFF/FDM ТЕХНОЛОГІЯ, 3D-ДРУК, СЕРІЙНЕ ВИРОБНИЦТВО, ШТАМПУВАННЯ, ЛАЗЕРНЕ РІЗАННЯ.

Мета роботи – розробка автоматизованого верстату для адитивного 3D-друку на основі штампуванні корпусів.

Об’єкт дослідження – процеси адитивного виробництва об’ємних моделей.

Предмет дослідження – технологія 3D-друку пластиком.

У роботі були проаналізовані області використання 3D-друку. Розглянуті види технологій 3D-друку. Проаналізовані кінематики 3D-принтерів за технологією FFF/FDM, їх переваги та недоліки і технологічні характеристики.

Була розроблена конструкція штампованого 3D-принтера за кінематикою CoreXY для серійного виготовлення за технологією FFF/FDM.

ABSTRACT

Report of the practice: 68 p., 3 tabl., 41 fig., 27 sources.

3D PRINTER, FFF/FDM TECHNOLOGY, 3D PRINTING, MASS PRODUCTION, STAMPING, LASER CUTTING.

The purpose of the work – to development of an automated machine for additive 3D printing based on case stamping.

The object of research – processes of additive manufacturing of three-dimensional models.

The subject of research – is the technology of 3D plastic printing.

The paper analyses the areas of application of 3D printing. The types of 3D printing technologies are considered. The kinematics of 3D printers using FFF/FDM technology, their advantages and disadvantages, and technological characteristics are analysed.

The design of a stamped 3D printer based on CoreXY kinematics for mass production using FFF/FDM technology was developed.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень……..9
Вступ……10
1 Аналіз предметної області……...……....12
1.1 Види 3D друку ……...……..…12
1.2 FDM 3D друк ……...…16
1.3 Кінематики 3D принтерів за технологією FDM …….……..19
1.3.1 Кінематика «Prusa»……..20
1.3.2 Кінематика «H-bot»…….….21
1.3.3 Кінематика «CoreXY»……..23
1.3.4 Кінематика «Makerbot»……..……..24
1.3.5 Кінематика «Ultimaker»……..……26
1.4 Види корпусів для 3D принтерів ……....……..27
1.5 Аналіз технічного завдання ……..……..30
1.6 Висновки до першого розділу ……...……...……..31
2 Методи виготовлення корпусів …….....32
2.1 Штампування ……...32
2.1.1 Холодне штампування……...……..33
2.1.2 Гаряче штампування ……..…….35
2.2 Лазерне різання і гравірування ……..…….....37
2.3 Фрезерне різання і гравірування…….……..……39
2.4 Висновки до другого розділу ……...……..41
3 Розробка 3D-моделі принтера ……...….42
3.1 Загальна 3D-модель принтера ……....42
3.1.1 Розробка вісь X ……..……..43
3.1.2 Розробка вісь Y ……...…….45
3.1.3 Розробка вісь Z ……..……..48
3.1.4 Розробка корпусу 3D принтера ……..51

3.2 Вибір двигунів для моделі та розрахунок передавальної функції……..55
3.3 Висновки до третього розділу …….…….……..56
4 Охорона праці ……...……...58
4.1 Вимоги до охорони праці під час холодного штампування металів ……..58
4.2 Вимоги до робочих місць ……..…..59
Висновки …….....61
Перелік джерел посилання ……..…..63
Додаток А Демонстраційний матеріал ……..…..67

Вибір двигунів для моделі та розрахунок передавальної функції

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CJP – (Color Jet Printing) кольоровий струменевий друк;

EBM – (Electron-beam Melting) електронно-променева плавка;

DLP – (Digital Light Processing) цифрова обробка світла;

DMLS – (Direct Metal Laser Sintering) пряме лазерне спікання металу;

FFF – (Fused Filament Fabrication) виробництво плавленої нитки;

FDM – (Fused Deposition Modeling) моделювання плавленого осадження;

LCD – (Liquid Crystal Display) рідкокристалічний дисплей;

LOM – (Laminated Object Manufacturing) виготовлення об'єктів за допомогою ламінування;

MJM – (Multi Jet Modeling) метод багатострунного моделювання;

SLS – (Sodium Lauryl Sulfate) лаурилсульфат натрію;

SLM – (Selective Laser Melting) селективне лазерне плавлення;

SLA – (Selective Laser Sintering) селективне лазерне спікання;

SHS – (Selective Heat Sintering) вибіркове теплове спікання.

ВСТУП

Розвиток адитивних технологій виробництва все більше стає поширеним в промисловості та повсякденному житі. Одним з най більш універсальним та доступним для споживачів засобом для отримання об’ємних деталей складних форм є 3D-друк. На даний час за допомогою 3D-принтерів можливо виготовлювати деталі з пластика (FDM – друк).

Актуальність FFF/FDM – друку, безумовно, залишається високою в сучасному світі, особливо в контексті розвитку 3D друку та виробничих технологій загалом. FFF/FDM -друк використовується у багатьох галузях, включаючи виробництво прототипів, виробництво кінцевих виробів, освіту, медицину та інше. Він дозволяє швидко та ефективно створювати складні деталі та готові вироби з різних матеріалів

Також слід зазначити що, FFF/FDM-принтери стають все більш доступними для широкої громадськості, що сприяє їхньому поширенню в освітніх закладах, малому бізнесі та серед споживачів. Крім того, зменшення вартості матеріалів та підвищення швидкості друку зробили цю технологію більш привабливою для бізнесу та приватних користувачів. Постійні покращення у виробництві принтерів та програмному забезпеченні дозволяють досягати високої точності та швидкості друку, що робить FFF/FDM -друк привабливим варіантом для виробництва кінцевих виробів.

Отже, розробка надійного да дешевого 3D-принтера за технологією FFF/FDM залишається актуальним та перспективним напрямком у світі виробництва та технологій, і його розвиток продовжуватиметься у майбутньому.

Мета роботи – розробка автоматизованого верстату для адитивного 3D-друку на основі штампуванні корпусів.

Об’єкт розробки – процеси адитивного виробництва об’ємних моделей.

Предмет розробки – технологія 3D-друку пластиком.

Задачі дослідження – проаналізувати технологію FFF/FDM друку та кінематики 3D-принтерів та розробити конструкцію верстата для серійного виробництва.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– провести аналіз видів 3D-друку;

– проаналізувати особливості FFF/FDM технології 3D-друку;

– розглянути кінематики 3D-принтерів для FFF/FDM технології;

– провести аналіз існуючих корпусів для 3D-принтерів;

– розглянути методи формоутворення корпусів;

– розробити конструкцію 3D-принтерів для серійного виробництва.

Пояснювальну записку виконано згідно з [1-2].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Види 3D друку

Адитивні технології або 3D-друк – одна з форм технологій адитивного виробництва, де тривимірний об'єкт створюється шляхом накладання послідовних шарів матеріалу (друку, вирощування) за даними цифрової моделі [3].

Друк здійснюється спеціальним пристроєм, 3D-принтером, який забезпечує створення фізичного об'єкта шляхом послідовного накладання пластичного матеріалу на основі віртуальної 3D-моделі. Цей процес вимагає спеціального обладнання та програмного забезпечення. В залежності від технології 3D друку, ви можете отримати різні типи об'єктів та матеріалів. Технології 3D друку розвиваються швидко і пропонують різні способи створення тривимірних об'єктів (рис 1.1).

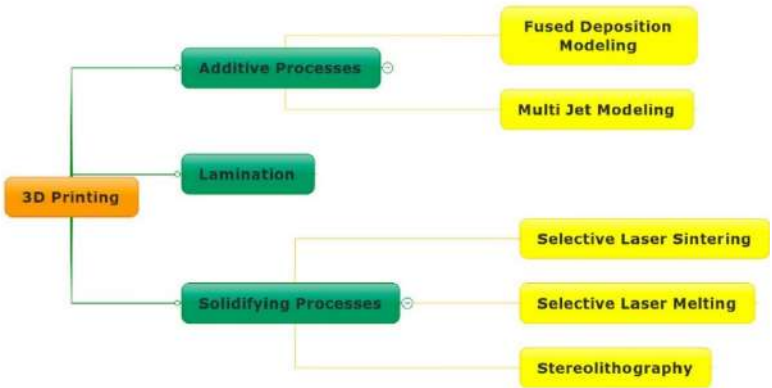


Рисунок 1.1 – Технології 3D друку

Ось декілька основних технологій 3D друку (рис 1.2):

– моделювання методом наплавлення (Fused Deposition Modeling, FDM). В цій технології пластиковий філамент плавиться і наноситься шар за шаром для створення об'єкта. Принтери, які використовують FDM, досить доступні і

широко використовуються в дому та на робочому місці;

– стереолітографія (Laser Stereolithography, SLA). У цьому методі об'єкти створюються шляхом висвітлення рідинного смолосполуканого світлом. Вони використовуються в основному для виробництва високодеталізованих моделей і прототипів [4];

– селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering, SLS). SLS використовує лазер для злиття порошкового матеріалу шар за шаром, що дозволяє створювати деталі з різних матеріалів, таких як пластик, метал або кераміка;

– електронно-променева плавка (Electron-beam Melting, EBM). Ця технологія використовує побудову з використанням потоку електронів для плавлення порошкового металу та створення металевих деталей [5];

– цифрова світлодіодна проекція (Digital Light Processing, DLP). Ця технологія схожа на SLA, але використовує цифрове відображення для висвітлення смоли і створення об'єктів швидше [4];

– селективне лазерне плавлення (Selective Laser Melting, SLM). Це одна з передових технологій адитивного виробництва (3D друку), яка використовується для створення металевих деталей та компонентів. Ця технологія схожа на іншу відому технологію адитивного виробництва - селективне лазерне спікання (SLS), але в SLM використовуються вищі температури для повного плавлення металевого порошку [6];

– пряме лазерне спікання металу (Direct Metal Laser Sintering, DMLS). Це технологія адитивного виробництва (3D друку), яка використовується для створення металевих деталей шляхом спікання металевого порошку. DMLS подібне до інших методів селективного лазерного спікання (SLS), але використовується в основному для металевих матеріалів [7];

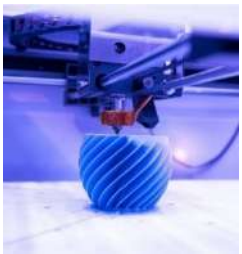
– вибіркове теплове спікання (Selective Heat Sintering, SHS). Це одна з технологій адитивного виробництва, яка використовує тепло для створення тривимірних об'єктів. SHS схоже на іншу відому технологію - селективне лазерне спікання (SLS), але використовує тепло, а не лазери, для спікання

матеріалу;

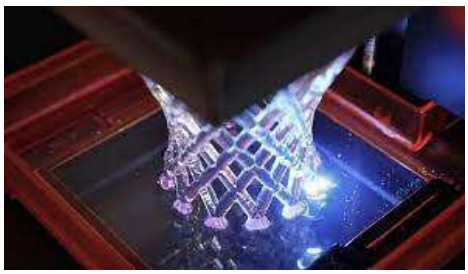
– виготовлення об'єктів за допомогою ламінування (Laminated Object Manufacturing, LOM). Це одна з технологій адитивного виробництва, яка відрізняється від інших методів, оскільки використовує папір чи інший матеріал, який ламінується та обрізається для створення тривимірних об'єктів;

– метод багатострунного моделювання (Multi Jet Modeling, MJM). Це технологія адитивного виробництва, яка використовується для створення тривимірних об'єктів шляхом нанесення багатьох струменів рідинного матеріалу на поверхню. MJM вирізняється своєю здатністю використовувати багато матеріалів одночасно, що дозволяє створювати деталі з різних матеріалів або змішувати їх для досягнення специфічних характеристик [8];

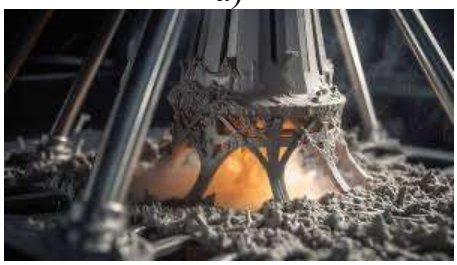
– кольоровий струменевий друк (Color Jet Printing, CJP). Це технологія адитивного виробництва, яка використовує струмені для нанесення кольорового біндера (ліпильного матеріалу) на підложу з порошку для створення повно кольорових тривимірних об'єктів. Технологія CJP відрізняється від інших методів 3D друку своєю спроможністю створювати об'єкти в повних кольорах без подальшого фарбування або обробки [9].



а)



б)



в)

г)

а – FDM друк; б – фотополімерний друк; в – друк порошковим матеріалами; г – друк керамікою.

Рисунок 1.2 – Приклади різновидів 3D-друку

Кожна з цих технологій має свої переваги та недоліки і підходить для різних застосувань. Розробники та виробники продовжують вдосконалювати технології 3D друку, розширюючи можливості і матеріали, які можна використовувати для створення різних видів об'єктів.

3D друк використовується в різних галузях, таких як прототипування, виробництво, медицина, архітектура, інженерія, мистецтво та інші (рис 1.3). Він дозволяє створювати складні та індивідуальні деталі та об'єкти, що раніше було б важко або навіть неможливо виготовити іншими способами. Технологія 3D друку знаходить застосування в різних галузях, наприклад як [10]:

1. Прототипування. 3D друк дозволяє швидко та вигідно створювати прототипи продуктів та деталей для тестування та вдосконалення.

2. Виробництво деталей і компонентів. Важлива галузь виробництва, де використовується 3D друк для створення складних індивідуальних деталей, включаючи виробництво авіаційних, медичних та автомобільних компонентів.

3. Медицина. 3D друк використовується для створення індивідуальних протезів, зубних імплантатів, моделей органів для планування операцій та багато іншого.

4. Архітектура та будівництво. 3D друк дозволяє створювати моделі будівель, прототипи, а також навіть великі будівлі та структури.

5. Авіація і космічна індустрія. Використовується для створення легких та міцних компонентів для літаків та космічних апаратів.

6. Мистецтво і дизайн: 3D друк дозволяє художникам і дизайнерам створювати унікальні скульптури, прикраси та інші творіння.

7. Освіта. Використовується в навчальних закладах для навчання студентів процесам дизайну та інженерії.

8. Спорт. Виробництво індивідуального спортивного обладнання, включаючи кросівки та велосипеди.

9. Харчова індустрія. 3D друк використовується для створення оригінальних десертів і страв.

За допомогою 3D друку можна створити об'єкти різної складності та з різних матеріалів, що розширює можливості великої кількості галузей індустрії та підвищує творчий потенціал дизайнерів і інженерів.

а) б) в)

г) д) е)

ж) з) і)

а – порипування; б – ювелірне виробництво; в – стоматологія;

г – виробництво деталей; д – медицина; е – архітектура;

ж – будівництво; з – спорт; і – військове виробництво.

Рисунок 1.3 – Приклади використання 3D-друку

1.2 FDM 3D друк

FDM – це технологія адитивного виробництва, яка використовується для створення тривимірних об'єктів, шар за шаром, з використанням пластикового матеріалу. Ця технологія дозволяє створювати об'єкти з 3D моделі, які можуть бути відтворені у фізичній формі (рис 1.4) [11].

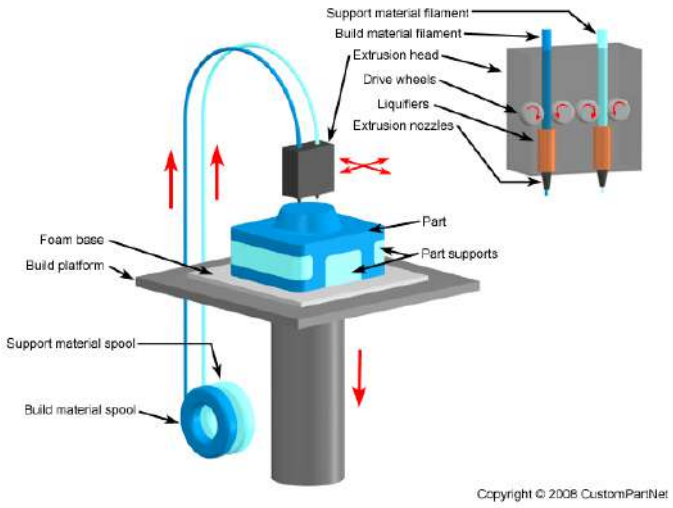


Рисунок 1.4 – Схема роботи 3D принтерів за технологією FDM

Нижче наведені основні принципи та етапи FDM 3D друку:

1. 3D Модель. Початковим кроком є створення або завантаження 3D моделі об'єкта, який ви хочете надрукувати. Ця модель генерується за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для 3D моделювання.

2. Роздруковування. Після створення 3D моделі, програмне забезпечення, що керує 3D принтером, роздруковує об'єкт шар за шаром. Принтер використовує пластиковий філат для нанесення різних шарів на будівельну платформу.

3. Нагрівання та відділення шарів. Філат нагрівається внутрішнім друкарським головкам, і рідкий пластик наноситься на платформу відповідно до 3D моделі. Після нанесення кожного шару пластик охолоджується і твердне, з'єднуючись з попереднім шаром.

4. Підтримка структури. Деякі складні об'єкти можуть вимагати додаткових структур для підтримки висячих або горизонтальних елементів. Ці структури зазвичай роздруковуються з тимчасового матеріалу, який потім видаляється після завершення друку.

5. Фінішна обробка. Після завершення друку може знадобитися додаткова обробка об'єкта, така як обрізка зайвого матеріалу або обробка поверхні для покращення вигляду та якості друку.

FDM 3D друк широко використовується в різних галузях, включаючи прототипування, виробництво кінцевих деталей, навчання та дослідження. Оскільки ця технологія доступна для дому і наукових лабораторій, вона здійснює революцію в творчості та інженерній розробці, дозволяючи створювати складні та індивідуалізовані об'єкти з використанням 3D друку. FDM 3D друк має свої переваги і недоліки, які варто враховувати при виборі цієї технології для конкретних завдань і застосувань. Ось деякі з них:

До переваг FDM 3D друку можна віднести:

– вартість і доступність. Принтери FDM вважаються одними з найбільш доступних і економічних пристроїв для 3D друку. Вони підходять для дому, навчання та малих бізнесів;

– простота використання. Принтери FDM досить прості у використанні, і їх можна швидко налаштувати для початку друку;

– матеріали. Ця технологія працює з широким спектром матеріалів, включаючи різні види пластику, гуми, і навіть метал;

– висока швидкість друку. Принтери FDM зазвичай пропонують високу швидкість друку, що робить їх ефективними для створення великих об'єктів;

– можливість змішування матеріалів. Деякі принтери FDM дозволяють змішувати різні матеріали в одному друку для отримання унікальних властивостей і кольорів;

– просте обслуговування. Більшість FDM принтерів досить надійні та відносно легко обслуговуються.

До недоліків FDM 3D друку можна віднести:

– обмеженість роздільної здатності. FDM не завжди здатен надрукувати деталі з дуже високою роздільною здатністю, порівняно з іншими технологіями;

– видимі шари. Друкування шарами може призводити до видимих лінійних шарів на об'єктах, що вимагають подальшої обробки або фарбування;

– обмежена якість поверхні: Поверхні виробів, надрукованих за допомогою FDM, можуть бути грубими, і для досягнення більшої гладкості

потрібна додаткова обробка;

– підтримка. Деякі складні об'єкти можуть вимагати використання підтримки, яку потрібно буде видаляти після друку;

– можлива деформація. Пластиковий матеріал, який використовується в FDM, може деформуватися або згинатися під впливом тепла або механічного впливу;

– вимоги до температури та вологості. Деякі матеріали, які використовуються в FDM, можуть бути чутливими до температури і вологості, що вимагає спеціальних умов зберігання.

Загалом, FDM 3D друк є важливою технологією для багатьох застосувань, але варто розглядати як його переваги, так і недоліки, при виборі для конкретних завдань.

1.3 Кінематики 3D принтерів за технологією FDM

Незважаючи на те, що всі принтери FDM працюють за одним принципом - пошарове наплавлення, конструктивні відмінності між окремими їхніми видами досить істотні. Це пристрої для створення тривимірних об'єктів, як зрозуміло з назви, шляхом пошарового нанесення на робочу поверхню розплавленого термопластика.

Зрозуміло, у методу є і недоліки, а саме:

– необхідність налаштовувати параметри друку під кожен вид пластику і навіть на пластики одного типу різних виробників і партій;

– точність і роздільна здатність по осях XY обмежена діаметром сопла;

– за віссю Z утворюються лінії шарів, видимі і відчутні навіть за мінімального кроку;

– нависаючі частини деталі потребують підтримки, що призводить до ускладнення друку, перевитрати матеріалу, зниження якості поверхні;

– структура деталі виходить неоднорідною за міцністю, впоперек шарів максимальне витримуванні навантаження нижче, ніж уздовж;

– деталі з пластиків, що мають навіть невелику термоусадку, викривляються під час друку через нерівномірний нагрів і охолодження, відриваються від столу і спотворюють геометричні розміри;

– обмеження за фізичними властивостями матеріалів друку.

Однак недоліки перекриваються перевагами даного методу:

– висока швидкість і низька вартість прототипування;

– відносно проста і недорога конструкція принтерів, доступна ціна;

– великий вибір і невисока вартість витратних матеріалів;

– прийнятна швидкість друку, порівняно з іншими технологіями;

– точність розмірів близько десятої міліметра і вище, чого достатньо для переважної кількості виробів;

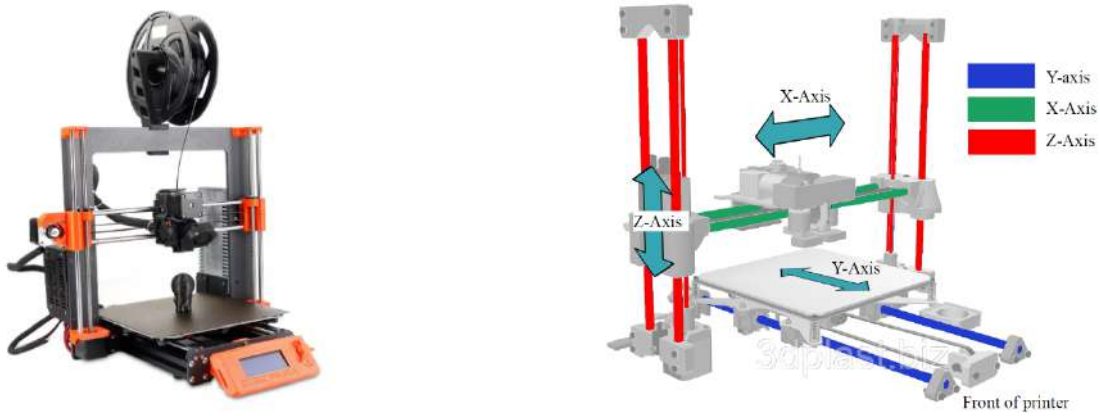
– міцність, при деяких матеріалах і правильно підібраних параметрах друку, наближається до міцності литих виробів.

Базових частин у будь-якого FDM-принтера всього дві: стіл (він же платформа), на якому кріпиться деталь, що друкується, і екструдер – вузол, з якого подається розм'якшений матеріал. Загалом, як відомо, у тривимірного об'єкта три осі - X, Y і Z, де Z – традиційно вертикальна. Те, як два елементи принтера ділять ці три напрямки, і є принципом роботи кожного з видів.

Кожен 3D-принтер має власну кінематичну схему, згідно з якою приводяться в рух механічні частини пристрою: платформи та екструдери. Розглянемо, у чому між ними різниця, а також їхні сильні та слабкі сторони.

1.3.1 Кінематика «Prusa»

«Prusa» – найпростіша, компактна недорога схема. Названа на честь свого винахідника, мабуть, різновид принтерів, який найбільше продається в побутовому секторі. Стіл рухомий в одній горизонтальній осі, як правило, Y, а екструдер рухається по інших двох. За кожен напрямок відповідає свій двигун, на деяких моделях за вісь Z абсолютно одночасно працюють два (рис 1.5) [12].



а) б)

а – зразок принтера кінематики «Prusa»; б – схема кінематики «Prusa».

Рисунок 1.5 – 3D принтер кінематики «Prusa»

До переваг даної кінематики можливо віднести, наступні параметри:

– проста конструкція, яку цілком можна зібрати самостійно;

– невисока ціна комплектуючих і самого принтера;

– за процесом друку зручно спостерігати;

– легкий доступ до деталей, яким може знадобитися обслуговування.

До недоліків даної кінематики можливо віднести:

– відкрита робоча камера. Це погіршує якість друку матеріалами, які чутливі до перепадів температур, а може і зовсім зробити його неможливим. Можна зробити камеру закритою, зібравши кубічний ковпак, наприклад, з акрилу, але це може сильно збільшити загальні габарити корпусу принтера;

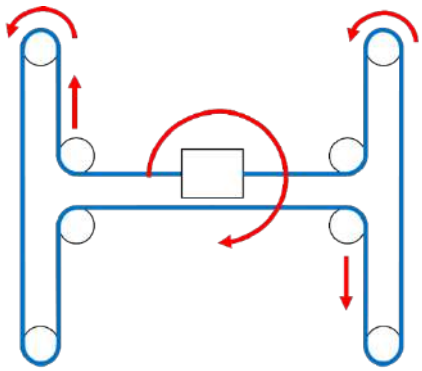
– інертність, пов'язана з нагрівальним столом 3D принтера. Стіл переміщається по осі Y з чималою швидкістю, а разом з ним під час друку переміщається і сама модель. У підсумку, під час друку високих і тонких моделей на великих швидкостях сильно погіршується якість результату друку. Для того щоб отримати швидкий якісний результат для моделей з такою геометрією, доводиться ґрунтовно підходити до налаштувань слайсингу.

1.3.2 Кінематика «H-bot»

«H-bot» – це тип конфігурації кінематики для 3D-принтерів, який використовує два незалежних рухомих елементи (мотори), розташованих по

обидва боки робочої області.

Конструкція передбачає всього один довгий ремінь і не вимагає наявності рухомих моторів. За кінематики «H-bot» краще використовувати армований ремінь – жодних проблем із натягувачами. Стіл рухається виключно вгору-вниз, по осі Z (рис 1.6). Каретка з екструдером переміщається над столом по осях X і Y за допомогою одного ременя і двох двигунів, що працюють узгоджено [13].



а) б)

а – зразок принтера кінематики «H-bot»; б – схема кінематики «H-bot».

Рисунок 1.6 – 3D принтер кінематики «H-bot»

До переваг «H-bot» кінематики, можливо віднести:

– велика область робочого простору: «H-bot» дозволяє отримати значну робочу область без значного збільшення ваги або габаритів принтера;

– висока швидкість переміщення: Завдяки використанню двох незалежних моторів, «H-bot» може досягати високої швидкості переміщення;

– простота конструкції: Ця конфігурація є відносно простою, що полегшує будівництво та обслуговування 3D-принтера;

– відсутність необхідності в рейках: «H-bot» використовує лише два бруски для руху, що може вивести з експлуатації нестабільні рейки.

До недоліків «H-bot» кінематики, можливо віднести:

– виробнича точність: В порівнянні з іншими конфігураціями, такими як «CoreXY», «H-bot» може мати меншу точність і виробничі характеристики, що

може вплинути на якість друку;

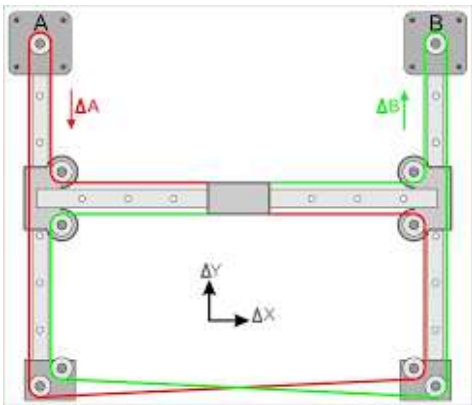
– неоднакове навантаження моторів: При неідеальному розташуванні або налаштуванні може виникнути нерівномірне навантаження на два мотора, що може впливати на точність та швидкість;

– можливість вібрацій: Залежно від конструкції та якості виготовлення, «H-bot» може виявляти певний рівень вібрацій, що також може впливати на якість друку;

– обмеження щодо розширення: При збільшенні робочої області можуть виникнути проблеми зі стабільністю та точністю руху.

1.3.3 Кінематика «CoreXY»

«CoreXY» багато в чому повторює «H-bot», але відрізняється наявністю двох зубчастих ременів. Найчастіше професійні 3D принтери компонуються за цими кінематичними схемами (рис 1.7).



а) б)

а – зразок принтера кінематики «CoreXY»; б – схема кінематики «CoreXY».

Рисунок 1.7 – 3D принтер кінематики «CoreXY»

З різної схеми встановлення ременів випливають основні відмінності між «H-bot» та «CoreXY». У «H-bot» зусилля, що переміщують балку осі X по осі Y можуть перекосити її, після чого конструкція потребуватиме відновлення. У зв'язку з цим, кріплення балки осі X і сам її профіль повинні бути якісними, і добре продуманими, що в кінцевому підсумку позначається на витратах при

виробництві принтера. У «CoreXY» ця проблема відсутня. Ще одне вразливе місце цих кінематик - зубчасті ремені. Через свою велику довжину, класичні ремені GT2-6 можуть помітно розтягнутися за невеликий проміжок робочого часу, що, безсумнівно, позначиться на якості друку і працездатності принтера.

Цей момент більше стосується кінематики «H-bot», бо там використовується один дуже довгий зубчастий ремінь, протягнутий через усю конструкцію. Однак під час масштабування габаритів усього механізму для збільшення обсягу робочої камери, в якийсь момент ця проблема може з'явитися і на «CoreXY». Там теж використовуються досить довгі зубчасті ремені, хоч і значно коротші, як порівняти з «H-bot». У підсумку, під час масштабування таких кінематик варто приділити особливу увагу підбору відповідного зубчастого ременя, для того, щоб під час роботи він не провисав і зміг прослужити досить довгий час [14].

До переваг «CoreXY» кінематики, можливо віднести:

– висока жорсткість конструкції;

– можливість забезпечити високоточний якісний друк за прийнятної швидкості;

– рівномірна якість друку в будь-якому місці робочого простору;

– відсутність інертності, що викликається рухом столу;

– легше упакувати в захисний кожух і термокамеру.

До недоліків «CoreXY» кінематики, можливо віднести:

– розмір принтера вдвічі-втричі більший за об'єм, що друкується;

– висока вартість;

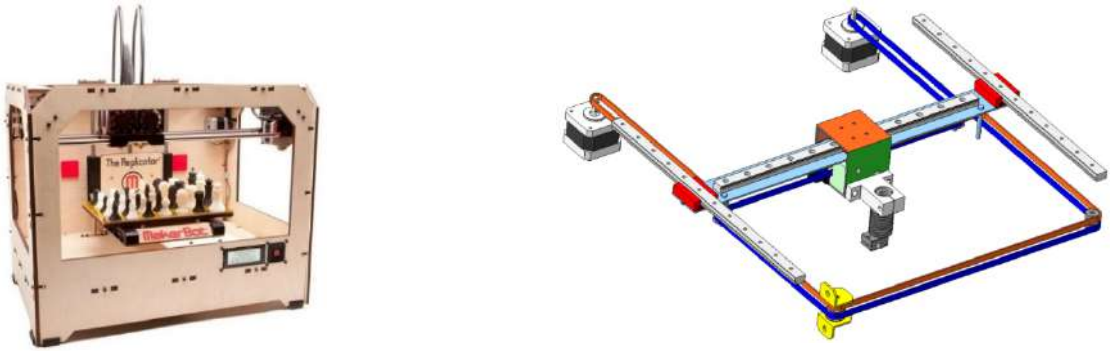
складний ремонт;

– схильність до перекосів каретки (для «H-bot»).

1.3.4 Кінематика «Makerbot»

На перший погляд ця кінематика схожа на «CoreXY» та «H-bot», друкуюча голова переміщається по осях X та Y, а стіл 3D принтера переміщається по вертикальній осі Z. Її відмінність у тому, що для осей X та Y

використовуються різні ремені і крокові двигуни. Один кроковий двигун переміщається по осі Y разом з кареткою екструдера, він відповідає за переміщення друкуючої голови по осі X, контролюючи їх через окремий зубчастий ремінь. А за переміщення по осі Y відповідає інший кроковий двигун і своя система ременів (рис 1.8).



а) б)

а – зразок принтера кінематики «Makerbot»; б – схема кінематики «Makerbot».

Рисунок 1.8 – 3D принтер кінематики «Makerbot»

До переваг «Makerbot» кінематики, можливо віднести:

– зубчасті ремені, що використовуються в конструкції, не мають великої довжини і не схильні до розтягування;

– хороша якість результатів 3D друку за досить високої швидкості;

– таку кінематику легко зібрати в закритий корпус, щоб друкувати філаментами, чутливими до перепадів температур;

– хороша масштабованість завдяки порівняно коротким зубчастим ременям.

До недоліків «Makerbot» кінематики, можливо віднести:

– кроковий двигун осі X подорожує разом із друкуючою головою по осі Y, через що каретка набуває додаткової ваги;

– кроковий двигун розташовується з краю від напрямних осі X, через що конструкція цієї осі отримує зміщення центру мас в одну зі сторін, що може позначитися на якості друку.

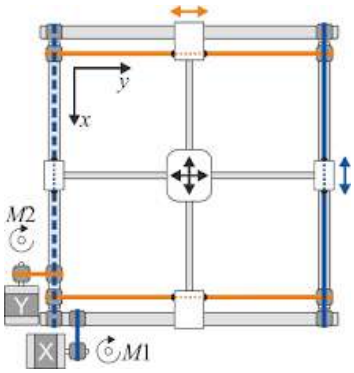
1.3.5 Кінематика «Ultimaker»

«Ultimaker» зазвичай асоціюється з 3D-принтерами, а не з кінематикою в класичному механічному сенсі. Якщо ви маєте на увазі кінематику 3D-принтерів «Ultimaker», то важливо зазначити, що конкретні моделі можуть мати певні відмінності в дизайні та кінематиці.

Однак спільним для більшості 3D-принтерів «Ultimaker» є використання кінематики "каретки по прямій лінії" (cartesian motion system). Її основна відмінність - напрямні вали, розташовані перпендикулярно один до одного і проходять крізь каретку хотенда або екструдера. Ці вали мають бути по можливості максимально рівними. Від цього безпосередньо залежить як працездатність принтера, так і якість його друку. Також, особливу увагу в цій кінематиці потрібно приділити і підшипникам ковзання. Зазвичай як підшипники використовують втулки. Управління переміщеннями по осях X і У розділене. Двигуни встановлені на корпус принтера і не ускладнюють переміщення своєю вагою [15].

Для кожної осі окремо використовується свій кроковий двигун і окремі зубчасті ремені, часто замкнуті. Безпосередньо до друкуючої голови ремені тут приєднувати не доведеться (рис 1.9).

а)



б)

а – зразок принтера кінематики «Ultimaker»; б – схема кінематики «Ultimaker».

Рисунок 1.9 – 3D принтер кінематики «Ultimaker»

До переваг «Ultimaker» кінематики, можливо віднести:

– короткі зубчасті ремені;

– легко встановити закритий корпус;

– крокові двигуни розташовані на корпусі;

– мала вага друкованої голови, висока швидкість переміщення;

– хороша якість друку.

До недоліків «Ultimaker» кінематики, можливо віднести:

– дуже високі вимоги до якості напрямних валів і підшипників;

– погана масштабованість, пов'язана з першим мінусом.

1.4 Види корпусів для 3D принтерів

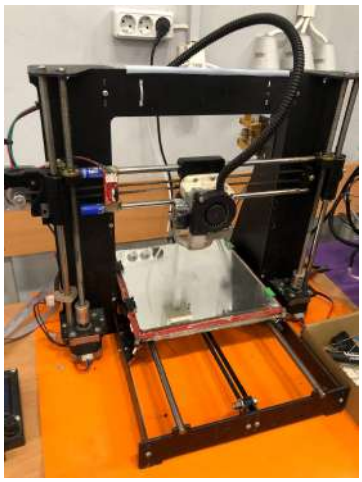
Велику роль на якість друку моделі при 3D друці за технологією FDM, відіграє жорсткість корпусу 3D принтера. Чим більше жорсткість конструкції тим менший люфт рухомих частин, що в сою чергу позитивно впливає на точність позиціонування екструдеру та дозволяє друкувати модель на більших швидкостях [16-17].

Жорсткість конструкції в свою черго залежить від двох чинників, а саме:

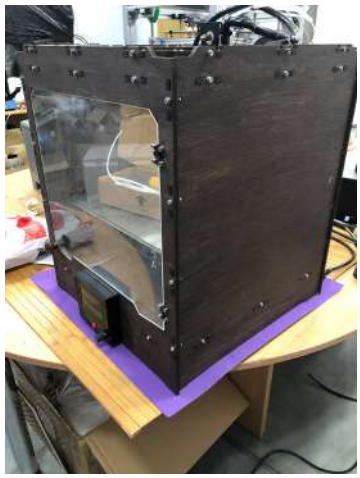
– матеріалу корпусу (це може бути: фанера, пластик, акріл, алюмінієвий верстаний профіль);

– тип формування корпусу (збірний або штампований).

Одним з найдешевших типом корпусів для 3D принтерів є збірні корпус з листового матеріалу, фанери, акріла, пластику або металу. Зазвичай вони використовуються в дешевих кінематиках таких як «Prusa», але можуть зустрічатися і більш дорогих та складних механіках. Вони виготовляються зазвичай за допомогою лазерного різання або фрезерування. Товщина матеріалу зазвичай від 4 мм до 8 мм, з’єднання між собою частин відбувається за допомогою гвинтів та гайок М3 або М4, та пазів передбачених при розкрою листа (рис 1.10). Для більшої жорсткості такий тип формування корпусу може бути виконаний в металі товщиною від 3 мм до 6 мм.



а)



б)

а – збірний різаний корпус з металу; б – збірний різаний корпус з фанери.

Рисунок 1.10 – Різані корпуси з листового матеріалу

До переваг даного типу корпусів можна віднести:

– низько вартість (через низьку вартість виготовлення);

– простота виготовлення;

– простота збірки корпусу.

До недоліків можливо віднести, наступні параметри:

– низька жорсткість конструкції. Суттєво це відчувається коли використовується фанера або акрил, це пов’язано гнучкість матеріалу та його руйнуванням при вібраціях при роботі принтера;

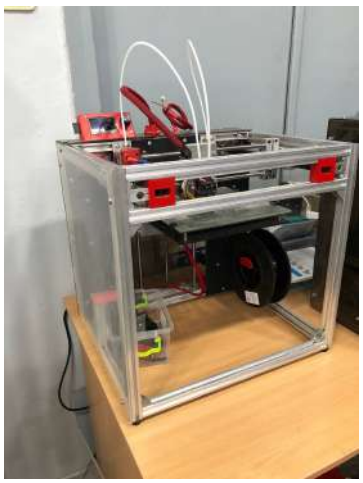
– недостатня надійність з’єднання гвинтами. Часом експлантації проточені пази в корпусі під гайки через вплив вібрації, стають білими і гвинти недостатньо стягують запчастини корпусу;

– корпуси виконані з фанери сильно хильни набирати вологу, та руйнуватися, а корпуси з акрилу або пластику під дією механічних вібрацій з часом тріскаються в місцях з’єднання частин принтера.

Наступним типом корпусів для 3D принтерів є, корпуси виконані за допомогою верстатний алюмінієвого профілю. Цей варіант являється універсальним з точки розробки 3D принтерів різних кінематик, та модифікацій.

Такий матеріали використовується як і комерційних принтерах так і в саморобних. Алюмінієвий верстатний профіль, представляє собою профіль квадратного або прямокутного перетну, з пазами з кожної сторони здовж всієї його довжини. Стандартними розмірам такого профілю, які використовуються для створення 3D принтерів, є: 20×20 мм, 20×40 мм, 20×60 мм, 30×30 мм, 30×60 мм, 40×40 мм та 40×80 мм.

З’єднання профілю між собою відбувається за допомогою верстатних кутків, Т-гайок та гвинтів (рис 1.11).



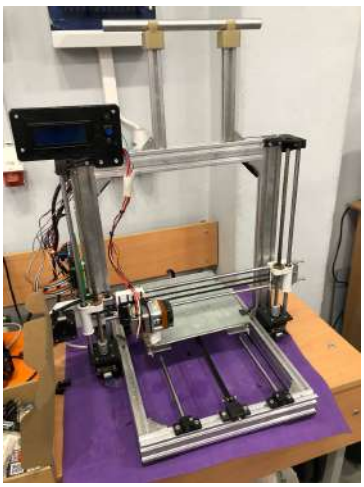


Рисунок 1.11 – Різані корпуси з листового матеріалу

До переваг даного тип збірки можна віднести:

– доволі висока жорсткість конструкції;

– універсальність та можливість модифікацій (можливо робити 3D принтери різних розмірів та встановлювати додаткові вузили або датчики).

До недоліків можливо віднести:

– висока вартість профілю, Т-гайок та кутків;

– точність різання профілю (щоб забезпечити жорсткість конструкції необхідно зберегти перпендикулярність з’єднання, а для цього необхідно, щоб торці профілю били перпендикулярні після нарізки).

Штамповані корпуси най поширеніший тип корпусу для комерційних 3D принтерів. Вони використовуються для будяки кінематик. Корпус виконанні з

листового металу товщиною 3 мм, гнуті за допомогою штампування та зварювання. За рахунок додаткових ребр жорсткості та мінімальності використання гвинтових з’єднань (рис 1.12).

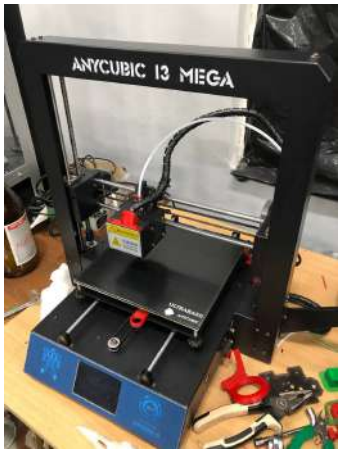


Рисунок 1.12 – Приклад 3D принтерів з штампованою рамою

До переваг даного тип збірки можна віднести:

– висока серійність виготовлення;

– доволі висока жорсткість конструкції;

– відсутність додаткової збірки принтера після придбання;

До недоліків можливо віднести:

– висока вартість виготовлення для одиничного виготовлення;

– складність встановлення додаткових модифікації принтерів.

1.5 Аналіз технічного завдання

Згідно з завданням буде зробити 3D принтер за технологією FDM для серійного виробництва. Кінематикою даного 3D принтера, була обрана «CoreXY». Даний тип кінематики був обраний через її механічні переваги та простоти реалізації її для серійного виробництва. Основні вимоги до конструкції 3D принтера, наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Вимоги до конструкції 3D принтера.

№	Параметри	Значення
1	Розміри конструкції, мм	не більше 500×500×600
2	Вага, кг	не більше 20
3	Тип кінематики	CoreXY
4	Енергоживлення, В	220-250
5	Кількість екструдерів	1
6	Розміри робочого поля, мм	230×230×200
7	Максимальна швидкість друку, мм/с.	не менше 100
8	Максимальна температура екструдера, °С	260
9	Максимальна температура стола, °С	80
10	Матеріали для друку	ABS, PLA, CoPET, PET-G, Nilon, TPU, HIPS
11	Тип подачі матеріалу	Bowden
12	Максимальна вага деталі, кг	5

1.6 Висновки до першого розділу

В першому розділі були розглянуті технології 3D порипування, які вони бувають та їх особливості. За результатними цього аналізу, було вирішено розробляти 3D принтер за технологією FFF/FDM, оскільки друк пластиком є одним з дешевих та доступних для споживача на ринку.

Також були розглянуті кінематики верстатів які, найчастіше використовуються. Виходячи з переваг та недоліків які є, була обрана кінематика «CoreXY», оскільки вона проста в реалізації та дозволяє принтеру друкувати на швидкостях 100 – 150 мм/с, без дефектів на поверхні моделі. Але така швидкість обумовлена не тільки типом обраної кінематики, а також типом виготовлення самої рами верстата та її матеріалом. Ці чинники напряму впливають на жорсткість конструкції, тому були розглянуті окремо корпуси, які вони бувають та з чого складаються.

За результатами аналізу було прийняте рішення використовувати металевий корпус з листового металу. Оскільки даний підхід більше підходить для серійного виробництва. Для подальшої розробки та досягнення мети, слід більш ретельно розглянути технології формоутворення корпусів, які використовуються для серійного виробництва.

2 МЕТОДИ ВИГОТОВЛЕННЯ КОРПУСІВ

З проведеного аналізу аналогів 3D принтерів, можливо зробити висновок, що для серійного виготовлення даних верстатів зазвичай використовуються наступні методи форма утворення корпусу: листове штампування; лазерне різання; фрезерування.

Кожний цих методів є найпоширенішим для масового виробництва великої кількості однакових виробів. Всі вони мають свої переваги та недоліки, тому розглянемо кожний більш детально [18].

2.1 Штампування

Штампування металу дозволяє швидко і точно надати вихідного листовому матеріалу форму готового виробу. Даний процес полягає в деформації металу під дією спрямованого тиску. При цьому матеріал змінює свою форму, зберігаючи початкову товщину листа. В цілому є два основних різновиду штампування [19-20]:

1. Гарячим штампуванням називається процес одержання поковок за допомогою спеціальної оснастки — штампів (рис.). Молотовий штамп являє собою два сталевих бойка (матриця і пуансон), що мають в площині роз'єму виїмки, які відповідають конфігурації деталі. Під дією сили удару молота або тиску преса нагріта заготовка деформується і заповнює порожнину штампа. В результаті штампування одержують деталь, що за формою і розмірами відповідає формі і розмірам штампу;

2. Холодне штампування здійснюється без попереднього підігріву металу. Найчастіше застосовують листове холодне штампування, матеріалом для якого служать тонкі листи (товщиною 5 - 6 мм), стрічки, прутки з м'якої вуглецевої і легованої сталі, кольорових металів і їх сплавів. Холодним штампуванням виготовляють як плоскі, так і вигнуті вироби (ковпаки, днища залізничних

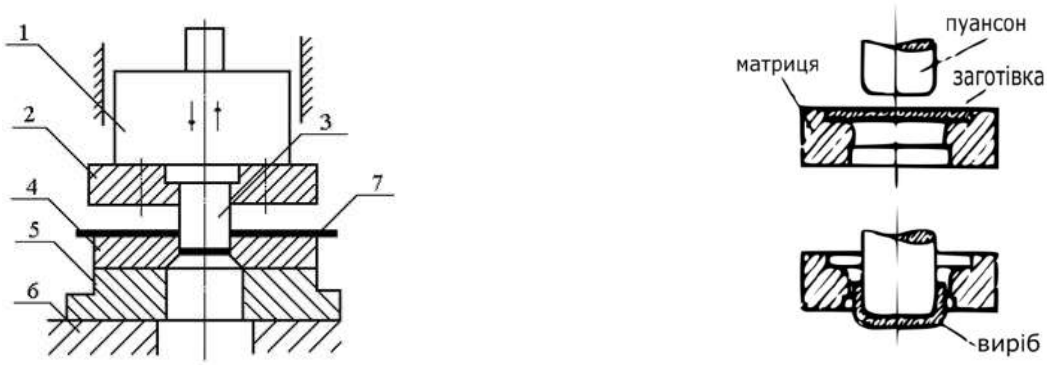
цистерн, деталі котлів і ін.).

2.1.1 Холодне штампування

Листове штампування – один із розповсюджених способів отримання деталей з листового матеріалу. Таке штампування можна здійснювати з нагріванням, проте найпоширенішим є холодне штампування. Листовим штампуванням виготовляють втулки, посуд, монети, гільзи, облицювання автомобілів, автобусів, літаків тощо [21].

Вирізуванням називається відокремлення від заготовки частини матеріалу у вигляді виробу по замкнутому зовнішньому контуру. Для цього використовують штамп. Заготовку в вигляді стрічки установлюють між пуансоном і матрицею, які виконують роль ножів, прикріплюють до верхньої та нижньої плит штампа. Пуансон, опускаючись вниз, своїми гострими краями відокремлює деталь і проштовхує її в отвір матриці (рис 2.1,а).

Витяжка – це виготовлення з листової заготовки порожнистої просторової деталі. Заготовку кладуть на матрицю з заокругленими краями і затискають притискним кільцем. Після опускання пуансона, що теж має заокруглені краї, він затягує заготовку в зазор між пуансоном і матрицею. Притискне кільце запобігає утворенню складок на краях деталі (рис 2.1,б).



а) б)

а – вирізання штампом (1 – пуансон; 2 – кріплення під штамп; 3 – штамп; 4 – матриця; 5 – нижня плита; 6 – заснування; 7 – листова заготівка); б – витяжка.

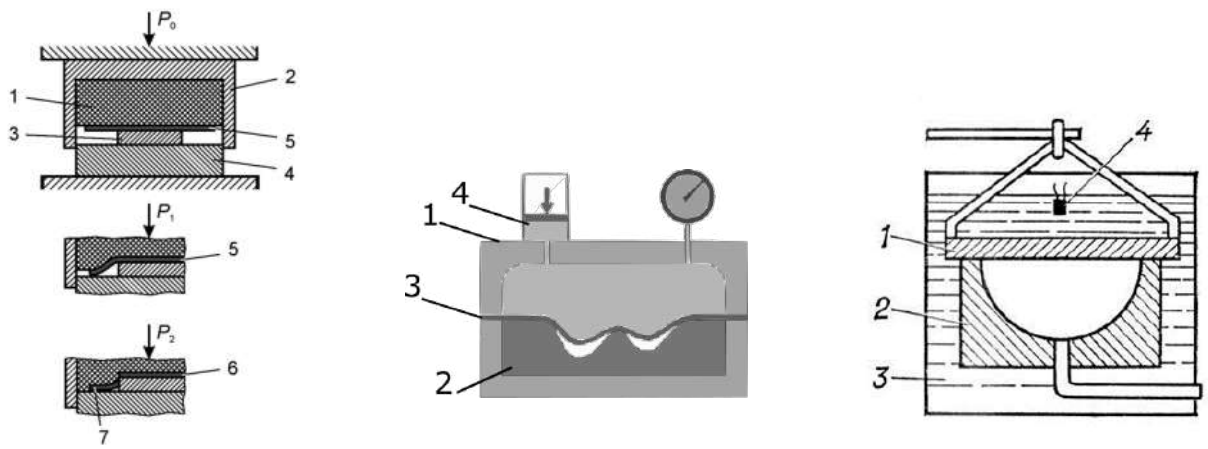
Рисунок 2.1 – Схема роботи штампувального станка

У мало серійному виробництві використовують листове штампування у відносно нескладних штампах:

– штампування гумою лист розміщається на шаблоні, а повзуном преса притискують шар гуми (rubber), надаючи заготовці рельєф шаблона (рис 2.2);

– штампування рідиною або газами отримують пустотілі вироби, наприклад, перетворення стаканоподібної заготівки в кулеподібну, заготовка поміщається в роз'ємну матрицю і через прийомний канал подається під тиском рідина або газ (рис 2.2);

– штампування вибухом (explosion) на матрицю укладається заготовка, яка закріплюється притискним кільцем до басейна за допомогою гвинтів. Завдяки вибуху відбувається формування заготовки в матриці (рис 2.2).



а) б) в)

а – штампування гумою (1 – еластичне середовище; 2 – контейнер; 3 – шаблон; 4 – під штампова плита; 5 – заготовка; 6 – відштампована деталь;7 – відхід); б – штампування рідиною (1 – камера; 2 – матриця; 3 – заготівка; 4 – рідина піл тиском); в – штампування вибухом (1 — заготівка; 2 — матриця; 3 — ємність з водою; 4 — заряд вибухової речовини)

Рисунок 2.2 – Штампування складних форм

Даний метод дозволяє виготовляти складно-конструктивні деталі з високою точністю виготовлення. При холодному штампуванні коефіцієнт використання матеріалу досягає до 95%, що позитивно позначається на вартості

виготовлення.

До основних переваг холодного штампування можливо віднести:

– висока точність (всі виготовлені деталі з партії будуть ідентичні, без будь-яких розбіжностей в розмірах);

– економія матеріалу (формування деталі проводитися за допомогою виготовленого штампа, а не методом механічної обробки металу);

– низька собівартість (за рахунок економії матеріалу і часу на виготовлення деталей ціна на металообробку істотно менше);

– підвищена міцність (при штампуванні деталі відбувається фізичне зміна структури металу, завдяки чому підвищується міцність виробу).

2.1.2 Гаряче штампування

Гаряче листове штампування застосовують для матеріалів недостатньо пластичних або для таких, що товстіші за 6 мм. З нагріванням виготовляють деталі корпусів корабля, днище цистерн тощо. В цілому в гарячому листовому штампуванні використовуються наступні методи [22].

Гаряче об’ємне штампування, а точніше, її технологічний процес, має низку особливостей і розробляється відповідно до наступних рекомендацій:

– вибір методу виготовлення – у штампі з відкритим або закритим струмком;

– розробка детального креслення штампованого виробу;

– визначення точної кількості переходів, які необхідно виконати для надання заготівлі необхідної форми;

– розробка окремого креслення кожному за переходів;

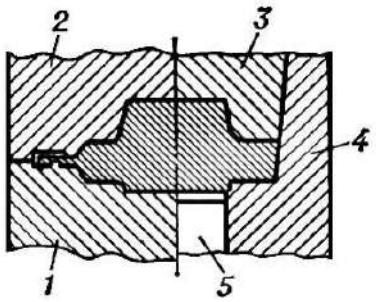
– вибір обладнання та форми для кожного з етапів техпроцесу;

– вибір способу та режиму нагрівання заготовки;

– визначити перелік фінішних операцій, завдяки яким штампована заготівля перетвориться на готовий виріб.

Об’ємне штампування – це такий спосіб обробки металів тиском, внаслідок якого заготовка, поміщена в робочу порожнину штампа, пластично

деформується, набуваючи конфігурації та розмірів порожнини (рис 2.3).



1 – нижня половина; 2 – верхня половина; 3 – пуансон; 4 – матриця; 5 – виштовхувач

Рисунок 2.3 – Гаряче об’ємне штампування

Штамп складається з двох рознімних частин, які в зібраному вигляді створюють одну чи декілька внутрішніх порожнин, що називають рівчаки. Конфігурація робочої порожнини такого штампа геометрично подібна до конфігурації заготовки, яку виймають з печі і кладуть в нижню частину штампа, а верхньою частиною обжимають заготовку, внаслідок чого заготовка набуває конфігурацію порожнини штампа.

Вироби складної конфігурації виготовляють у штампах що мають багато рівчаків. У них заготовку послідовно деформують у кожному рівчаку, наближаючи її форм у й розміри до форми й розмірів виробу.

Об’ємне гаряче штампування виконують двома способами: у відкритих і закритих штампах. У першому випадку одержують поковку, коли у місці роз’єднання половинок штампа зроблено спеціальний рівчак, куди витісняється надлишковий метал заготовки через вузьку щілину, утворюючи облой. Вузька щілина заважає виходові металу в рівчак і сприяє доброму заповненню порожнини металом. Облой відокремлюють на обрізних штампах, які обрізають безпосередньо після операції штампування. Гаряче штампування латуні та інших кольорових металів має такі переваги:

– можливість одержання заготовки, розміри якої максимально наближені

до габаритів готової деталі. А це, у свою чергу, сприяє зниженню витрати металу при подальшій механічній обробці поковки та суттєво полегшує процес її проведення;

– однорідність структури готових виробів, зокрема таких як кран пожежний, що збільшує їхню міцність;

– мінімальний ризик виникнення внутрішніх дефектів;

– можливість виготовлення великої кількості однотипних виробів у стислий термін;

– відносно невисока собівартість готових виробів.

2.2 Лазерне різання і гравірування

Лазерне різання та гравіювання – технологія різання або гравіювання матеріалів, що використовує лазер високої потужності. Сфокусований лазерний промінь забезпечує високу концентрацію енергії і дозволяє розрізати практично будь-які матеріали незалежно від їх теплофізичних властивостей. У процесі різання під впливом лазерного променя матеріал розрізається на ділянки, плавиться, займається, випаровується і видувається струменем газу [23] (рис 2.4).

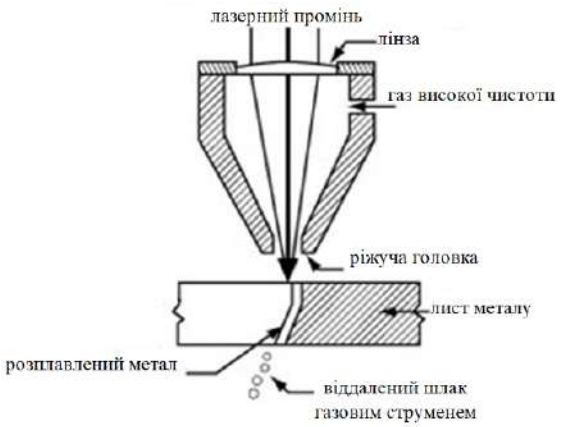


Рисунок 2.4 – Схема лазерного різання і гравіювання

Завдяки великій потужності лазерного випромінювання забезпечується висока продуктивність процесу в поєднанні з високою якістю поверхонь різу.

Легке і порівняно просте управління лазерним випромінюванням дозволяє здійснювати лазерну різку і гравіювання по складним контурам плоских та об'ємних деталей та заготовок з високим ступенем автоматизації процесу [17].

Для лазерного різання підходить будь-яка сталь будь-якого стану; алюміній та його сплави, інші кольорові метали. Зазвичай застосовують листи з таких металівнаведених у таблиці 2.1 [23].

Таблиця 2.1 – Лазерна різка металів

Метал	Товщина листової заготівки, (мм)
Сталь	0,2 – 30
Нержавіюча сталь	0,2 – 12
Алюмінієві сплави	0,2 – 20
Латунь	0,2 – 12
Мідь	0,2 – 15

Лазерну різку використовують для обробки інших видів матеріалів, таких як: дерево, ДСП, шпон, фторопласт, акрил, стеклоліт, гетинакс, пластик, тканину, скло, дзеркало, шкіру, шкірзам, мармур, граніт, гумутощо.

Для виготовлення корпусів для 3D-принтерів лазерне різання використовується для металів на більше 4 мм. Також для здешевлення виробу, в якості основного матеріалу корпусу використовується ДСП, фанера або акрил товщиною до 8 мм.

Переваги лазерного різання і гравіювання:

– відсутність механічного контакту дозволяє обробляти крихкі матеріали, які легко деформуються матеріали;

– висока швидкість роботи (в залежності від типу лазера, його потужності і матеріалу);

– обробка матеріалів з твердих сплавів;

– малі розміри станків у порівнянні з плазмовими і газокисневими;

– можлива високошвидкісна різка тонколистової сталі;

– висока точність різу і гравіювання від ±0,01 до ±0,1 мм;

– мінімальна кількість відходів при різанні й гравіруванні;

– низька ціна обладнання в порівнянні з іншими видами термічної обробки;

– можливість роботи у великому діапазоні листових матеріалів;

– висока якість виробів.

Недоліки лазерного різання і гравіювання:

– не підходить для різання товстостінного металу;

– залежність параметрів, таких як ефективність, швидкість обробки, якість різу від типу лазера і його потужності;

– обмеження по товщині і габаритам листа, максимальний розмір листа 1500×3000 мм;

– потрібен додатковий захист очей від лазерного випромінювання;

– обмежений термін служби лазера.

2.3 Фрезерне різання і гравірування

Фрезерування (фрезерна обробка) – це процес механічної обробки, при якому ріжучий інструмент (фреза) здійснює обертальний рух (зі швидкістю V), а оброблювана заготовка – поступальний (зі швидкістю подачі S) [8] (рис 2.5).

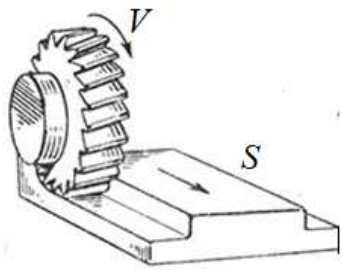
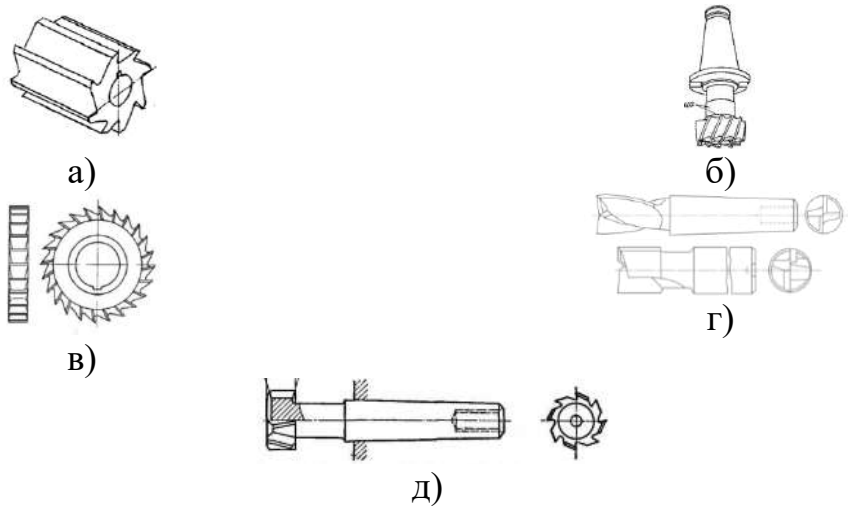


Рисунок 2.5 – Схема роботи фрези

Сама фреза – зубчасте колесо, що має безліч лез, яке затискається у фрезерному станку і, обертаючись з великою швидкістю, знімає шари з поверхні заготовки в потрібній ділянці.

Залежно від необхідної форми деталі фрези бувають наступних таких видів (рис 2.6) [24].



а) циліндрична фреза; б)торцева фреза; в) дискова фреза; г) шпонкова фреза; д) фреза для обробки Т – образних пазів.

Рисунок 2.6 – Види фрез

Переваги фрезерного різання і гравірування:

– висока точність різання та гравіювання від ±0,1 до ±0,01 мм, при використанні високоточних фрезерних станків можна отримати мікронну точність різу;

– відсутність обмежень по геометричній формі деталі;

– можливість різання та гравіювання не тільки металу, але і дерева, ДСП, ДВХ, полістиролу, ПВХ пластика, композитних матеріалів, акрилу та інших видів пластмас;

– можливість різання і гравірування великих заготівок з товщиною від 1 до 50 мм і більше;

– висока швидкість різання в залежності від матеріалу і необхідної форми деталі.

Недоліки фрезерного різання і гравірування:

– висока вартість фрезерних станків і фрез;

– велика витрата матеріалу в залежності від складності деталей і числа підходів фрези до заготовки;

– обмежений ресурс роботи ріжучого інструменту (фрези).

2.4 Висновки до другого розділу

В другому розділ були розглянуті методи формо утворення корпусів, які найчастіше використовуються в серійному виробництві. За результатами аналізу особливу увагу було надано методам штампування та лазерного різання.

Виходячи з мети роботи – розробки серійного 3D принтера, подальша розробка конструкції буде відбуватися з урахуваннями методів виготовлення корпусів за допомогою холодного штампування рами (а саме гнуття), а вирізання пазів та інших елементів верстату за допомогою лазерного різання.

Даний підхід дозволяє зробити швидко та точно виготовляти раму верстатів в серійній кількості. При цьому дані підходи дозволяють зменшити витрат на виготовлення 3D-принтеру.

3 РОЗРОБКА 3D-МОДЕЛІ ПРИНТЕРА

3.1 Загальна 3D-модель принтера

Виходячи з елементної бази яка зараз є на ринку та з мети виготовлення серійного 3D принтера, було обрано метод виготовлення за допомогою штампування. Для створення конструкції та листів розкрою, була створена модель в програмному середовищі Fusion 360 [25]. На рисунку 3.1 наведений загальний вигляд макету.

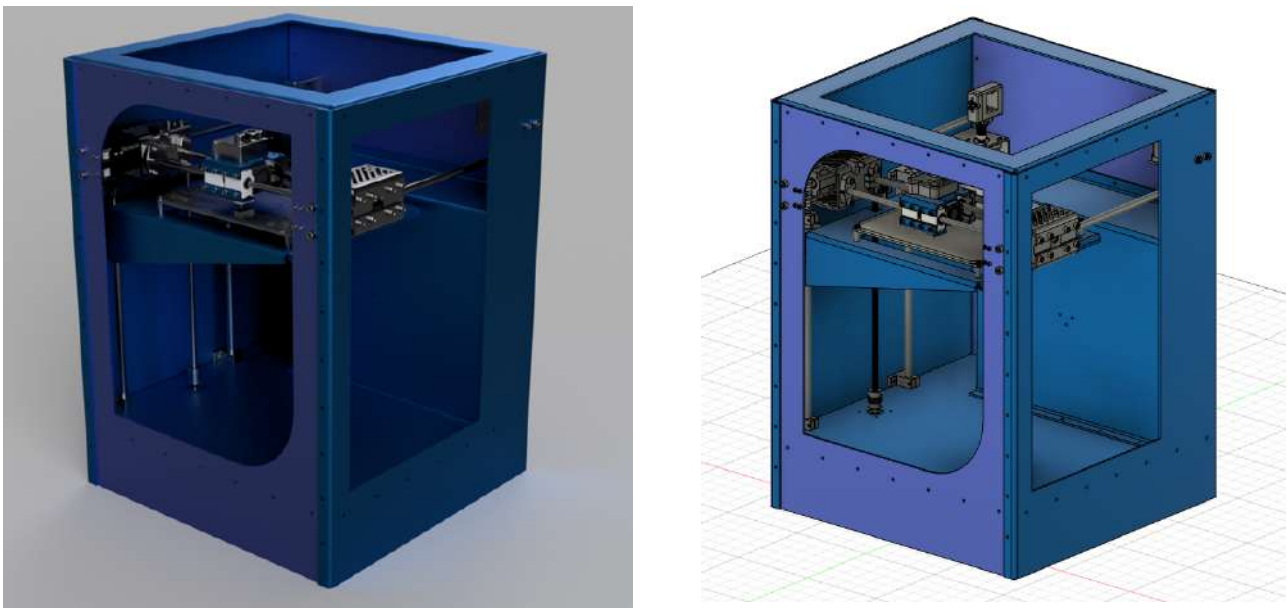


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд макету

Конструкцію механічної частини 3D принтера можна умовно розділити на кілька основних підсборок: вісь X, вісь Y, вісь Z та корпус.

Всі конструкційні елементи принтера виготовлюються з холоднокатаної сталі товщиною 3 мм, марка Ст3. Ненавантажені деталі для фіксації крокових двигунів, фторопластової трубки, гофри дротів і т.д. виготовляються з PETG пластика із заповненням 50% методом FFF/FDM 3D друку.

3.1.1 Розробка вісь X

Вісь X відповідає за рух каретки екструдера вздовж осі. Головними вимогами до неї є мала вага, що дозволить збільшити швидкість друку, та висока жорсткість, що забезпечить відсутність люфтів і покращить точність друку. Зовнішній вигляд осі X наведено на рисунку 3.2.

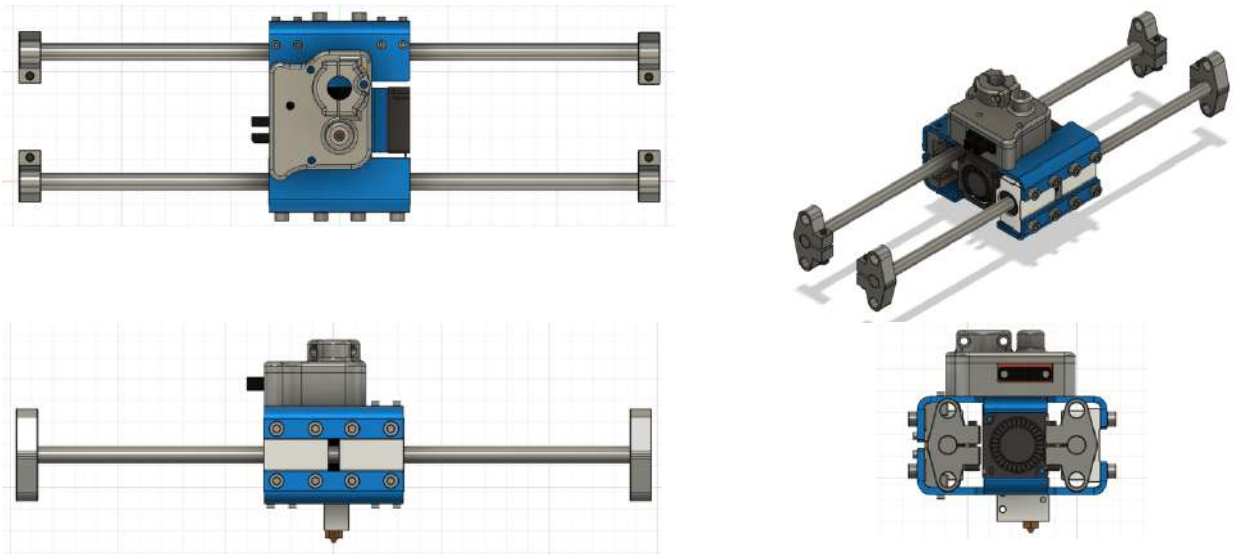


Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд осі X

Екструдер, що використано, Box V6 Volcano від компанії E3D. Вибір зумовлено невеликою вартістю, великім розміром нагрівального блоку та довжиною сопла, доступністю компонентів на ринку України. Конструкція осі X містить як стандартні компоненти, так і виготовлені спеціально для даного принтера. До стандартних компонентів відносяться: два вали 8мм, довжиною 293 мм; чотири алюмінієві опори валів SHF8; три лінійні підшипника в алюмінієвому корпусі SC8UU; ремінь GT2; гвинти, шайби та гайки.

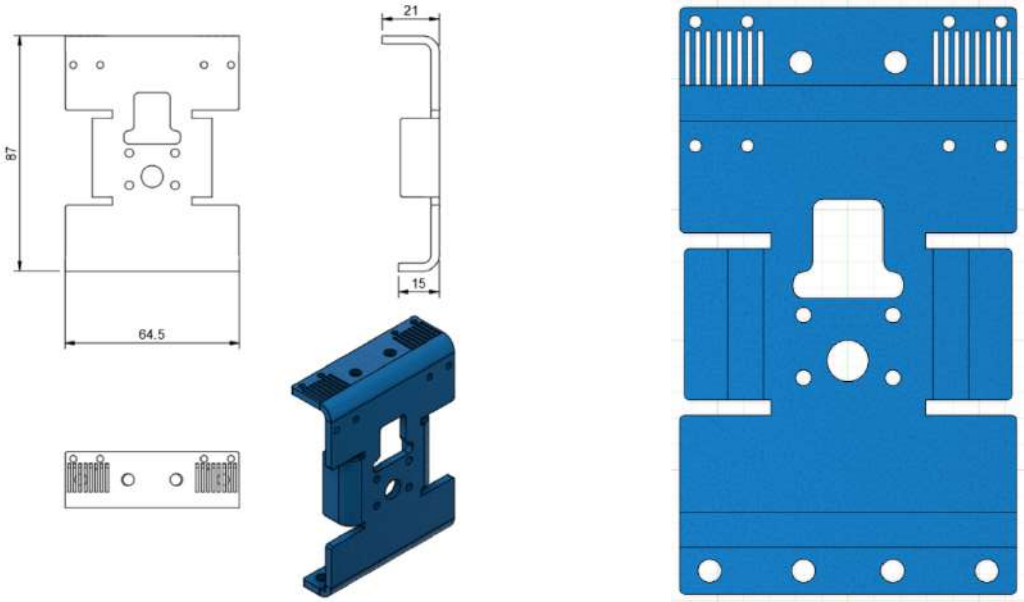
До нестандартних елементів осі X відносяться:

– верхня штампована кришка каретки екструдера (рис. 3.3);

– нижня кришка штампована каретки екструдера (рис. 3.4);

– чотири друковані фіксатора ременя (рис. 3.5);

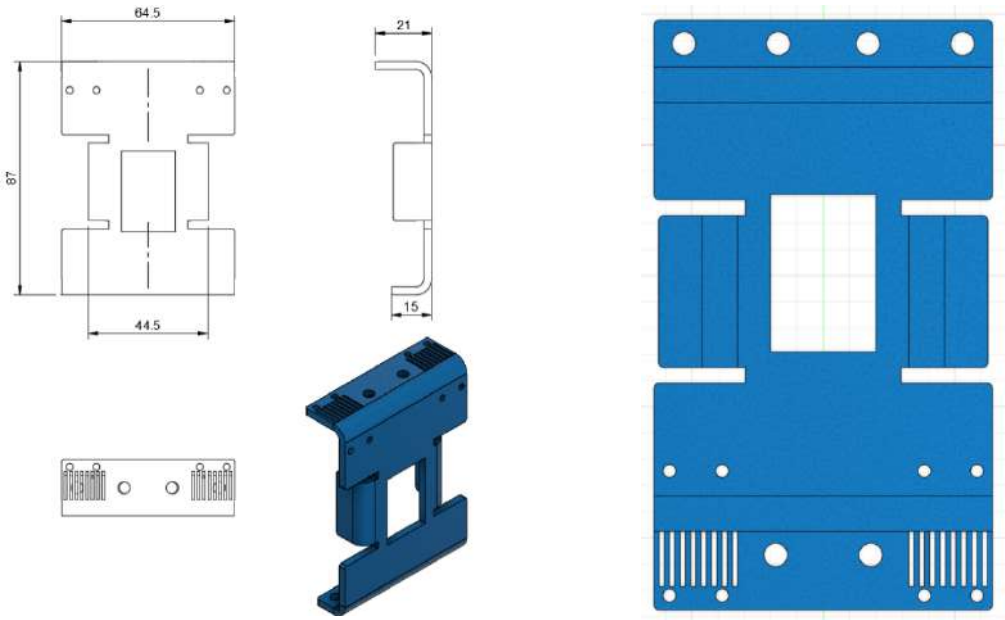
– фіксатор фторопластової трубки та гофри для дротів, що складається з двох друкованих деталей (рис. 3.6).



а) б)

а – верхня кришка каретки екструдера; б – розгортка верхньої кришки каретки екструдера.

Рисунок 3.3 – Верхня каретки частина екструдера



а) б)

а – нижня кришка каретки екструдера; б – розгортка нижньої кришки каретки екструдера.

Рисунок 3.4 – Нижня частина каретки екструдера

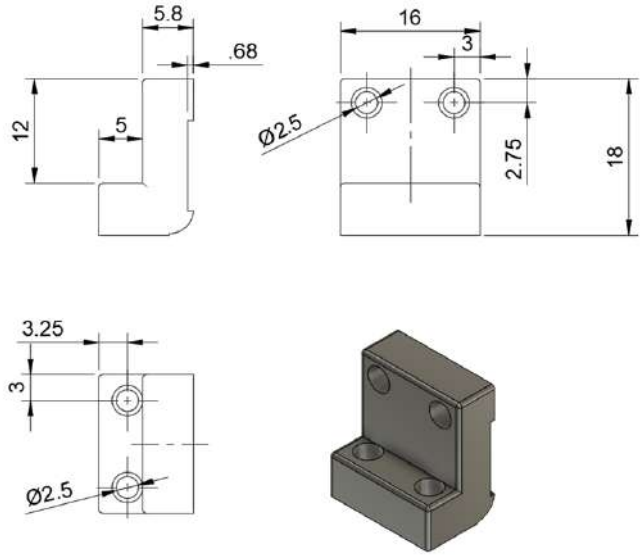


Рисунок 3.5 – Фіксатор ременя

а) б)

а – фіксатор фторопластової трубки та гофри для дротів; б – вибух-схема фіксатора фторопластової трубки та гофри для дротів.

Рисунок 3.6 – Нижня частина каретки екструдера

3.1.2 Розробка вісь Y

Вісь Y відповідає за рух всієї осі X вздовж відповідної осі. Головними вимогами до неї є мала вага елементів що рухаються (каретки), що дозволить збільшити швидкість друку, та висока жорсткість, що забезпечить відсутність люфтів і покращить точність друку. Зовнішній вигляд осі Y наведено на (рис 3.7).

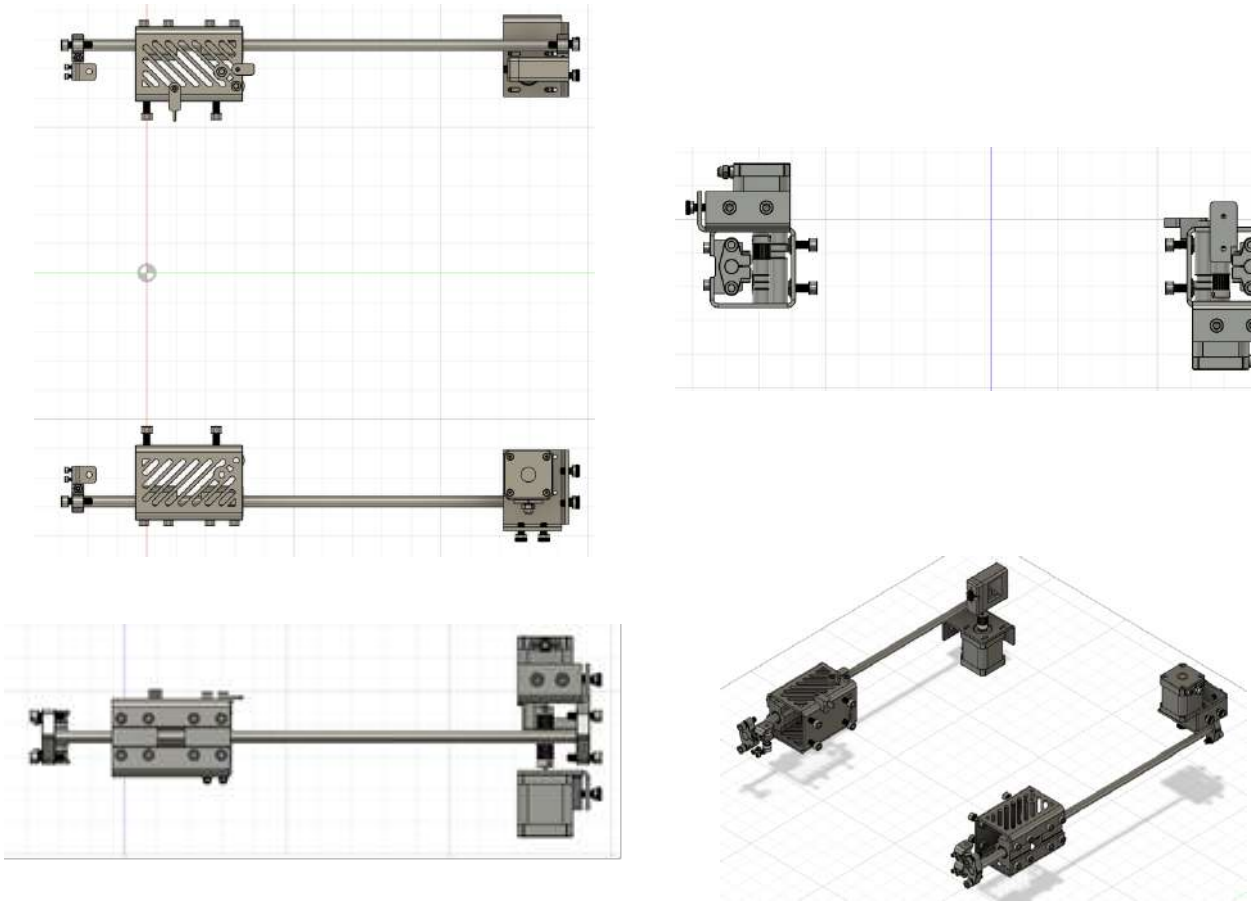


Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд осі Y

Конструкція осі Y містить як стандартні компоненти, так і виготовлені спеціально для даного принтера. До стандартних компонентів відносяться: два вали 10мм, довжиною 420 мм; чотири алюмінієві опори валів SHF10; чотири лінійні підшипника в алюмінієвому корпусі SC10UU; шістнадцять підшипників 685; два крокових двигуна Nema 17; два алюмінієві шківа 20 зубів для ременя GT2 10мм; гвинти, шайби та гайки.

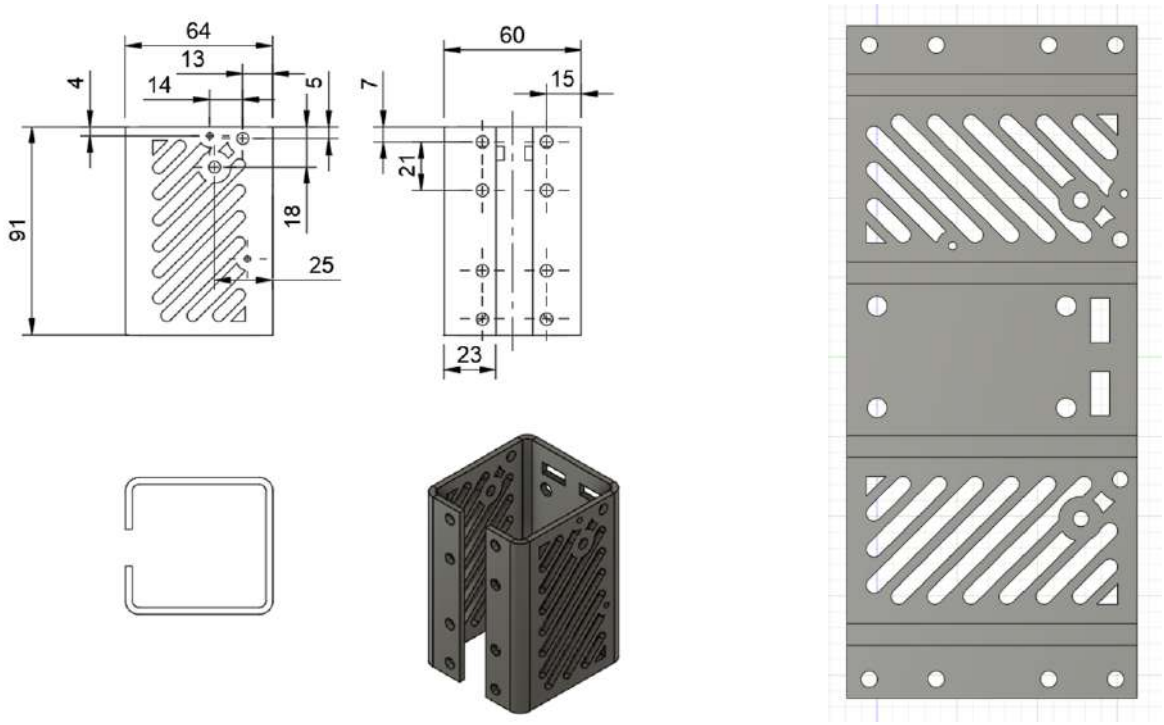
До нестандартних елементів осі Y відносяться:

– дві каретки осі Y (рис. 3.8);

– два кронштейна крокових двигунів Nema 17 (рис. 3.9);

– чотири кронштейна опозитних шківів (рис. 3.10);

– чотири обмежувача ременя (рис. 3.11).



а) б)

а – каретка осі Y; б – розгортка каретки осі Y.

Рисунок 3.8 – Креслення каретки осі Y

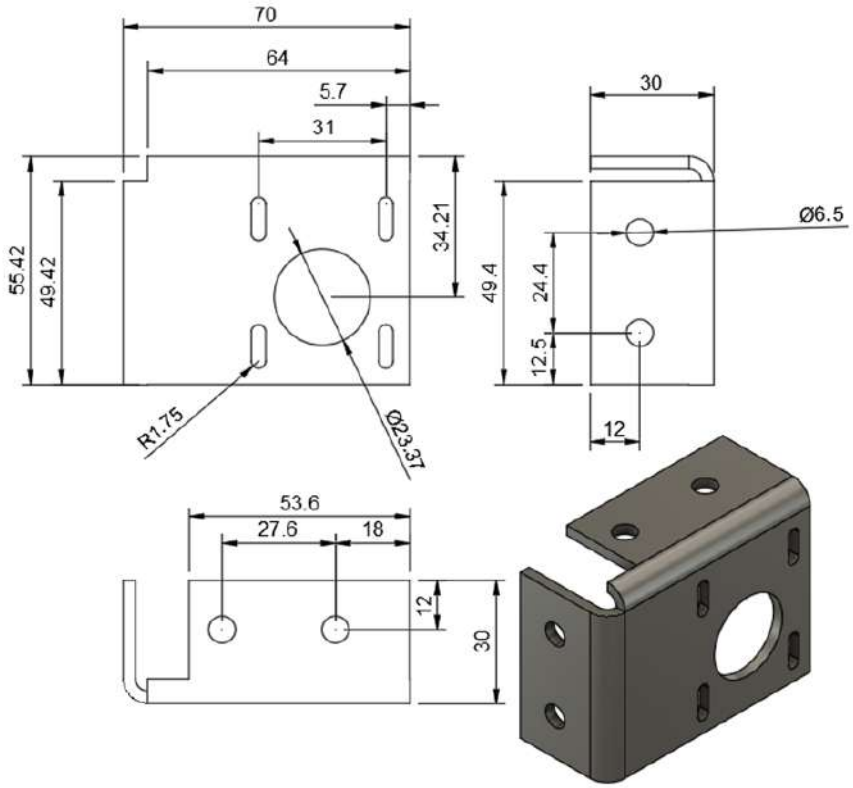
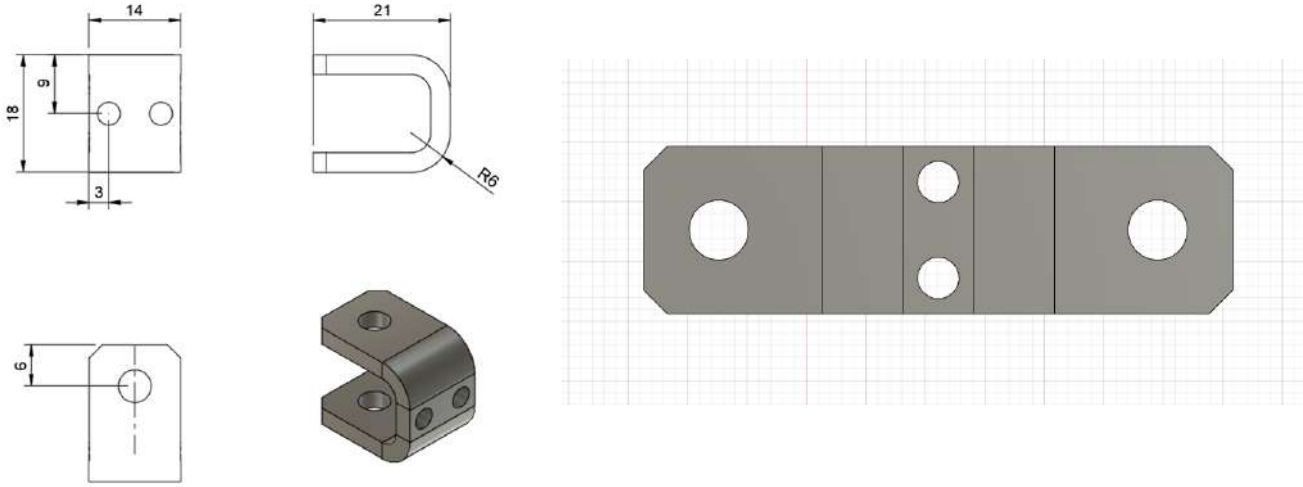


Рисунок 3.9 – Кронштейн крокового двигуна Nema 17



а) б)

а – кронштейн опозитного шківа;

б – розгортка кронштейну опозитного шківа.

Рисунок 3.10 – Корпуси для шківів ременя

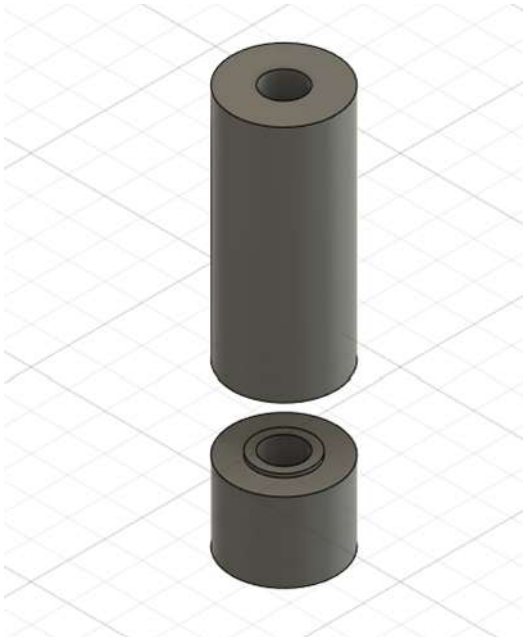


Рисунок 3.11 – Обмежувач ременя

3.1.3 Розробка вісь Z

Вісь Z забезпечує вертикальне переміщення столу. Основними вимогами є висока жорсткість конструкції, точність переміщення та відсутність люфтів. Рух вздовж цієї осі досить повільний, але вимагає максимальної точності. Зовнішній вигляд осі Z наведено на рисунку 3.12.

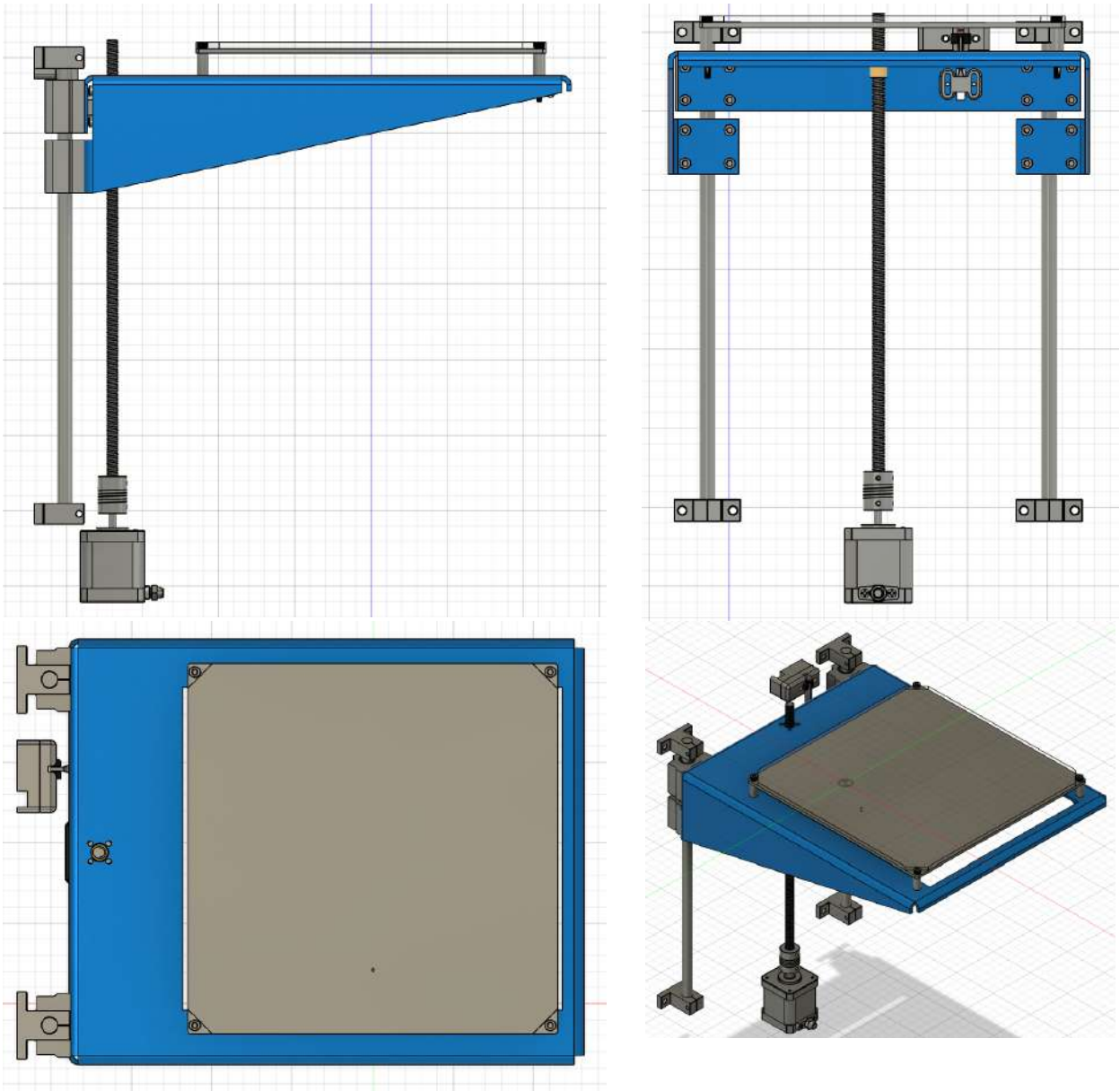


Рисунок 3.12 – Зовнішній вигляд осі Z

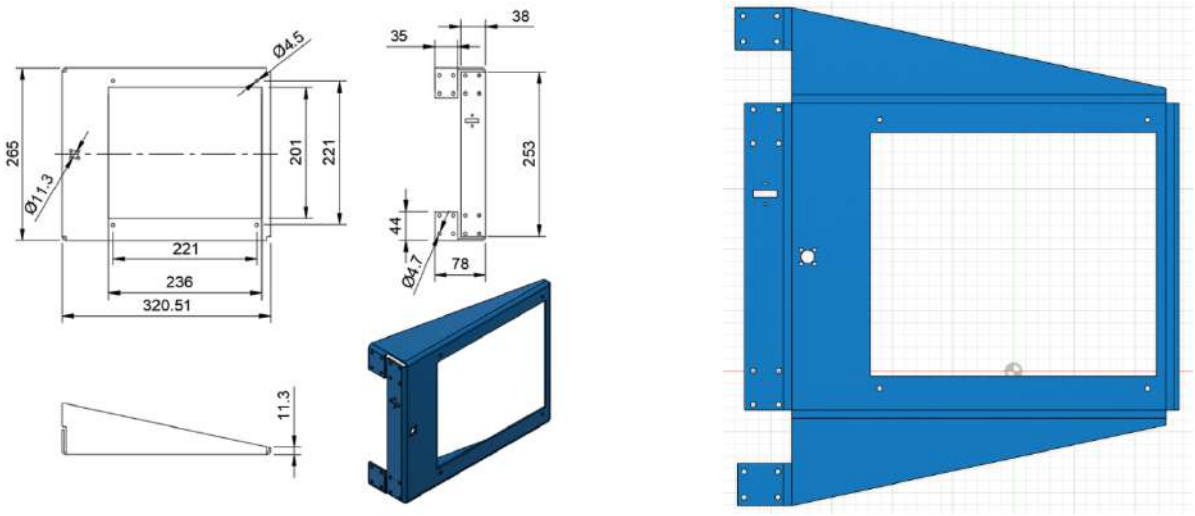
Конструкція осі Z містить як стандартні компоненти, так і виготовлені спеціально для даного принтера. До стандартних компонентів відносяться: два вали 10мм, довжиною 316 мм; чотири алюмінієві опори валів SH10; чотири лінійні підшипника в алюмінієвому корпусі SC10UU; кроковий двигун Nema 17; шпилька T8 довжиною 295мм; антилюфт гайка; чотири пружини столу; чотири фіксатори столу; гвинти, шайби та гайки.

До нестандартних елементів осі Z відносяться:

– кронштейн столу (рис. 3.13);

– пластина столу (рис. 3.14);

– скло столу (рис. 3.15).



а) б)

а – кронштейн столу; б – розгортка кронштейну столу.

Рисунок 3.13 – Кріплення нагрівального столу осі Z

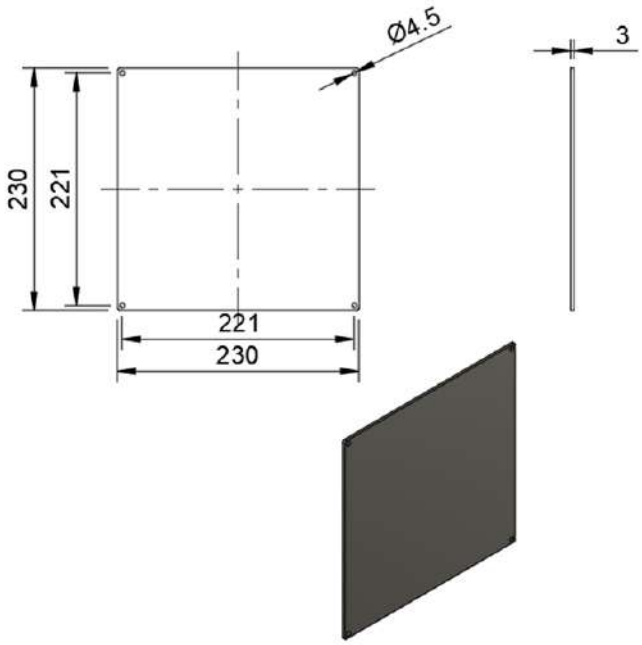


Рисунок 3.14 – Пластина столу

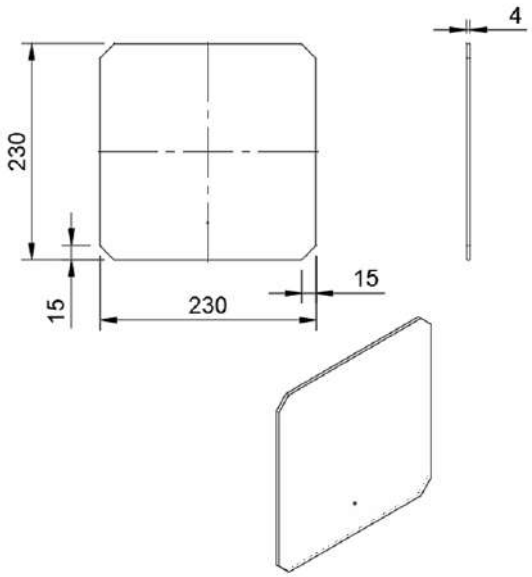


Рисунок 3.15 – Скло столу

3.1.4 Розробка корпусу 3D принтера

До корпусу э наступні вимоги: висока жорсткість; значна вага, що зменшить вібрації; центр тяжіння, що знаходиться максимально низько;

Зовнішній вигляд корпусу наведено на рисунку 3.16.

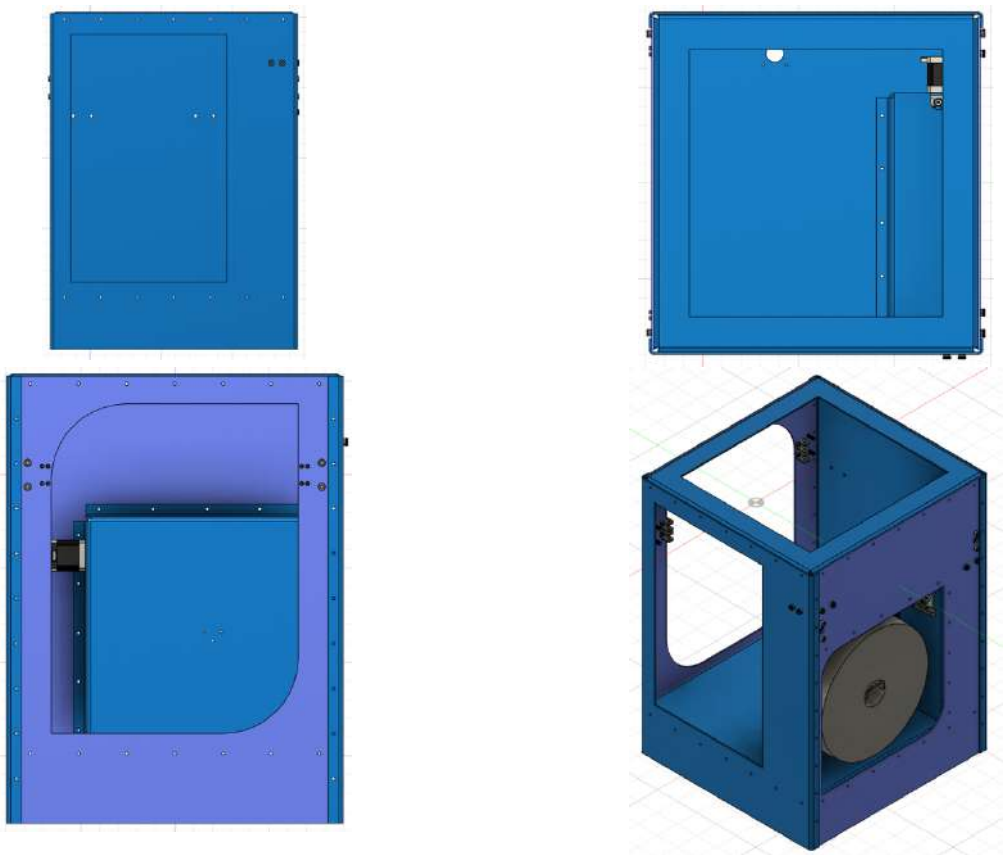


Рисунок 3.16 – Корпус

Конструкція корпусу містить як стандартні компоненти, так і виготовлені спеціально для даного принтера. До стандартних компонентів відносяться: механізм подачі пластику; кроковий двигун NEMA 17; гвинти, шайби та гайки.

До нестандартних елементів корпусу відносяться:

– передня пластина (рис. 3.17);

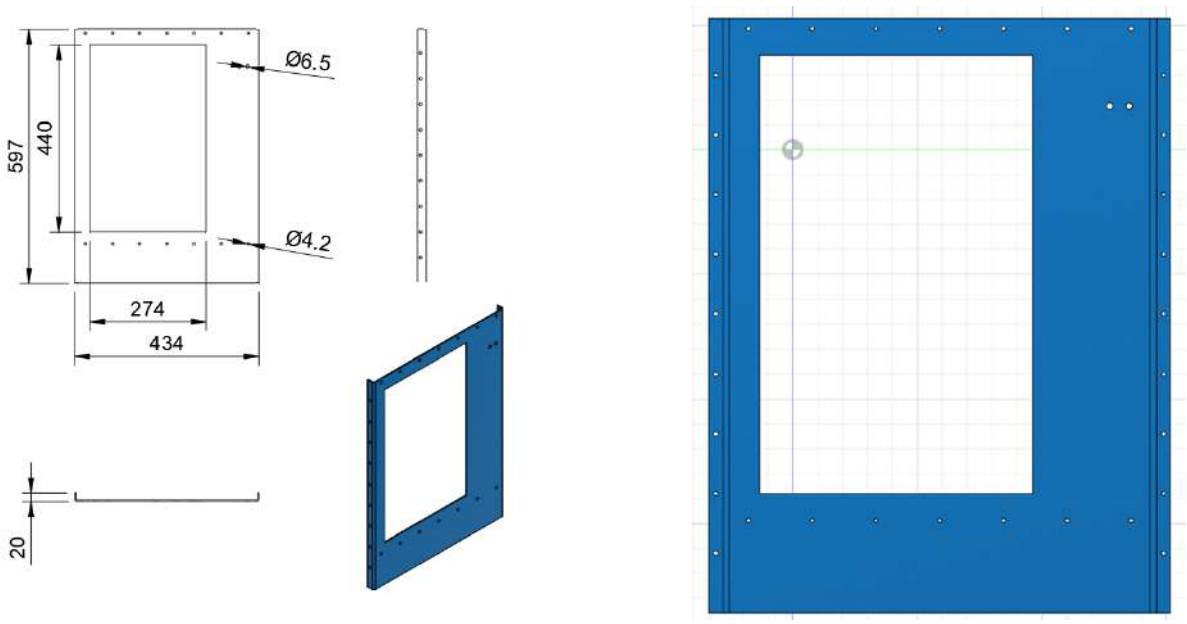
– задня пластина (рис. 3.18);

– ліва пластина та права пластина (рис. 3.19);

– верхня пластина (рис. 3.20);

– нижня пластина (рис. 3.21);

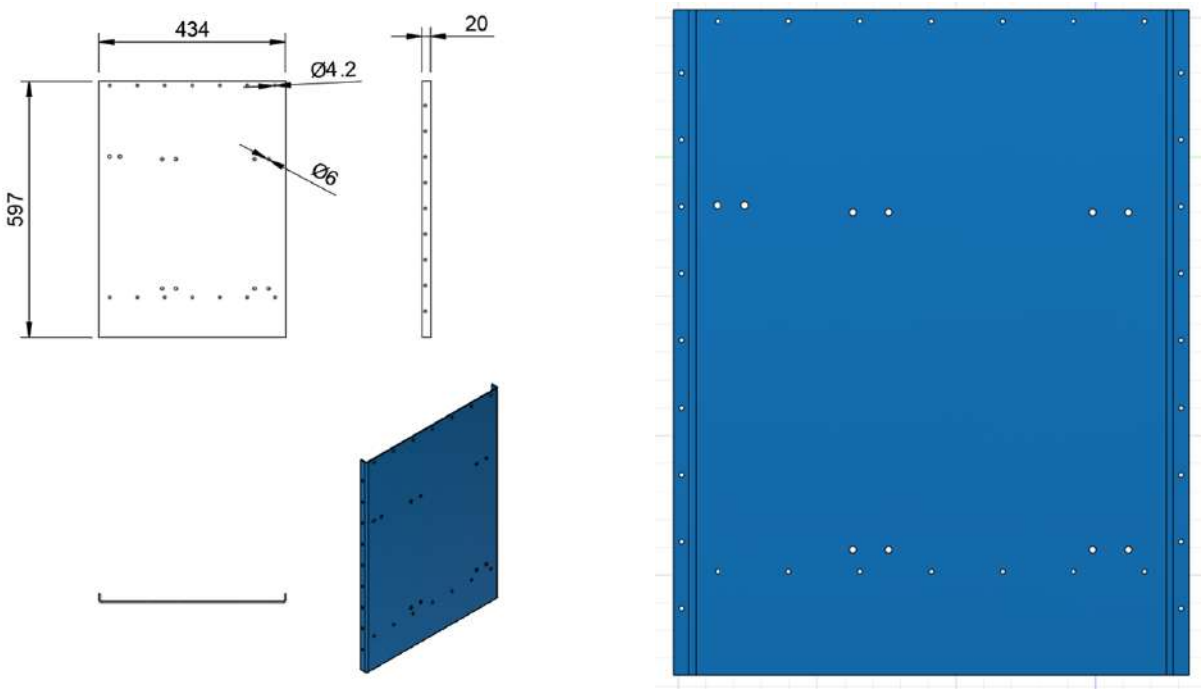
– пластина корпусу котушки філаменту (рис. 3.22).



а) б)

а – передня пластина; б – розгортка передньої пластина.

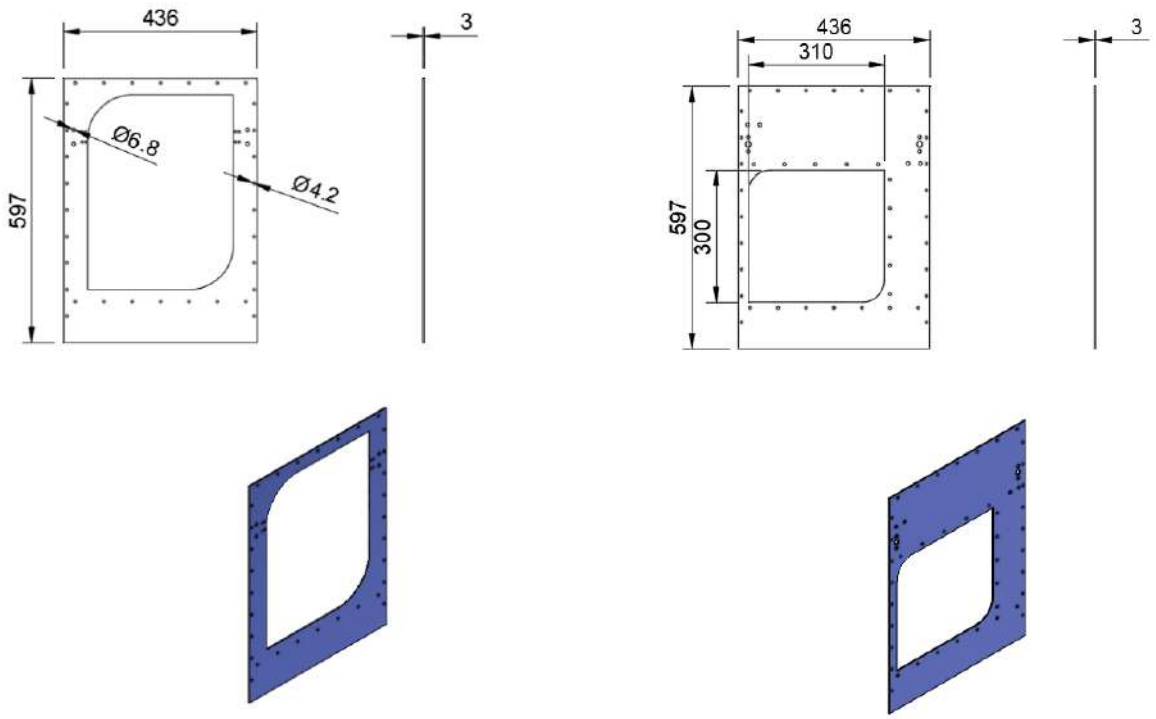
Рисунок 3.17 – Кріплення передньої пластини



а) б)

а – задня пластина; б – розгортка задньої пластина.

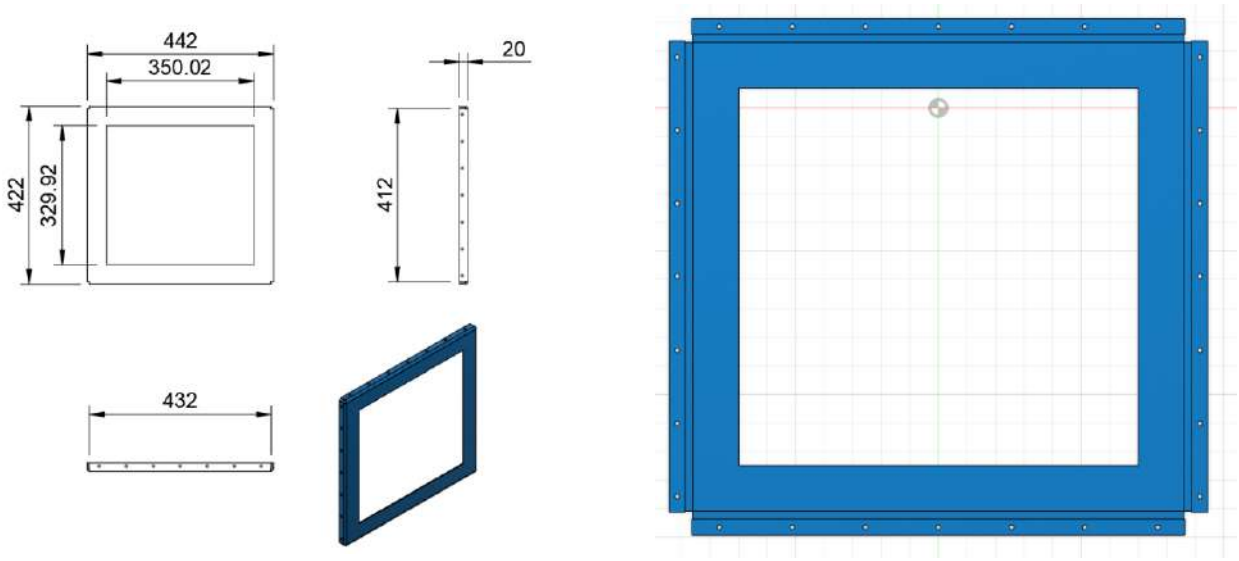
Рисунок 3.18 – Кріплення задньої пластини



а) б)

а – ліва пластина; б – права пластина.

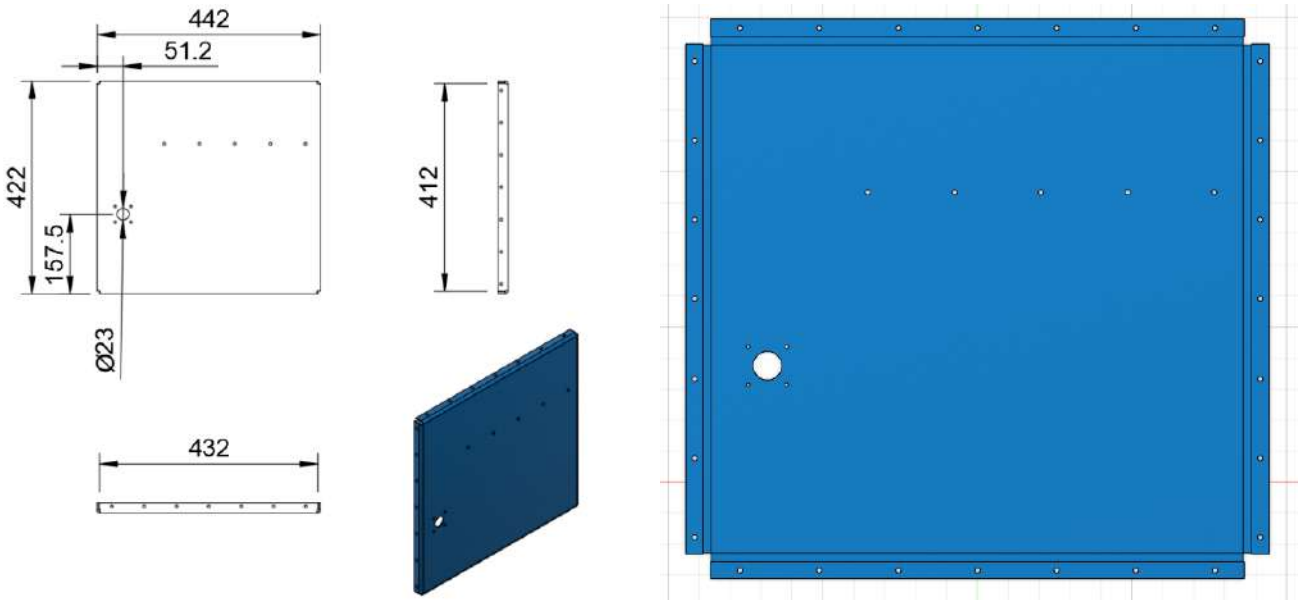
Рисунок 3.19 – Кріплення бокових пластини



а) б)

а – верхня пластина; б – розгортка верхньої пластини.

Рисунок 3.20 – Кріплення верхньої пластини



а) б)

а – нижня пластина; б – розгортка нижньої пластини.

Рисунок 3.21 – Кріплення нижньої пластини

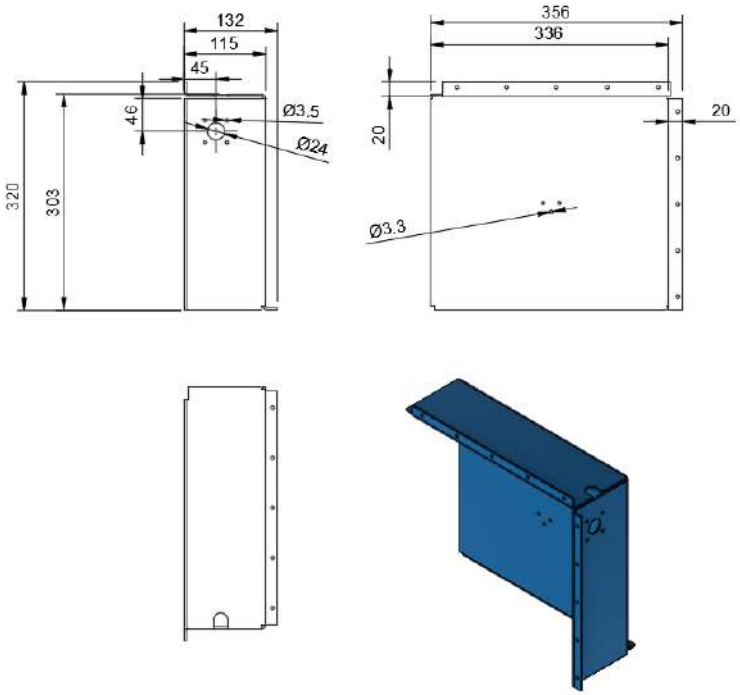


Рисунок 3.22 – Пластина корпусу котушки філаменту

3.2 Вибір двигунів для моделі та розрахунок передавальної функції

Виходячи з розробленої кінематичної схеми для руху осей потрібно три двигуна. Як найкращі варіанти, були обрані крокові біполярні двофазні двигуни NEMA 17 17HS4401. Характеристики двигунів описані в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Характеристики крокового двигуна NEMA 17 17HS4401.

Характеристика	Значення
Крок	1.8°, 200 кроків за один оберт
Номінальний струм	1.7 А
Опір обмотки	1.5 Ом
Індуктивність обмотки	2.8 мГн
Інерція ротора	54 см^2
Діаметр валу	5 мм
Вага	280 г
Максимальне значення температури	80°C

Цей двигун також має компактні розміри (42 х 42 мм), і це робить його придатним для 3D принтеру, він не буде займати занадто багато місця.

Для розрахунку передавальної функції нам знадобиться формула:

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{k_t}{s(Js + b)(R + k_b s)}$$

де $\Omega(s)$ – кутова швидкість ротора;

$V(s)$ – вхідна напруга;

k_t – константа крутного моменту = 0.025 Н·м/А;

J – момент інерції ротора = 0.0000054 кг·м² або 5.4×10^{-6};

b – коефіцієнт в'язкого тертя = 0.1 Н·м·с/рад;

R – опір обмотки = 1.5 Ом;

k_b – константа проти-ЕРС = 0.025 В·с/рад.

Підставивши значення отримаємо вираз:

$$G(s) = \frac{0.025}{s(5.4 \times 10^{-6}s + 0.1)(1.5 + 0.025s)}$$

Ця передавальна функція показує, як кутова швидкість двигуна змінюється відносно прикладеної напруги. Це може бути корисно для аналізу стабільності та проектування контролера для двигуна.

3.3 Висновки до третього розділу

Третій розділ був повність присвячений розкрою листів для корпусу та елементній базі, яка буде використовуватися для створення макету. Була створена 3D-модель принтера в програмному середовищі Fusion 360 та описаний принцип роботи кожної осі.

Конструкцію механічної частини 3D принтера можна умовно розділити на кілька основних підсборок: вісь X, вісь Y, вісь Z та корпус.

Всі конструкційні елементи принтера виготовлюються з холоднокатаної

сталі товщиною 3 мм, марка Ст3. Ненавантажені деталі для фіксації крокових двигунів, фторопластової трубки, гофри дротів і т.д. виготовляються з PETG пластика із заповненням 50% методом FFF/FDM 3D друку.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Вимоги до охорони праці під час холодного штампування металів

Під час виконання штампувальних робіт необхідно дотримуватися вимог, які зазначені в Правилах охорони праці під час холодного оброблення металів НПАОП 0.00-1.68-13.

Під час штампування дрібних деталей невеликими партіями подавання заготовок у штамп необхідно виконувати із застосуванням засобів малої механізації (лотків, шиберів). Подавання заготовок у штамп і видалення відштампованих деталей і відходів зі штампа вручну дозволяється за наявності на пресі ефективних захисних пристроїв (дворуке включення, фотоелементний захист, огородження небезпечної зони преса) або при застосуванні штампів безпечної конструкції, висувних або відкидних матриць, зблокованих із ввімкненням преса. На невеликих штампах, застосовуваних на пресах з малим ходом повзуна, необхідно передбачати зазори безпеки між рухомими і нерухомими їх частинами.

На пресах з великим ходом повзуна зазор безпеки повинен бути збільшений з таким розрахунком, щоб кисть руки працівника не була притиснута в нижньому положенні повзуна. Якщо за умовами роботи (установка штампа на пресі з нерегульованим великим ходом повзуна) неможливо дотримати зазори безпеки між рухомими і нерухомими частинами, небезпечні зони повинні бути обгороджені. У штампах з напрямними колонками повинно блокуватися сходження напрямних втулок з колонок під час підйому повзуна. Противіджимні пристрої не повинні виходити з напрямного отвору під час роботи преса або вони повинні розташовуватися на штампі відповідно до вимог технологічної документації, затвердженої роботодавцем. Застосування випадкових шайб і прокладок під час кріплення штампів не дозволяється [26-27].

Під час закріплення верхньої частини штампа за допомогою хвостовика розміри його повинні відповідати отворові в повзуні преса. За потреби повинні використовуватися інші наявні в повзуні преса елементи кріплення (різьбові, наскрізні отвори). Застосовувати на хвостовиках штампів перехідні втулки дозволяється у випадках, коли хвостовик призначений тільки для центрування. Під час закріплення верхньої частини штампа до повзуна преса тільки хвостовиком, а також при застосуванні кулькових напрямних елементів сходження напрямних втулок зі стовпчиків під час роботи штампа не дозволяється. Установлення декількох пружин у штампах в наборі по висоті без центрувальних елементів, які запобігають зсуванню пружин, не дозволяється. Штампи із твердосплавними робочими деталями установлювати на підкладні бруси не дозволяється. Видалення застряглих у штампі деталей і відходів необхідно виконувати відповідними пристроями (гачками, щітками) при вимкненому пресі. Змащування штампів необхідно виконувати за допомогою спеціальних пристосувань (ручних розбризкувачів або стаціонарних пристроїв для змазування) для запобігання потраплянню рук працівника у небезпечну зону. Під час роботи на пресах необхідно систематично перевіряти кріплення штампів до преса, кріплення деталей штампів, стан захисних пристроїв, прочищати канали для змащення і виходу повітря.

4.2 Вимоги до робочих місць

Під час згинання металу на згинальних і профілезгинальних верстатах необхідно застосовувати приймальні пристрої (столи) із запобіжними огородженнями [26-27].

Подавання і направлення листів у вальці листоправильних багатовалкових верстатів необхідно виконувати за допомогою механізованого пристрою для подавання і приймання листів на столи (рольганги) та відключення верстата при неправильному подаванні листа.

Під час згинання профілів на роликових верстатах необхідно застосовувати

захисні пристрої для запобігання потраплянню пальців рук працівника між роликом та заготовкою.

Не дозволяється працювати на згинальному верстаті у разі: - випередження одного кінця або нерівномірного (ривками) переміщення траверси; - невідповідності ходу траверси (верхнього вала) показанням індикатора; -значного провисання верхнього вальця і прогину верхньої поверхні балки верстата (постелі) під час прокатування.

Під час прокатування металевих листів на згинальному верстаті із застосуванням полотнини або паперу не дозволяється розправляти складки, що утворилися на полотнині або папері. Не дозволяється протирати опорні ролики і валки під час їх обертання.

Під час роботи на профілезгинальному верстаті не дозволяється перебування працівників на відстані менше 1 м від профілю.

Жолоби двовалкових правильно-полірувальних і багатовалкових трубоправильних і сортоправильних верстатів повинні бути оснащені накладками (з поліуретану, гуми) для зниження рівня шуму.

У місці вивантаження жолоби повинні мати пристрій для уникнення викидання заготовки за його межі.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі були проаналізовані сфери застосування 3D-друку, розглянуті технологій, їх переваги та недоліки. Зокрема були розглянуті особливості FFF/FDM.

Після проведеного аналізу було вирішено створити 3D принтер за технологією FFF/FDM, оскільки друк пластиком є економічно доступним для користувачів. Також розглянуті різновиди кінематик верстатів, що найчастіше застосовуються. З урахуванням переваг та недоліків кожної кінематики, було обрано "CoreXY", оскільки вона проста у виготовленні та дозволяє принтеру працювати на високих швидкостях без дефектів на поверхні друку. Проте така швидкість зумовлена не лише вибором кінематики, але й матеріалом та конструкцією рами верстата.

Ці фактори безпосередньо впливають на жорсткість верстата, тому були детально розглянуті типи корпусів та їх матеріали. В результаті аналізу було вирішено використовувати металевий корпус з листового металу, оскільки це найбільш практичний підхід для серійного виробництва.

Для розробки серійного 3D принтера, подальша модифікація конструкції буде здійснюватися з урахуванням методів виготовлення корпусів, таких як холодне штампування рами (зокрема, гнуття), а також вирізання пазів та інших елементів верстату за допомогою лазерного різання. Цей підхід дозволяє ефективно та точно виготовляти раму верстатів у великих обсягах, що в свою чергу сприяє зменшенню витрат на виготовлення 3D-принтерів.

Виходячи з мети та технічного завдання, була створена 3D-модель принтера в програмному середовищі Fusion 360 та описаний принцип роботи кожної осі. Конструкцію механічної частини 3D принтера можна умовно розділити на кілька основних підсборок: вісь X, вісь Y, вісь Z та корпус. Всі конструкційні елементи принтера виготовлюються з холоднокатаної сталі товщиною 3 мм, марка Ст3. Ненавантажені деталі для фіксації крокових

двигунів, фторопластової трубки, гофри дротів і т.д. виготовляються з PETG пластика із заповненням 50% методом FFF/FDM 3D друку.

За результатними розробки був спроектований макет 3D-принтера з наступними:

– розміри конструкції – 434×434×597 мм;

– вага верстата – 12,5 кг;

– розміри робочого поля – 230×230×200 мм;

– максимальна температура сопла – 260°C;

– максимальна температура стола – 80°C;

– максимальна швидкість друку – 120 мм/с;

– кількість екструдерів – 1 шт;

– матеріали для друку – ABS, PLA, CoPET, PET-G, Nilon, TPU, HIPS;

– тип подачі матеріалу – пряма (Bowden).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання – На заміну ДСТУ 3008-95; чинний від 2017-07-01. – Вид. офіц. – [Б. м. : б. в.], 2015. – 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипенко, О.В. Токарєва, С.П. Новоселов, О.В Сичова. – Харків: ХНУРЕ, 2023. – 64 с.

3. V. Doroshenko, P. Kaliuzhnyi, S. Kolomiitsev. Examples of 3D-Technologies for the Production of Hardware and Polymer Patterns // December 2021, Casting processes 146(4):p 48-54.: https://doi.org/ 10.15407/plit2021.04.048.

4. Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є., Близнюк Д.С. Порівняльний аналіз технологій 3D прототипування SLA, DLP та LCD. Розробка автоматизованої станції для 3D друку // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 26 листопада 2020. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2020. 55 – 56 с.

5. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (І частина) / Г. О. Андрощук // Наука, технології, інновації. - 2017. - № 1. - С. 68-77.

6. Тулашвілі Ю.Й., Лук'янчук Ю.А. Використання сучасних SLA засобів в адитивних ІТ-технологіях // The XXIII International Science Conference «Theory, practice and science», April 27 – 30, 2021, Tokyo, Japan. P 462 – 467. ISBN-978-1-63848-669-5. https://doi.org/10.4699/ISG.2021.I.XXIII.

7. Valentina G. Sysyuk, Vasil M. Granchak. Optical and polymerization

characteristics of the materials for 3D-printing depending on the nature of their composite component // Publishing House “*Akademperiodyka*” National Academy of Sciences of Ukraine 2017. p 226 – 237. https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.444.226

8. Alfred Jacobsen, Trond Jorgensen, Qyvind Tafjord, and Endre Kirkhorn "Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads", Proc. SPIE 9376, *Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications* VII, 937605.

9. 3D printing. A Practical Guide / Redwood Ben, Garrat Brian, Chauffeur Philemon. - M.: DMK-Press, 2020. - 220 p.

10. Rossi, S.; Puglisi, A.; Benaglia, M. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing in Organic Synthesis. *ChemCatChem* 2018, 10, 1512– 1525, https://doi.org/10.1002/cctc.201701619.

11. Manapat J, Chen Q, Ye P, Advincula R (2017) 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography. Macromol Mater Eng 302:1600553.

12. Yurii Kuznietsov, Oleksii Solntsev Structural morphological synthesis of parallel kinematics based hybrid 3D-printer and connection with the challenges of INDUSTRY 4.0 // Journal of the Technical University of Gabrovo, vol.65, 2022.-p.p.1-6.

13. Johnson, G. A., French, J. J. (2018). Evaluation of Infill Effect on Mechanical Properties of Consumer 3D Printing Materials. Advances in Technology Innovation, 3 (4), 179–184

14. Поліщук, А. О. (2024). Development of a 3D printer screw extruder that uses granules or crushed polymer particles as raw materials. Technologies and Engineering, (5), 33–49. https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.3

15. Xiao-Su Yi, Shanyi Du, Litong Zhang, (eds.). Composite Materials Engineering. Fundamentals of Composite Materials. Springer, Singapore, 2018, Vol. 1, doi: 10.1007/978-981-10-5696-3.

16. Kolosov A. E., Sivetskii V. I., Kolosova E. P., Vanin V. V., Gondlyakh A. V., Sidorov D. E., Ivitskiy I. I. Creation of Structural Polymer Composite Materials for

Functional Application Using Physicochemical Modification. Advances in Polymer Technology, 2019, p. 12, doi: 10.1155/2019/3501456.

17. Borelli V. Kinematic and dynamic analysis of a machine for additive manufacturing. Torino, 2018, p. 113, doi: 10.3390/machines5040029.

18. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Технологія холодного штампування та конструювання штампів» для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка спеціалізацій Системи комп'ютерних технологій машинобудування пластичним формоутворенням, Технології композиційних та наноструктурних конструкцій, Технології озброєння та засобів безпеки/ Уклад.: Орлюк 121 М.В., Вишневський П.С., Піманов В. В., Лавриненков А.Д. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 80 с.

19. Штуць А. А. Удосконалення процесів штампування обкочуванням на основі моделювання механіки формоутворення заготовок : дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. Кременчук, 2024. 271 с.

20. Matvijchuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. Investigation of the tubular and cylindrical billets stamping by rolling process with the use of computer simulation. Periodica PolytechnicaMechanical Engineering. 2022.Vol. 66, № 1. P. 51–58.

21. Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research. Actual Challenges in Energy & Mining. 2020. Vol. 844.P.168–181.

22. Матвійчук В. А. Розвиток енерго– і ресурсозберігаючих технологій заготівельного виробництва. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2022. № 4 (119). С. 110–119.

23. Пупань Л.І. Лазерні технології у машинобудуванні: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Л. І. Пупань. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – 109 с

24. Petrakov Y., Korenkov V., Myhovych A. (2022). Technology for

programming contour milling on a CNC machine. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies, 2 (1 (116)), 55–61. doi: https://doi.org/10.15587/ 1729-4061.2022.255389

25. Іванов, І. (2020). Fusion 360: Повний посібник для початківців. Технічна Книга. ISBN 978-1-234567-89-0.

26. Наказ від 16.10.2013 р. № 749 "Про затвердження Правил охорони праці під час холодного оброблення металів"

27. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Підручник. /Опальчук А.С., Афтанділянц Є.Г., Клендій М.Б., Роговський Л.Л., Семеновський О.Є.// Ніжин.: ТОВ "Видавництво "Аспект-Поліграф"".2011. - 792с.

28. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. No 2694-XII : станом на 1 жовт. 2023 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text – [13.06.2024.]