

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)
Моделювання об'єкту типу «шків» для верстата з ЧПК з використанням
комп'ютерно-інтегрованих технологій
(тема)

Виконав студент 4 курсу,
групи АКТАКІТ-20-3
Замковий Андрій Владиславович
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва напрямку)

Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. КІТАР Бронніков А.І.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

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

22.06.2024

Замковий А. В.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав.кафедри _____
(підпис)

«__» _____ 2024р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові _____ Замковому Андрію Владиславовичу
(шифр і назва)

1. Тема роботи: _____ Моделювання об'єкту типу «шків» для верстата з ЧПК з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій

Затверджена наказом університету від _____ 03.06.2024 №544Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 25.06.2024р.

3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Деталь типу «шків»; 3.2 3д-модель;

3.3 Програма для моделювання роботи верстатів з чисельним керуванням;

3.4 Діаметр не більше 90 мм, кількість зубців не більше 60, діаметр вала не більше 30 мм

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз

Індустрія 4.0 та 5.0 у сучасному світі; 4.3 Аналіз сучасних комп'ютерно-інтегрованих технологій; 4.4 Аналіз основних характеристик моделювання;

4.5 Аналіз деталей типу «шків» та їх застосування; 4.6 Обґрунтування та вибір матеріалів для виготовлення деталі типу «шків»; 4.7 Розрахунок

механічних параметрів деталі типу «шків»; 4.8 Розрахунок динамічних параметрів деталі типу «шків»; 4.9 Обґрунтування та вибір середовища

моделювання; 4.10 Розробка 3D-моделі деталі типу «шків»; 4.11 Розрахунок стійкості системи; 4.12 Вибір станка з ЧПК; 4.13 Структура G-coda;

4.14 Розробка програми для 3D друку деталі; 4.15 Моделювання процесу 3D друку деталі на станку; 4.16 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(*.ppt) формату А4 –15 сторінок.

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	Аналіз літератури за темою	18.04.2024-26.04.2024	виконано
2	Обґрунтування та вибір матеріалів для виготовлення деталі типу «шків»	27.04.2024-29.04.2024	виконано
3	Розрахунок механічних параметрів деталі типу «шків»	30.04.2024-01.05.2024	виконано
4	Розрахунок динамічних параметрів деталі типу «шків»	02.05.2024-05.05.2024	виконано
5	Обґрунтування та вибір середовища моделювання	06.05.2024-08.05.2024	виконано
6	Розробка 3D-моделі деталі типу «шків»	09.05.2024-12.05.2024	виконано
7	Розрахунок стійкості системи	13.05.2024-14.05.2024	виконано
8	Вибір станка з ЧПК	15.05.2024-17.05.2024	виконано
9	Структура G-coda	18.05.2024-22.05.2024	виконано
10	Розробка програми для 3D друку деталі	23.05.2024-28.05.2024	виконано
11	Моделювання процесу 3D друку деталі на станку	29.05.2024-04.06.2024	виконано

Дата видачі завдання 3 червня 2024р.

Студент _____ Замковий А.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ Бронніков А.І.
(підпис) (прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 56 с., 6 табл., 21 рис., 1 дод., 11 джерел.

3D МОДЕЛЬ, ШКІВ, ЧПК ВЕРСТАТ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ІНДУСТРІЯ 5.0, G-КОД, 3D ДРУК, ІНДУСТРІЯ 4.0.

Мета роботи – створення тривимірної моделі і розробка процесу виготовлення деталі типу шків за допомогою комп'ютерно інтегрованих технологій, що може бути використано на верстатах з числовим програмним керуванням(ЧПК).

Об'єкт роботи – моделювання об'єкту типу "шків" для верстата з ЧПК з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Предмет роботи – технології та процеси в машинобудуванні та робототехніці.

В даній кваліфікаційній роботі проаналізовано індустрію 4.0 та 5.0 у сучасному світі та сучасні комп'ютерно-інтегровані технології. Проведено аналіз основних характеристик моделювання та аналіз деталей типу «шків» та їх застосування. Проведено обґрунтування та вибір матеріалів для виготовлення деталі типу «шків». Проведено розрахунок механічних та динамічних параметрів деталі типу «шків». Проведено обґрунтування та вибір середовища моделювання. Розроблено 3D-модель деталі типу «шків». Проведено розрахунок стійкості системи. Проведено вибір станка з ЧПК. Розроблено структура G-coda. Розроблено програму для 3D друку деталі та змодельовано процес 3D друку деталі на станку.

ABSTRACT

Explanatory note: 56 pages, 6 tables, 21 figures, 1 app, 11 sources.

3D MODEL, PULLEY, CNC MACHINE, COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES, INDUSTRY 5.0, G-CODE, 3D PRINTING, INDUSTRY 4.0.

The purpose of the work is to develop a 3D model of a pulley-type object for modeling the work process of a CNC machine tool.

The object of the work is the modeling of a "pulley" type object for a CNC machine tool using computer-integrated technologies.

The subject of work is technologies and processes in mechanical engineering and robotics.

Industry 4.0 and 5.0 in the modern world and modern computer-integrated technologies are analyzed in this qualification work. An analysis of the main characteristics of modeling and analysis of "pulley" type details and their application was carried out. The justification and selection of materials for the manufacture of the "pulley" type part was carried out. The mechanical and dynamic parameters of the "pulley" type part were calculated. The justification and selection of the simulation environment was carried out. A 3D model of a "pulley" type part was developed. The stability of the system was calculated. A CNC machine was selected. The G-coda structure has been developed. A program for 3D printing of a part was developed and the process of 3D printing of a part on a machine was simulated.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	8
Вступ.....	9
1 Аналіз літератури за темою.....	11
1.1 Індустрія 4.0 та 5.0 у сучасному світі	11
1.2 Сучасні комп'ютерно-інтегровані технології.....	13
1.3 Аналіз основних характеристик моделювання	15
1.4 Аналіз деталей типу «шків» та їх застосування.....	16
2 Розробка 3D моделі деталі типу «шків»	18
2.1 Обґрунтування та вибір матеріалів для виготовлення деталі типу «шків».....	18
2.2 Розрахунок механічних параметрів деталі типу «шків»	19
2.3 Розрахунок динамічних параметрів деталі типу «шків»	21
2.4 Обґрунтування та вибір середовища моделювання	22
2.5 Розробка 3D-моделі деталі типу «шків».....	25
2.6 Розрахунок стійкості системи.....	33
3 Моделювання 3D друку деталі на станку з ЧПК	36
3.1 Вибір станка з ЧПК.....	36
3.2 Структура G-coda	39
3.3 Розробка програми для 3D друку деталі.....	42
3.4 Моделювання процесу 3D друку деталі на станку.....	47
3.5 Охорона праці.....	51
Висновки	54
Перелік джерел посилання	55
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	57

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЧПК – числове програмне керування;

ADAM – Atomic Diffusion Additive Manufacturing.

AI – штучний інтелект;

CAD – комп'ютерне проектування;

CAM – комп'ютерне виробництво;

CIM – сучасні комп'ютерно-інтегровані технології;

DMLS – лазерне наплавлення;

EBM – електронно-променеве плавлення;

IoT – інтернет речей;

MES – системи управління виробничими процесами;

ML – машинне навчання;

SLM – селективне лазерне плавлення;

ВСТУП

Моделювання об'єкту типу шків для верстата з числовим програмним керуванням(ЧПК) з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій є важливим етапом в проектуванні та виробництві сучасних верстатів. Моделювання дозволяє точно відтворити геометрію шківів та його функціональні характеристики, що забезпечує високу якість та ефективність роботи верстата з ЧПК. Застосування комп'ютерно-інтегрованих технологій дозволяє швидше та ефективніше створювати та оптимізувати конструкцію шківів, що зменшує час і витрати на виробництво.

Моделювання дозволяє інженерам експериментувати з різними варіантами дизайну та функціональністю шківів, щоб забезпечити оптимальні параметри для конкретних завдань верстата. Використання комп'ютерно-інтегрованих технологій дозволяє виявити та усунути потенційні проблеми ще на етапі проектування, що зменшує ризик виникнення дефектів під час виробництва та експлуатації верстата.

Мета роботи – створення тривимірної моделі і розробка процесу виготовлення деталі типу шківів за допомогою комп'ютерно інтегрованих технологій, що може бути використано на верстатах з числовим програмним керуванням(ЧПК).

Об'єкт роботи – моделювання об'єкту типу "шків" для верстата з ЧПК з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Предмет роботи – технології та процеси в машинобудуванні та робототехніці.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз літератури за темою;
- провести обґрунтування та вибір матеріалів для виготовлення деталі типу «шків»;

- провести розрахунок механічних параметрів деталі типу «шків»;
- провести розрахунок динамічних параметрів деталі типу «шків»;
- провести обґрунтування та вибір середовища моделювання;
- розробити 3D-моделі деталі типу «шків»;
- провести розрахунок стійкості системи;
- провести вибір станка з ЧПК;
- розробити структуру G-coda;
- розробити програми для 3D друку деталі;
- провести моделювання процесу 3D друку деталі на станку.

Дана кваліфікаційна робота була виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1], а також, керуючись навчальним посібником з дипломного проекту [2] та методичними вказівками [3].

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ

1.1 Індустрія 4.0 та 5.0 у сучасному світі

Індустрія 4.0, також відома як Четверта промислова революція, розпочалася в середині 2010-х років. Її ключовими елементами стали інтеграція кіберфізичних систем, інтернету речей (IoT), великих даних та штучного інтелекту в виробничі процеси. Основна ідея полягає в тому, щоб створити "розумні фабрики", де машини, системи і люди взаємодіють у реальному часі. Завдяки цьому підприємства можуть досягати вищої продуктивності, знижувати витрати та підвищувати якість продукції.

Однією з ключових технологій Індустрії 4.0 є Інтернет речей (IoT), який дозволяє з'єднувати різні пристрої в єдину мережу. Інша важлива технологія – великі дані (Big Data), що дозволяє аналізувати величезні обсяги інформації для прийняття більш обґрунтованих рішень. Штучний інтелект (AI) та машинне навчання (ML) забезпечують автоматизацію та оптимізацію виробничих процесів. Доповнена та віртуальна реальність (AR/VR) використовуються для навчання персоналу та моделювання виробничих ліній.

Впровадження Індустрії 4.0 приносить значні переваги, такі як підвищення ефективності, зниження витрат, швидша адаптація до змін ринку та покращення якості продукції. Однак існують і виклики, серед яких – висока вартість впровадження нових технологій, необхідність у підготовці кваліфікованих кадрів та загроза кібербезпеці [4].

Індустрія 5.0, яка наразі перебуває на стадії концептуалізації та раннього впровадження, акцентує увагу на співпраці між людьми та роботами. Мета полягає в тому, щоб використати технології для покращення якості життя людей, створення персоналізованих продуктів та послуг, а

також для забезпечення сталого розвитку. Індустрія 5.0 спрямована на гармонізацію технологічних інновацій з потребами людства.

В Індустрії 5.0 велика увага приділяється роботам-співробітникам (cobots), які працюють поруч із людьми, доповнюючи їхні можливості. Також важливу роль відіграють технології штучного інтелекту, які дозволяють створювати індивідуалізовані рішення та продукти. Індустрія 5.0 активно впроваджує концепції сталого розвитку, використовуючи зелений енергетичний потенціал та переробку ресурсів.

Індустрія 5.0 обіцяє суттєві соціальні та економічні зміни. По-перше, вона сприятиме створенню нових робочих місць, орієнтованих на високі технології та творчі професії. По-друге, вона може значно покращити якість життя, завдяки більш екологічним та індивідуалізованим продуктам і послугам. Однак, для цього необхідно буде адаптувати системи освіти, щоб підготувати працівників до нових викликів [5].

Проведемо порівняльний аналіз цих двох концепцій та виділимо переваги та недоліки кожної з них, представимо у вигляді таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0

Критерій	Індустрія 4.0	Індустрія 5.0
1	2	3
Основна концепція	Автоматизація та інтеграція кіберфізичних систем	Співпраця людей і роботів, орієнтація на індивідуалізацію та сталий розвиток
Технології	Інтернет речей (ІоТ), великі дані, штучний інтелект (АІ), автоматизація, AR/VR	Роботи-співробітники (cobots), АІ для індивідуалізації, зелена енергетика
Переваги	Підвищення ефективності, зниження витрат, покращення якості продукції	Підвищення якості життя, створення індивідуалізованих продуктів, сталість розвитку

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
Недоліки	Висока вартість впровадження, потреба у кваліфікованих кадрах, кібербезпека	Необхідність адаптації системи освіти, високі початкові витрати на впровадження нових технологій
Економічні наслідки	Зниження витрат на виробництво, підвищення продуктивності, можливе скорочення робочих місць	Створення нових робочих місць у сфері високих технологій та творчих професій
Соціальні наслідки	Можливе зменшення кількості робочих місць через автоматизацію	Підвищення якості життя, персоналізовані продукти та послуги, сприяння сталому розвитку
Фокус на людину	Мінімальний, акцент на автоматизацію процесів	Максимальний, акцент на співпраці з роботами та покращенні якості життя

Таким чином, Індустрія 4.0 та Індустрія 5.0 представляють різні підходи до розвитку промисловості. Індустрія 4.0 орієнтована на автоматизацію та ефективність, у той час як Індустрія 5.0 зосереджена на співпраці між людьми і технологіями, персоналізації та сталому розвитку [6].

1.2 Сучасні комп'ютерно-інтегровані технології

Сучасні комп'ютерно-інтегровані технології (СІМ) є підходом до виробництва, який використовує комп'ютерні системи для контролю та управління всіма аспектами виробничого процесу. Вони охоплюють широкий

спектр технологій і методів, включаючи автоматизацію, робототехніку, комп'ютерне проектування (CAD), комп'ютерне виробництво (CAM), системи управління виробничими процесами (MES) та інші.

Комп'ютерне проектування (CAD) і комп'ютерне виробництво (CAM) є одними з основних компонентів СІМ. CAD використовується для створення детальних тривимірних моделей виробів, що дозволяє інженерам проектувати та тестувати продукти на етапі розробки. CAM, в свою чергу, використовує ці моделі для автоматизації виробничих процесів, таких як токарська обробка, фрезерування та інші.

Автоматизація та робототехніка відіграють ключову роль у СІМ. Сучасні робототехнічні системи можуть виконувати складні завдання з високою точністю і швидкістю. Автоматизовані виробничі лінії забезпечують безперервне виробництво без втручання людини, що підвищує продуктивність і знижує витрати. Системи управління виробничими процесами (MES) забезпечують інтеграцію всіх етапів виробництва, від планування і контролю за матеріальними потоками до управління якістю і збору даних. MES забезпечують реальний час контроль над виробничими процесами, дозволяючи оперативно реагувати на відхилення та оптимізувати виробництво.

Інтернет речей (IoT) та великі дані є важливими складовими СІМ. IoT дозволяє підключати різні виробничі пристрої та системи до мережі, забезпечуючи обмін даними в реальному часі. Аналіз великих даних допомагає оптимізувати виробничі процеси, передбачати несправності обладнання та підвищувати ефективність використання ресурсів. Впровадження СІМ дозволяє значно підвищити ефективність виробництва, знизити витрати, скоротити час на розробку і випуск нових продуктів. Комп'ютерно-інтегровані технології також сприяють покращенню якості продукції завдяки точному контролю всіх етапів виробничого процесу. СІМ

забезпечує гнучкість виробництва, що дозволяє швидко адаптуватися до змін на ринку та задовольняти індивідуальні потреби клієнтів.

Незважаючи на значні переваги, впровадження СІМ пов'язане з певними вимогами, такими як високі початкові інвестиції, потреба в кваліфікованих кадрах та забезпечення кібербезпеки. У майбутньому розвиток СІМ буде тісно пов'язаний з подальшою інтеграцією штучного інтелекту, машинного навчання та інших передових технологій, що дозволить ще більше підвищити ефективність і гнучкість виробничих процесів [7].

1.3 Аналіз основних характеристик моделювання

3D моделювання для створення моделі об'єкта типу «шків» для верстата з ЧПК є критично важливим етапом в процесі виробництва. Основні характеристики цього процесу включають точність моделювання, розмірну стабільність та здатність до візуалізації складних геометричних форм. Точність моделювання важлива для забезпечення правильної взаємодії з іншими компонентами верстата і точності обробки.

Розмірна стабільність передбачає, що модель «шківа» повинна бути створена з урахуванням вимог точності, щоб уникнути будь-яких деформацій чи змін у розмірі під час виробничого процесу. Це досягається завдяки використанню відповідних інструментів для моделювання і перевірки відповідності.

Здатність до візуалізації дозволяє інженерам і проектувальникам отримувати чітке уявлення про кінцевий вигляд «шківа» ще до його фізичного виготовлення. Це дозволяє виявляти і виправляти потенційні проблеми ще на етапі проектування, що зменшує витрати та час виробництва.

Комп'ютерно-інтегровані технології (САПР) використовуються для автоматизації процесу моделювання, що сприяє підвищенню продуктивності і зменшенню ймовірності помилок. Вони включають у себе різноманітні інструменти для створення, редагування та аналізу геометричних форм, що робить процес моделювання більш ефективним і точним.

Для моделювання «шківа» для верстата з ЧПК часто використовуються технології CAD/CAM, які дозволяють не лише створювати 3D модель, а й автоматично генерувати дані для ЧПК для подальшого виготовлення. Це включає в себе налаштування шляхів інструментів та стратегій обробки.

Інтеграція виробничих процесів у САПР дозволяє здійснювати безпосереднє взаємодію з системами ЧПК і автоматизувати передачу даних між програмами. Це сприяє збереженню єдиної точки дефініції «шківа» протягом всіх етапів виробничого циклу.

Узагальнюючи, 3D моделювання об'єкту типу «шків» для верстата з ЧПК вимагає високої точності, розмірної стабільності, здатності до візуалізації та використання комп'ютерно-інтегрованих технологій для ефективного проектування та виробництва [8].

1.4 Аналіз деталей типу «шків» та їх застосування

Деталі типу «шків» відіграють важливу роль у роботі верстатів з ЧПК, забезпечуючи передачу руху і зміну швидкостей в процесі обробки матеріалів. Шківи зазвичай є циліндричними чи конічними деталями, з отвором по центру для встановлення на вал верстата. Вони забезпечують передачу обертового руху від одного механізму до іншого через ремені, ланцюги або інші трансмісійні елементи [9].

Основні застосування шківів включають виробництво настільних верстатів, промислових станків, транспортних засобів і механічних установок. Вони часто використовуються для регулювання швидкості

обертання робочих інструментів або деталей, що обробляються, забезпечуючи оптимальні умови для обробки різних матеріалів і форм.

Різновиди шківів включають плоскі, ступеневі і зубчасті моделі, кожна з яких має власні переваги залежно від конкретних потреб виробництва. Наприклад, зубчасті шківви забезпечують більш точну передачу обертального моменту і використовуються у високоточних механізмах, тоді як ступеневі шківви дозволяють легко змінювати швидкість обертання в залежності від потреб процесу.

Шківви можуть бути виготовлені з різних матеріалів, таких як метал, пластик або композитні матеріали, залежно від вимог до міцності, зносостійкості і експлуатаційних умов. Наприклад, для високозавантажених верстатів з ЧПК використовуються сталеві або алюмінієві шківви, що забезпечують довговічність і надійність.

Проектування шківів включає в себе не лише вибір матеріалів і форми, але і розрахунки щодо міцності, термічної стійкості і сумісності з іншими елементами механізму. Це важливо для забезпечення безперебійної роботи верстата з ЧПК і зменшення ймовірності відмови під час експлуатації.

Узагальнюючи, шківви є невід'ємною частиною трансмісійних систем верстатів з ЧПК, які використовуються для передачі руху і зміни швидкостей в різних промислових та виробничих застосуваннях. Їх різноманітність і властивості дозволяють ефективно використовувати верстати для виробництва різноманітних деталей і виробів [10].

2 РОЗРОБКА 3D МОДЕЛІ ДЕТАЛІ ТИПУ «ШКІВ»

2.1 Обґрунтування та вибір матеріалів для виготовлення деталі типу «шків»

Для порівняльного аналізу різноманітних матеріалів для виготовлення деталі типу шків для станку ЧПК, розглянемо такі параметри як міцність, маса, теплопровідність та вартість. Порівняльний аналіз представлено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння матеріалів для виготовлення деталі типу «шків»

Матеріал	Міцність (МПа)	Маса (г/см ³)	Теплопровідність (Вт/(м·К))	Вартість (\$) за кілограм
Сталь	250 – 700	7,8 – 8,05	50 – 60	1,5 – 3,5
Алюміній	100 – 350	2,7	200 – 250	2 – 6
Нейлон	40 – 80	1,12 – 1,14	0,25 – 0,35	5 – 10
Дерево	Залежить від виду та обробки	0,4 – 1,2	0,08 – 0,2	0,5 – 3
Пластик	50 – 150	0,8 – 2,2	0,15 – 0,5	2 – 10

Перехресний аналіз даних матеріалів для виготовлення деталі типу шків для станку ЧПК дає можливість оцінити кожен матеріал з різних перспектив, що допомагає визначити найбільш підходящий варіант для конкретного додатку. Сталь має значно вищу межу міцності порівняно з іншими матеріалами, такими як нейлон, дерево або пластик. Це робить сталь відмінним вибором для деталей, які піддаються великим механічним навантаженням. Алюміній та пластик мають найнижчу масу серед усіх

розглянутих матеріалів, що може бути важливим для додатків, де важлива легкість конструкції та зниження маси верстату. Алюміній має найкращі теплопровідні властивості серед розглянутих матеріалів. Це може бути важливо для шківів, які використовуються в умовах високих температур або потребують ефективного відведення тепла. Дерево та пластик можуть бути вигідними з точки зору вартості порівняно з металами, але сталь, зазвичай, має більш прийнятну вартість порівняно з алюмінієм.

Отже, на основі проведеного аналізу даних матеріалів для виготовлення деталі типу шків для станку ЧПК можна визначити, що сталь виявляється кращим вибором. Вона має високу міцність, прийнятну вартість та можливість витримувати великі механічні навантаження, що робить її ідеальним матеріалом для таких деталей.

2.2 Розрахунок механічних параметрів деталі типу «шків»

Розрахунок механічних параметрів шківів, таких як момент інерції, напруження, деформації, тощо допоможе визначити оптимальні параметри конструкції шківів для забезпечення його надійності та ефективності під час роботи на верстаті з ЧПК.

Сталеві шківів добре витримують великі механічні навантаження та мають високу зносостійкість. Вони підходять для використання в умовах високого тиску та тертя, а також мають достатню термічну стійкість. Алюмінієві шківів мають високу міцність при малій вазі, що дозволяє зменшити масу верстату та підвищити його динаміку. Вони також мають хорошу теплопровідність, що важливо для відведення тепла від ріжучого інструменту. Далі проведемо приклад розрахунку механічних характеристик шківів для обраних можливих матеріалів. Спочатку визначимо основні параметри матеріалів, такі як модуль пружності (E) та межа міцності (σ). Модуль пружності для більшості видів сталі дорівнює приблизно

200 ГПа. Межа міцності сталі може бути в діапазоні від 250 МПа до 700 МПа.

Тепер, коли у нас є ці значення, ми можемо розрахувати механічні характеристики шківа, такі як момент інерції та напруження. Припустимо, що шків має циліндричну форму та рівномірно розподілений матеріал.

Момент інерції (I) для даної деталі можна розрахувати за формулою:

$$I = 64\pi \cdot (D^4 - d^4), \quad (2.1)$$

де D – зовнішній діаметр;

d – внутрішній діаметр.

$$I = 64\pi \times (86^4 - 80^4).$$

Після проведених розрахунків отримуємо, що $I \approx 3,696 \times 10^6$ мм⁴. Напруження можна розрахувати за допомогою формули Гюлера-Мора:

$$\sigma = IM \cdot c, \quad (2.2)$$

де M – момент прикладеної сили;

c – відстань від центру до зовнішньої або внутрішньої поверхні.

Припустимо, що на шків діє момент сили, який викликає напруження в матеріалі. Нехай цей момент $M = 100$ Нм, а відстань від центру до зовнішньої поверхні $c = 2/D = 86/2 = 43$ мм.

$$\sigma = IM \cdot c / I, \quad (2.3)$$

Після проведених розрахунків отримуємо, що $\sigma \approx 1,156$ МПа.

Таким чином, напруження в матеріалі шківів зі сталі за заданими параметрами становить приблизно 1,156 МПа при прикладеному моменті сили 100 Нм. Це значення може бути порівняно з межею міцності матеріалу, щоб забезпечити безпеку та надійність шківів під час експлуатації.

2.3 Розрахунок динамічних параметрів деталі типу «шків»

Для проведення приблизного розрахунку динамічних параметрів системи для деталі масою 0,5 кг, яка є частиною шківів для станку ЧПК, можемо розглянути основні параметри, такі як момент інерції та частота коливань. Момент інерції деталі можна розрахувати як:

$$I = m \cdot r^2 \quad (2.4)$$

де m – маса деталі;

r – радіус, який можна вважати за половину зовнішнього діаметра шківів.

При $m = 0,5$ кг та $r = 86 / 2 = 43 = 0,043$ м, отримаємо:

$$I = 0,5 \cdot (0,043)^2 \approx 0,000932 \text{ кг} \times \text{м}^2$$

Частота коливань системи може бути розрахована за допомогою формули:

$$f = 2\pi \sqrt{1/mk}, \quad (2.5)$$

де k – жорсткість системи.

Зважаючи на те, що в даному випадку ми маємо справу з шківом верстата ЧПК, який має свою власну жорсткість, та що цей розрахунок є

досить спрощеним, важко визначити точну жорсткість k без додаткових вимірювань. Однак, можна вважати, що частота коливань зазвичай буде високою, оскільки шків встановлюється на вертлюжку, і система має низьку амплітуду коливань.

2.4 Обґрунтування та вибір середовища моделювання

В сучасному індустріальному та інженерному середовищі використання програмного забезпечення для моделювання має вирішальне значення для ефективного проектування та автоматизації виробництва. Серед різноманітних доступних інструментів виокремлюються Fusion 360, SolidWorks та CATIA, які відомі своєю потужністю та функціональністю у галузі комп'ютерного моделювання. Проведемо порівняльний аналіз, де розглянемо переваги та недоліки кожного з цих середовищ моделювання з метою обрати зручний та функціональний простір. Представимо порівняльний аналіз трьох середовищ моделювання, включаючи Fusion 360, SolidWorks та AutoCAD, за такими параметрами, як доступність, потужність функцій, вартість та хмарна інтеграція, представимо дане порівняння у вигляді таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняльний аналіз різноманітних середовищ моделювання

Параметр	Fusion 360	SolidWorks	AutoCAD
1	2	3	4
Доступність	Онлайн, з можливістю безкоштовного використання	Ліцензійна	Ліцензійна

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4
Потужність функцій	Інтегроване середовище, включаючи CAD, CAM та CAE	Широкий спектр функцій для складного моделювання та інженерної аналітики	Основне для 2D-моделювання та креслення, обмежений у 3D
Вартість	Підписна модель, доступні різні плани підписки	Висока вартість ліцензії, можливість придбання окремих модулів	Висока вартість ліцензії, можливість придбання окремих модулів
Хмарна інтеграція	Є, дозволяє зберігати та спільно працювати над проектами	Немає, але можливе обмін файлами через інші хмарні сервіси	Немає, але можливе обмін файлами через інші хмарні сервіси

Fusion 360 вражає своєю універсальністю та доступністю для широкого кола користувачів. Він поєднує в собі можливості комп'ютерного моделювання, САМ-програмування та обробки в одному інтегрованому середовищі. Перевагою Fusion 360 є його хмарна база, що дозволяє користувачам легко зберігати та спільно працювати над проектами. Крім того, Fusion 360 має широкий набір інструментів для створення складних та органічних форм, що робить його ідеальним вибором для дизайнерів інноваційних продуктів. Однак, недоліками Fusion 360 є його підписна модель, що може бути не доступною для деяких користувачів, а також менша стійкість до обробки великих об'ємів даних порівняно з деякими іншими САД-програмами.

SolidWorks відомий своєю потужністю та широким спектром функцій, що дозволяють інженерам моделювати навіть найскладніші об'єкти. Його інтуїтивний інтерфейс та широкий вибір інструментів роблять його дуже популярним серед професіоналів. SolidWorks дозволяє проводити детальну інженерну аналітику, включаючи механічні, теплові та динамічні аналізи. Однак, його висока вартість та потреба в потужних комп'ютерах можуть бути перешкодою для малих компаній або початківців.

AutoCAD відомий своєю простотою та універсальністю. Він є стандартом в індустрії для 2D-моделювання та креслення. AutoCAD надає користувачам широкий спектр інструментів для створення різних типів креслень, від архітектурних до механічних. Його найбільшою перевагою є доступність та простота використання. Проте, у порівнянні з Fusion 360 та SolidWorks, AutoCAD обмежений у можливостях тривимірного моделювання та інженерних аналізів.

Після проведеного аналізу, можна виділити, що Fusion 360 є кращим вибором завдяки своїй універсальності, потужності та доступності. Його інтегроване середовище об'єднує CAD, CAM та CAE, що робить його ідеальним інструментом для повного циклу проектування та виробництва. Завдяки хмарній інтеграції, Fusion 360 дозволяє користувачам зберігати та спільно працювати над проектами в реальному часі, що спрощує співпрацю команди та забезпечує постійний доступ до даних. Крім того, Fusion 360 пропонує різні плани підписки, включаючи безкоштовний варіант для стартапів та освітніх закладів, що робить його доступним для широкого кола користувачів. Його широкий набір інструментів для моделювання, аналізу та виробництва дозволяє забезпечити високу якість та ефективність проектів будь-якої складності. Таким чином, Fusion 360 відзначається не лише своєю потужністю, але й гнучкістю, доступністю та можливістю ефективно працювати над проектами будь-де і будь-коли.

2.5 Розробка 3D-моделі деталі типу «шків»

Моделювання деталі типу шків має критичне значення для проєктування надійних та довговічних механічних та автоматизованих систем. Точна 3D-модель дозволяє виконувати різноманітні аналізи, включаючи стрес-аналіз, динамічне моделювання та симуляції зносу. Це, в свою чергу, забезпечує можливість оптимізації дизайну та попередження потенційних збоїв у роботі. 3D-модель шківа, яка змодельована в Fusion360 має наступні характеристики, які представлені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Характеристики шківа

Назва характеристики	Значення
Зовнішній діаметр	86 мм
Внутрішній діаметр	80 мм
Діаметр вала	24 мм
Діаметр отвору	14 мм
Ширина обмежувальних обідків	2 мм
Профіль зубців	Напівкруглий M5
Кількість зубців	52
Крок	5 мм
Профіль ременя	HTD5M
Ширина ременя	20 мм
Кількість отворів для кріплення	2
Діаметр отворів	4 мм
Різьба	M4 x 0,7

За даними характеристиками, можна сказати, що змодельований шків представляє собою зубчасте колесо для ременів HTD5M з шириною до 20 мм та посадковим отвором 14 мм, яке дозволяє закріпити його на осі двигуна.

Дані зубці забезпечують надійне зчеплення з ременем та рівномірний розподіл навантаження на кожному зубчику, що підвищує як потужність ремінного приводу, так і швидкість його надійної роботи. Для додаткової фіксації на шківі було змодельовано бічні обмежувальні обідки.

Креслення змодельованого шківу збоку, представлено на рисунку 2.1, де представлено й габаритні розміри деталі.

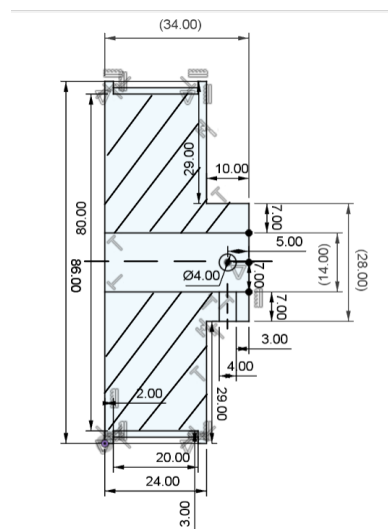


Рисунок 2.1 – Креслення шківу

На рисунку 2.2 представлено всі етапи рішень, які були використані для проектування шківів. Опис всіх етапів пропасний нижче.



Рисунок 2.2 – Етапи моделювання

Першим кроком при моделюванні шківів було спроектовано зубчасту різьбу по внутрішньому діаметру ролика. На рисунку 2.3 представлена частина створення двох зубців з кроком 5 мм. Для цього було отримано відрізок від кола та створені декілька кіл з діаметром 3 мм, відрізок між колами становить 1,95 мм і має закруглення на кутах радіусом 0,42 мм. Після

того як рубець був зроблений, його було продубльовано 52 рази командою «Circular Pattern» і в результаті отримуємо коло. Далі було додано коло для створення в майбутньому отвір в шківі.

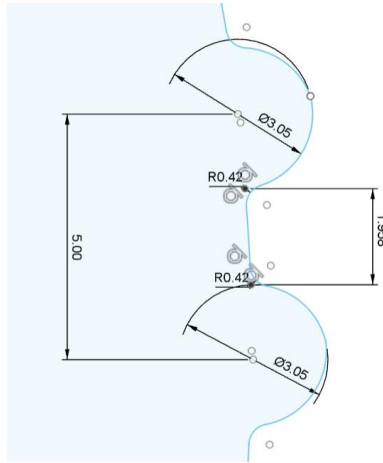


Рисунок 2.3 – Креслення зубця на шківі

Отриманий скетч даного кроку представлено на рисунку 2.4, на якому можна побачити створене коло з 52 зубцями. Для впевненості, що точки на середині колу є закріплені була використана команда «Coincident», яка знаходиться в кладці «Constraints». Ця команда дозволила об'єднати дві точки в одну і зафіксувати на колі. Коли було використано цю команду на ділянці, яка представлена на рисунку 2.3, вона застосувалась до всіх інших. Єдине, що слід враховувати, що з такою кількістю зубців зафіксувати спроектоване поле в просторі немає сенсу, тому даний скетч є незакритим.

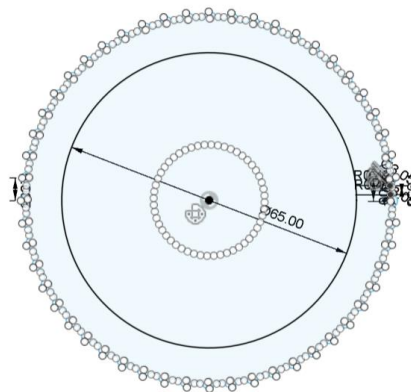
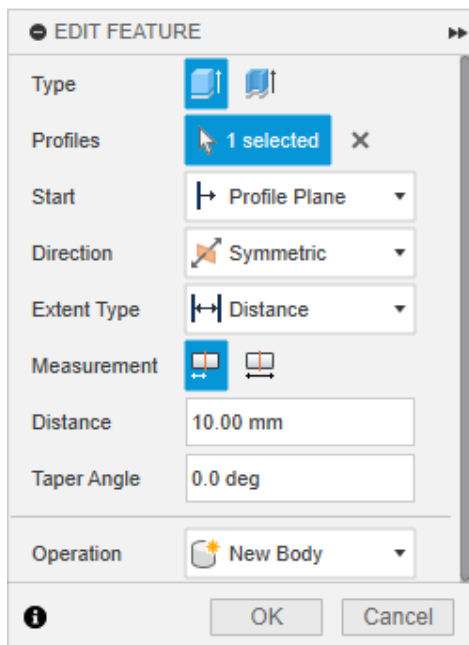


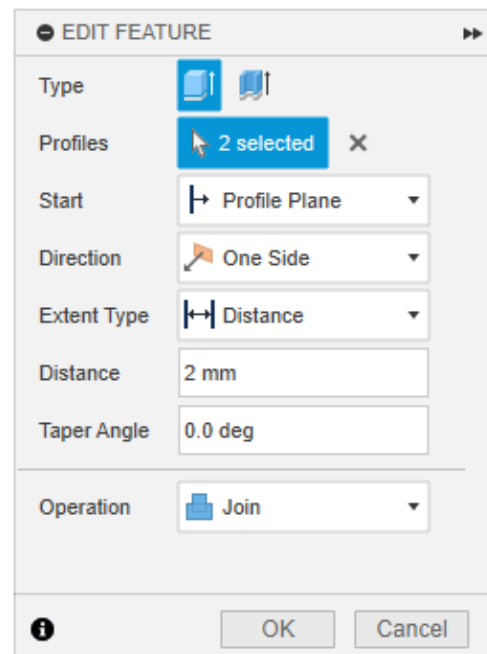
Рисунок 2.4 – Готовий скетч різьби шківу

Другим кроком після створення скетчу є його витягування на 20 мм за допомогою команди «Extrude» для отримання ширини шківів. «Edit Feature» даної команди на цьому етапі представлено на рисунку 2.5, де представлені всі виставлені налаштування, які виконувалися. На рисунку 2.6, а, представлено результат даної команди. Після цього було створено ще два скетча, по обидві сторони вже отриманого кола, в них було створене коло з діаметром 86 мм, яке представляє собою обмежувальні ободки, для запобігання переміщення ремня під час роботи. І так само їх було витягнуто за допомогою команди «Extrude». Отриманий результат представлено на рисунку 2.6, б.

З рисунку 2.5 можна побачити, що при витягуванні колеса з зубцями використовувалось направлення симетричне, це зроблене для того щоб створювана модель була в центрі осі координат.



а)

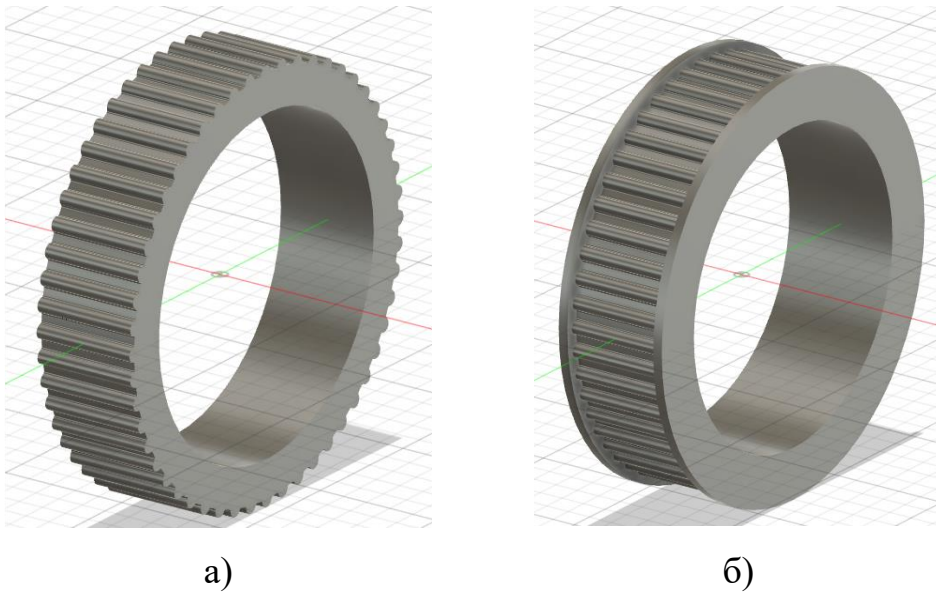


б)

а) Edit Feature для кола з зубцями;

б) Edit Feature для обмежувальних ободків

Рисунок 2.5 – Edit Feature команди «Extrude»



а) отримана ширина ремня; б) колесо шківів з бортиками

Рисунок 2.6 – Готове колесо шківів

Наступним кроком було моделювання валу. Спочатку було спроектовано частина валу, яка з'єднувалася з колесом за допомогою чотирьох частин, скетч даного рішення представлено на рисунку 2.7.

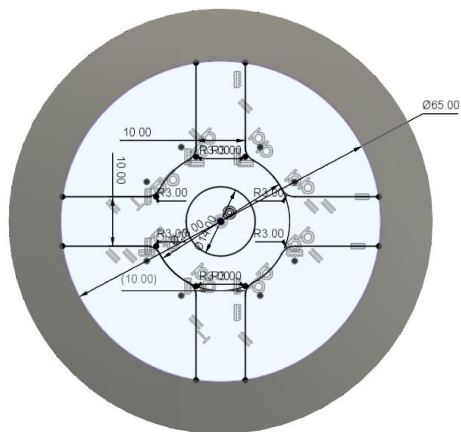


Рисунок 2.7 – Скетч частини валу

Це рішення дозволяє зменшити кількість вмісту матеріалу при виготовленні деталі, що зменшує вартість його виготовлення і при цьому не зменшити надійність самої деталі. Потім даний скетч також було витягнуто як і коло, використовуючи команду «Extrude». Налаштування Edit Feature є

такі самі, як і в рисунку 2.5, а, для того щоб ця частина валу займала повний об'єм колеса шківу.

Використовуючи команду «Fillet» було округлено гострі кути в внутрішній частині колеса, на рисунку 2.8 представлено Edit Feature даної команди, які застосовувались для 8 ребр, які з'єднувались з колесом. Це було зроблено через те, що гострі кути при використанні можуть стати точками концентрації напружень, що може призвести до утворення тріщин або руйнування деталі. На рисунку 2.9 представлено даний етап проектування.

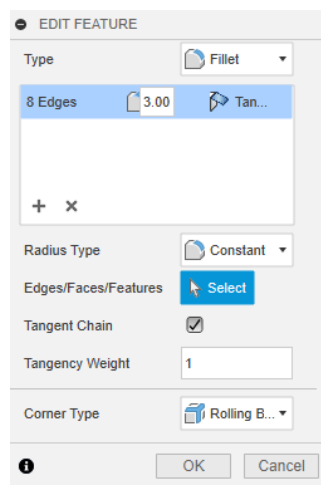


Рисунок 2.8 – Edit Feature команди «Fillet»

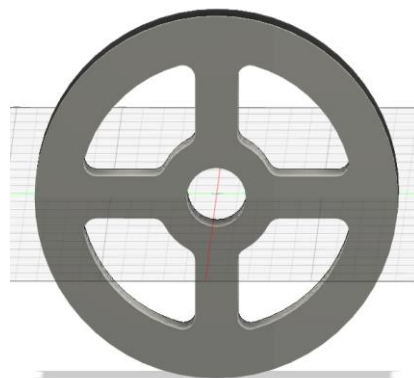


Рисунок 2.9 – Колесо шківу з частиною валу

Після цього було закінчено вал, а саме витягнуто на 10 мм командою «Extrude» від колеса для можливості закріплення його на станку ЧПК. Потім

було змодельований отвір з діаметром 14 мм, який є стандартом для таких станків і використовується для закріплення і майбутньої роботи всього шківу. Довжина даного отвору становить 34 мм. На рисунку 2.10 зображено отриманий шків з валом.

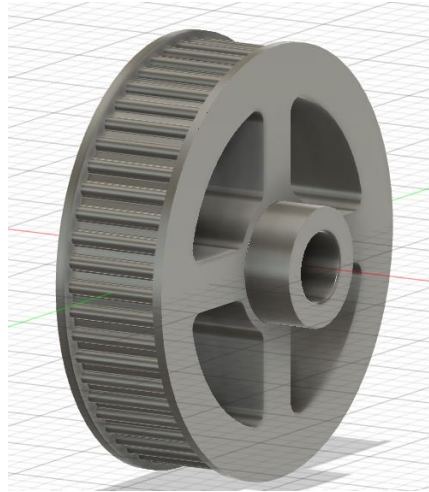
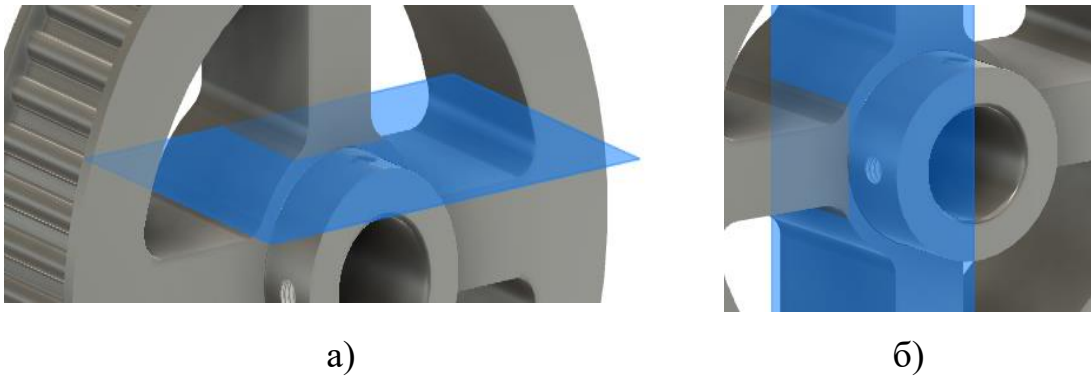


Рисунок 2.10 – Шків з валом

Для фіксації шківa на шпиндель було змодельовано два отвори для закріплюваних гужонів, замість шпонкового пазу в посадковому отворі. Це дозволяє зробити модельований шків більш універсальним. Щоб зробити дані отвори спочатку було створено дві дотичні площини на верхній та боковій частині валу, за допомогою команди «Tangent Plane», яка знаходиться в кладці «Construct». Дана команда дозволяє створювати площину, дотичну до циліндричної поверхні. Створені площини зображені на рисунку 2.11.

Потім зроблені отвори діаметром 4 мм для гвинтів на створених площинах. І останім кроком була створена різьба типу «ISO Metric profile», з позначенням: M4 x 0,7, класом 6H та з правим напрямком, за допомогою команди «Thread» в кладці «Create». На рисунку 2.12 зображений Edit Feature даної команди.



а) створена площина зверху; б) створена площина збоку
Рисунок 2.11 – Створені дотичні площини до циліндру

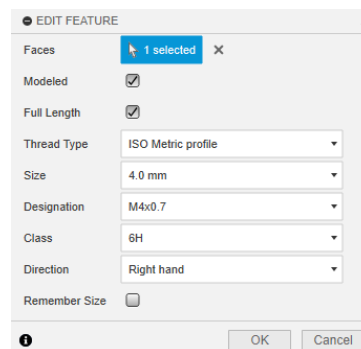
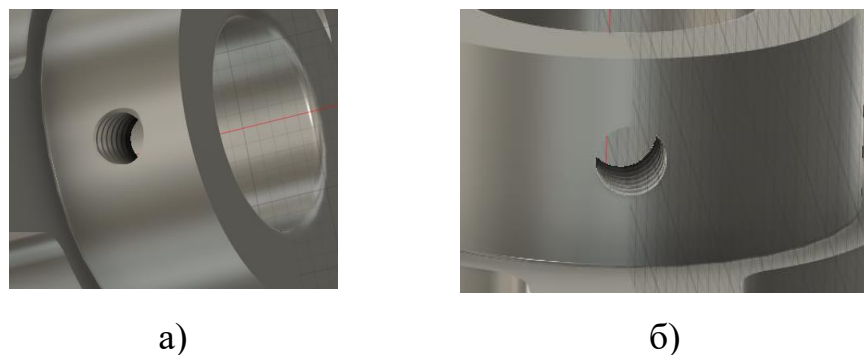


Рисунок 2.12 – Edit Feature команди «Thread»

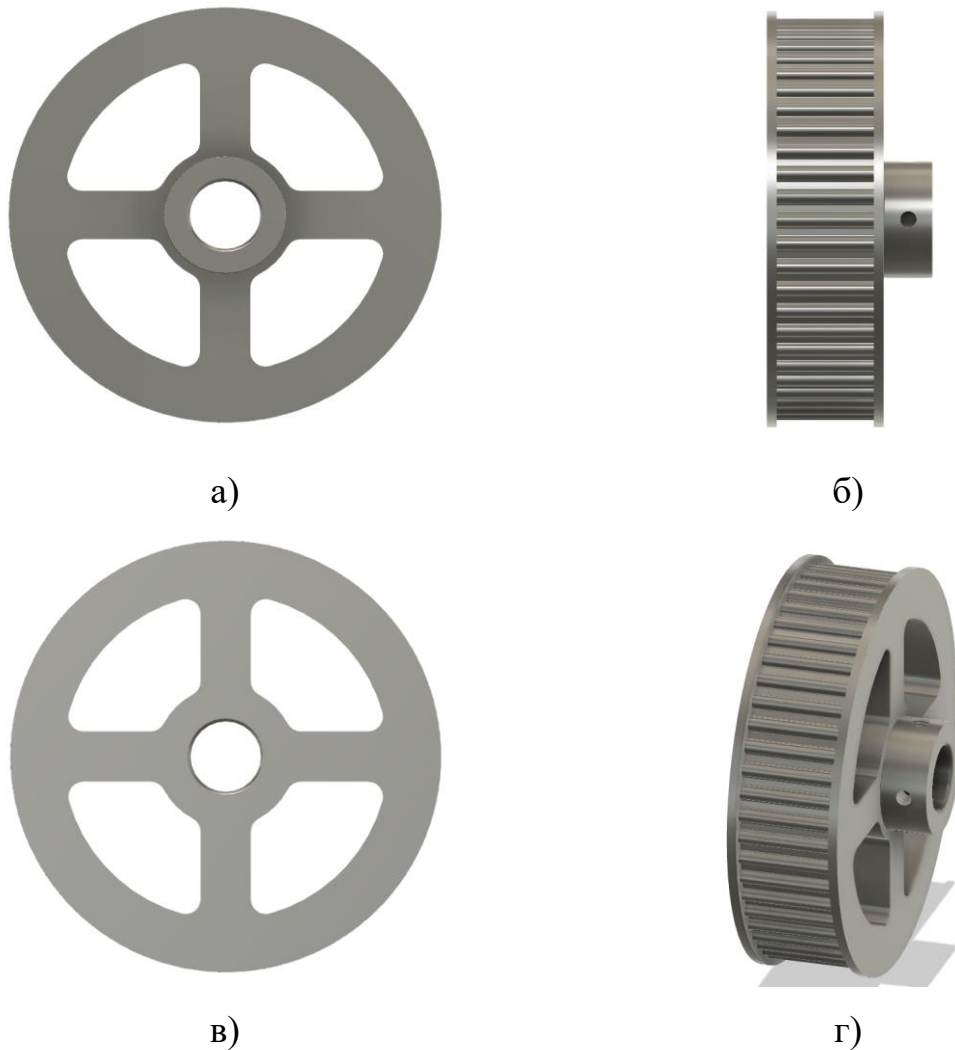
З рисунку 2.12 видно, що різьба зроблена для болтів М4, які використовуються для фіксації. На рисунку 3.13 представлено верхній і боковий фіксуєчий отвір, які були отримані при створенні етапів, які були описані зверху.



а) верхній отвір; б) боковий отвір

Рисунок 2.13 – Спроектвані фіксуєчі отвори

Готовий вид змодельованого шківу з переду, збоку, в діагональ та задньої частини представлено на рисунку 2.14.



а) вид з переду; б) вид збоку; в) вид задньої частини; г) вид з діагоналі

Рисунок 2.14 – Готовий вид змодельованого шківу

2.6 Розрахунок стійкості системи

Для проведення розрахунків стійкості системи з деталлю типу «шків» за принципом Требінгера, необхідно мати детальні дані щодо конфігурації системи, прикладених сил і внутрішніх реакцій. Наведемо загальні кроки та формули для розрахунку. Припустимо, що у нас є «шків», який кріпиться на валу і на нього діють наступні сили і моменти:

F_1, F_2, \dots – сили, що діють на «шків»;

M_1, M_2, \dots – моменти, що діють на «шків»;

R_1, R_2, \dots – сили, що діють на «шків».

Тоді можна визначити умови стійкості таким чином, згідно з принципом Требінгера, сума моментів всіх сил і моментів має дорівнювати нулю:

$$\sum M_i + \sum (r_j \cdot F_j) = 0, \quad (2.6)$$

де M_i – моменти, що створюють прикладені сили;

r_j – радіус-вектор прикладення сили F_j .

Припустимо, що $F_1 = 500$ Н, $F_2 = 300$ Н, $M_1 = 1000$ Нм, а $M_2 = -500$ Нм. Нехай вибіркові реакції дорівнюють $R_A = -800$ Н, $R_B = -700$ Н. Розрахуємо суму моментів:

$$\sum M_i = M_1 + M_2 = 1000 + (-500) = 500 \text{ Нм.}$$

Розрахуємо внутрішні моменти, створені прикладеними силами:

$$\sum (r_j \cdot F_j) = (r_1 \cdot F_1) + (r_2 \cdot F_2). \quad (2.7)$$

Припустимо, що радіус-вектор $r_1 = 0,7$ м і $r_2 = 0,5$ м (це відстані від точки прикладання сил до вісі шківа):

$$(r_1 \cdot F_1) = -0,7 \cdot 500 = -350 \text{ Нм,}$$

$$(r_2 \cdot F_2) = -0,5 \cdot 300 = -150 \text{ Нм,}$$

$$\sum (r_j \cdot F_j) = -350 + (-150) = -500 \text{ Нм,}$$

$$\sum Mi + \sum(rj \cdot Fj) = 500 + (-500) = 0.$$

Так як сума моментів дорівнює нулю, це свідчить про те, що система є стійкою.

3 МОДЕЛЮВАННЯ 3D ДРУКУ ДЕТАЛІ НА СТАНКУ З ЧПК

3.1 Вибір станка з ЧПК

Вибір 3D принтера для друку металом є важливим завданням, яке потребує врахування багатьох аспектів. По-перше, важливо звернути увагу на технологію друку. Існують різні методи, такі як селективне лазерне плавлення (SLM), лазерне наплавлення (DMLS) та електронно-променеве плавлення (EBM). Кожен із них має свої переваги та недоліки, залежно від необхідних характеристик кінцевого продукту. Наприклад, SLM дозволяє отримати високоточні деталі з великою щільністю, але вимагає більш складного обладнання та може бути дорогим. По-друге, слід звернути увагу на матеріали, з якими працює принтер. Різні моделі принтерів підтримують різні типи металів, включаючи нержавіючу сталь, титан, алюміній та інші сплави. Вибір матеріалу залежить від конкретних вимог до механічних властивостей, корозійної стійкості та інших характеристик кінцевого продукту. Наприклад, для медичних імплантатів часто використовують титан, завдяки його біосумісності та міцності. Третій важливий аспект – розмір робочої області принтера. Залежно від розмірів виробів, які планується друкувати, необхідно вибрати принтер з відповідними розмірами платформи. Великі платформи дозволяють друкувати великі деталі або кілька менших одночасно, що може значно підвищити ефективність виробництва. Також варто враховувати точність і якість друку. Висока роздільна здатність і точність позиціонування лазера або електронного променя впливають на якість кінцевого виробу, особливо якщо мова йде про деталі з складною геометрією або вузькими допусками. Технічні характеристики принтера, такі як товщина шару та мінімальний діаметр лазера, допоможуть визначити його здатність відповідати вашим вимогам. Не менш важливою є і програмна

частина. Від програмного забезпечення залежить зручність підготовки моделей до друку, можливості оптимізації структури виробів та підтримка різних форматів файлів. Надійне та зручне у використанні програмне забезпечення може значно полегшити процес друку та зменшити кількість помилок. Також слід враховувати вартість обладнання та витратних матеріалів. 3D принтери для друку металом є досить дорогими, і витрати на обслуговування та матеріали можуть суттєво вплинути на загальні витрати.

Виходячи з габаритних розмірів розробленої моделі 3D деталі типу шків, яка представлена у 2 розділі, в ході аналізу було прийнято рішення використовувати для виробництва наступний верстат з ЧПК, який представлено на рисунку 3.1, а його технічні характеристики приведені в таблиці 3.1.



Рисунок 3.1 – Верстат з ЧПК 3D-друку The Metal X

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики верстату з ЧПК 3D-друку The Metal X

Характеристика	Значення
1	2
Технологія друку	Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM)

Продовження таблиці 3.1

1	2
Робоча область	300 мм x 220 мм x 180 мм
Матеріали для друку	17-4 PH Stainless Steel, H13 Tool Steel, A2 Tool Steel, D2 Tool Steel, Inconel 625, Copper, Titanium Ti-6Al-4V
Діаметр нитки	1,75 мм
Товщина шару	50-125 мікрон
Система керування	Вбудований комп'ютер, сенсорний екран
Підключення	Wi-Fi, Ethernet, USB
Підтримувані формати файлів	STL, MFG, GCode
Підтримка програмного забезпечення	Eiger Software
Джерело живлення	100-240 В, 150 Вт
Максимальна температура екструдера	300 °C
Максимальна температура платформи	150 °C
Точність позиціонування	± 100 мікрон

Вибір системи 3D-друку The Metal X від компанії Markforged для друку розробленої деталі є оптимальним завдяки її передовим технічним характеристикам і широким можливостям. Ця система використовує технологію Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM), що забезпечує високу якість і точність виготовлення металевих виробів. Робоча область розміром 300 мм x 220 мм x 180 мм дозволяє друкувати деталі достатньо великого розміру, що відповідає потребам більшості виробничих завдань. Висока точність позиціонування ± 100 мікрон та товщина шару від 50 мікрон до 125 мікрон гарантують отримання виробів з високою роздільною

здатністю і деталізацією. Використання різних металів, таких як 17-4 PH Stainless Steel, H13 Tool Steel, A2 Tool Steel, D2 Tool Steel, Inconel 625, мідь та титан Ti-6Al-4V, дозволяє обрати матеріал, який найкраще відповідає вимогам міцності та корозійної стійкості. Система підтримує програмне забезпечення Eiger, що забезпечує зручну підготовку моделей до друку та оптимізацію структури виробів. Вбудовані системи фільтрації та вентиляції підвищують безпеку під час роботи. Додатково, компактні габарити 575 мм x 467 мм x 1120 мм і вага 75 кг роблять цю систему зручною для інтеграції в будь-яке виробниче середовище. Завдяки всім цим перевагам, The Metal X є ідеальним вибором для створення високоякісних металевих деталей з різноманітними технічними вимогами.

3.2 Структура G-coda

Використання G-коду для друку деталей є переважним з кількох важливих причин. По-перше, G-код є стандартом у галузі адитивного виробництва та верстатів з ЧПУ, що забезпечує його сумісність із більшістю сучасних 3D-принтерів. Це спрощує інтеграцію обладнання та знижує витрати на перенавчання персоналу, оскільки більшість операторів уже знайомі з цим форматом. По-друге, G-код забезпечує високий рівень контролю над процесом друку, дозволяючи точно налаштувати такі параметри, як швидкість подачі, температура екструдера та швидкість обертання шпинделя. Це особливо важливо для досягнення високої якості друкованих виробів і відповідності строгим вимогам до точності та повторюваності. Крім того, G-код є текстовим форматом, що робить його легким для редагування та налагодження. Це дозволяє інженерам швидко вносити зміни або коригування у процес друку без необхідності використовувати складні програмні інструменти. Також важливою перевагою є його відкритість та прозорість: G-код можна переглянути та

проаналізувати, що спрощує виявлення та виправлення помилок. У порівнянні з іншими форматами, такими як пропріетарні файли від конкретних виробників, G-код є більш гнучким та універсальним, що робить його ідеальним вибором для широкого спектра застосувань у 3D-друці. Таким чином, використання G-коду для друку деталей дозволяє досягти високої якості виробів, спрощує процес налагодження та забезпечує сумісність із різним обладнанням, що робить його оптимальним вибором у більшості випадків.

G-code для друку металом за технологією ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing) має специфічні особливості, які відрізняють його від стандартного G-коду, що використовується для друку пластиком. Нижче представимо опис структури G-коду для цієї технології, поблочно:

- пролог (Початкові налаштування). Пролог включає команди для налаштування основних параметрів принтера, таких як одиниці вимірювання, режим позиціонування та ініціалізація компонентів:

- G21 – встановити одиниці вимірювання в міліметри;

- G90 – встановити абсолютне позиціонування;

- M82 – встановити абсолютне екструдкування;

- нагрівання екструдера та платформи. Ці команди встановлюють необхідну температуру для екструдера і платформи друку, щоб підготувати принтер до процесу друку:

- M104 S200 – встановити температуру екструдера на 200 °C;

- M140 S60 – встановити температуру платформи на 60 °C;

- калібрування та підготовка до друку. Принтер виконує калібрування осей і переміщається в початкову позицію;

- G28 – перемістити в нульову точку по всіх осях;

- G1 Z0.25 F1200 – перемістити до висоти 0,25 мм з подачею 1200 мм/хв.

- основний цикл друку. Цей розділ включає команди для безпосереднього друку, що задають переміщення екструдера і подачу

матеріалу. Команди G1 використовуються для лінійного переміщення екструдера, а команди E контролюють екструзію металевого порошку:

G1 X10 Y10 F1500 – перемістити до координат (10, 10) з подачею 1500 мм/хв;

G1 Z0.35 – перемістити до висоти 0,35 мм;

G1 X20 Y20 E2 F600 – перемістити до координат (20, 20) з екструзією 2 мм матеріалу та подачею 600 мм/хв;

– команди управління та контроль. Включають команди для керування допоміжними системами, такими як вентилятори, охолодження та паузи для технічного обслуговування:

M106 S255 – увімкнути вентилятор на максимальну потужність;

– завершення друку. Включає команди для завершення процесу друку, охолодження екструдера та платформи, а також повернення до вихідної позиції.

M104 S0 – вимкнути нагрів екструдера;

M140 S0 – вимкнути нагрів платформи;

G28 – перемістити в нульову точку по всіх осях;

– епілог (Кінцеві налаштування). Завершальні команди для вимкнення принтера і підготовки до наступного друку:

M84 – вимкнути двигуни.

Технологія ADAM вимагає точного контролю над параметрами друку, такими як температура екструдера та платформи, швидкість подачі, і екструзія матеріалу. G-code для цієї технології включає додаткові команди для управління специфічними аспектами процесу друку металом, такими як швидкість і тиск екструзії металевого порошку, а також контролю над температурою для забезпечення правильного дифузійного скріплення частинок металу під час друку. Це забезпечує високу якість виготовлення металевих деталей з точною геометрією і структурою.

3.3 Розробка програми для 3D друку деталі

При розробці програми у вигляді G-коду для 3D-друку деталі типу шківів на верстаті ЧПК 3D-друку The Metal X необхідно врахувати кілька ключових аспектів, щоб забезпечити високу якість друку та відповідність технічним вимогам. В таблиці 3.2 приведені параметри які потрібно врахувати при розробці G-кода деталі типа «шків».

Таблиця 3.2 – Параметри які потрібно врахувати при розробці G-кода деталі типа «шків»

Параметр	Опис
1	2
Матеріал друку	Вибір матеріалу (наприклад, 17-4 PH Stainless Steel) впливає на параметри друку, такі як температура екструдера та платформи, швидкість подачі, а також на загальну тривалість друку
Точність друку	Необхідно враховувати вимоги до точності виготовлення шківів, встановлюючи оптимальні параметри товщини шару (зазвичай від 50 мікрон до 125 мікрон) і точність позиціонування екструдера
Розмір деталі	Врахуйте розмір робочої області (300 мм x 220 мм x 180 мм) і переконайтеся, що деталь поміщається в цій області
Налаштування температур	Встановіть відповідні температури для екструдера і платформи на основі обраного матеріалу. Це включає прогрівання до початку друку та підтримку стабільної температури під час друку
Калібрування та підготовка	Проведіть калібрування осей і початкове позиціонування. Це включає команди для ініціалізації машини, калібрування осей, та очищення екструдера

Продовження таблиці 3.2

1	2
Структура підтримки	Для друку складних форм, таких як шків, може знадобитися додавання підтримок, які будуть видалені після завершення друку
Швидкість друку та екструзії	Виберіть оптимальні параметри швидкості друку і швидкості екструзії матеріалу, щоб забезпечити якість і точність друку
Охолодження та постобробка	Під час друку необхідно враховувати охолодження деталі, особливо для металевих деталей. Може знадобитися програмування пауз для охолодження шарів
Завершення друку	рограма повинна включати команди для завершення процесу друку, охолодження екструдера і платформи, а також повернення до вихідної позиції
Безпека та очищення	Включіть команди для вимкнення двигунів і очищення робочої зони після завершення друку

Виходячи з того що розроблений G-код 3D друку деталі типа «шків» має близько 544947 строк програмного коду, то ми приведемо приклад самих цікавих фрагментів реалізацій 3D друку деталі на на верстаті ЧПК 3D-друку The Metal X:

;Filament used: 15.9405m

;Layer height: 0.2

;MINX:100.955

;MINY:100.921

;MINZ:0.2

;MAXX:199.05

;MAXY:198.961

;MAXZ:32.6

Даний фрагмент G-коду містить інформацію про деякі параметри друку 3D-моделі:

- TIME:21760 – Час, який витрачено на друк у секундах (21,760 секунд або близько 6 годин);

- Filament used: 15.9405m – Кількість філаменту, використаного для друку, у метрах (15,9405 метрів);

- Layer height: 0.2 – Товщина шару друку у міліметрах (0,2 мм);

- MINX:100.955, ;MINY:100.921, ;MINZ:0.2 – Мінімальні координати по X, Y і Z відповідно, що вказують на початкову точку моделі у друкарському просторі;

- MAXX:199.05, ;MAXY:198.961, ;MAXZ:32.6 – Максимальні координати по X, Y і Z відповідно, що вказують на кінцеву точку моделі у друкарському просторі:

M105

M190 S150

M104 S300

M105

M109 S300

M82; absolute extrusion mode

G28; Home

G1 Z15.0 F2000; Move the platform

G92 E0

G92 E0

G1 F2700 E-4.5

;LAYER_COUNT:163

;LAYER:0

M107

M204 S1000

G1 F300 Z0.4

G0 F9000 X116.102 Y114.508 Z0.4

Даний фрагмент коду є початковим налаштуванням перед друкуванням на 3D-принтері. Основні команди в цьому фрагменті виконують наступні дії:

– M140 S150 – Встановлює температуру платформи нагріву на 150 градусів Цельсія;

– M105 – Запит поточної температури і стану принтера;

– M190 S150 – Чекає, поки платформа нагріється до 150 градусів Цельсія перед продовженням;

– M104 S300 – Встановлює температуру екструдера на 300 градусів Цельсія без очікування нагріву;

– M109 S300 – Чекає, поки екструдер нагріється до 300 градусів Цельсія;

– M82 – Встановлює режим абсолютної екструзії (абсолютне значення витрати філаменту);

– G28 – Повертає головку принтера в початкове положення (home);

– G1 Z15.0 F2000 – Піднімає платформу на 15 мм зі швидкістю 2000 мм/хв;

– G92 E0 – Встановлює поточне значення екструзії в нуль;

– G1 F2700 E-4.5 – Рухає екструдером на -4.5 мм за швидкістю 2700 мм/хв (витягує невелику кількість філаменту перед початком друку).

Цей фрагмент коду допомагає підготувати принтер до друкування, встановлюючи потрібні температури і початкові параметри руху:

```
;TIME_ELAPSED:21760.109474
```

```
G1 F2700 E3462.95253
```

```
M140 S0
```

```
M204 S500
```

```
M107
```

```
M104 S0
```

```
M140 S0
```

```

G92 E0
G1 E-10 F2000
G28 X0 Y0
M84
M82 ;absolute extrusion mode
M104 S0
;End of Gcode

```

Цей фрагмент G-коду вказує на закінчення друку та виконання певних дій після завершення процесу. Давайте розберемо кожну команду:

- TIME_ELAPSED:21760.109474 – час, який пройшов під час друку в секундах (21,760 секунд або близько 6 годин);
- G1 F2700 E3462.95253 – рухає екструдером на позицію E3462.95253 при швидкості 2700 мм/хв;
- M140 S0 – вимикає нагрів платформи;
- M204 S500 – встановлює максимальну швидкість прискорення руху в 500 мм²/с;
- M107 – вимикає вентилятор шару;
- M104 S0 – вимикає нагрів екструдера;
- M140 S0 – знову вимикає нагрів платформи (переконавання, що вона вимкнена);
- G92 E0 – встановлює поточне значення екструзії в нуль;
- G1 E-10 F2000 – витягує філамент на 10 мм при швидкості 2000 мм/хв;
- G28 X0 Y0 – повертає головку принтера в початкове положення по X та Y;
- M84 – вимикає мотори принтера;
- M82 – встановлює режим абсолютної екструзії;
- M104 S0 – вимикає нагрів екструдера (повторно);

;End of Gcode – позначення кінця G-коду, щоб вказати, що це остання команда.

Цей фрагмент G-коду допомагає завершити процес друку та забезпечує безпечну ініціалізацію принтера для подальшого використання або зупинки.

3.4 Моделювання процесу 3D печаті друку на станку

CAMotics є потужним інструментом для моделювання роботи верстатів з чисельним керуванням (ЧПК), що дозволяє візуалізувати та аналізувати процес обробки деталей перед фактичним виготовленням на верстатах. Вибір цієї програми для моделювання друку деталі типа "шків" на базі розробленого G-коду для принтера 3D The Metal X може бути обґрунтований кількома факторами. По-перше, CAMotics підтримує імпорт G-коду, що дозволяє завантажити та відтворити створений код для перевірки його правильності та ефективності. Далі, програма надає можливість візуалізувати кожний крок обробки, включаючи переміщення і обертання інструменту, що дозволяє виявити можливі проблеми та виправити їх перед фактичним виготовленням. Крім того, CAMotics дозволяє встановлювати параметри обробки, такі як швидкість і глибина різання, для оптимізації процесу і отримання кращих результатів. Програма також підтримує симуляцію в реальному часі, що дозволяє вам спостерігати за процесом обробки у деталях і вчасно реагувати на будь-які проблеми. Крім того, CAMotics має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача, що спрощує процес моделювання та робить його доступним навіть для початківців у галузі ЧПК. В цілому, вибір CAMotics для моделювання друку деталі типа "шків" на базі розробленого G-коду є обґрунтованим через його зручний інтерфейс, підтримку G-коду, можливість симуляції в реальному часі і можливість оптимізації параметрів обробки. Загальний вид програми для моделювання CAMotics представлено на рисунку 3.2.

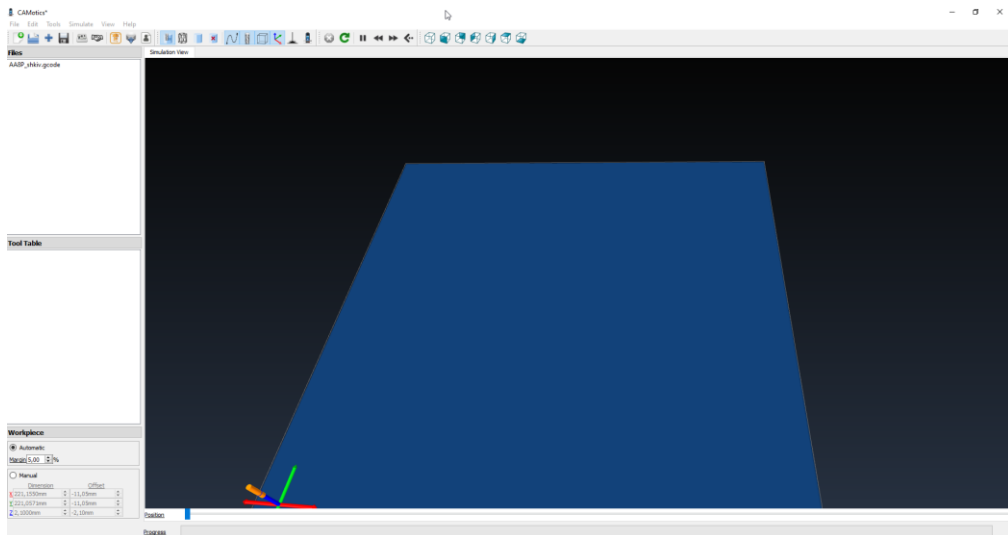


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд програми для моделювання роботи верстатів з чисельним керуванням (ЧПК) CAMotics

Проведемо завантаження розробленого g-коду деталі типа «шків» в програму для моделювання роботи верстатів з ЧПК CAMotics як показано на рисунку 3.3.

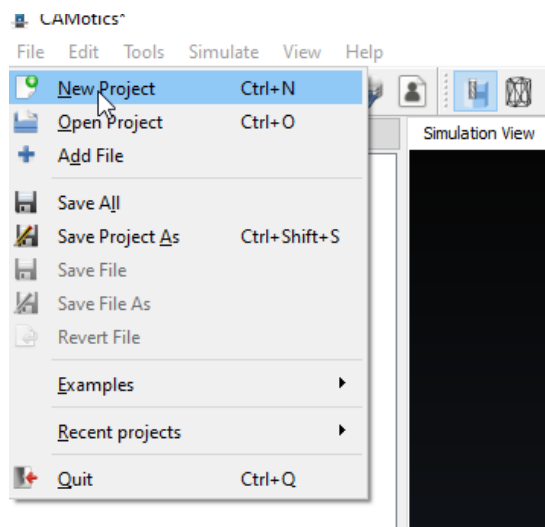


Рисунок 3.3 – Створення нового моделювання в CAMotics

Наступним кроком необхідно обрати тип метричної системи, для коректної побудови моделі моделювання, приклад вибору системи представлено на рисунку 3.4.

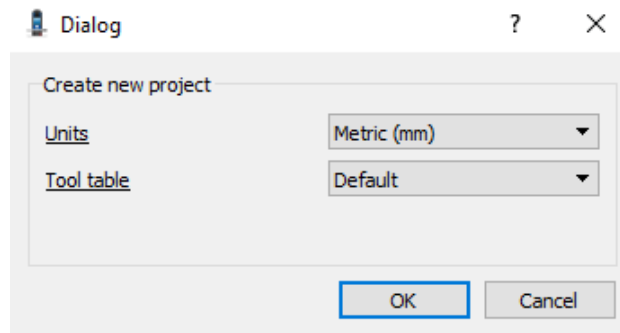


Рисунок 3.4 – Меню вибору метричної системи

Після завантаження фала з G-кодом, відповідно до розробленої програми та вказаних налаштувань, програма для моделювання в CAMotics, візуалізує стіл для 3D друку та знаходження екструдеру в 3D просторі, як показано на рисунку 3.5.

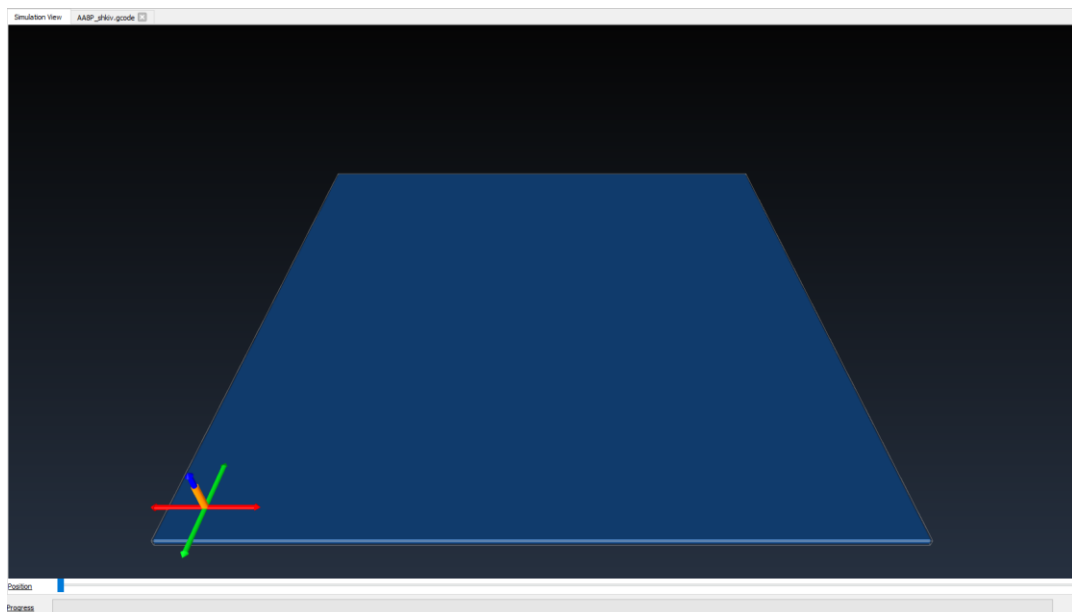


Рисунок 3.5 – Візуалізація столу для 3D друку та знаходження екструдеру в 3D просторі

Для моделювання роботи верстату ЧПК 3D-друку The Metal X для друку деталі «шків» з розробленого файла на базі G-коду, необхідно запустити симуляцію 3D друку в програмі CAMotics, як показано на рисунку 3.6.

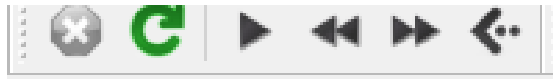
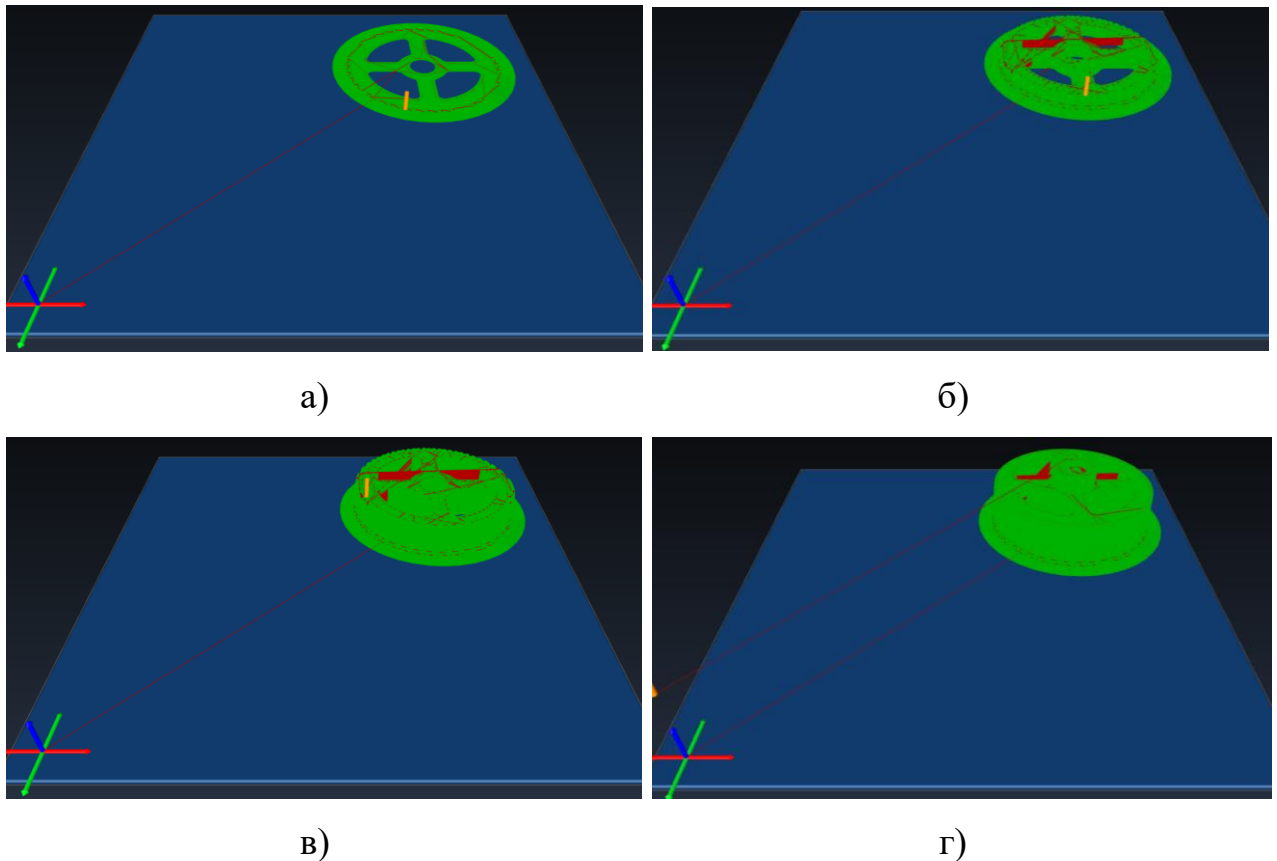


Рисунок 3.6 – Запуск симуляції 3D друку в програмі CAMotics

Результати моделювання 3D друку деталі типа «шків» в програмі CAMotics представлені на рисунку 3.7.



а) час друку ~ 4,000 с;

б) час друку ~ 10,000 с;

в) час друку ~ 18,000 с;

г) час друку ~ 21,760 с

Рисунок 3.7 – Результати моделювання 3D друку деталі типа «шків» в програмі CAMotics

Результати моделювання 3D друку деталі типу "шків" на верстаті ЧПК 3D-друку The Metal X в програмі симуляції 3D друку CAMotics є дуже

важливими для оцінки та підготовки до фактичного виготовлення деталі. CAMotics надає можливість візуалізувати кожний шар деталі, що дозволяє докладно вивчити її структуру та взаємодію з інструментом. Симуляція також допомагає виявити можливі проблеми під час друку, такі як перешкоди на шляху інструменту або недоліки у моделі. CAMotics дозволяє налаштовувати параметри друку, такі як швидкість руху, температуру екструдера та платформи, що дозволяє оптимізувати процес та досягти кращих результатів. Програма також дозволяє визначити час, необхідний для виготовлення деталі, та витрати матеріалу, що є важливими для планування виробництва та ефективного використання ресурсів. CAMotics дозволяє попередньо перевірити якість друку та виявити можливі проблеми, що дозволяє вносити корективи в програму обробки до фактичного виготовлення. Завдяки цьому, можна уникнути відхилень в якості друку та забезпечити високу точність виготовлених деталей.

3.5 Охорона праці

Охорона праці є важливою складовою забезпечення безпеки та здоров'я працівників на виробництві. У контексті розробки та моделювання об'єкту типу «шків» для верстата з ЧПК з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій, особливу увагу слід приділити аналізу потенційних ризиків, вибору відповідних заходів безпеки та створенню комфортних умов праці.

При роботі з верстатами з ЧПК та використанні комп'ютерно-інтегрованих технологій можуть виникати різні небезпеки, такі як потенційний контакт з рухомими частинами верстата, ударні навантаження від падаючих або викинутих об'єктів, ураження електричним струмом при роботі з електронними компонентами, перегрів електронного обладнання тощо.

Для забезпечення належних умов праці важливою є організація достатнього рівня освітленості робочих місць. Розрахуємо необхідну освітленість для зони роботи з верстатом. Для роботи з високою точністю рекомендована освітленість становить 750 люкс.

$$N = (F \cdot K) / (E \cdot S), \quad (3.1)$$

де E – рекомендована освітленість, люкс;

S – площа робочої зони, м²;

F – світловий потік одного світильника, люмен;

K – коефіцієнт запасу.

Припустимо, площа робочої зони складає 20 м², а світловий потік одного світильника – 2500 люмен.

$$N = (750 \cdot 20) / 2500 \cdot 1,5 = 4.$$

Отже, для забезпечення належної освітленості необхідно встановити 4 світильники. Для розрахунку кратності повітрообміну у виробничому приміщенні використовується формула:

$$L = n \cdot V, \quad (3.2)$$

де L – об'єм повітря, що подається, м³/год;

n – кратність повітрообміну;

V – об'єм приміщення, м³.

Припустимо, об'єм приміщення – 150 м³, а рекомендована кратність повітрообміну – 5 разів на годину.

$$L = 5 \cdot 150 = 750 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Отже, для забезпечення належної вентиляції необхідно забезпечити подачу 750 м³ повітря на годину.

Реалізація заходів з охорони праці є критично важливою для безпечної та ефективної роботи з верстатом з ЧПК. Дотримання технічних, організаційних заходів та використання засобів індивідуального захисту значно знижує ризики травм і професійних захворювань. Розрахунки освітлення та вентиляції підтверджують необхідність забезпечення комфортних умов праці для підвищення продуктивності та безпеки [11].

ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній роботі було проаналізовано індустрію 4.0 та 5.0 у сучасному світі та сучасні комп'ютерно-інтегровані технології. Проведено аналіз основних характеристик моделювання та аналіз деталей типу «шків» та їх застосування. Проведено обґрунтування та вибір матеріалів для виготовлення деталі типу «шків». Проведено розрахунок механічних та динамічних параметрів деталі типу «шків». Проведено обґрунтування та вибір середовища моделювання. Розроблено 3D-модель деталі типу «шків». Проведено розрахунок стійкості системи. Проведено вибір станка з ЧПК. Розроблено структура G-coda. Розроблено програму для 3D друку деталі та змодельовано процес 3D друку деталі на станку.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.

2. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» : Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В.А. Андрусевич, О. В. Токарева, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. 151 с.

3. 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. Филипченко, О.В. Токарева, С.П. Новоселов, О.В. Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2023. 64 с.

4. Сосновська, Ольга Олександрівна and Вакофян, Ваган Григорович (2022) Industry 4.0: The Essence and Development Trends Науковий журнал бізнес інформ (1). pp. 137-144. ISSN 2222-4459.

5. Нагара, М. (2022). Прогресивні бізнес-моделі: домінування цінностей індустрії 5.0. Економіка та суспільство, (45). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-45-38>.

6. Химич І. Індустрія 5.0: вдосконалення тенденцій індустрії 4.0. Цифрова економіка і сталий розвиток: новітні тенденції у фінансах, обліку, менеджменті та соціально-поведінкових науках: збірник матеріалів IV

Міжнародної науково-практичної конференції (м. Берегове, 26-27 березня 2024 р.). Берегове: ЗУІ ім. Ф. Ракоці II, 2024. С. 328-329.

7. Невлюдов І. Ш. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації: підручник для студентів закладів вищої освіти. Ч.1 / І. Ш. Невлюдов ; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : Панов А. М., 2021. – 604 с. – ISBN 978-617-7947-67-6

8. Осипенко О. О. Аналіз технологічних можливостей та сфер застосування 3D моделювання при обстеженні житлових багатоквартирних будинків: кваліфікаційна робота магістра спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» / наук. керівник Н. О. Данкевич. Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 107 с.

9. Vovkotrub A.V. Development and investigation of the design of a multi-groove pulley for the drive of the main motion of lathes". 133 – Industrial engineering; Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu; Ternopil, 2023. - 100 p.

10. Пилипенко В. В. Модель впливу технологічних параметрів 3D-друку на можливість друку без підтримок: пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / В. В. Пилипенко; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2024. – 101 с.

11. Охорона праці. Вимоги до робочого місця працівника // Сайт ГСС. URL: <https://gc.ua/uk/oxorona-praci-v-ofisi-vimogi-do-robochogo-miscya-ofisnogo-pracivnika/> (дата звернення: 01.06.2024).