НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут

Кафедра конструювання машин

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО:

Завідувач кафедри

_____ Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО

«___»_____20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Конструювання та дизайн машин»

зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: «Пристосування для визначення сил при магнітно-абразивному обробленні»

Виконав
студент IV курсу, групи МІ-01
Маркін Даниїл Андрійович

Науковий керівник:
Доцент, к.т.н. Слободянюк Іванна Валентинівна

Рецензент:
Доцент, к.т.н. Кореньков Володимир Миколайович

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет/ННІ Механіко-машино будівний інститут

(повна назва)

Кафедра Конструювання та дизайн машин

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 131 Прикладна механіка

(код і назва)

Освітньо-професійна програма Конструювання та дизайн машин

(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО
«___»_____20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту

Маркіну Даниїлу Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту Пристосування для визначення сил при магнітно-абразивному обробленні

керівник проєкту Слободянюк Іванна Валентинівна, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «27» Травень 2024 р. №2115-с

2. Строк подання студентом проєкту _____
3. Вихідні дані до проєкту: матеріал пристосування алюмінієвий сплав В95, ескіз пристосування, код програми для Arduino, тензометричний датчик.

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити): аналіз магнітно-абразивного оброблення; розроблення принципової схеми пристосування для вимірювання сил в робочій зоні кільцевого типу; розроблення конструкції пристосування; проєктування технологічних операцій на верстатах з ЧПК.

5. Перелік графічного матеріалу: складальний кресленик пристосування для вимірювання сил в робочій зоні кільцевого типу, кресленик корпусу, кресленик, верхньої оправки, кресленик нижньої оправки, технологічне забезпечення виготовлення верхньої оправки, технологічний процес та маршрутна карта виготовлення корпусу, технологічний процес та маршрутна карта виготовлення верхньої оправки, технологічний процес та маршрутна карта виготовлення нижньої оправки, принципова схема пристосування.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання: 16.10.2023

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Строк виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз оброблювального верстату та умови формування МАІ	29.03.2024	
2	Блок-схема пристосування, розробка керуючої програми	27.04.2024	
3	Розроблення конструкці пристосування	08.05.2024	
4	Технологічний процес виготовлення пристосування	27.05.2024	
5	Пояснювальна записка та креслення	05.06.2024	
6	Оформлення записки та креслеників	10.06.2024	

Студент _____ Даниїл МАРКІН
(підпис)

Керівник проєкту _____ Іванна СЛОБОДЯНЮК
(підпис)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проєкту (роботи)

АНОТАЦІЯ

Маркін Д. А. Пристосування для визначення сил при магнітно-абразивному обробленні – Рукопис.

Дипломний проєкт на здобуття ступеня бакалавра зі спеціальності 131 Прикладна механіка спеціалізації Конструювання та дизайн машин. - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2024.

Метою даного дипломного проєкту було розробити та створити пристосування для магнітно-абразивного оброблення на верстаті з робочою зоною кільцевого типу в лабораторних умовах на кафедрі конструювання машин КПІ ім. Ігоря Сікорського.

У дипломному проєкті було розроблено блок-схему роботи пристосування, що детально описує послідовність операцій та взаємодію компонентів. Це дозволяє забезпечити чітке розуміння всіх етапів функціонування пристосування. Крім того, було написано керуючу програму для мікроконтролерів Arduino, яка автоматизує процеси контролю та управління, забезпечуючи точність і стабільність роботи системи. Виконано робочі креслення: корпус, верхня оправка та нижня оправка.

Розроблено технологію виготовлення пристосування на токарних та фрезерних верстатах з ЧПК. Цей етап включав визначення оптимальних режимів оброблення, вибір відповідного інструменту та налаштування обладнання. Створено складальний кресленик пристосування для визначення сил при магнітно-абразивному обробленні

Ключові слова: магнітно-абразивне оброблення, пристосування, алюмінієвий сплав В95, збірна конструкція.

SUMMARY

Markin D. A. Magnetic abrasive force measurement device.

Diploma project for obtaining a bachelor's degree in speciality 131 Applied Mechanics, specialisation Construction and Design of Machines. - National Technical University of Ukraine ‘Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute’, Kyiv, 2024.

The aim of this diploma project was to develop and create a fixture for a ring-type magnetic abrasive treatment machine in the laboratory at the Department of Machine Design of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

In the diploma project, a flowchart of the device was developed, which describes in detail the sequence of operations and the interaction of components. This allows for a clear understanding of all stages of the device's functioning. In addition, a control programme was written for Arduino microcontrollers, which automates the monitoring and control processes, ensuring the accuracy and stability of the system. Working drawings were made: the body, the upper mandrel and the lower mandrel.

The technology for manufacturing the fixture on CNC lathes and milling machines was developed. This stage included determining the optimal machining modes, selecting the appropriate tools and setting up the equipment. The assembly drawing of the fixture for determining the forces during magnetic abrasive machining was created.

Keywords: magnetic-abrasive machining, fixture, aluminium alloy B95, prefabricated structure.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 8
ВСТУП 10
1 АНАЛІЗ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ 12
1.1 Схеми магнітно-абразивного оброблення 12
1.2 Умови формування МАІ 14
1.3 Магнітно-абразивні порошки, які використовуються при МАО 16
1.4 Аналіз сил в робочій зоні при МАО 18
1.4.1 Сили, які діють на окрему магнітно-абразивну частинку 20
1.4.2 Сила, з якою магнітно-абразивні частинки діють на поверхню оброблюваної деталі 21
1.4.3 Траєкторія руху МАІ 22
1.5 МАО в робочій зоні кільцевого типу 24
1.6 Висновки 28
2 РОЗРОБЛЕННЯ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ СИЛ В РОБОЧІЙ ЗОНІ КІЛЬЦЕВОГО ТИПУ 30
2.1 Блок-схема роботи пристосування 30
2.2 Опис компонентів системи 32
2.3 Схема підключення компонентів 37
2.4 Калібрування пристосування 40
2.5 Висновки 43
3 РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОРОШКОВОГО СЕРЕДОВИЩА В РОБОЧІЙ ЗОНІ КІЛЬЦЕВОГО ТИПУ 44
3.1 Вибір матеріалу пристосування 44
3.2 Опис деталей пристосування 46
3.3 Технологічний процес виготовлення пристосування 51
3.3.1 Технологічний процес виготовлення верхньої оправки 52
3.3.2 Технологічний процес виготовлення нижньої оправки 55
3.3.3 Технологічний процес виготовлення корпусу 57
3.4 Розрахунок припуску при механічному обробленні 59
3.5 Розрахунок режимів різання 61
4 ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК 64

4.1 Опис верстатів з ЧПК 64
4.2 Генерування керуючої програми для верстатів з ЧПК 67
4.2.1 Токарна операція з ЧПК 67
4.2.2 Фрезерна операція з ЧПК 69
4.3 Автоматизований розрахунок режимів різання 74
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 78
Додаток А 82
Додаток Б 83
Додаток В 84
Додаток Г 85
Додаток Д 86
Додаток Е 90
Додаток Ж 96

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

1. Скорочення

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ДЧК – дріб чавунна колота;

МАІ – магнітно-абразивний інструмент;

МАМ – магнітно-абразивні порошкові матеріали;

МАП – магнітно-абразивний порошок;

МАО – магнітно-абразивне оброблення;

ПК – персональний комп'ютер;

РІ – різальний інструмент;

РК – різальна кромка;

ЧПК – числове програмне керування;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

CAD – computer aided design;

DT – вихід даних;

GPS – global positioning system;

GND – земля;

IDE – Integrated Development Environment;

SCK – тактовий сигнал;

VCC – живлення.

2. Одиниці вимірювання

B – магнітна індукція;

H – напруженість магнітного поля;

J – вектор струмової щільності;

N – кількість витків соленоїда;

I – струм у соленоїді;

L – довжина соленоїда;

F_v – сила, яка діє на оброблюваний зразок під час його руху на частинки магнітно-абразивного інструменту;

$F_{тр}$ – сила тертя між порошком і поверхнею зразка;

$F_м$ – магнітна сила;

F_s – сила натягнення утворень конусоподібної форми;

F'_s – проекція сили натягнення цих конусоподібних утворень;

F_c – сила опору магнітно-абразивного інструменту в насипному стані;

F_n – нормальна складова результуючої сили;

F_τ – тангенціальна складова результуючої сили;

F_Σ – результуюча сила;

R_{Zi-1} – висота мікронерівностей поверхні на попередньому проході;

h_{i-1} – глибина дефектного поверхневого шару на попередньому проході;

p_{i-1}^2 – сумарне значення просторових відхилень взаємопов’язаних;

Rz – припуск

ρ – кривизна

δ – загальний припуск на обробку

t – глибина різання

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток сучасного автоматизованого виробництва та використання високошвидкісних методів різання залежать від експлуатаційних властивостей та якості різального інструменту (РІ). Застосування нових сучасних технологій в інструментальному виробництві на фінішних етапах виготовлення та оброблення дозволяє отримати оптимальне поєднання мікро- та макрогеометрії робочих поверхонь, фізико-механічних властивостей поверхневих шарів на всіх елементах, що беруть активну участь у різанні. Ці фактори впливають на продуктивність, якість та економічність виробничого процесу.

Перспективним методом, який здатний комплексно забезпечити досягнення всіх необхідних властивостей інструменту чи деталі, виготовленого з різних матеріалів, є магнітно-абразивне оброблення (МАО). Для досягнення високої якості оброблення та покращення експлуатаційних характеристик деталей різних видів чи різального інструменту доцільно використовувати магнітну систему з кільцевим розташуванням робочої зони.

Для забезпечення ефективного процесу оброблення важливим є підтримання стабільних властивостей та форми магнітно-абразивного інструменту (МАІ) під час технологічного процесу.

Отже, визначення силових параметрів взаємодії МАІ з оброблюваними поверхнями деталей є актуальною і важливою науково-практичною задачею. Вивчення цих параметрів дозволяє підвищити якість обробки, зменшити зношування МАІ та оптимізувати технологічні процеси.

Однією із задач є створення конструкції пристосування для дослідження поведінки порошкових середовищ у різних умовах. Особливу увагу привертає дослідження порошкового середовища у робочих зазорах кільцевого типу. Розуміння особливостей взаємодії порошкового середовища з оброблюваними

деталями дозволяє створювати ефективні технологічні процеси та формувати МАІ, які забезпечують високу точність та якість оброблення.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розроблення конструкції пристосування для аналізу поведінки порошкового середовища в робочій зоні кільцевого типу.

Для досягнення мети необхідно виконати такі задачі:

1. Аналіз умов МАО в робочій зоні кільцевого типу.
2. Розроблення принципової схеми пристосування для вимірювання динамічної складової сили взаємодії МАІ та оброблюваної деталі.
3. Розроблення конструкторсько-технологічної документації виготовлення пристосування для визначення сил при МАО.

Об'єкт дослідження – магнітно-абразивне оброблення у робочих зазорах кільцевого типу.

Предмет дослідження – пристосування для визначення динамічної складової сили взаємодії порошкового середовища з оброблюваною деталлю.

Методи дослідження – для вирішення поставлених задач було використано основні положення конструювання, матеріалознавства, мікропроцесорної техніки, технології машинобудування, теорії різання та інструментального забезпечення, теоретичної механіки, трибології.

Практичне значення. Розроблена конструкція пристосування дозволяє встановити закономірності силової взаємодії МАІ та оброблюваних деталей в робочій зоні кільцевого типу. Отримані дані дозволять виконувати проєктування нового обладнання для фінішного оброблення деталей різної геометричної форми.

Структура та обсяг дипломного проєкту. Дипломний проєкт складається зі вступу, 4 розділів, списку використаних джерел із 33 найменування на 78 - 81 сторінках та _____ додатків. Основний текст дипломного проєкту викладено на 12 сторінці, що містить 23 рисунка, 5 таблиць. Повний обсяг проєкту складає _____ сторінки.

1 АНАЛІЗ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ

В сучасних умовах розвитку виробництва постійно зростають вимоги до якості поверхні та точності оброблення деталей. Це особливо актуально для високотехнологічних галузей, таких як авіаційна, автомобільна та машинобудівна промисловості. Одним із ефективних методів досягнення високої якості обробки є магнітно-абразивне оброблення (МАО), яке дозволяє обробляти деталі різної форми з високою точністю та гарною якістю поверхні.

1.1 Схеми магнітно-абразивного оброблення

МАО визначається як процес, за допомогою якого матеріал видаляється таким чином, що фінішна обробка поверхні та видалення задирок виконується за наявності магнітного поля в зоні оброблення. Даний спосіб був запроваджений у Радянському Союзі, з подальшими фундаментальними дослідженнями в різних країнах. Сьогодні дослідження процесів фінішної обробки за допомогою магнітного поля проводяться на промислових рівнях у всьому світі [31]

На сьогодні відомо понад 250 схем способів магнітно-абразивного полірування. Єдиної системи класифікації цього процесу не існує, оскільки дослідники використовують різні підходи та критерії.

Технологію магнітно-абразивного оброблення можна класифікувати за режимом створення магнітного поля, магнітними властивостями готових матеріалів, діапазоном обробки та іншими факторами. Конкретні методи класифікації показані на рис. 1.1. [7]

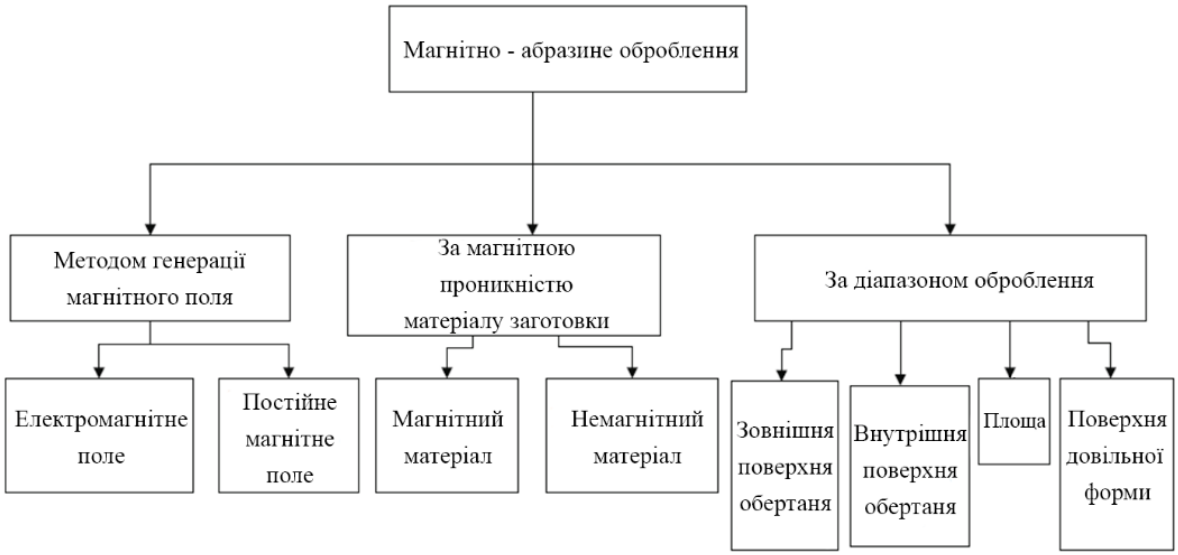


Рисунок 1.1 – Класифікація магнітно - абразивного оброблення

Схеми МАО можна розділити на два типи, це залежить від відстані між полюсними наконечниками робочої камери та оброблюваною поверхнею [15]. Перший тип включає схеми з робочою зоною від 0,3 до 2 мм вони називаються «малі». Такі робочі зони зазвичай призначені для оброблення феромагнітних деталей простої форми, таких як тіла обертання чи площини, де можна створити еквідистантну робочу зону за допомогою спеціальних полюсних наконечників або складних траєкторій руху деталі. У таких малих робочих зонах магнітні поля з індукцією 0,8 – 1,1 Тл забезпечують необхідну силу притискання частинок МАП до поверхонь деталей. Однак ці схеми неефективні для немагнітних деталей через недостатність сил магнітного походження [1].

Другий тип включає пристрої з робочою зоною шириною понад 3 – 5 мм. Вони використовуються для оброблення складних деталей, таких як тіла обертання та фасонні поверхні обертання. У цих схемах сили притискання МАП до деталі переважно створюються динамічними силами, що виникають при відносних рухах деталі та порошку, а магнітна індукція не перевищує 0,5 Тл у робочих зонах.

Робочий зазор визначає простір, у якому відбувається взаємодія між МАІ та оброблюваною поверхнею. У випадку великих робочих зазорів виникають різні умови, які потребують детального аналізу для забезпечення ефективності процесу. До основних факторів, які впливають на оброблення в умовах великих зазорів, належать:

1. Розподіл магнітного поля

Нерівномірність магнітного поля: у великих робочих зазорах магнітне поле розподіляється нерівномірно, що знижує щільність магнітного потоку в робочій зоні кільцевого типу. Це може вплинути на концентрацію абразивних частинок і знизити інтенсивність оброблення.

Інтенсивність магнітного поля: зменшення інтенсивності магнітного поля в великих зазорах знижує притискну силу абразивних частинок до поверхні деталі.

2. Розподіл абразивних частинок

Розсіювання частинок: великий робочий зазор може призводити до розсіювання абразивних частинок, знижуючи їх концентрацію в робочій зоні. Це ускладнює забезпечення стабільного процесу оброблення.

3. Силові параметри взаємодії

Зниження сили притиску: в умовах великих зазорів знижується сила притиску абразивних частинок до поверхні деталі, що може знизити ефективність знімання матеріалу та якість оброблення.

Контроль силових параметрів: необхідно забезпечити оптимальні значення притискної сили та швидкості обертання для підтримання стабільної взаємодії між МАІ та оброблюваною поверхнею.

1.2 Умови формування МАІ

В [1] показано, що одним з активних елементів технологічної системи процесу МАО є магнітно-абразивний інструмент (МАІ). Його особливості формування визначаються формою та матеріалом оброблюваної деталі на

22%, схемою оброблення та верстатом, на якому вона реалізована – на 33%, а також типом магнітно-абразивного порошку (МАП) та його здатністю до формування МАІ з потрібними властивостями – на 45%.

Для забезпечення прогнозованого процесу МАО деталей складної форми в умовах великих робочих зазорів кільцевого типу необхідна достатня інформація про особливості формування МАІ, умови його взаємодії з поверхнями оброблюваних деталей, а також специфічні процеси, що відбуваються в порошковому середовищі. Існуюча науково-технічна інформація в цьому напрямку обмежена щодо явищ та процесів, що відбуваються в МАІ під час МАО. На представленій схемі (рис. 1.2) відображено параметри, що визначають умови формування МАІ у процесі МАО.

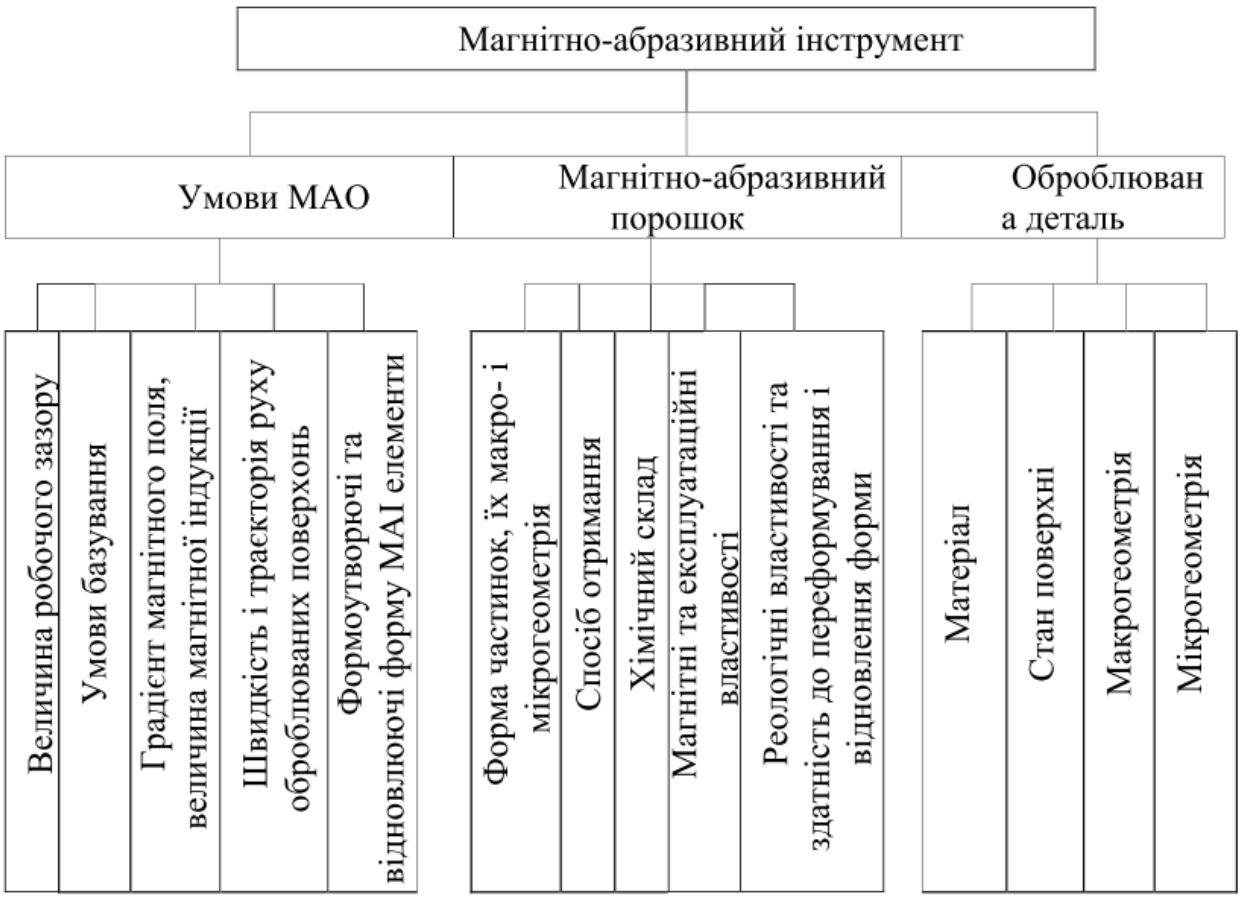


Рисунок. 1.2 – Схематичне представлення факторів, які визначають умови формування МАІ при МАО [1]

1.3 Магнітно-абразивні порошки, які використовуються при МАО

Якість оброблюваної поверхні покращується за рахунок мікрорізання, тертя та зношування, а також електрохімічного ефекту зношування поверхні заготовки, створеним МАП. У той же час заготовка також має відповідний вплив на частинки МАП та викликає їх зношування. Однак сильне зношування МАП може скоротити час використання, погіршити якість обробки поверхні та збільшити витрати на обробклення. Таким чином, знос магнітних абразивних частинок є важливим фактором, який впливає на продуктивність, якість та вартість оброблення [7]

Важливим параметром підвищення експлуатаційних характеристик МАІ є правильний вибір МАП. Оскільки процес оброблення здійснюється за рахунок неоднорідності магнітного поля, магнітно-абразивні частинки знаходяться у відносно вільному стані, вони переміщуються, обертаються та постійна зміна положення, що ефективно зменшує ймовірність зносу від стирання. Недоліки полягають у тому, що розмір однієї магнітно-абразивної частинки дуже малий, її не можна обробити та повторно використовувати, як абразивний круг, і важко гарантувати, що всі магнітні абразивні частинки досягають зносу від стирання одночасно під час оброблення.

МАП - це складні абразиви на основі заліза, які мають здатність до намагнічення та шліфування. Їхні розміри зазвичай становлять 60–200 мкм, і вони в основному складаються з фази магнітного середовища (зазвичай залізної матриці), абразивної фази (абразив) і адгезиву. Структура і розміри зерен показані на рис. 1.3.

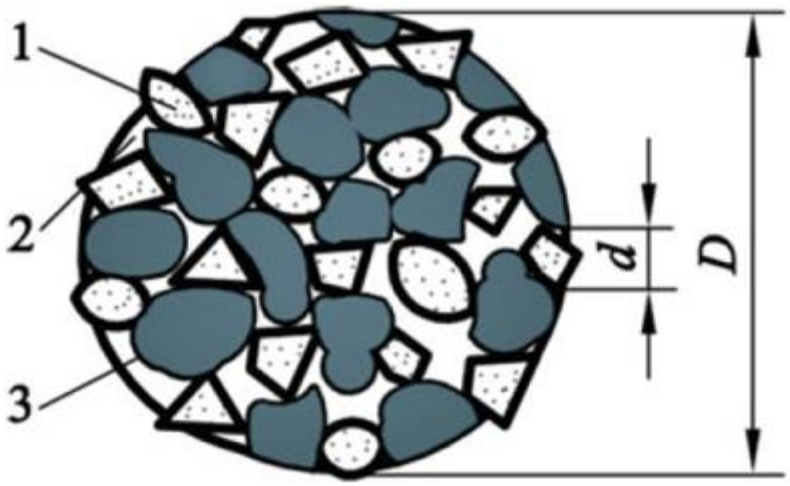


Рисунок 1.3 – Структура магнітно-абразивних частинок (1 – фаза магнітного середовища; 2 – клей; 3 – абразивна фаза)

Для забезпечення магнітних властивостей, щоб гарантувати, що магнітно-абразивні частинки мали вищу напруженість зсуву, сильну контрольованість і добру стабільність, зазвичай вибирають намагнічені матеріали з хорошою електропровідністю [32], якими зазвичай є залізо, сталь, алюмінієво-нікелевий сплав, ферит барію, магнієво-барієвий сплав та ін.

Абразивна фаза - це різновид абразиву високої твердості, який має дію шліфування, притирки та полірування. Його склад і співвідношення безпосередньо впливають на фінішний ефект та продуктивність. Зазвичай до його складу входять корунд, карбід кремнію, алмаз, кубічний нітрид бору та інші [33].

Роль адгезиву полягає в тому, щоб зв’язати два компоненти разом, завдяки чому абразивна фаза рівномірно розподіляється у фазі магнітного середовища навколо, і не може відпасти та бути розділеною в процесі оброблення. Звичайний зв'язка включає епоксидну смолу, поліамідну смолу, фуранову смолу, клей для наповнення металу, стійкий до високих температур конструкційний клей та інші.

Особливо важливо враховувати абразивну та полірувальну здатність магнітно-абразивних порошків, яка значно залежить від геометричних та

мікро-геометричних характеристик окремих частинок порошкових МАМ, що використовуються для формування МАІ. Саме ці характеристики визначатимуть область та ефективність застосування різних типів порошків, умови їх взаємодії з оброблюваною поверхнею, здатність до оновлення різальних кромок окремих частинок. Зокрема, це стосується провертання частинок у складі МАІ, що залежить від ступеня їх нерівномірності, розгалуженості зовнішньої поверхні та характеристик внутрішнього тертя в МАІ. Розмір різальних кромок окремих частинок визначатиме ймовірні умови їх контакту з оброблюваною поверхнею.

Для більшості МАП зерна мають неправильну форму, яка залежить від природи порошку та технології його виготовлення і подрібнення, з мікро- та субмікровиступами на поверхні зерен, це зазначено в [10]. Одна з основних вимог до оптимальної форми частинок МАП полягає в забезпеченні максимальної кількості дряпаючих елементів на їх поверхні та здатності до максимального ущільнення. Важливо, щоб форма частинок сприяла їх багаторазовому перевертанню під дією механічних сил у робочому просторі [10], а також відповідала третій умові ефективного процесу магнітно-абразивного оброблення [6].

1.4 Аналіз сил в робочій зоні при МАО

Сила, з якою МАІ впливає на поверхню оброблюваної деталі, є сумарною величиною кількох сил: магнітних, електромагнітних і механічних. Ці сили діють на кожне зерно МАП, що знаходиться в робочій зоні установки. Взаємодія МАП з поверхнею оброблювальної деталі залежить від зовнішнього магнітного поля, електропровідних та магнітних властивостей порошку і матеріалу деталі, розмірів робочої зони, схеми оброблення, фізико-механічних характеристик порошкового середовища, форми та розмірів зерен, а також від швидкості обертання деталі навколо осі кільцевої ванни і траєкторії руху в робочій зоні.

Як зазначено в [20] Якщо МАП розмістити між полюсними наконечниками S та N, де створюється магнітне поле, ці частинки будуть розташовані щільно та регулярно під дією магнітної сили, утворюючи магнітну абразивну щітку (рис. 1.4)

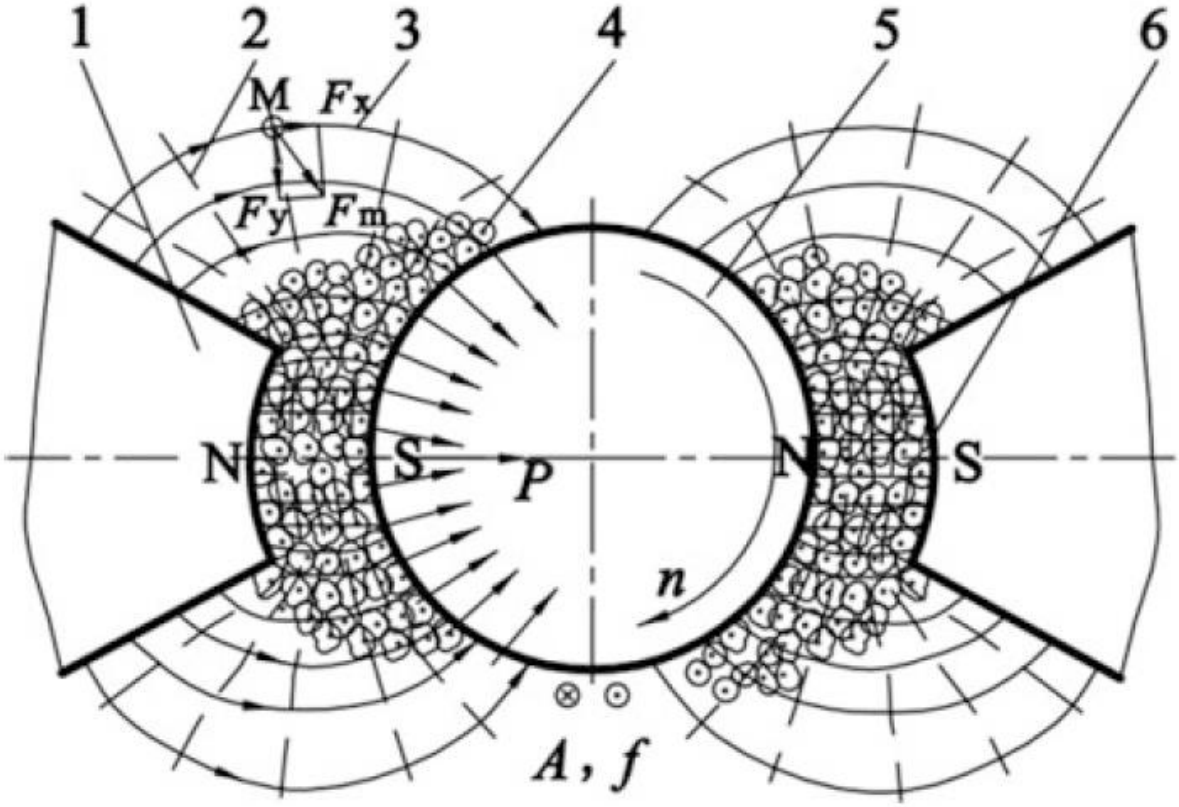


Рисунок 1.4 – Ескіз силового аналізу магнітно-абразивних частинок. 1 - магнітні полюси; 2 - магнітні еквіпотенціальні лінії; 3 - магнітні силові лінії; 4 - магнітні абразивні частинки; 5 - заготовка; 6 - зазор при обробці.

Помістивши оброблювану деталь в магнітно-абразивну щітку, сила буде діяти на поверхню заготовки у вигляді тиску. Під час оброблення поверхні заготовка повинна мати відносний рух, який є обертальним рухом і осьовою вібрацією. Під дією відносного руху між заготовкою та МАІ поверхня оброблюваної деталі полірується та зміцнюється. Оскільки шорстка поверхня, задирки, краї, виступи та інші місця оброблювальної поверхні мають велику інтенсивність магнітної індукції, що спричиняє централізацію ліній

магнітного поля, ці деталі оброблюються головним чином для досягнення якісної поверхні.

1.4.1 Сили, які діють на окрему магнітно-абразивну частинку

Беручи як приклад готову зовнішню циліндричну поверхню заготовки з магнітного матеріалу, розглянемо умови дії сили на окрему абразивну частинку в зоні обробки, як показано на рис. 1.4. Після того, як окрема магнітна абразивна частинка в зоні обробки намагнічується, вона розташовується в магнітній щітці вздовж ліній магнітного поля. При розміщенні готової заготовки в магнітній абразивній щітці заготовка і магнітні абразивні частинки на передньому кінці щітки притягуються одна до одної, під дією магнітної сили магнітні абразивні частинки притискаються до поверхні заготовки [3]. Припускаючи, що напрямок лінії магнітної сили – це напрямок X, а напрямок ліній магнітного еквіпотенціалу, які завжди перпендикулярні лініям магнітної сили, – це напрямок Y, то магнітні сили магнітно-абразивних частинок в точці M в магнітному полі дорівнюватимуть:

$$F_X = \left(\frac{\pi D^3}{6}\right)\chi H\frac{\partial H}{\partial x}$$

$$F_y = \left(\frac{\pi D^3}{6}\right)\chi H\frac{\partial H}{\partial y}$$

Результуюча сила завжди спрямована до поверхні заготовки, тому її називають силою магнітного утримання, тобто

$$\overrightarrow{F_m} = \overrightarrow{F_X} + \overrightarrow{F_Y}$$

де D - діаметр магнітно-абразивних частинок (мкм);

χ - магнітна сприйнятливість магнітно-абразивних частинок;

H - напруженість магнітного поля в зоні обробки (А/м);

$\frac{\partial H}{\partial x}$ - швидкість зміни напруженості магнітного поля вздовж напрямку X;

$\frac{\partial H}{\partial y}$ - швидкість зміни напруженості магнітного поля вздовж напрямку Y, що також називається градієнтом напруженості магнітного поля.

В процесі фінішної обробки під дією магнітної сили утримання кожна магнітно-абразивна частинка з групи частинок, що заповнила зазор, стабільно утримується в зазорі і діє на поверхню заготовки у фіксованому напрямку. У той же час, під дією магнітної утримуючої сили, ці частинки, що знаходяться в зовнішній області обробки, будуть автоматично збиратися разом в область обробки і заповнювати зазор між магнітними полюсами і оброблюваною заготовкою, в кінцевому підсумку утворюючи цілісний і безперервний процес обробки [2].

1.4.2 Сила, з якою магнітно-абразивні частинки діють на поверхню оброблюваної деталі

В процесі обробки, завдяки дії магнітної сили утримання F_m, кожна абразивна частинка, яка заповнює зазор, прилягає одна до одної, утворюючи магнітний кластер уздовж напрямку магнітних силових ліній, таким чином формуючи магнітну абразивну щітку. В результаті утворюється сила P, спрямована до поверхні заготовки, і це сила, з якою магнітно-абразивні частинки діють на поверхню заготовки, як показано на рис. 1.4. Якщо припустити, що форма окремої магнітно-абразивної частинки - сфероїд, то сила P, з якою магнітно-абразивні частинки діють на поверхню заготовки при чистовій обробці зовнішньої циліндричної поверхні, дорівнює:

$$P = \frac{B^2}{4\mu_O} \cdot \frac{3\pi(\mu_r - 1)}{3(2 + \mu_r) + \pi(\mu_r - 1)\omega}$$

де

P - фінішний тиск, який чинять магнітно-абразивні частинки на поверхню заготовки (Н/мм2);

B - напруженість магнітної індукції (Тл);

μ_O - магнітна проникність повітря (Гс/м);

μ_r - відносна магнітна проникність магнітно-абразивних частинок;

ω - об'ємний відсоток фази магнітного середовища в магнітно-абразивних частинках (%).

1.4.3 Траєкторія руху MAI

Як різновид фінішної обробки вільним абразивним інструментом, сила та складний відносний рух між абразивним інструментом та поверхнею заготовки є двома необхідними умовами для фінішної обробки. При магнітно-абразивній обробці сила, що створюється між абразивними частинками та поверхнею заготовки, в основному пояснюється магнітною силою, а відносний рух між абразивними частинками та поверхнею заготовки в основному досягається певною формою руху заготовки або магнітними полюсами.

Візьмемо для прикладу готову зовнішню циліндричну поверхню заготовки з магнітного матеріалу, щоб зробити магнітно-абразивну обробку кращою, під час процесу обробки заготовка здійснює обертальний рух уздовж власної осі з певною швидкістю n, а осьова вібрація з певною амплітудою A та частотою f допомагає реалізувати складний відносний рух між абразивними частинками та поверхнею заготовки.

В процесі фінішної обробки траєкторії різання, які генеруються на поверхні заготовки ріжучою кромкою магнітно-абразивних частинок в термінальній частині щітки, мають вигляд

$$\begin{cases} x = r\cos(2\pi nt) \\ y = r\sin(2\pi nt) \\ z = \pm 2Aft \end{cases}$$

Траєкторії різання, що утворилися на поверхні заготовки, і напрямок обертання заготовки утворюють кут, який називається поперечним кутом, його величина дорівнює:

$$\theta_m = \arctan(\frac{60Af}{\pi nr})$$

де θ_m - поперечний кут;

n - швидкість обертання заготовки (об/хв);

r - радіус заготовки (мм);

f - частота осьових коливань заготовки (Гц);

A - амплітуда осьових коливань заготовки (мм).

Оскільки гнучка магнітно-абразивна щітка легко деформується під дією сили, фактичні траєкторії, які генеруються ріжучою кромкою магнітно-абразивних частинок на поверхні заготовки, відрізняються від теоретичних траєкторій, а також змінюється поперечний кут, який позначається як θ'_m та $\theta'_m < \theta_m$.

Для різних швидкостей обертання n, амплітуди осьової вібрації A, частоти f і фактичного поперечного кута θ'_m, траєкторії, що генеруються магнітними абразивними частинками, відрізняються, і це вплине на фінішні ефекти та ефективність.

Через вібрацію заготовки збільшується відстань переміщення поверхні заготовки за одиницю часу. У той же час, оскільки напрямок руху поверхні заготовки постійно змінюється, траєкторії різання поверхні заготовки, що генеруються ріжучою кромкою магнітних абразивних частинок, показують пересічний і неповторюваний сітчастий візерунок, створюючи ефект суперпозиції та спонукаючи ефекти перекидання та перемішування в обробному зазорі магнітних абразивних частинок. Місця обробки магнітних

абразивних частинок часто змінюються, самоформування магнітних абразивних частинок в процесі обробки сильніше, і обробка поверхні заготовки повністю завершена.

1.5 МАО в робочій зоні кільцевого типу

За дослідженнями представленими в [1, 3, 10, 11, 18, 20] встановлено, що МАО в робочій зоні кільцевого типу забезпечує відповідну якість поверхонь складної геометричної форми. Такий процес дозволяє за короткий проміжок часу отримати низьку шорсткість, задані фізико-механічні властивості поверхневого шару, сформувати сприятливу мікрогеометрію на різальних кромках інструменту та ін.

Установка для магнітно-абразивного оброблення повинна відповідати ряду вимог, таких як забезпечення стабільного магнітного поля, можливість регулювання технологічних параметрів, надійність та зручність в експлуатації. Розробка і впровадження таких установок дозволяє значно підвищити ефективність виробничих процесів, забезпечити високу якість оброблення та знизити витрати на виробництво.

Комплексне обладнання, яке забезпечує механічний рух і утримання деталей та МАІ в потрібному положенні. Схема МАО з великою магнітною робочою зоною кільцевого типу використовується для обробки різноманітного різального інструменту, лопаток газотурбінних двигунів та інших циліндричних і деталей складної форми. Ця схема реалізована на дослідно-промисловому вертикально-фрезерному верстаті типу ОЦ – Іжевськ [11]. Вертикально-фрезерний верстат (рис. 1.5) включає магнітну систему (1), встановлену на нерухомому горизонтальному робочому столі, та універсальну головку (4), яка кріпиться до шпинделя верстата і може рухатися у вертикальному напрямку. Вісь шпинделя збігається з вертикальною віссю магнітної системи. Магнітна система складається з розгалуженого, симетричного магнітопроводу з коаксіально розташованими полюсними

наконечниками (9), що утворюють між полюсами кільцеву робочу зону (2), яка заповнюється магнітно-абразивним порошком (МАП) [18]. Під дією магнітного поля МАП формується в магнітно-абразивний інструмент (МАІ) (10) під час оброблення.

Середній діаметр кільцевої робочої зони становить 200 мм, висота - 30 мм, ширина - 35 мм. Така конструкція дозволяє обробляти деталі різної форми і розмірів. Магнітна індукція у вільному від МАП міжполюсному просторі може регулюватися в межах 0,02 - 0,5 Тл, що достатньо для використовуваної схеми МАО. Верстат забезпечує обертання шпинделя з реверсом у діапазоні частот 0 - 800 об/хв з плавним регулюванням [3, 6].

Для оброблення використовується універсальна головка, яку встановлюють у шпинделі верстата таким чином, щоб її вертикальна вісь збігалася з віссю магнітної системи та шпинделем верстата [18]. Універсальна головка складається з базової плити (5), на якій з одного боку закріплюється пристрій із мінішпинделем (6), що може обертатися навколо вертикальної осі в діапазоні кутів q = 0 - 90°, та оправка з деталлю (8). Оправка з деталлю може вільно обертатися навколо власної осі та осі мінішпинделю. Мінішпиндель з'єднаний з двигуном постійного струму (7) через редуктор, що забезпечує можливість обертання деталі з реверсом навколо власної осі з регульованою кутовою швидкістю [18] в діапазоні від 0 до 800 обертів за хвилину. Крім того, пристрій із мінішпинделем забезпечує можливість базування оброблюваної деталі під кутами в діапазоні p = 0 – 90° по відношенню до площини кільцевого магнітного зазору. На базовій платформі також розташовується другий змінний мінішпиндель (3), спрощеної конструкції, який може обертатися навколо вертикальної осі та використовується для встановлення додаткового формоутворювального МАІ елемента. Обидва мінішпинделі можуть розташовуватися під різними кутами відносно дотичної до середньої лінії кільцевої ванни.

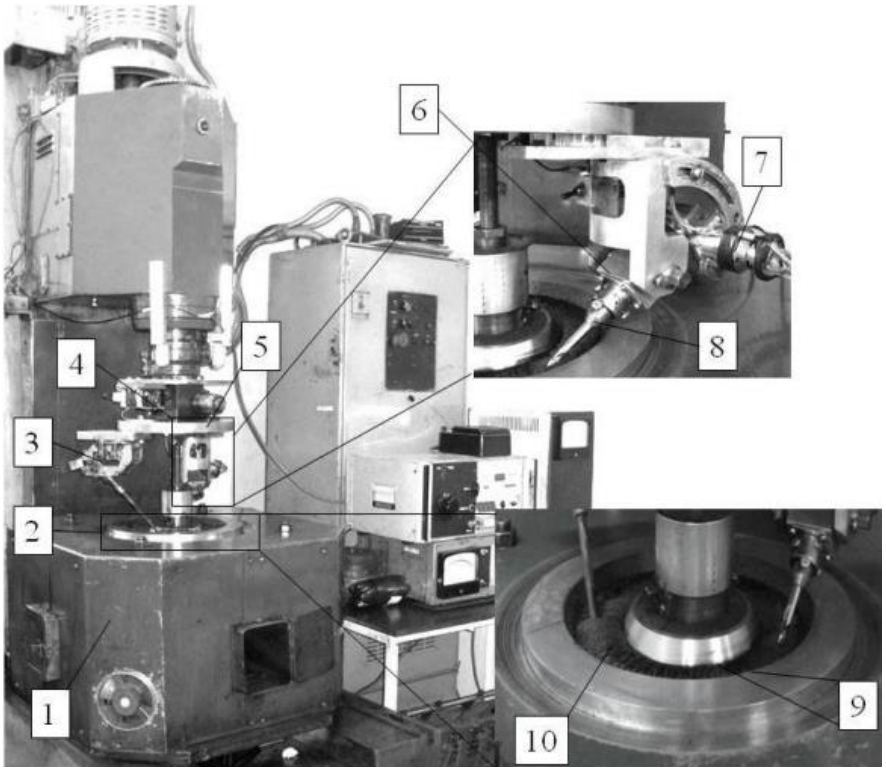
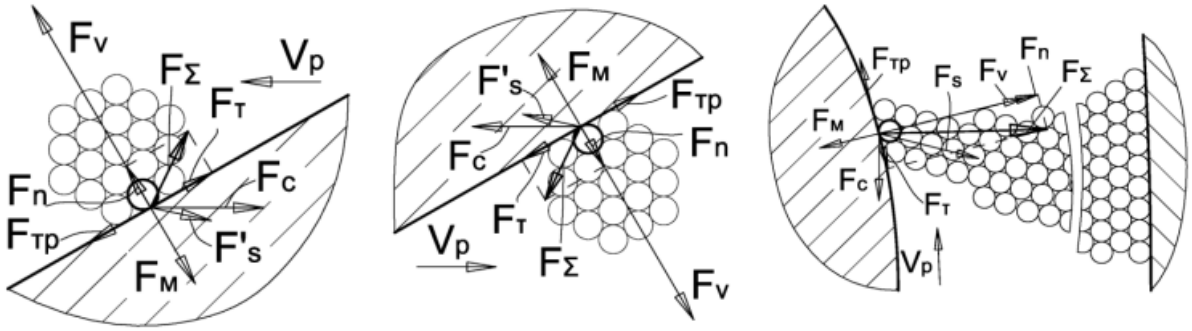


Рисунок 1.5 – Експериментальний стенд для МАО з кільцевим розташуванням робочої зони [1]

Важливим є для проектування нового обладнання володіти інформацією про технологічні вимоги та умови оброблення для забезпечення продуктивного та якісного процесу.

Встановлено, що в робочих зонах кільцевого типу сили, що діють на окремі частинки МАП та представницькі об'єми, представлений у [2, 3], дозволяє узагальнено розглянути та проаналізувати механізм переміщення частинок МАІ та їх груп у робочому зазорі під час МАО. Схема їх взаємодії з частинками МАП під впливом прикладених сил зображена у роботі [1]. Там розглянуто і проаналізовано механізм переміщення груп частинок МАІ в робочому зазорі під час МАО феромагнітних зразків, представлена схема їх взаємодії (рис. 1.6) з частинками МАП під дією прикладених сил (F_v – сила, яка діє на оброблюваний зразок під час його руху на частинки магнітно-абразивного інструменту; $F_{тр}$ – сила тертя між порошком і поверхнею зразка; $F_м$ – магнітна сила; F_s – сила натягнення утворень конусоподібної форми; F'_s –

проекція сили натягнення цих конусоподібних утворень; F_c – сила опору МАІ в насипному стані; F_n і F_τ – нормальна і тангенціальна складові результуючої сили; F_Σ – результуюча сила).



а – «натікання» б – «стікання» в

Рисунок 1.6 – Схема взаємодії МАІ з оброблюваною поверхнею при МАО: а, б – в площині, яка проходить через вісь зразка і паралельна осі кільцевої ванни; в – складові сил в площині, перпендикулярній осі кільцевої ванни [1]

Під час руху деталі в робочій зоні кільцевого типу на зерна порошку, які є складовими представницьких об’єднань, діє результуюча сила F_Σ. При певних значеннях нормальної складової сили F_n відбувається розрив цих об’єднань МАІ. Частина зерен, які знаходяться в контакті з оброблюваною деталлю, продовжує рухатися разом з нею завдяки контактній взаємодії тріботехнічних і магнітних сил як самої деталі, так і представницьких об’ємів МАІ.

Під час руху деталі в режимі «натікання» (рис. 1.6 а), тангенціальні складові сил примушують частинки МАП і їх угрупування підніматися вгору по деталі, поки вони не досягнуть границі розділу середовищ МАІ та повітря, тобто краю робочої зони. Тут, внаслідок крайового ефекту, спостерігається підвищений градієнт магнітного поля, направлений до середини робочої зони (в порошкове середовище), і виникають підвищені магнітні сили F_M, які протидіють силам F_V, що виникають при русі деталі, і сприяють частковому утриманню в зоні робочої щілини та додатковому переміщенню порошку у

вертикальному напрямку, як це ілюструють на рис. 1.6. Навпаки, під час руху деталі в режимі «стікання», спостерігається протилежна картина, де зазначені сили діють в зворотному напрямку.

Беручи до уваги описаний механізм переміщення сформованого МАІ на верстатах з кільцевим розташуванням робочої зони при МАО відповідних деталей, спостерігається негативне явище витіснення феромагнітного середовища за межі робочої зони, як зазначено в [1]. Це витіснення відбувається в ті зони, де процес стає некерованим, і повернення витісненої маси порошку стає неможливим через дію крайового ефекту. Внаслідок цього знижується ступінь заповнення робочої зони МАІ, що призводить до зниження ефективності процесу МАО. Необхідно дослідити можливість відновлення форми МАІ за рахунок дії динамічних сил.

1.6 Висновки

Магнітно-абразивне оброблення є високоефективним методом досягнення високої якості поверхні та точності обробки деталей. Цей метод широко застосовується в таких високотехнологічних галузях, як авіаційна, автомобільна та машинобудівна промисловість. Основою МАО є використання магнітного поля для створення магнітно-абразивного інструменту, який здійснює оброблення поверхні деталі за рахунок механічної дії абразивних часток.

Одним із ключових елементів процесу є установка для МАО, яка повинна забезпечувати стабільне магнітне поле, можливість регулювання технологічних параметрів, надійність і зручність в експлуатації. Установки для МАО дозволяють значно підвищити ефективність виробничих процесів, забезпечити високу якість оброблення та знизити витрати на виробництво.

Особлива увага приділяється параметрам робочого зазору між МАІ та оброблювальною поверхнею, який впливає на інтенсивність механічної дії абразивних часток і розподіл магнітного поля. Важливим аспектом є

правильний вибір магнітно-абразивного порошку, від якого залежить якість оброблення. Для проектування нового обладнання необхідно володіти повною інформацією про процес який відбувається в робочій зоні кільцевого типу. На даний час не достатньо досліджена динамічна складова сили взаємодії МАІ та оброблюваної деталі, що потребує розроблення додаткового пристосування.

2 РОЗРОБЛЕННЯ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ СИЛ В РОБОЧІЙ ЗОНІ КІЛЬЦЕВОГО ТИПУ

Розроблення принципової схеми пристосування для вимірювання сил у робочій зоні кільцевого типу є важливим етапом у створенні ефективного і точного вимірювального пристосування для дослідження процесів взаємодії МАІ та оброблюваної деталі.

Використання сучасних електронних компонентів, таких як тензометричний датчик, мікроконтролери Arduino, АЦП модуль HX711 і радіомодулі NRF24L01, дозволяє забезпечити високий рівень точності та надійності вимірювань. В даному розділі буде детально розглянуто послідовність підключення та взаємодії всіх компонентів пристосування, що забезпечують передачу і обробку даних.

Така розробка потребує глибокого розуміння всіх елементів системи, їхніх характеристик та особливостей функціонування. Кожен компонент відіграє важливу роль у забезпеченні кінцевого результату - точного і надійного вимірювання сил, що діють у робочій зоні кільцевого типу. Крім того, важливо врахувати всі можливі фактори, що можуть вплинути на точність вимірювань, такі як температурні зміни, механічні вібрації та електромагнітні перешкоди. Усе це робить процес розробки складним та багатогранним, вимагаючи не тільки технічних знань, але й уміння інтегрувати різні технології в єдину систему.

2.1 Блок-схема роботи пристосування

Блок-схема є графічним відображенням процесу, системи або комп'ютерного алгоритму, що дозволяє зрозуміло і наочно показати їхні кроки та взаємозв'язки. Цей інструмент широко застосовується в різних галузях діяльності для документування, детального вивчення, ретельного планування, вдосконалення та зрозумілого пояснення складних процесів. Використання

блок-схем сприяє спрощенню та логічному структуруванню інформації, що робить її доступнішою для розуміння і аналізу.

Було розроблено блок-схему (рис. 2.1) для чіткої і наочної демонстрації процесу використання пристосування для визначення динамічної складової сили взаємодії МАІ та оброблюваної деталі. Вона дозволяє легко зрозуміти послідовність дій і взаємозв'язок між різними етапами оброблення, що значно полегшує аналіз та вдосконалення процесу. Блок-схема допомагає виявити можливі проблемні місця, оптимізувати налаштування та забезпечити більш точний контроль над усіма параметрами оброблення. На основі цієї блок-схеми створювалися керуючі програми для мікроконтролера Arduino.

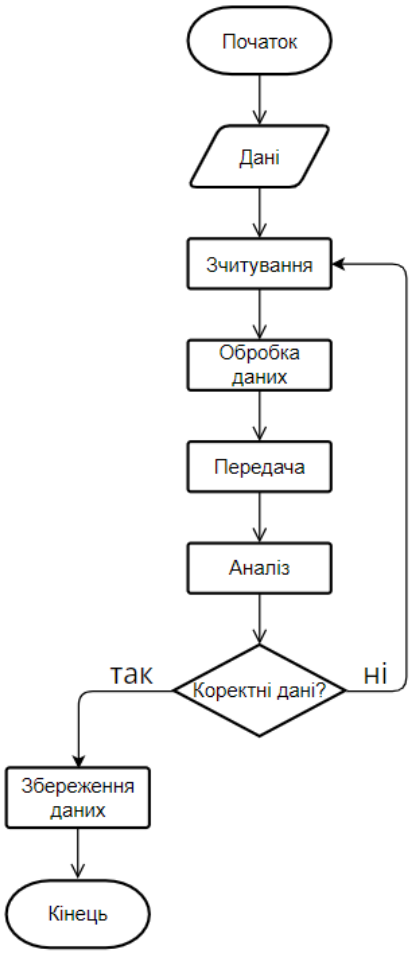


Рисунок 2.1 – Блок-схема роботи пристосування для вимірювання сил

2.2 Опис компонентів системи

Тензодатчик є ключовим елементом системи, що відповідає за вимірювання механічних напружень. Він перетворює механічні деформації в електричний сигнал, який далі обробляється мікроконтролером. Тензодатчики бувають різних типів, але для нашого застосування найкраще підходять резистивні тензодатчики, які характеризуються високою точністю та стабільністю [17]. Обрано тензодатчик моделі CZL-801 з номінальним навантаженням 40 кг та точністю 0,02 (рис. 2.2.). Тензодатчики зазвичай мають високий коефіцієнт чутливості та низький рівень дрейфу, що робить їх незамінними для точних вимірювань в умовах мінливих навантажень [17].

Рисунок 2.2 – Зовнішній вид тензодатчик моделі CZL-801

Резистивні тензодатчики складаються з дроту або фольги, яка змінює свій опір під дією механічного навантаження. Ця зміна опору перетворюється в напругу за допомогою моста Вітстона (рис. 2.3), що є частиною

тензодатчика. Сигнал від тензодатчика потребує подальшого підсилення і фільтрації через АЦП модуль HX711, щоб забезпечити достатній рівень для обробки мікроконтролером. Важливим аспектом є також калібрування тензодатчика, яке проводиться для забезпечення його точності та відповідності специфікаціям.

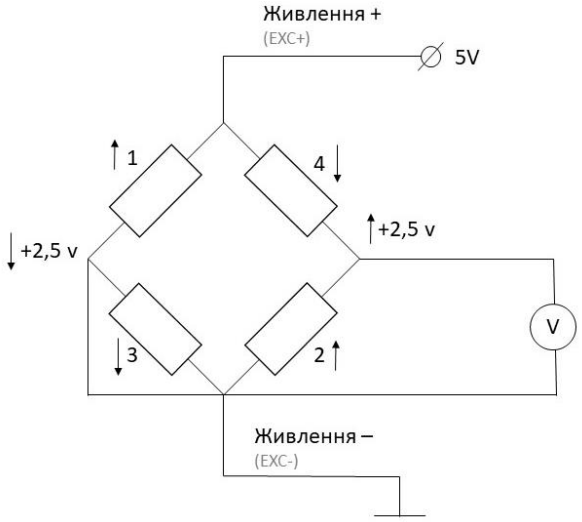


Рисунок 2.3 – Схема підключення тензодатчика через міст Вітстона

Оскільки проводити вимірювання простіше від нульової точки, то в складі тензометричних датчиків часто застосовують схему, що отримала назву «міст Вітстона». Міст Вітстона - це чотириполюсник, що містить у своїй схемі резистори R1, R2, R3 і R4. Резистори розташовуються в плечах моста, тобто, в його незалежних гілках [22].

Важливо те, що за рівності всіх чотирьох опорів моста Вітстона напруга на його виході дорівнюватиме нулю незалежно від напруги на вході. А якщо опір хоча б в одному плечі зміниться, то на виході моста моментально з'явиться напруга, яку легко відстежити і яка прямо пропорційна зміні опору резистора.

Ось цю залежність вихідної напруги моста Вітстона від зміни опорів у його плечах і використовують у тензометричних датчиках. Якщо розмістити в

одному або кількох плечах моста тензометричні резистори, можна відстежувати складні деформації, що виникають у датчику.

Для підсилення та перетворення сигналу з тензодатчика використовується АЦП HX711 з частотою 10/80 Гц (рис. 2.4). Цей модуль забезпечує високу точність вимірювань завдяки інтегрованому підсилювачу з низьким рівнем шуму.

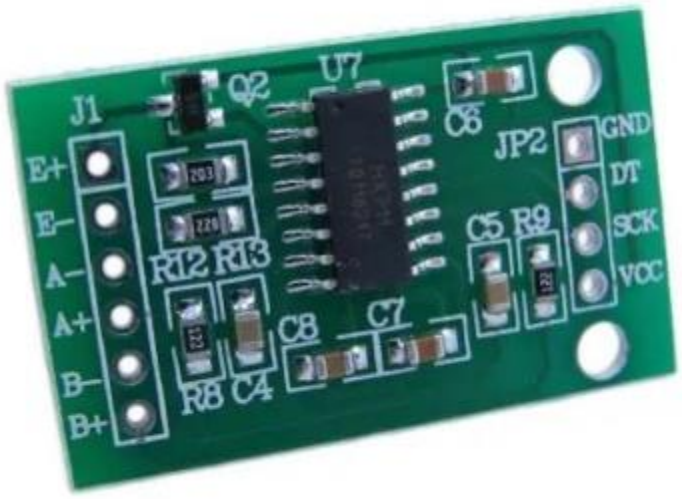


Рисунок 2.4 – Зовнішній вид АЦП HX711

АЦП HX711 виконує кілька важливих функцій:

- Підсилення сигналу, HX711 має інтегрований підсилювач, який дозволяє підсилювати слабкі сигнали від тензодатчика до рівня, зручного для цифрової обробки;
- Фільтрація шумів, завдяки високій точності і низькому рівню шумів, HX711 забезпечує стабільні та точні вимірювання;
- Цифрова обробка сигналів, HX711 перетворює аналоговий сигнал від тензометричного датчика у цифровий формат, що дозволяє легко інтегрувати його з мікроконтролерами.

Схема підключення тензодатчика до Arduino UNO через HX711 зображена на рис. 2.5. E+ (Excitation +) і E- (Excitation -) для подачі живлення на датчик. A+ (Analog+) і A- (Analog-) для зчитування вихідного сигналу

датчика. VCC – Живлення, GND – земля, DT – вихід даних, SCK – тактовий сигнал. Після підключення тензодатчика до HX711, цей модуль підключається до Arduino через цифрові виводи, що дозволяє зчитувати дані та передавати їх далі.

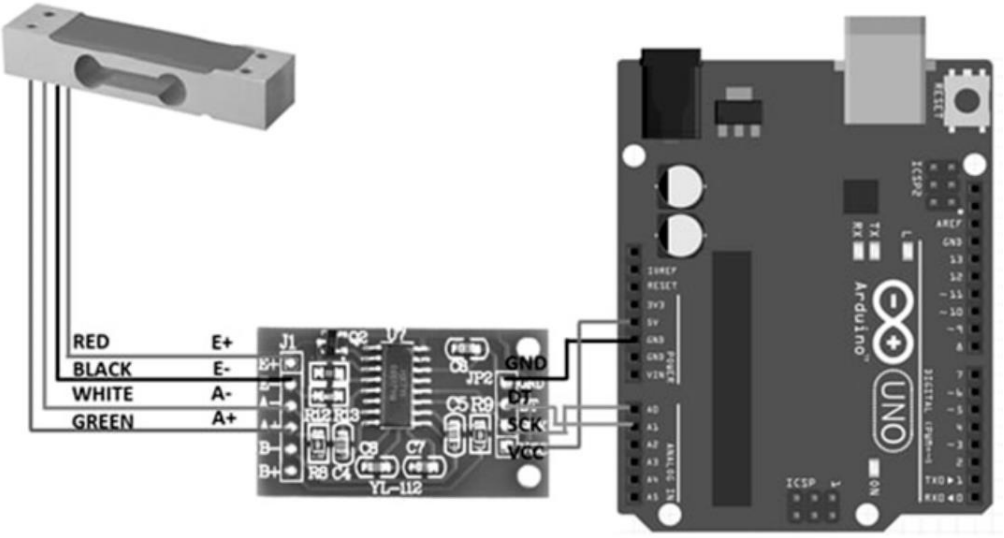


Рисунок 2.5 – Схема підключення тензодатчика до Arduino UNO через HX711 [23]

Для забезпечення коректної роботи тензометричного датчика у пристосуванні для дослідження порошкового середовища було використано апаратну обчислювальну платформу Arduino – це платформа з відкритим вихідним кодом, що включає в себе апаратне і програмне забезпечення для створення інтерактивних проектів. Програмування Arduino зазвичай виконується за допомогою мови програмування C/C++, використовуючи Arduino IDE (Integrated Development Environment).

У цій системі використовуються два мікроконтролери Arduino. Перший мікроконтролер підключається до тензометричного датчика через АЦП модуль HX711 за допомогою інтерфейсу USB, збирає дані та передає їх за допомогою радіомодуля NRF24L01 з SMA антеною. Другий мікроконтролер приймає дані від радіомодуля за допомогою встановленого такого ж самого радіомодуля і передає їх до комп'ютера через COM-порт. Arduino має низку

переваг: серед яких простота використання; доступність великої кількості бібліотек та прикладів коду; а також підтримка різноманітних периферійних пристроїв.

Arduino UNO, як один з найбільш популярних варіантів, оснащений мікроконтролером ATmega328P, який має 14 цифрових входів/виходів (з яких 6 можуть використовуватися як ШІМ-виходи), 6 аналогових входів, кварцовий резонатор на 16 МГц, припаяний роз'єм USB, роз'єм живлення, ICSP-заголовок і кнопку скидання. Для нашого проекту важливими є аналогові входи, які використовуються для читання сигналів з тензодатчика, та можливості з'єднання по USB для передачі даних на ПК.

Радіомодуль NRF24L01 + PA + LNA 2.4ГГц використовується для бездротової передачі даних між двома мікроконтролерами Arduino. Як зазначено в [16] цей модуль працює на частоті 2.4 ГГц і забезпечує надійну передачу даних на відстань до 1000 метрів. Радіоканал на даних радіомодулях може обмінюватися інформацією в обидва напрямки. Кожен модуль можна програмно встановлювати як приймач чи передавач. Завдяки вбудованим підсилювачу потужності (PA) та низько шумовому підсилювачу (LNA), модуль має високу чутливість та потужність передачі. Використання таких модулів дозволяє уникнути проблем з кабельним з'єднанням, що особливо важливо в умовах МАО у великих робочих зазорах кільцевого типу.

Радіомодуль NRF24L01 має низьке енергоспоживання, що дозволяє використовувати його в автономних системах з живленням від батарейки. Від аналогічних модулів відрізняється зменшеними розмірами та можливістю монтажу безпосередньо на плату. Модуль підтримує різні режими передачі, включаючи передачу пакетів даних, автоматичне підтвердження отримання даних та можливість роботи в режимі багатоканальної мережі [8]. Ці можливості забезпечують високу надійність передачі даних навіть в умовах значних електромагнітних перешкод.

Комп'ютер виконує роль кінцевого пристрою для збору, оброблення та аналізу даних, отриманих з тензодатчика. Дані передаються до комп'ютера

через COM-порт, де вони можуть бути збережені, відображені та проаналізовані за допомогою спеціального програмного забезпечення CoolTerm. Важливою частиною є також графічний інтерфейс, який забезпечує зручне відображення даних у режимі реального часу, що дозволяє оперативно аналізувати отримані результати і приймати відповідні рішення.

2.3 Схема підключення компонентів

Тензодатчик підключається до Arduino через спеціальний тензометричний інтерфейс АЦП модуль HX711. Цей інтерфейс дозволяє точно вимірювати мікро напругу, що генерується тензодатчиком. Цифровий сигнал з HX711 передається на Arduino через вивід A1 та A0. Arduino збирає ці дані для подальшої обробки де вони перетворюються в цифрові дані. Важливим аспектом є також правильне живлення тензодатчика і модуля HX711, що забезпечує стабільність вимірювань і високу точність отриманих даних.

Модуль HX711 є 24-бітовим АЦП (аналогово-цифровим перетворювачем), який спеціально розроблений для вимірювання зважування і датчиків напруги. Він дозволяє підключати два датчики з різними коефіцієнтами посилення, що робить його універсальним інструментом для точних вимірювань. Крім того, модуль HX711 має низьке енергоспоживання і може працювати від батареї, що забезпечує автономність системи.

Після чого Arduino з'єднується з радіомодулем NRF24L01 за допомогою SPI інтерфейсу (Serial Peripheral Interface). До цих з'єднань входять такі сигнали:

MOSI (Master Out Slave In) – дані від Arduino до модуля;

MISO (Master In Slave Out) – дані від модуля до Arduino;

SCK (Serial Clock) – тактовий сигнал;

CSN (Chip Select Not) – сигнал вибору модуля.

SPI інтерфейс забезпечує високу швидкість передачі даних між Arduino і радіомодулем, що є важливим для забезпечення оперативного збирання і

передачі вимірювань. Крім того, правильне розташування та підключення модулів забезпечує стабільну і надійну роботу системи, мінімізуючи можливість виникнення помилок у передачі даних.

Радіомодуль NRF24L01 передає дані з Arduino до іншого такого ж радіомодуля, підключеного до другого Arduino. Дані передаються пакетами, що включають інформацію про виміряні значення та службову інформацію для забезпечення коректності передачі. Використання бездротової передачі даних дозволяє уникнути обмежень, пов'язаних з довжиною кабелів, і забезпечує гнучкість у розташуванні вимірювальних компонентів. Слід зазначити що до двох радіомодулів підключена підсилювальна антена SMA.

Передача даних за допомогою радіомодуля включає в себе встановлення з'єднання між двома модулями, налаштування каналів передачі і прийому, а також управління енергоспоживанням. Використання протоколів передачі даних, таких як ShockBurst, який забезпечує надійність і швидкість передачі даних, знижуючи ймовірність втрати даних і підвищуючи загальну ефективність системи.

Другий мікроконтролер Arduino отримує дані від радіомодуля NRF24L01 та передає їх через інтерфейс до комп'ютера. В цьому випадку використовується стандартний COM-порт, який забезпечує надійне з'єднання між Arduino та ПК. Прийом даних включає в себе налаштування радіомодуля на прийом сигналів, обробку отриманих даних і їх передачу на комп'ютер.

USB інтерфейс забезпечує простоту підключення і високий рівень надійності передачі даних, що особливо важливо для систем, що працюють в реальному часі. Крім того, використання стандартного COM-порту дозволяє легко інтегрувати систему з будь-яким комп'ютером, незалежно від його операційної системи і апаратного забезпечення.

На комп'ютері встановлюється програмне забезпечення CoolTerm, яке отримує дані через COM-порт, зберігає їх у файлі або базі даних та відображає у зручному для аналізу форматі. Програмне забезпечення CoolTerm – це термінальний додаток для послідовного порту, для якого потрібен обмін

даними з обладнанням, підключеним до послідовних портів, таких як сервоконтролери, роботизовані комплекти, GPS приймачі, мікроконтролери і т.д. Особливість цього програмного забезпечення, яка безпосередньо потрібна у цьому проекті, це збереження отриманих даних у текстовому форматі, це може бути база даних або файли у форматах CSV, Excel або інших, які легко імпортуються в аналітичні програми, та відправці даних для подальшого аналізу. Також серед особливостей є можливість множинних паралельних підключень, якщо є кілька послідовних портів. Важливим аспектом є також зручний інтерфейс користувача, який дозволяє легко налаштувати параметри з'єднання, переглядати дані і виконувати основні операції з ними.

Основною задачею програмного забезпечення є забезпечення надійного зчитування даних з COM-порту, їх відображення у реальному часі для подальшої обробки.

Програма, яка виконується на першому Arduino, збирає дані з тензодатчика, обробляє їх та передає через радіомодуль. Основні етапи роботи програми включають:

- Ініціалізацію тензометричного інтерфейсу;
- Читання даних з тензодатчика;
- Обробку та масштабування даних;
- Обчислення середнього значення;
- Передачу даних через радіомодуль.

Для реалізації цих завдань використовується стандартна бібліотека для роботи з модулем HX711, яка дозволяє легко отримувати дані з тензодатчика і обробляти їх у реальному часі. Крім того, необхідно налаштувати радіомодуль NRF24L01 для передачі даних на інший Arduino. Програма включає в себе функції для встановлення з’єднання з радіомодулем, передачі даних і перевірки їх коректності.

Розроблено код керуючої програми на базі програмного забезпечення Arduino IDE, який представлений в Додатку А. Він забезпечує ініціалізацію тензодатчика, і радіомодуля, читання даних з тензодатчика і їх передачу через

модуль аналого-цифрового перетворювача (АЦП) HX711 та передачі цих даних бездротовим способом за допомогою радіомодуля NRF24L01 з антеною SMA на інший Arduino, який в свою чергу має такий самий радіомодуль з антеною. Кожну секунду здійснюється вимірювання і передача даних, що забезпечує стабільний потік даних для подальшої обробки. Для розробки цієї керуючої програми потрібно завантажити бібліотеки для допоміжних датчиків, а саме: HX711.h – бібліотека для роботи з модулем аналого-цифрового перетворювача HX711, який використовується для зчитування даних з тензодатчика. SPI.h – бібліотека для роботи з шиною SPI, яка необхідна для взаємодії з радіомодулем NRF24L01. nRF24L01.h та RF24.h – бібліотеки для роботи з радіомодулем NRF24L01.

2.4 Калібрування пристосування

Розроблений код керуючої програми (Додаток А) також виконує калібрувальну функцію тензодатчика. Калібрування пристосування для дослідження порошкового середовища є критичним етапом, який забезпечує точність та надійність отриманих даних. Функція «calibration_factor» використовується для перетворення початкових даних з датчика у вагові одиниці. Значення цього коефіцієнта підбирається експериментально для забезпечення точності вимірювань.

Для проведення калібрування пристосування використовуються еталонні ваги, за допомогою яких визначається відповідність показань датчика реальним значенням ваги. На тензометричний датчик встановлюється еталонна вага (рис. 2.6), у нашому випадку еталонна вага дорівнює 1 кілограм, і відповідно до отриманих результатів налаштовується коефіцієнт так, щоб різниця між виміряними та реальними значеннями була мінімальною. Цей процес повторюється до досягнення бажаної точності. Дослідним шляхом встановлено, що це значення буде дорівнювати «-3.8». Це є оптимальним

числом для калібрування тензометричного датчика до 40кг, який ми використовуємо у цьому пристосуванні.

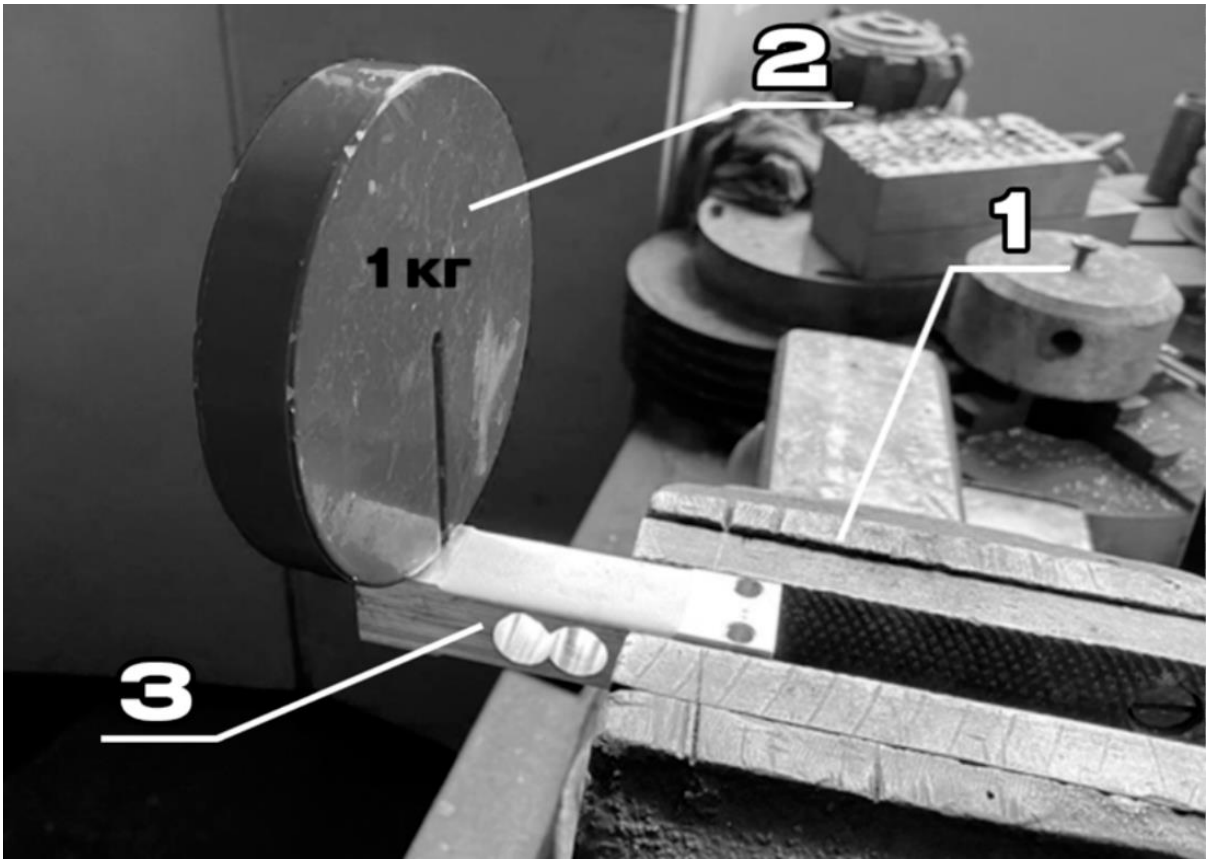


Рисунок 2.6 – Встановлення еталонної ваги на тензодатчик (1 – лещата; 2 – еталонна вага 1 кг, 3 – тензометричний датчик)

24 біти HX711 містять деякий шум, тому в залежності від налаштування, навантаження, температури і вібрації на практиці тільки 16-20 бітів можуть бути значущими. Це приблизно відповідає 4 або максимум 5 значущим цифрам в одному вимірюванні. Тому рекомендується проводити кілька вимірювань для усереднення і зменшення шуму. Для зменшення випадкових похибок і забезпечення стабільності результатів використовується усереднення вимірювань. У програмному коді це реалізовано шляхом проведення 10 вимірювань та обчислення середнього значення.

Після встановлення коефіцієнту калібрування проводяться додаткові тести з різними еталонними вагами для перевірки точності. Якщо похибки все ще присутні, проводяться додаткові налаштування та корекції.

Також у головному циклі програми зчитуються дані з тензодатчика, обчислюється їх значення в унціях та передається на ПК через серійний порт.

Значення «ounces = units · 0.035274;» відповідає точному співвідношенню між грамами і унціями, оскільки: 1 грам = 0.035274 унцій.

Розроблено код керуючої програми для приймаючого дані Arduino на базі програмного забезпечення Arduino IDE, який знаходиться у додатку (Б). Програма на другому Arduino приймає дані від радіомодуля NRF24L01 та передає їх на комп'ютер через COM-порт. Основні етапи роботи включають:

- Ініціалізацію радіомодуля.
- Прийом даних від першого Arduino.
- Передачу даних на комп'ютер через COM-порт.

Програма включає в себе функції для налаштування радіомодуля на прийом даних, їх обробку і передачу через серійний порт на комп'ютер.

Цей код забезпечує ініціалізацію радіомодуля, прийом даних і їх передачу через серійний порт на комп'ютер. Таким чином, комп'ютер отримує дані від тензометричного датчика через два мікроконтролери Arduino і радіомодулі NRF24L01 з антенами SMA за допомогою програмного забезпечення CoolTerm. Після чого дані без бар’єрно можна опрацьовувати та працювати з ними.

На комп'ютері програмне забезпечення CoolTerm виконує наступні функції:

- Підключення до COM-порту;
- Прийом та збереження даних;
- Відображення даних у реальному часі;
- Аналіз та обробка отриманих даних.

Важливим є забезпечення стабільного з'єднання з COM-портом і коректне зчитування даних, що надходять від Arduino.

2.5 Висновки

Розробка принципової схеми пристосування для вимірювання сил у робочій зоні кільцевого типу є складним та багатогранним процесом, що включає вибір та інтеграцію різних електронних компонентів, програмування мікроконтролерів та створення програмного забезпечення для аналізу даних. В результаті створено надійну і ефективну систему, яка забезпечує точні вимірювання і передачу даних у реальному часі. Використання сучасних технологій дозволяє досягти високої точності і надійності вимірювань, що є критичним для дослідження і оптимізації процесів магнітно-абразивного оброблення. Використання бібліотеки HX711 дозволяє точно вимірювати силу прикладену на оброблювальну деталь, а радіомодуль NRF24L01 забезпечує надійну бездротову передачу даних. Програма CoolTerm на комп’ютері використовується для моніторингу та запису даних, що надходять з Arduino через COM порт. Це робить систему зручною для використання у експериментальних цілях. Таке пристосування може знайти широке застосування в різних галузях промисловості, де потрібне точне вимірювання механічних напружень і сил.

3 РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОРОШКОВОГО СЕРЕДОВИЩА В РОБОЧІЙ ЗОНІ КІЛЬЦЕВОГО ТИПУ

В даному розділі буде детально розглянуто конструкційні особливості та технологічні аспекти виготовлення таких пристосувань, включаючи опис деталей, шорсткість поверхонь та посадки.

Було проведено ґрунтовний аналіз вимог до кожної деталі пристосування, враховуючи специфіку їх експлуатації, а також умови магнітно-абразивного оброблення. Зокрема, було визначено основні параметри, такі як габаритні розміри, допустимі відхилення, шорсткість поверхонь та матеріальні характеристики, що є критично важливими для належного функціонування пристосування. У ході аналізу враховувалися всі можливі чинники, які можуть вплинути на якість та довговічність деталей під час їх використання.

3.1 Вибір матеріалу пристосування

У технічних галузях застосовується величезна кількість різноманітних сплавів. Найбільш значущими є ті, що створені на основі заліза, алюмінію та міді. Рідше використовуються сплави на основі цинку, титану, ніобію, цирконію, магнію та інших металів. Існує кілька тисяч видів сплавів, і їх кількість постійно зростає, оскільки різні галузі промисловості висувають нові вимоги до властивостей конструкційних матеріалів.

Сплави, як і метали, поділяються за кольором на чорні та кольорові. До чорних належать сплави на основі заліза, а до кольорових – на основі інших металів. Сплави на основі заліза включають чавуни і сталі. Сплави на основі кольорових металів включають алюмінієві, мідні, цинкові, магнієві, нікелеві та інші сплави. Найбільш широке застосування на практиці знаходять сплави алюмінію та міді. Так як пристосування буде використовуватись

безпосередньо під впливом магнітної складової сили, було обрано саме сплав алюмінію для уникнення несправної роботи пристосування. Він є основним матеріалом для виготовлення розроблених деталей пристосування. Через уникнення впливу магнітної складової сили.

Алюмінієві сплави, в яких основним елементом є алюміній, використовуються для покращення властивостей цього металу за допомогою додавання титану, міді, марганцю, кремнію, магнію, цинку, берилію та інших елементів. Вони відомі своєю малою щільністю та високою питомою міцністю, яка у деяких випадках досягає показників високоміцних сталей. Алюмінієві сплави знаходять широке застосування в багатьох галузях промисловості, особливо в авіаційному, суднобудівному, автомобільному секторах та в будівництві. Найпоширенішими є сплави алюмінію з додаванням міді, кремнію, магнію, а також їхні комбінації: алюміній з міддю і магнієм, з міддю, магнієм і кремнієм, з магнієм і кремнієм, з цинком, магнієм і міддю.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад алюмінієвого сплаву В95 [9]

Сплав	Вміст елементів, %				
	Cu	Mg	Mn	Si	інших
В95	1,4-2,0	1,8-2,8	0,2-0,6	-	5-7 Zn 0,1-0,25 Cr

Отже матеріалом для виготовлення розроблених деталей пристосування був обраний алюмінієвий сплав В95 ДСТУ 2839-94 (табл. 3.1), аналогом э сплав 7075 (літера "В" на початку марки означає що він високоміцним), який забезпечує необхідну міцність та точність при обробленні. Використання цього матеріалу дозволило досягти високих показників якості та довговічності виготовлених елементів. Як зазначено в [21] високоміцний алюмінієвий сплав В95 - найміцніший серед всіх алюмінієвих сплавів, що застосовуються в промисловості. Він належить до конструкційних матеріалів системи Al – Zn – Mg – Cu. Це означає, що алюміній (що займає 91-92% загального складу)

легується магнієм, міддю та цинком. Цей сплав зміцнюють гартуванням при температурі 460 - 470 °С, охолодження проходить у воді, з подальшим штучним старінням, температура при цьому сягає 120…140°С, це відбувається на протязі 16 - 24 годин.

Цей сплав відрізняється високою твердістю і міцністю, тимчасовий опір його 600-700 МПа, межа текучості 550 МПа. Твердість = 150 НВ [21].

Теплопровідність у цього сплаву досить низька, експлуатувати його можна при температурах не вище 100° - 120°.

3.2 Опис деталей пристосування

Пристосування складається з кількох важливих деталей, кожна з яких виконує свою важливу функцію. Почнемо з опису нижньої оправки (рис. 3.1), яка є однією з основних частин розробленого пристосування. Ця деталь виготовлена з високоякісного алюмінієвого сплаву В95, відповідно до стандартів ДСТУ 2839-94. Її основна функція полягає в надійному кріпленні оброблювального зразка до пристосування. Завдяки отвору діаметром 20 мм з посадкою H7 та наявності різьбового отвору М4, до оправки надійно кріпиться тримач для оброблювальної деталі. В отворі діаметром 20 мм розміщується тримач, який потім фіксується гвинтом ISO 1580 - M4 x 14. Додатково, на оправці є фрезерована лиска та паз з радіусом R3, які слугують для кріплення тензодатчика шляхом гвинтового з’єднання. Шорсткість поверхні нижньої оправки становить Ra 1.6, що є оптимальним для забезпечення необхідної точності та гладкості. Допуски на відхилення форми не перевищують 0,01 мм, а радіуси округлення країв відповідають стандарту ДСТУ ISO 2768 - mK. Це забезпечує стабільність і надійність всіх з’єднань, підвищуючи загальну міцність та ефективність конструкції.

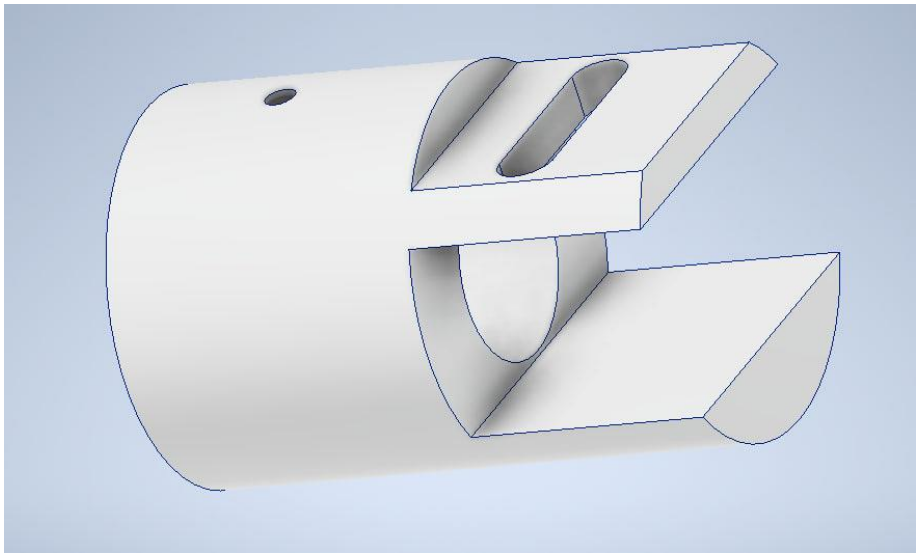


Рисунок 3.1 – 3D ескіз нижньої оправки

Робоче креслення нижньої оправки наведено в Додатку Д.

Верхня оправка (рис. 3.2), як і нижня, виготовлена з високоякісного алюмінієвого сплаву В95, який забезпечує міцність та довговічність конструкції. Вона виконує аналогічні функції до нижньої оправки, але має свою специфіку – вона закріплює тензодатчик з іншого боку та надійно фіксує його до корпусу пристосування. Разом дві оправки утворюють систему, яка забезпечує роботу тензодатчика на згин, що є критично важливим для точності його вимірювань. Верхня оправка має дві фрезеровані лиски та пази з допусками співвісності ∅0,01 Ⓜ. Це забезпечує надійне кріплення тензодатчика у паз з висотою 21 мм та посадкою H7, що гарантує його стабільну роботу. Крім того, для закріплення цієї оправки разом з іншими елементами пристосування до корпусу пристосування, вона має два пази на основній площині, розташовані на діаметрі 48 мм, що сприяє точному та надійному з'єднанню. Шорсткість поверхні на робочих ділянках верхньої оправки становить Ra 0,63, що є надзвичайно важливим для зменшення тертя та зносу, забезпечуючи довговічність роботи всієї системи. Допуски на відхилення форми також не перевищують 0,01 мм, що повністю відповідає вимогам стандарту ДСТУ ISO 2768 - mK, забезпечуючи точність і надійність конструкції.

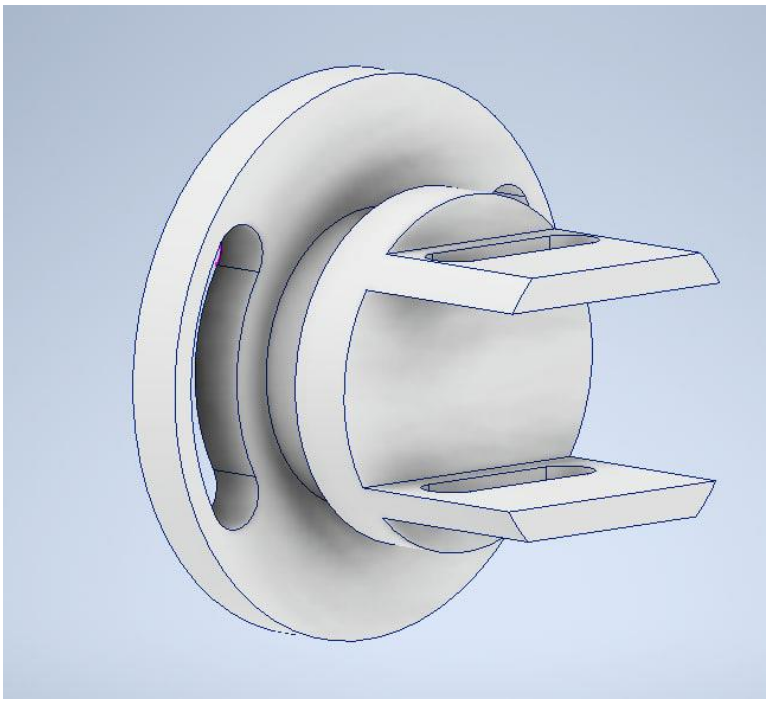


Рисунок 3.2 – 3D ескіз верхньої оправки

Робоче креслення верхньої оправки наведено в Додатку Д.

Корпус пристосування (рис. 3.3) є найбільшою та найважливішою деталлю в усій конструкції, оскільки саме він забезпечує стабільність всієї системи. Основна функція корпусу полягає в тому, щоб надійно закріпити усе пристосування до несучої пластини експериментальної установки, яка обертається під час роботи. Для цього корпус має чотири просвердлені отвори діаметром 7 мм, розташовані на діаметрі 45 мм. Це дозволяє надійно фіксувати його до лабораторної установки. Виготовлений корпус з високоякісного алюмінієвого сплаву В95, що забезпечує високу міцність і довговічність конструкції.

Крім того, для забезпечення надійного з'єднання з іншими елементами пристосування, у корпусі також є два додаткових отвори діаметром 7 мм, розташовані на прилягаючій до верхньої оправки пластині на діаметрі 48 мм та на відстані 46 мм один від одного. Таке розташування отворів було обрано спеціально для поворотної фіксації до інших деталей пристосування, що дозволяє змінювати кут повороту конструкції. Це особливо важливо для

роботи в кільцевій ванній з великими зазорами, де необхідно адаптувати пристосування для досягнення оптимальних умов оброблення.

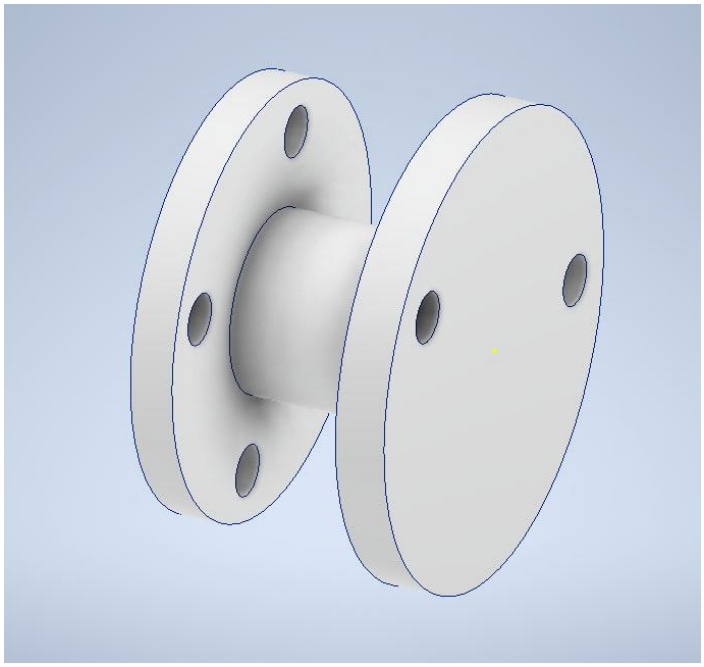


Рисунок 3.3 – 3D ескіз корпусу

Шорсткість поверхні корпусу становить Ra 1,6, що є важливим показником для зменшення тертя і зносу під час експлуатації. Високоякісна обробка поверхні корпусу не лише забезпечує довговічність конструкції, але й сприяє точності вимірювань протягом тривалого часу. Це дозволяє зберігати стабільність роботи пристосування, забезпечуючи надійність та високу ефективність.

Робоче креслення корпусу наведено в Додатку Д.

Покупною деталлю є тензометричний датчик, який було описано у розділі 2.2, є ключовим компонентом пристосування, встановлюється між нижньою та верхньою оправками. Він призначений для вимірювання сил, що діють у робочій зоні, і працює на згин, що дозволяє отримувати високоточні дані про прикладені навантаження. Тензометричний датчик закріплюється таким чином, щоб забезпечити оптимальне розташування та стабільність під час вимірювань.

Кріпильні елементи також відіграють важливу роль у забезпеченні цілісності та надійності конструкції пристосування. Зокрема, використовуються такі компоненти (рис. 3.4), як:

- Гвинти ISO 4762 - M5 x 10 під номером позиції (9), яких на зборці використовується 6 штук. Ці гвинти служать для кріплення тензодатчика до нижньої та верхньої оправок.
- Гвинт ISO 1580 - M4 x 14 під номером позиції (5) використовується для кріплення тримача оброблювальної деталі.
- Шайби ISO 7089 - 6, під номером позиції (6), використовується разом з кріпильними елементами для забезпечення належної фіксації, їх на зборці використовується 2 штуки.
- Гвинти ISO 1580 - M6 x 20 під номером позиції (7), яких на зборці 2 штуки, служать для кріплення основного пристосування до деталі «корпус».
- Гайки ISO 4032 - M6 під номером позиції (8) використовується з гвинтами M6 та шайбою для забезпечення надійного кріплення, і на зборці їх 2 штуки.
-

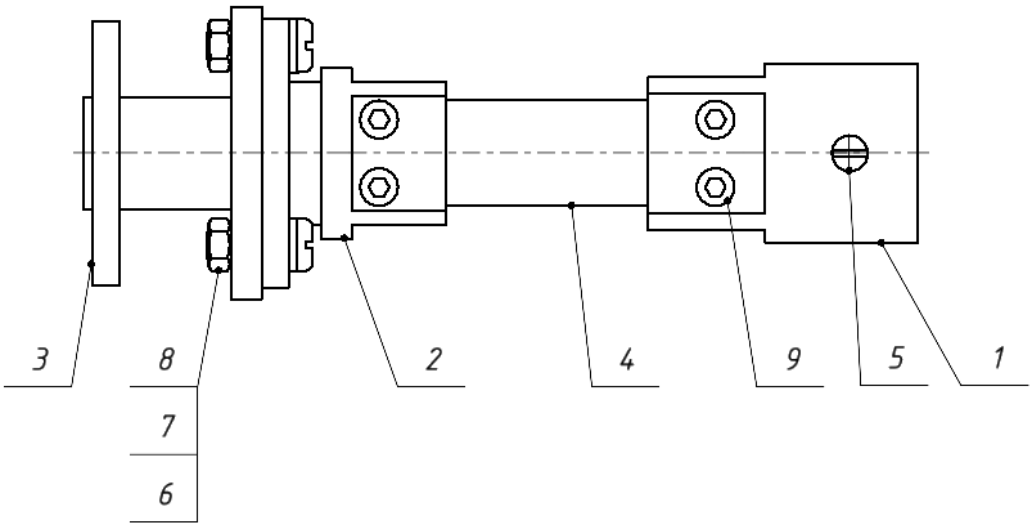


Рисунок 3.4 – Ескіз зборки пристосування

Специфікація на пристосування для вимірювання динамічної складової сили взаємодії МАІ та оброблюваної деталі наведено в Додатку Г.

При розробці креслень використовувалося сучасне програмне забезпечення для комп'ютерного моделювання (CAD-системи), а саме Autodesk Inventor Professional 2025. Завдяки цьому вдалося не лише створити точні й детальні креслення, але й виконати попередню візуалізацію та аналіз зібраної моделі. Це дало змогу детально проаналізувати кожну деталь, передбачити можливі проблеми та внести необхідні корективи ще на етапі проектування. Усі креслення виконані у відповідності зі стандартами ДСТУ, що забезпечує їх універсальність та зрозумілість для виробників, полегшуючи процес виготовлення та збирання деталей.

Було виконано токарну та фрезерну операції для досягнення необхідної форми, точності та шорсткості поверхонь. На кожному етапі виробництва проводився постійний контроль якості, включаючи вимірювання розмірів, шорсткості та твердості матеріалів. Це забезпечило високу точність виготовлення та відповідність усім вимогам проекту, що є запорукою надійності та довговічності пристосування.

3.3 Технологічний процес виготовлення пристосування

Технічні вимоги до виготовлення верхньої оправки визначаємо за ДСТУ 3015—95 [25]:

1) Алюмінієвий сплав В95 за ДСТУ 2839-94 [29];

2) Твердість деталі пристосування 150 НВ;

3) На поверхні не має бути тріщин, викришень, задирок;

4) Крайні відхилення розмірів оправки в мм не повинні перевищувати значень зовнішнього діаметра - Н7;

5) Висвердлені отвори мають мати посадки Н7;

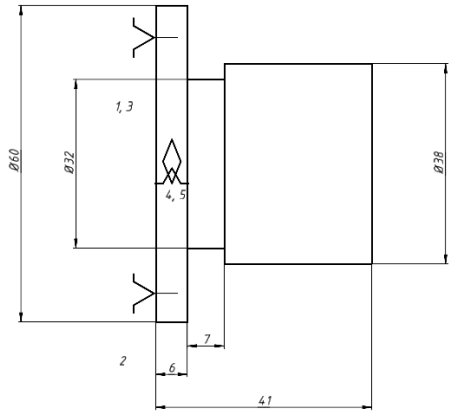
6) Параметри шорсткості поверхонь пристосування за ДСТУ 2413-94 [30] повинні бути, мкм, не більше: посадочного пазу для тензодатчика, які

дотикаються до поверхонь цанг і корпусів фрез поверхонь укорочених цанг – Ra 1,25; зовнішніх поверхонь деталі – Ra 1,6.

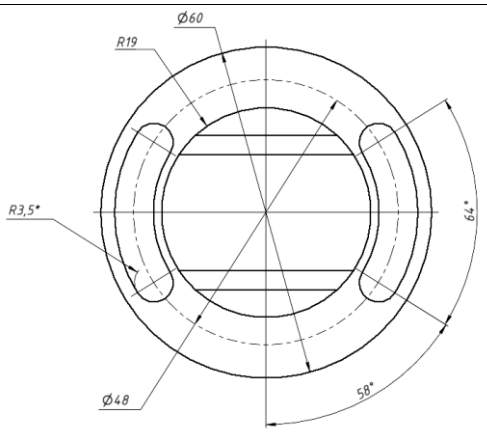
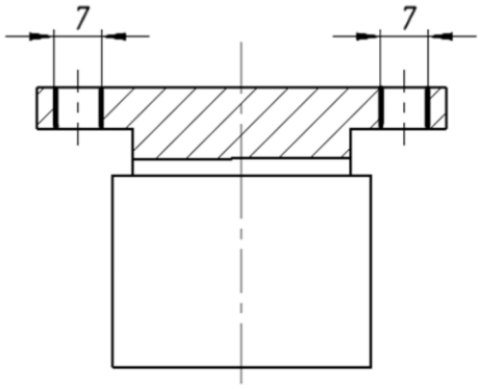
3.3.1 Технологічний процес виготовлення верхньої оправки

Технологічний процес виготовлення верхньої оправки за допомогою верстатів з ЧПК і застосуванням сучасного обладнання та інструментів представлено в таблиці 3.2.

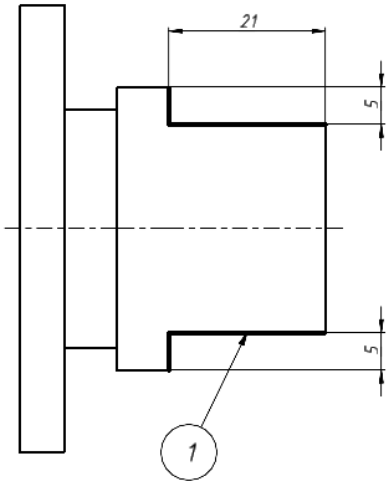
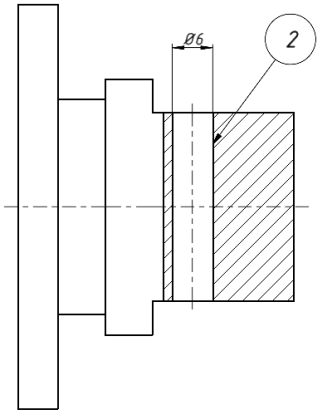
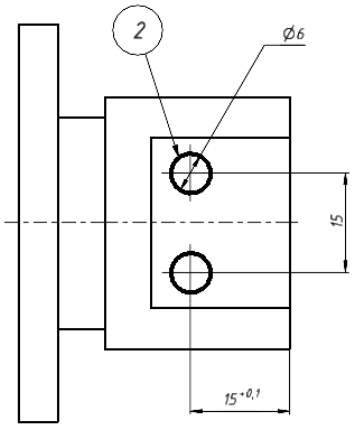
Таблиця 3.2 – Технологія виготовлення верхньої оправки

№	Найменування операції	Ескіз заготовки та базування	Верстат, інструмент	Пристосування
005	Токарна з ЧПК 1) Торцювання 2) Токарна операція 3) Відрізка заготовки 41мм.		Верстат горизонтально-токарний HAAS ST-20, прохідний різець STTCR 2020K 16, прохідний різець STFCR 2020K 16, канавочний різець QD-NN2J60C25A, відрізний різець QD-NN1G60C25AY 1	Трьохкулачковий патрон, Штангенциркуль

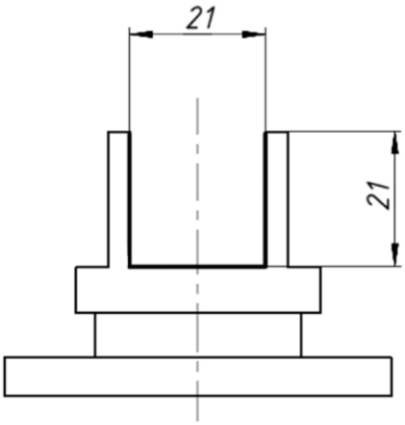
Продовження таблиці 3.2

№	Найменування операції	Ескіз заготовки та базування	Верстат, інструмент	Пристосування
010	Фрезерна операція Фрезерування пазів	 	Вертикально-фрезерний верстат HAAS VF-4SS з ЧПК, кінцева фреза 1K223-0200-020-NG H10F 4мм	Планшайба, штангенциркуль

Продовження таблиці 3.2

№	Найменування операції	Ескіз заготовки та базування	Верстат, інструмент	Пристосування
015	Свердління та фрезерування з ЧПК. 1) Фрезерування лиски 2) Свердління діаметром 6мм	  	Вертикально-фрезерний верстат HAAS VF-4SS з ЧПК, кінцева фреза 1К223-1600-050-NH H10F 16мм, свердло 860.1-0600-048A1-NM H10F 6мм	Планшайба, штангенцир куль

Кінець таблиці 3.2

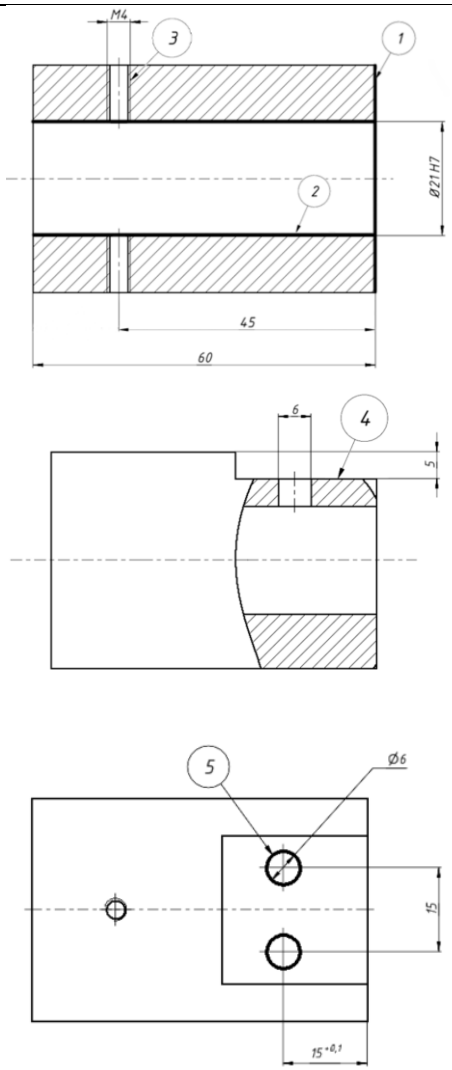
№	Найменування операції	Ескіз заготовки та базування	Верстат, інструмент	Пристосування
020	Фрезерна з ЧПК. Фрезерувати паз шириною 21мм та глибиною 26мм.		Вертикально-фрезерний верстат HAAS VF-4SS з ЧПК, кінцева фреза 1K223-1600-050-NH H10F 16мм	Планшайба, штангенцир куль
025	Контрольна операція Перевірка розмірів			

Маршрутна карта виготовлення верхньої оправки наведено в Додатку Е.

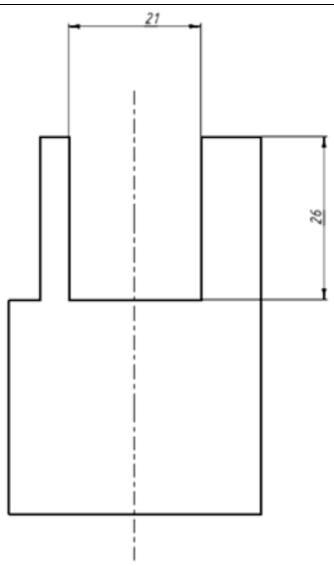
3.3.2 Технологічний процес виготовлення нижньої оправки

Технологічний процес виготовлення нижньої оправки на верстатах з ЧПК і застосуванням сучасного обладнання та інструментів представлено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Технологія виготовлення нижньої оправки

№	Найменування операції	Ескіз заготовки та базування	Верстат, інструмент	Пристосування
005	Токарна з ЧПК 1) Торцювати 2) Фрезерувати отвір діаметром 20 H7 мм. 3) Свердлити отвір діаметром 3,5, та нарізати різьбу М4. 4) Фрезерувати лиску 5) Свердлити отвір 6мм 7) Відрізка заготовки довжиною 60мм і діаметром 40мм.		Вертикально-фрезерний верстат HAAS VF-4SS з ЧПК, прохідний різець QS-SMALL 1212E3, кінцева фреза 1K223-1600-050-NH H10F 16мм, мітчик М4, свердло 860.1-0600-048A1-NM H10F 6мм, відрізний різець QD-NN1G60C25 AY1	Планшайба, штангенциркуль

Кінець таблиці 3.3

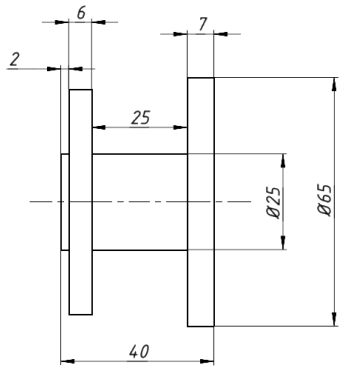
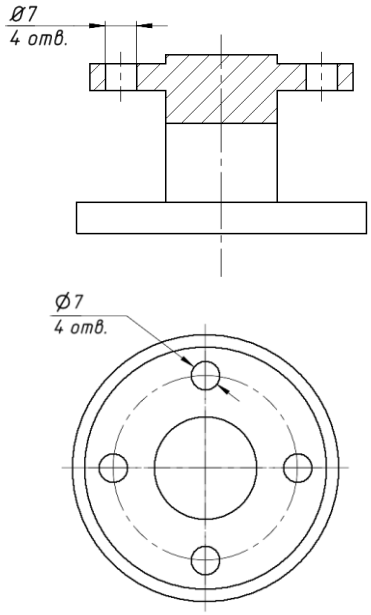
№	Найменування операції	Ескіз заготовки та базування	Верстат, інструмент	Пристосування
010	Фрезерна з ЧПК. Фрезерувати паз шириною 21мм та глибиною 26мм.		Вертикально-фрезерний верстат HAAS VF-4SS з ЧПК, кінцева фреза 1K223-1600-050-NH H10F 16мм	Планшайба, штангенциркуль
015	Контрольна операція Перевірка розмірів (як мінімум діаметр)			

Маршрутна карта виготовлення нижньої оправки наведено в Додатку Е.

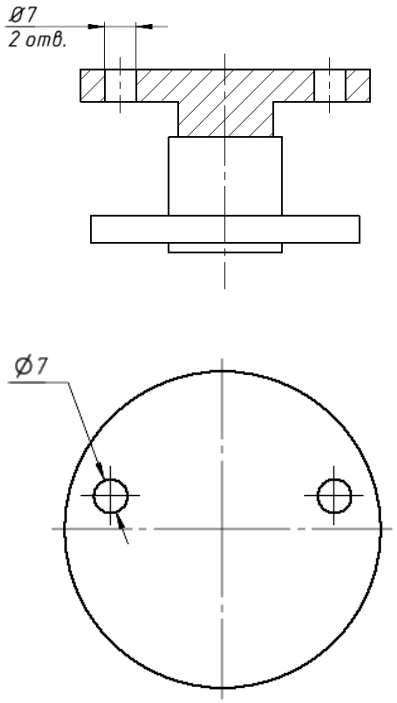
3.3.3 Технологічний процес виготовлення корпусу

Технологічний процес виготовлення корпусу на верстатах з ЧПК і застосуванням сучасного обладнання та інструментів представлено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Технологія виготовлення корпусу

№	Найменування операції	Ескіз заготовки та базування	Верстат, інструмент	Пристосування
005	Токарна з ЧПК 1) Торцювання 2) Токарна операція 4) Відрізка заготовки 40мм.		Верстат горизонтально-токарний HAAS ST-20, прохідний різець STTCR 2020K 16, відрізний різець QD-NN1G60C25AY1	Трьохкулачковий патрон , Штангенциркуль
010	Свердлильна. Свердлити отвори діаметром 7мм.		Вертикально-фрезерний верстат HAAS VF-4SS з ЧПК. Свердло 7мм 460.1-0700-021A0-XM GC34.	Планшайба, Штангенциркуль

Кінець таблиці 3.4

№	Найменування операції	Ескіз заготовки та базування	Верстат, інструмент	Пристосування
015	Свердлильна. Свердлити отвори діаметром 7мм. Два установа		Вертикально-фрезерний верстат HAAS VF-4SS з ЧПК. Свердло 7мм 460.1-0700-021A0-XM GC34.	Планшайба, Штангенциркуль
020	Контрольна операція Перевірка розмірів			

Маршрутна карта виготовлення корпусу наведено в Додатку Е.

3.4 Розрахунок припуску при механічному обробленні

Для чорнового та чистового оброблення зовнішнього діаметру 60 мм корпусу фрези необхідно розрахувати припуски. Для цього скористуємось методикою, наведеною в довіднику [24]:

Мінімальне значення припуску розраховують за наступною формулою:

$$2Z_{min} = 2(\ R_{Zi-1} h_{i-1} \sqrt{p_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2}\ )$$

де R_{Zi-1} – висота мікронерівностей поверхні на попередньому проході;

h_{i-1} – глибина дефектного поверхневого шару на попередньому проході;

p_{i-1}^2 – сумарне значення просторових відхилень взаємопов'язаних поверхонь, які залишилися після попереднього проходу;

Визначення припуску для чорнового проходу. За табл. Б.1 [12]:

Rz = 150 мкм, h = 250 мкм

За табл. В.14 [12] кривизна

$$\rho = 0{,}4\%L$$

Тоді:

$$\rho = 0{,}4\% \cdot 60 = 0{,}24 \text{ мм} = 240 \text{ мкм}$$

Значення ε розраховуємо за формулою (2.39) [25]:

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_\sigma^2 + \ \varepsilon_з^2}$$

За табл. Д.2 [12] похибка закріплення при установці заготовки в трикулачковому самоцентрувальному патроні становить:

$$\varepsilon_3 = 200$$

Похибка базування враховуючи для поверхні обертання:

$$\varepsilon_\sigma = 0$$

Отже

$$2Z_{min} = 2\left(150 + 250\sqrt{240^2 + 200^2}\ \right) = 1424 \text{ мкм}$$

Допуск після обробки h12

Визначення припуску для чистового проходу

Згідно з табл. Б.16 [12]:

$$Rz = 120 \text{ мкм}, h = 120 \text{ мкм}$$

Кривизна після чорнового точіння:

$$\rho_2 = \rho_{\text{чорн}} = 0{,}06 \cdot \rho = 0{,}06 \cdot 240 = 14{,}4 \text{ мкм}$$

Згідно з формулою (2.30) [21] похибка установки дорівнює:

$$\varepsilon_2 = K_y \cdot \varepsilon_1$$

де

K_y – коефіцієнт зменшення початкової похибки при виконанні попереднього проходу.

$$Ky = 0{,}06$$

Тоді:

$$\varepsilon_2 = 0{,}06 \cdot 280 = 16{,}8 \text{ мкм}$$

Отже

$$2Z_{min} = 2\left(120 + 120\sqrt{14{,}4^2 + 16{,}8^2}\right) = 524 \text{ мкм}$$

Допуск після обробки h9

3.5 Розрахунок режимів різання

Проведемо розрахунок режимів різання для токарних операцій з ЧПК. Для цього скористуємось методичними вказівками з довідника [12]. Операції виконуються на верстаті горизонтально-токарному HAAS ST-20.

Загальний припуск на обробку:

$$\delta = \frac{D - d}{2}, \text{мм}$$

де D = 65мм – діаметр заготовки;

d = 60мм – діаметр деталі.

$$\delta = 2.5 \text{ мм}$$

Рекомендується знімати припуск за один прохід інструменту, за умови якщо це дозволяє міцність інструменту, який обробляє заготовку.

При чорновій обробці глибина різання t дорівнює:

$$t = 1 \text{ мм}$$

За [12] призначаємо подачу S_0 = 0,8 мм/об.

Визначаємо швидкість різання V_1 м/хв

$$V_1 = \frac{C_V}{T^m \cdot t^x \cdot S_0^y} K_V, \text{м/хв}$$

де T = 30хв – середнє значення стійкості різця;

C_V = 328 – коефіцієнт пропорційності ;

m = 0.28, x = 0.12, y = 0.5 – показники степенів.

KV – коефіцієнт, що враховує умови різання:

$$K_V = K_{mV} \cdot K_{nV} \cdot K_{iV}$$

де K_{mV} = 0,8 – коефіцієнт якості оброблюваного матеріалу;

K_{nV} = 0,9 – коефіцієнт стану поверхні заготовки;

K_{iV} = 1 - коефіцієнт, який враховує якість матеріалу інструменту.

$$V_1 = 101 \text{ м/хв}$$

Швидкість обертання шпинделя розраховується за формулою:

$$n = \frac{v \cdot 1000}{\pi D}$$

Підставимо дані:

$$n = \frac{101 \cdot 1000}{\pi \cdot 60} \approx 535 \text{ об/хв}$$

Розрахуємо значення складника сил різання для нашого різця використовуючи формулу:

$$P_{z,x} = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot {S_0}^y \cdot {V_1}^n \cdot K_p \text{ , Н}$$

де $Cp = 40$ – коефіцієнт;

$n = 0$, $x = 1$, $y = 0.75$ – показники степенів.

K_V – коефіцієнт, який враховує конкретні умови обробки:

$$Kp = K_{Mp} \cdot K_{\varphi p} \cdot K_{\gamma p} \cdot K_{\lambda p} \cdot K_{tp}$$

де $K_{Mp} = 1.3$ – коефіцієнт, який враховує вплив якості матеріалу заготовки;

$K\varphi p = 0.98$, $K\gamma p = 1$, $K\lambda p = 1$, $Ktp = 1$ – коефіцієнти, які враховують геометричні параметри інструменту;

Отже підставимо всі вищезазначені значення:

$$Kp = 1{,}3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}98 = 1{,}274;$$

Округлюємо значення до сотих і отримуємо: $Kp = 1.3$;

Тоді

$$P_{z,x} = 10 \cdot 40 \cdot 1 \cdot 0.8^{0.75} \cdot 101^0 \cdot 1.3 = 430{,}06912 \text{ Н},$$

Округлюємо значення та приймаємо

$$Pz,x = 430 \text{ Н}.$$

4 ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

Технологічні операції для виготовлення верхньої та нижньої оправок, корпусу виконуються на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК). Верстати з ЧПК - це обладнання, яке автоматично обробляє деталі за допомогою комп'ютерного управління. Такі верстати широко використовуються у різних галузях промисловості, включаючи машинобудування, автомобілебудування, аерокосмічну галузь та інші сфери.

4.1 Опис верстатів з ЧПК

Як зазанчає автор у [28] основні компоненти верстата з числовим програмним керуванням (ЧПК) складаються з наступного:

- Основа верстата: це міцна структура, на якій розташовані всі рухомі частини та інструментальне обладнання;
- Верстати з ЧПК зазвичай оснащуються закритими захисними кожухами, які запобігають викиду стружки та ріжучої рідини, зменшуючи ризик випадкових травм операторів. Крім того, ці захисні пристрої забезпечують додаткову безпеку, знижуючи рівень шуму та покращуючи робоче середовище;
- Інструментальне обладнання: ЧПК верстати здатні використовувати різні інструменти для виконання широкого спектру операцій, включаючи фрезерування, свердління, гравіювання та нарізання різьби. Верстати з ЧПК зазвичай оснащені автоматичним револьверним супортом, який може самостійно змінювати інструменти під час роботи, забезпечуючи безперервне виконання кількох операцій обробки;
- Рухомі елементи: Вони включають шпиндель, який обертає інструмент, а також осі (X, Y, Z), що контролюють рух верстата в різних напрямках. Деякі верстати з ЧПК можуть мати додаткові осі, такі як поворотна вісь

(A) або крокова вісь (B), що дозволяє виконувати складні операції обробки;

– Програмне забезпечення: Сучасні ЧПК верстати оснащені спеціалізованим програмним забезпеченням, яке дозволяє легко створювати, редагувати та завантажувати програми обробки. Це програмне забезпечення часто інтегрується з CAD/CAM системами, що дозволяє швидко і точно перетворювати проєктні моделі в інструкції для верстата;
– Контролер ЧПК: це комп'ютерний контролер, який отримує програму обробки, створену оператором або інженером, і керує рухами верстата та виконанням операцій відповідно до цієї програми.

Переваги верстатів з ЧПК включають високу точність обробки, автоматизацію виробничого процесу, швидкість та ефективність, здатність виконувати складні операції та забезпечувати високу якість готових деталей.

Верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) є ключовими інструментами в промисловому виробництві, де необхідна точна та автоматизована обробка деталей високої якості. У нашому випадку, для операцій 005 (табл. 3.2) використовується верстат горизонтально-токарний HAAS ST-20 (рис. 4.1). Після цього переустановлюємо заготовку на інший верстат, для фрезерних операцій. Для операцій 010 – 020 (табл. 3.3) використовується вертикально-фрезерний верстат HAAS VF-4SS (рис. 4.2).

Рисунок 4.1 – Верстат горизонтально-токарний HAAS ST-20 [13]

Як зазначено у [4] високопродуктивні токарні центри серії ST від Haas відрізняються винятковою гнучкістю налаштувань, підвищеною жорсткістю конструкції та значною термостійкістю, що гарантує їх стабільну роботу навіть за умов максимальних навантажень. Токарний верстат моделі ST-20, незважаючи на свої компактні розміри, пропонує велику робочу зону, що дозволяє ефективно обробляти великі деталі. Цей верстат представляє найкраще співвідношення ціни та якості у своєму класі.

Рисунок 4.2 – Вертикально-фрезерний верстат HAAS VF-4SS [26]

Супершвидкісний вертикальний обробний центр Haas оснащений високошвидкісним шпинделем, який забезпечує точні рухи та оперативну зміну інструменту, що сприяє значному скороченню циклу обробки та підвищенню продуктивності. Як зазначає [5] кожен верстат серії SS обладнаний шпинделем з прямим приводом, що досягає швидкості 12 000 обертів на хвилину, а також супершвидкісним інструментальним магазином бокового кріплення. Це дозволяє забезпечити виняткову точність і швидкість руху по всіх осях.

4.2 Генерування керуючої програми для верстатів з ЧПК

Основним інструментом програмування верстатів з ЧПК є коди. Програмування таких верстатів включає використання G-кодів та M-кодів. G-код - це мова програмування, що містить інструкції для виконання операцій на верстаті з ЧПК, забезпечуючи високу точність і повторюваність деталей. M-код відповідає за керування різними функціями верстатів з ЧПК, такими як запуск і зупинка обертання шпинделя [19].

G-код складається з комбінацій букв і чисел [14], де кожна команда виконує певну функцію або операцію. Основні команди G-коду включають рухи верстату (наприклад, по осях X, Y, Z), вмикання та вимикання інструменту, зміну швидкості руху, зміну координатного початку, вибір режиму роботи верстату (наприклад, свердління, фрезерування, нарізання різьби) та інші операції.

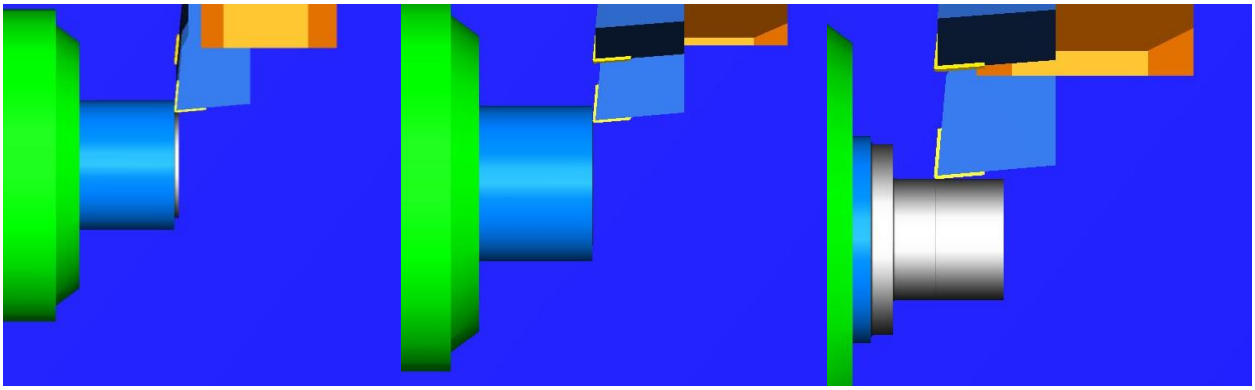
Для створення програм ЧПК можна використовувати спеціалізоване програмне забезпечення, таке як CAM (Computer-Aided Manufacturing) системи, в нашому випадку це Delcam FeatureCam 2013 та Autodesk Fusion 360. В цих програмах оператор або програміст створює візуальну модель деталі, вибирає операції обробки та налаштовує параметри. Після цього програма генерує відповідний G-код, який завантажується на верстат для виконання обробки.

G-код також може бути написаний вручну за допомогою текстового редактора або спеціальних програм для редагування G-коду. Оператор або програміст повинен знати синтаксис і команди G-коду для правильного складання програми обробки.

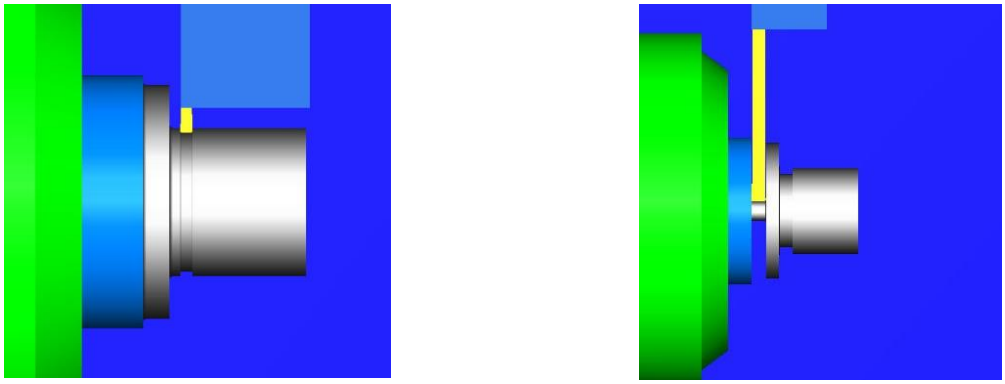
4.2.1 Токарна операція з ЧПК

За допомогою середовища Delcam FeatureCam 2013 створимо керуючу програму для операцій 005 (табл. 3.2) верхньої оправки на токарному верстаті

HAAS ST-20 з ЧПК. Першим етапом обираємо заготовку. Так як деталь має циліндричну форму обираємо «круглу» заготовку. Деталь зажимається в трьохкулачковому патроні, тому базуємо по торцю заготовки. Після цього обираємо інструмент відповідно до технологічного маршруту виготовлення деталі (Додаток Е), а також режим різання. Наступним етапом є виконання необхідних технологічних операцій на горизонтально – токарному верстаті. Першим кроком буде підрізання торця. Використання середовища FeatureCam дозволяє провести симуляцію цієї операції для перевірки наявності можливих помилок. Перше підрізання є чорновим, після зміни інструменту йде чистове підрізання. Для операції точіння потрібно побудувати криву, для цього обираємо параметр «геометрія», обираємо інструмент «лінія» і задаємо їй відповідні параметри. У параметрі «Крива» створюємо криву з заданої лінії траєкторії переміщення інструменту. Обираємо створену криву у параметрі «Точіння», обираємо інструмент і виконуємо операцію. Наступною операцією створюємо криву для виконання прорізання канавки. Обираємо створену криву у параметрі «Канавка», встановлюємо, необхідні для виповнення цієї операції, параметри, обираємо інструмент і виконуємо операцію. Після цього виконуємо операцію відрізання деталі. Для цього створюємо елемент «Відрізання», задаємо необхідне положення для елементу «Відрізання» та виконуємо операцію. Після виконаних операцій необхідно вигрузити G-код, який далі можна використовувати для токарної операції виготовлення деталі. Отриманий G -код наведено в Додатку В. В результаті ми отримали переходи, які зображені на рис. 4.3.



а б в



г е

Рисунок 4.3 – Операція чорнового підрізання торця (а), операція чистового підрізання торця (б), цикл обточювання (в), операція підрізання канавки (г), операція відрізання деталі (е).

4.2.2 Фрезерна операція з ЧПК

Для виконання операцій «010 – 020» (табл. 3.2) ми створимо окрему частину керуючої програми за допомогою середовища Autodesk Fusion 360 для оброблення верхньої оправки на фрезерному верстаті з ЧПК HAAS VF-4SS. У середовищі Autodesk Fusion 360 процес проектування здійснюється аналогічно до будь-якої іншої програми САПР. Тому спочатку будуємо модель у вкладці «Design».

Спочатку налаштовуємо заготовку за допомогою опції «Setup», загружаємо у Autodesk Fusion 360 виготовлену заготовку у попередніх етапах,

котрі наведено в Додатку Е. Її розміри відповідають параметрам, наведеним у відповідній технологічній операції (табл. 3.2). Обираємо відповідний фрезерний верстат HAAS VF-4SS для виготовлення деталі у вкладці «Machine» (рис. 4.4).

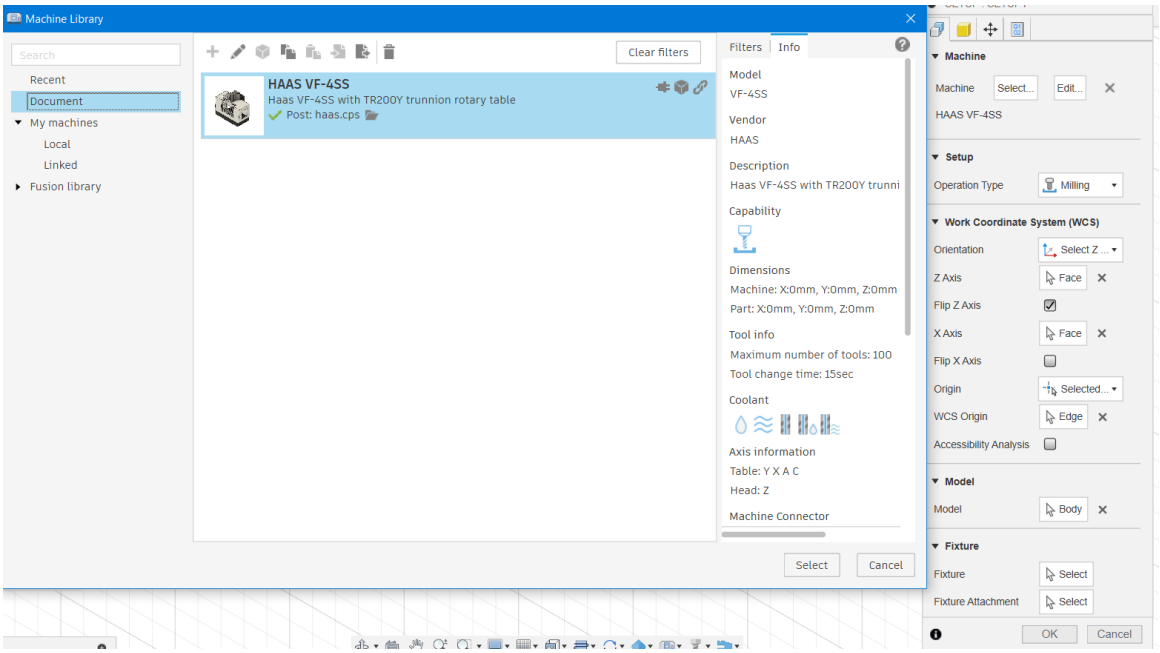


Рисунок 4.4 – Обираємо верстат для виготовлення деталі в середовищі Autodesk Fusion 360

Після цього, переходимо до виконання необхідних операцій на фрезерному верстаті. В середовищі Autodesk Fusion 360, згідно з технологічним процесом, першою операцією є фрезерування пазів. Інструменти (рис. 4.5) та режими різання ретельно обираємо відповідно до технологічного процесу фрезерування пазів «010» (таблиця 3.2), щоб забезпечити оптимальну якість виготовлення деталі. Середовище Fusion 360 також дозволяє провести симуляцію операції для виявлення можливих помилок, що значно полегшує процес налаштування. Після завершення симуляції з’являється детальна візуалізація обробленої заготовки та траєкторія руху інструменту, що допомагає переконатися у правильності виконання операції.

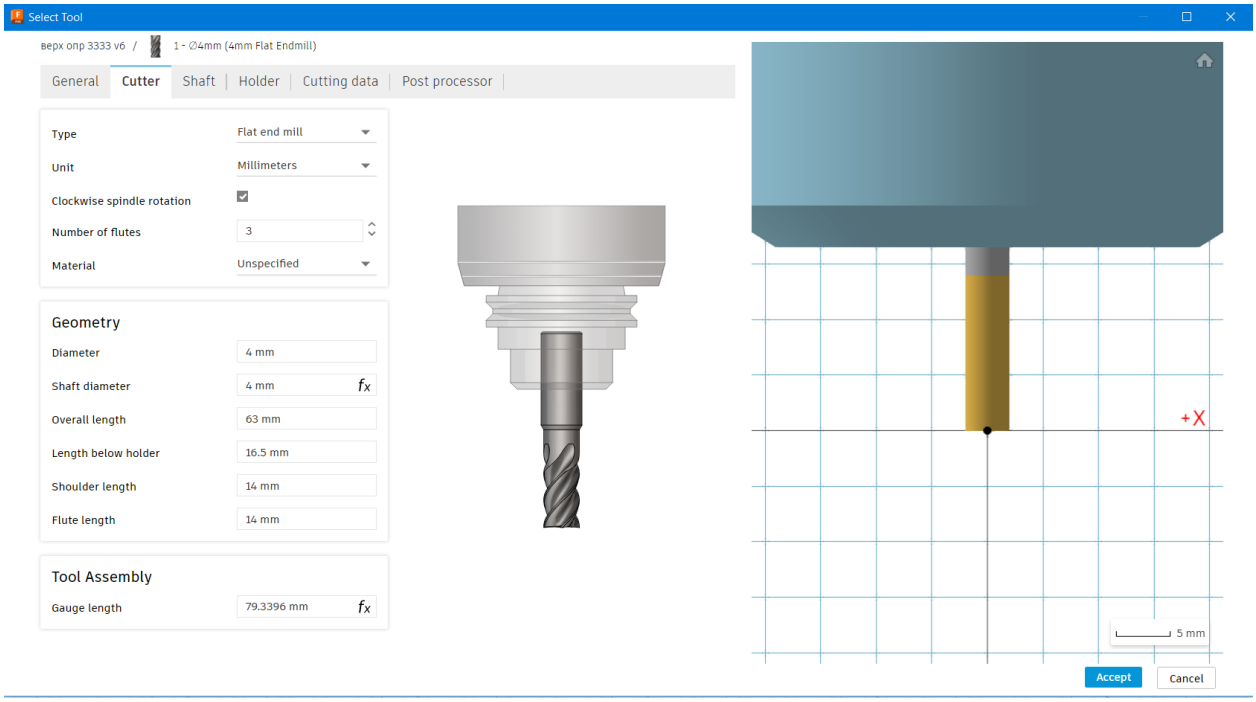
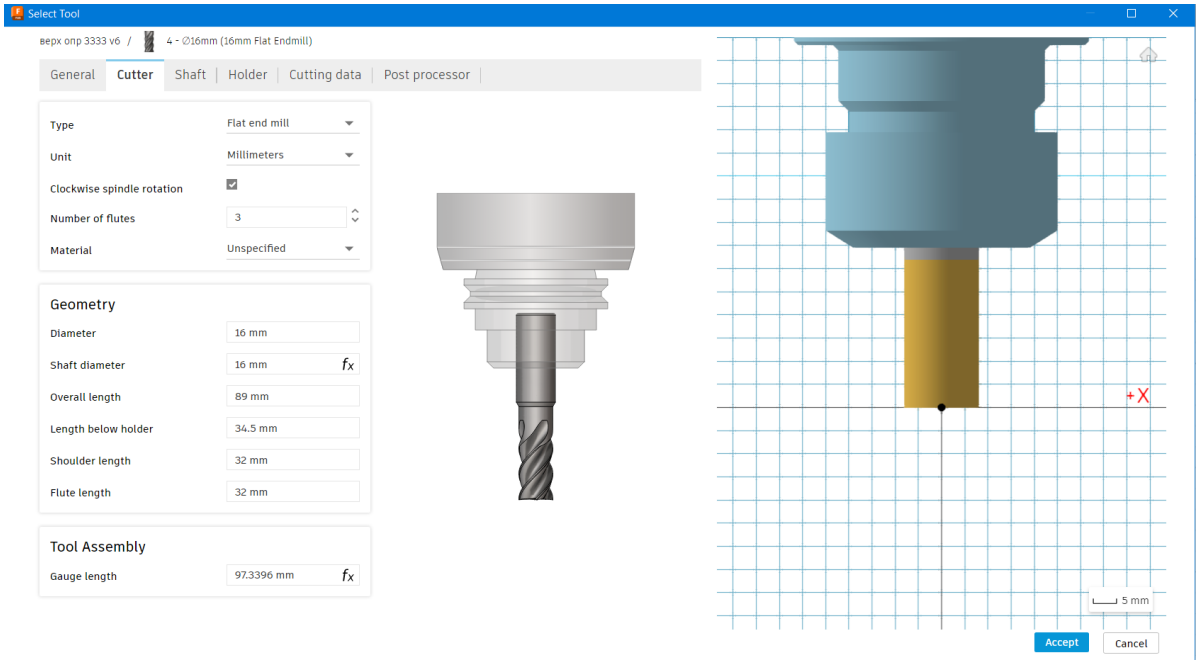
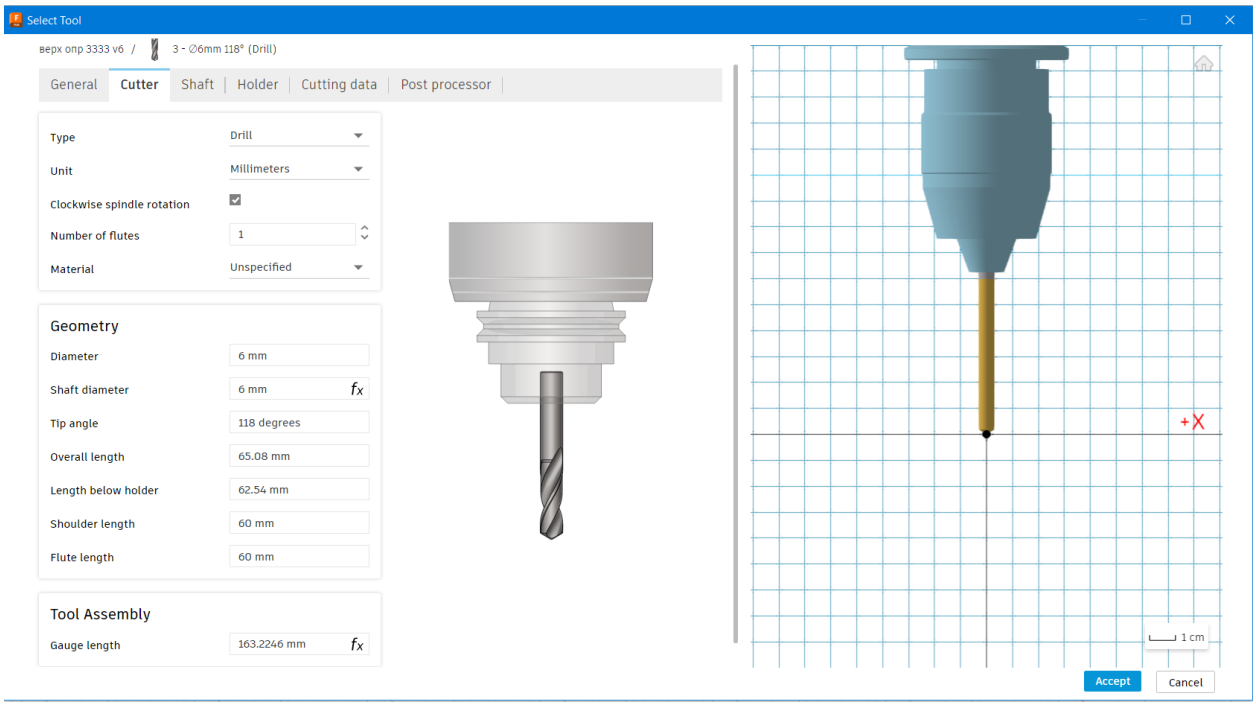


Рисунок 4.5 – Обираємо необхідний інструмент для операції «010»

Наступним етапом є виконання операцій під номером «015» (табл. 3.2), що включає фрезерування лисок та свердління отворів. Ретельно обираємо потрібні площини для оброблення, режими різання та необхідний інструмент для виконання цих операцій. Для фрезерування використовується фреза діаметром 16 мм (рис. 4.6 а), а для свердління отворів – свердло діаметром 6 мм (рис. 4.6 б), що забезпечує високу точність обробки. Після виконання операції, отвори будуть з основним відхиленням H7, що відповідає необхідним вимогам.



а



б

Рисунок 4.6 – Вибір інструменту фрези для операцій «015» та «020» (а), вибір інструменту свердло для операції «015» (б)

Фінальна операція у середовищі Autodesk Fusion 360 – це фрезерування пазу шириною 21 мм та глибиною 26 мм, яка наведена в таблиці 3.2 під

номером «020». Знову ж таки, ретельно обираємо необхідну фрезу (рис. 4.6 а) та режими різання для неї, щоб забезпечити точність і якість виконання цієї операції. Виконання цієї операції завершить процес оброблення, дозволяючи отримати деталь з необхідними параметрами та характеристиками.

В кінці ми отримали переходи, які зображені на рис. 4.7.

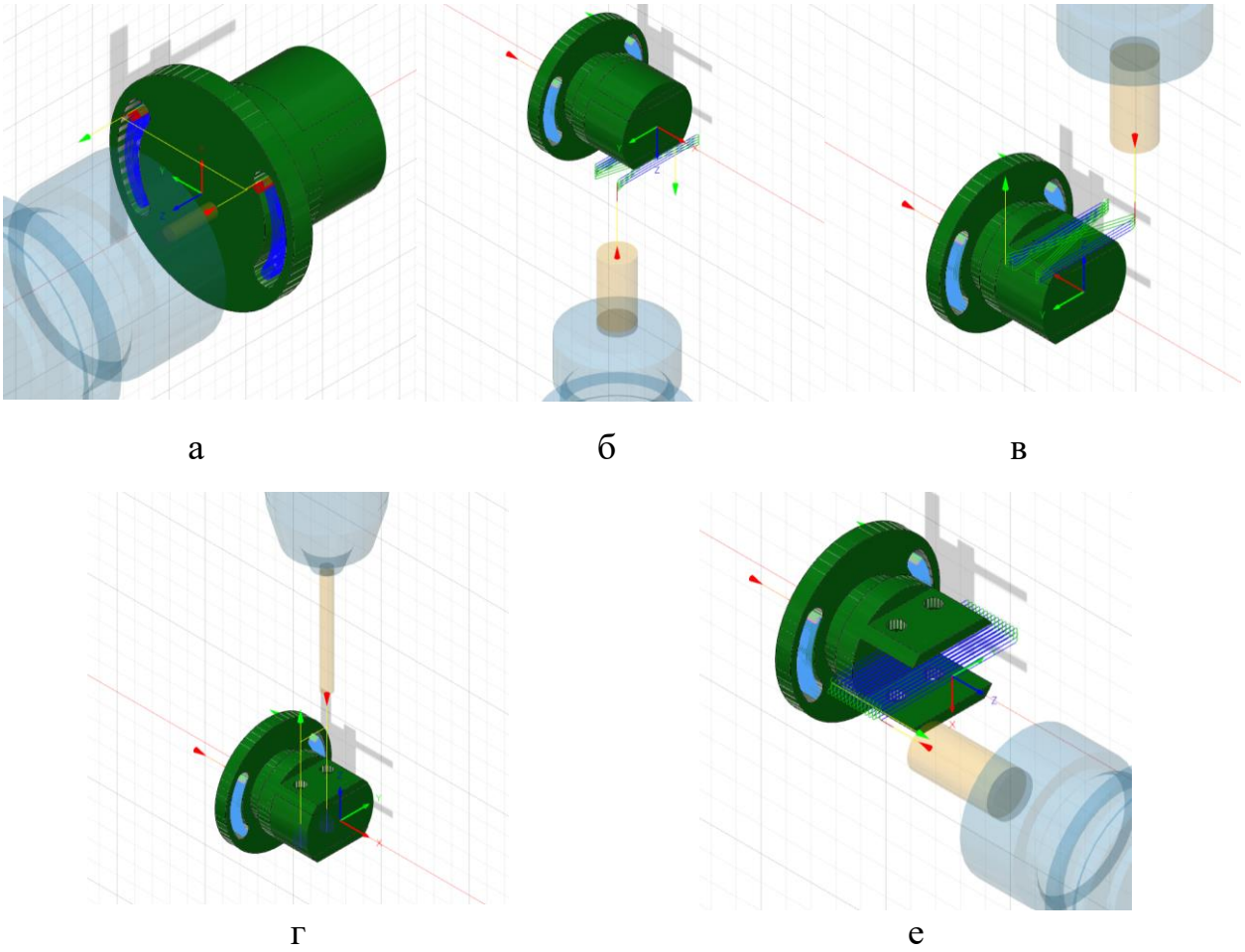


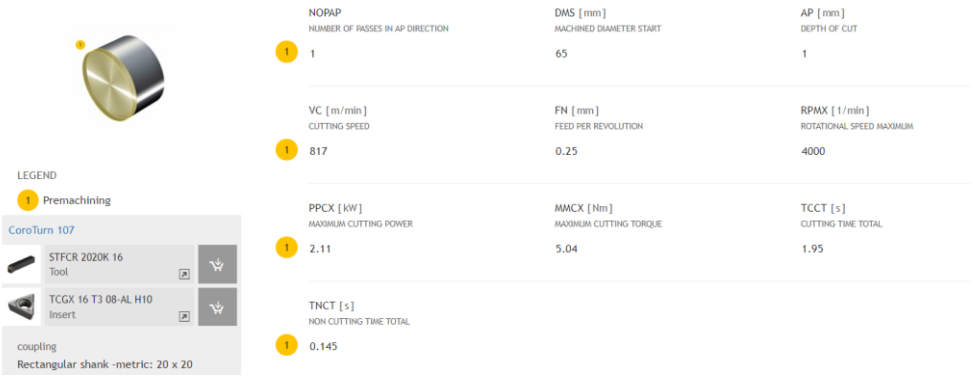
Рисунок 4.7 – Операція фрезерування пазів (а), операція фрезерування нижньої лиски (б), операція фрезерування верхньої лиски (в), операція свердління отворів (г), операція фрезерування пазу (е).

Після завершення симуляції всіх операцій обирають відповідний постпроцесор для верстату. Використовуючи команду «NC Program», Autodesk Fusion 360 генерує G-код для всіх виконаних операцій і зберігає його у вказаному місці. Згенерований G-код буде точно відповідати обраним

інструментам і режимам різання, які були встановлені під час налаштування операції.

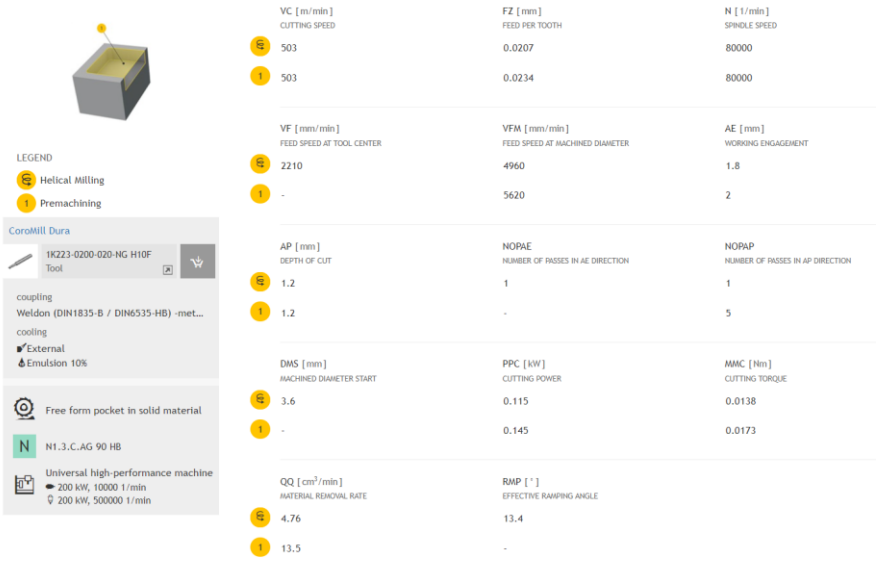
4.3 Автоматизований розрахунок режимів різання

Для подальших розрахунків режимів різання ми скористалися ресурсами сайту Sandvik Coromant [27]. Це глобальний лідер у галузі ріжучих інструментів та інструментальних рішень для обробки металів. Компанія надає широкий спектр продукції та послуг, призначених для підвищення ефективності та якості обробки металевих деталей [27]. Цей сайт надає доступ до спеціалізованого калькулятора, приклад розрахунків наведено на рис. 4.8, який дозволяє визначити оптимальні режими різання, враховуючи обраний інструмент та матеріал заготовки.



а

б



в

Рисунок 4.8 – Розрахунок режиму різання для підрізання торця (а), розрахунок режиму різання для точіння канавки (б), розрахунок режиму різання для фрезерування пазів (в)

Калькулятор на сайті Sandvik Coromant є автоматизованою системою, яка значно спрощує процес налаштування режимів різання. Використання цього калькулятора дозволяє уникнути тривалого і трудомісткого пошуку даних у друкованих довідниках. Замість цього, система автоматично обчислює необхідні параметри, такі як швидкість різання, подача, глибина різання та інші важливі показники.

Процес роботи з калькулятором включає декілька етапів. Спочатку користувач вводить основні характеристики заготовки, такі як матеріал і розміри. Потім вибирається конкретний інструмент, який буде використовуватись для обробки. Після введення цих даних, калькулятор обробляє інформацію і надає рекомендації щодо оптимальних режимів різання. Ці дані можуть бути безпосередньо використані для налаштування програмного забезпечення верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК). Обчисленні дані для виготовлення верхньої оправки на цьому калькуляторі записані в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Режими різання

№	Верстат	Різальний інструмент	S, мм/об	n, об	V, м/хв	T, хв
005	HAAS ST-20	прохідний різець STFCR 2020K 16	0,25	4000	110	0,035
005	HAAS ST-20	прохідний різець STTCR 2020K 16	0,29	6000	126	0,02
005	HAAS ST-20	канавочний різець QD-NN2J60C25A	0,2	4000	95	0,0037
010	HAAS VF-4SS	кінцева фреза 1K223-0200-020-NG H10F	0,02	80000	503	0,06
015	HAAS VF-4SS	кінцева фреза 1K223-1600-050-NH H10F	0,03	80000	462	0,09
015	HAAS VF-4SS	свердло 860.1-0600-048A1-NM H10F	0,317	16100	602	0,04
020	HAAS VF-4SS	кінцева фреза 1K223-1600-050-NH H10F	0,205	25200	509	0,615

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В рамках даного дипломного проекту було успішно розроблено і створено пристосування для магнітно-абразивного оброблення в ванній кільцевого типу в лабораторних умовах.

У процесі виконання роботи було створено детальну блок-схему, яка описує послідовність операцій та взаємодію компонентів системи, що дозволяє чітко розуміти всі етапи функціонування пристосування. Також було написано керуючу програму для мікроконтролерів Arduino, яка автоматизує процеси моніторингу та контролю, забезпечуючи високу точність і стабільність роботи системи. Виконано робочі креслення основних компонентів пристосування, включаючи корпус, верхню та нижню оправки, які є основою для виготовлення та складання пристосування.

Було розроблено технологічні процеси для виготовлення компонентів на токарних та фрезерних верстатах з ЧПК. Визначено оптимальні режими обробки, підібрано відповідні інструменти та налаштовано обладнання. Також створено складальний кресленик пристосування.

Виконаний проект є значним внеском у розвиток прикладної механіки та технологій оброблення матеріалів, демонструючи ефективність і перспективність використання сучасних технологічних рішень у виробничих процесах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ткачук І. В. Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу: дис. … канд. техн. наук: 131. Київ, 2015. 164 с.

2. Y. Wang, D.J. Hu, Grinding mechanism and preparation technology of magnetic abrasive grains. Tool Eng. 6, 32–34 (2003)

3. N.I. Wakayama, Utilization of magnetic force in space experiments. Adv. Space Res. 24(10), 1337–1340 (1999)

4. Верстат Горизонтально-Токарний HAAS ST-20. Abplanalp Україна. URL: https://abplanalp.ua/verstat-gorizontalno-tokarnij-haas-st-20 (дата звернення: 08.06.2024).

5. Вертикально-фрезерний верстат з ЧПК HAAS VF-4SS. Abplanalp Україна. URL: https://abplanalp.ua/verstat-frezernij-vertikalno-frezernij-haas-vf-4ss (дата звернення: 08.06.2024).

6. Майборода В.С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту, сформованого із сумішей порошків. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні.* 2009. № 6. С 141–153.

7. Shengqiang Y. Surface Finishing Theory and New Technology [Електронний ресурс] / Y. Shengqiang, L. Wenhui // National Defense Industry Press and Springer-Verlag GmbH Germany. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: https://doi.org/10.1007/978-3-662-54133-3.

8. Бездротовий Модуль NRF24L01+PA+LNA З Антеною (2.4 - 2.5 ГГц До 1000 Метрів). ArduShop. URL: https://ardushop.in.ua/arduino/wireless-nrf24l01-module-with-antenna-2_4-2_5ghz-up-to-1000-meters (дата звернення: 18.05.2024).

9. Яновський О. С. Технологічні основи керування фізичними процесами. Лекція 6: Лекція. Запоріжя, 2022. С. 23. URL: https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/1021693/mod_resource/content/1/Лекція%206.pdf (дата звернення: 20.05.2024).

10. Тарган, Д. В., Майборода, В. С., Плівак, О. А., & Добровольський, Г. Г. (2018). Вплив кінематики процесу магнітно-абразивного оброблення на параметри якості робочих поверхонь мітчиків із швидкорізальної сталі. *Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки"*, (1 (81), 48–53. https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-48-53

11. Тарасенко Катерина Борисівна Магістерська дисертація Відновлення борфрез для лікувальної стоматології за допомогою магнітно-абразивного оброблення 2018. – 94 с.

12. Кувальдин Ю. І., В.Д. Перевощиков Розрахунок припусків та проміжних розмірів при обробці різанням: Навчальний посібник / Ю.І Кувальдин Ю. І., В.Д. Перевощиков. – 157 с

13. ST-20 | 8" Chuck | 10" Chuck | High-Performance Turning | Lathes – Haas CNC Machines. Haas Automation Inc. - CNC Machine Tools. URL: https://www.haascnc.com/machines/lathes/st/models/standard/st-20.html (date of access: 01.06.2024).

14. Знайомство з G-Code і M-Code у програмуванні з ЧПК – Частина друга. Fifth Metal Industrial Co.,Ltd. URL: http://ua.dgcncmachining.com/info/an-intro-of-g-code-and-m-code-in-cnc-programmi-76068794.html#:~:text=Основний%20інструмент%20програмування%20з%20ЧПК%20–%20код&text=G-code%20–%20це%20мова%20програмування,запуск%20і%20зупинка%20обертання%20шпинделя. (дата звернення: 17.05.2024).

15. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь : дис. докт. техн. наук: 05.03.01 / Майборода В. С. – Київ, 2001. – 404 с.

16. Міні-комп'ютери. ROZETKA. URL: https://rozetka.com.ua/ua/213327949/p213327949/ (дата звернення: 30.05.2024).

17. Тензодатчики - Загальні відомості та принцип роботи тензодатчиків - Типи тензодатчиків. АСВІК ЦЕНТР. URL: https://asvik.kiev.ua/ua/articles/5 (дата звернення: 14.03.2024).

18. Деберний М. Б. Магнітно-абразивне оброблення головного обтікача макету ракети : master's thesis. Київ, 2021. 109 с. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/46136 (дата звернення: 29.05.2024).

19. Lathe Program way too long, shorten it!. Practical Machinist - Largest Manufacturing Technology Forum on the Web. URL: https://www.practicalmachinist.com/forum/threads/lathe-program-way-too-long-shorten-it.178509/ (date of access: 11.05.2024).

20. H.L. Chen, Practical Technology Investigation of Magnetic Abrasive and Magnetic Abrasive Finishing (Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 2009)

21. АЛЮМІНІЄВИЙ КОЛО В95: МІЦНІСТЬ Детальніше: https://firma-tera.com.ua/ua/a411814-alyuminievyj-krug-v95.html. ООО "Тэра". URL: https://firma-tera.com.ua/ua/a411814-alyuminievyj-krug-v95.html (дата звернення: 30.05.2024).

22. Міст Вітстона | Робота, приклади, програми-Electron-FMUSER FM/TV Broadcast One-Stop Supplier. FMUSER FM / TV трансляція Одноразовий постачальник. URL: https://uk.fmuser.net/content/?21200.html (дата звернення: 28.05.2024).

23. Модуль HX711 24-біт АЦП. 3V3 – Радіодеталі та електроні компоненти. URL: https://3v3.com.ua/product_4570.html (дата звернення: 31.05.2024).

24. ДСТУ ISO 129-1:2007. Кресленики технічні проставлення розмірів і допусків Частина 1. Чинний від 2007-10-10. Вид. офіц. Київ: держспоживстандарт україни, 2010. 29 с.

25. ДСТУ 3015-95 Виливки із алюмінієвих сплавів. Зі зміною № 1 (ІПС № 6-2000) і поправкою (ІПС № 2-2000). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=93195 (дата звернення: 03.06.2024).

26. VF-4SS | 40-Taper Mill | Super Speed | Vertical Mills – Haas CNC Machines. Haas Automation Inc. - CNC Machine Tools. URL:

https://www.haascnc.com/machines/vertical-mills/vf-series/models/medium/vf-4ss.html (date of access: 01.06.2024).

27. Sandvik Coromant. URL: https://www.sandvik.coromant.com/en-gb (дата звернення: 25.05.2024).

28. Склад і функції токарного верстата з ЧПУ. JIDE. URL: https://ua.jidemachinery.com/info/the-composition-and-function-of-cnc-lathe-55056334.html (дата звернення: 08.06.2024).

29. ДСТУ 2839-94 Сплави алюмінієві ливарні. З Поправками (ІПС № 11-95), (ІПС № 4-97), (ІПС № 7-97), (ІПС № 10-97), (ІПС № 2-2004), (ІПС № 11-2005). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=50317 (дата звернення: 05.06.2024).

30. ДСТУ 2413-94. Шорсткість поверхні. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=92004 (дата звернення: 03.06.2024).

31. Mori T. Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism / T. Mori, K. Hirota, Y. Kawashima. // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 143-144 – P. 682-686.

32. V.E. Oliker, A.F. Zhornyak, V.Y. Shlyuko, Structure formation in magneto-abrasive materials from iron-carbon melts alloyed with carbide-forming elements. Poroshkovaya Mettelurgiya 22(2), 76–84 (1983)

33. H. Yamaguchi, T. Shinmura, Internal finishing process for alumina ceramic components by a magnetic field assisted finishing process. Precision Eng. 28, 135–142 (2004)

Додаток А
Код керуючої програми для першого Arduino

```
#include <HX711.h>

#include <SPI.h>
#include "nRF24L01.h"
#include "RF24.h"
#include <HX711.h
HX711 scale(A1, A0);

RF24 radio(9, 10);
byte address[][6] = {"1Node", "2Node", "3Node", "4Node", "5Node", "6Node"};
int hx;
float calibration_factor = -3.8;
float units;
float ounces;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  radio.begin();
  radio.setAutoAck(1);
  radio.setRetries(0, 15);
  radio.enableAckPayload();
  radio.setPayloadSize(32);

  radio.openWritingPipe(address[0]);
  radio.setChannel(0x60);

  radio.setPALevel (RF24_PA_MAX);
  radio.setDataRate (RF24_250KBPS);

  radio.powerUp();
  radio.stopListening();

  scale.set_scale();
  scale.tare();
  scale.set_scale(calibration_factor);
 }

void loop() {

  for(int i = 0;i < 10; i ++) units =+ scale.get_units(), 10;
 units / 10;
units = scale.get_units();


  ounces = units * 0.035274;
  Serial.println(ounces);


  radio.write(&ounces, sizeof(ounces));
   //hx = hx711.read();
  // Serial.println(hx);
   //radio.write(&hx, sizeof(hx));

}
```

Додаток Б
Код керуючої програми для приймаючого Arduino

```
#include <SPI.h>
#include "nRF24L01.h"
#include "RF24.h"

RF24 radio(9,10);

byte address[][6] = {"1Node","2Node","3Node","4Node","5Node","6Node"};
float gotInt;

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  radio.begin();
  radio.setAutoAck(1);
  radio.setRetries(0,15);
  radio.enableAckPayload();
  radio.setPayloadSize(32);

  radio.openReadingPipe(1,address[0]);
  radio.setChannel(0x60);
  radio.setPALevel (RF24_PA_MAX);
  radio.setDataRate (RF24_250KBPS);


  radio.powerUp();
  radio.startListening();
}

void loop() {
    byte pipeNo;

    while( radio.available(&pipeNo)){
      radio.read(&gotInt, sizeof(gotInt) );

      Serial.println(gotInt);
   }
}
```

Додаток В
Код керуючої програми для токарного верстату з ЧПК

```
N10 T1/01/ M6 ' CHANGE TO TOOL # 1
N15 S0  M4 ' SET RPM TO 0
N20 G0 X2.7328 Z-0.0945
N25 M8
N30 G1 X-0.0625 Z-0.0945 F0.
N35 G1 X-0.0625 Z0. F0.
N40 G1 X-0.0347 Z0.0139 F0.
N45 G0 X-0.0347 Z0.1181
N50 G0 X9.8425 Z4.9213 T2/02/ ' CHANGE TO TOOL # 2
N55 S10  M4 ' SET RPM TO 10
N60 G0 X2.7953 Z-0.0984
N65 G1 X-0.0625 Z-0.0984 F0.
N70 G1 X0.1487 Z0.0072 F0.
N75 G0 X9.8425 Z4.9213 T1/01/ ' CHANGE TO TOOL # 1
N80 S100  M4 ' SET RPM TO 100
N85 G0 X2.7953 Z0.0197
N90 G1 X1.4961 Z0.0197 F0.
N95 G1 X1.4961 Z-1.4764 F0.
N100 G1 X2.2997 Z-1.4764 F0.
N105 G2 X2.3622 Z-1.5076 I2.2997 K-1.5076
N110 G1 X2.3622 Z-1.7438 F0.
N115 G0 X2.7953 Z-1.7438
N120 G0 X9.8425 Z4.9213 T2/02/ ' CHANGE TO TOOL # 2
N125 S10  M4 ' SET RPM TO 10
N130 G0 X2.5984 Z0.0197
N135 G1 X1.4961 Z0.0197 F0.
N140 G1 X1.4961 Z-1.4764 F0.
N145 G1 X2.2997 Z-1.4764 F0.
N150 G2 X2.3622 Z-1.5076 I2.2997 K-1.5076
N155 G1 X2.3622 Z-1.7438 F0.
N160 G0 X2.7953 Z0.0197
N165 G0 X9.8425 Z4.9213 T3/03/ ' CHANGE TO TOOL # 3
N170 S10  M4 ' SET RPM TO 10
N175 G0 X1.7323 Z-1.4641
N180 G1 X1.2677 Z-1.4641 F0.
N185 G0 X1.7323 Z-1.4641
N190 G0 X1.7323 Z-1.4724
N195 G1 X1.2677 Z-1.4724 F0.
N200 G0 X2.7793 Z-1.4724
N205 G0 X9.8425 Z4.9213 T4/04/ ' CHANGE TO TOOL # 4
N210 S10  M4 ' SET RPM TO 10
N215 G0 X2.7953 Z-1.9626
N220 G1 X1.8582 Z-1.9626 F0.
N225 G0 X1.9566 Z-1.9626
N230 G1 X0.9211 Z-1.9626 F0.
N235 G0 X1.0195 Z-1.9626
N240 G1 X-0.016 Z-1.9626 F0.
N245 G0 X2.7953 Z-1.9626
N250 G0 X9.8425 Z4.9213
N255 M02
```

Додаток Г
Специфікація складального кресленика

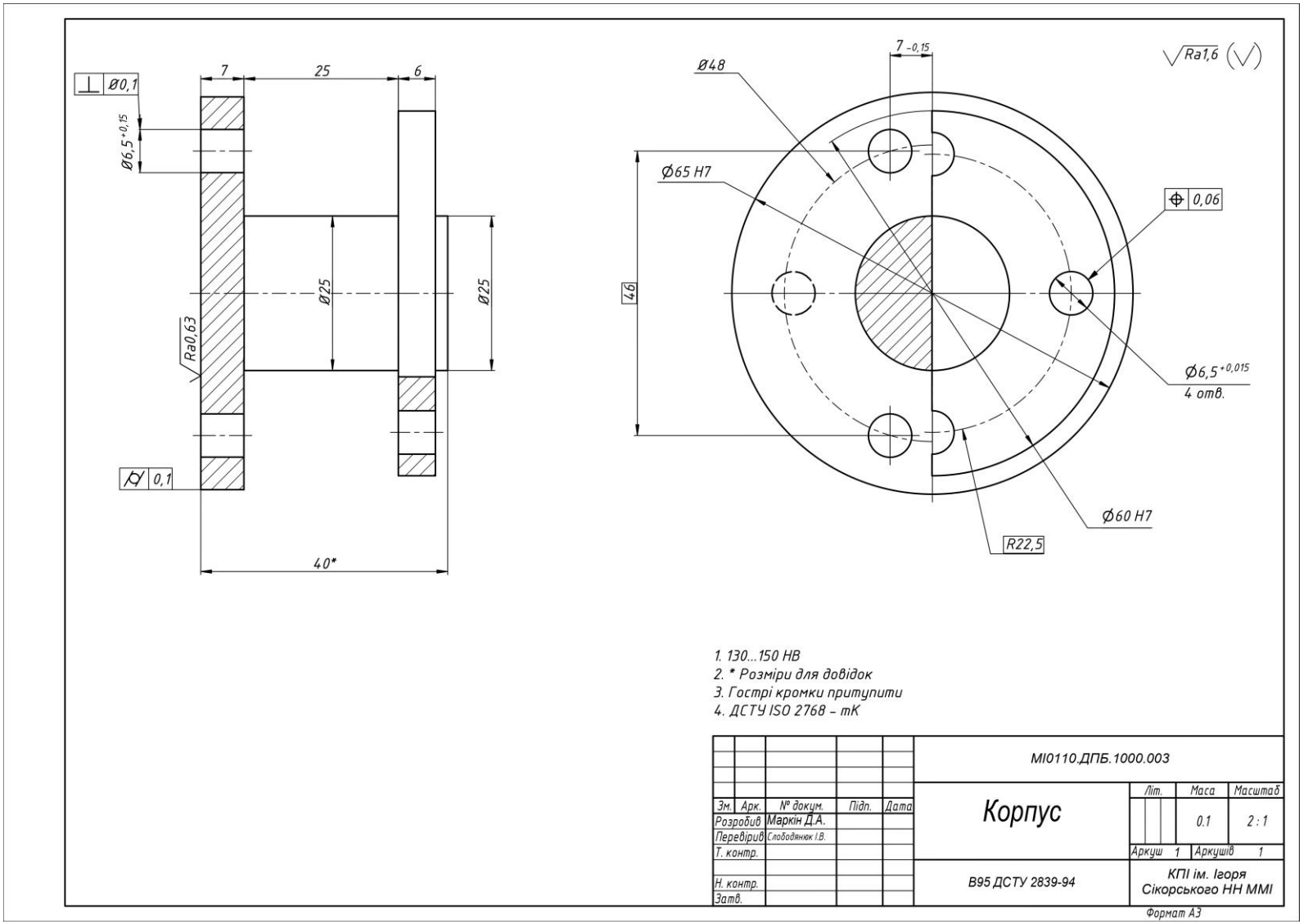
Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
				Документація		
			МІ0110.ДПБ.2000.001 СК	Пристосування для визначення сил при магнітно-абразивному обробленні	1	
				Деталі		
		1	Оправка нижня		1	
		2	Оправка верхня		1	
		3	Корпус		1	
		4	Тензодатчик		1	
				Стандартні вироби		
		5		ISO 1580 – M4 x 14	1	
		6		ISO 7089 – 6	2	
		7		ISO 1580 – M6 x 20	2	
		8		ISO 4032 – M6	2	
		9		ISO 4762 – M5 x 10	6	

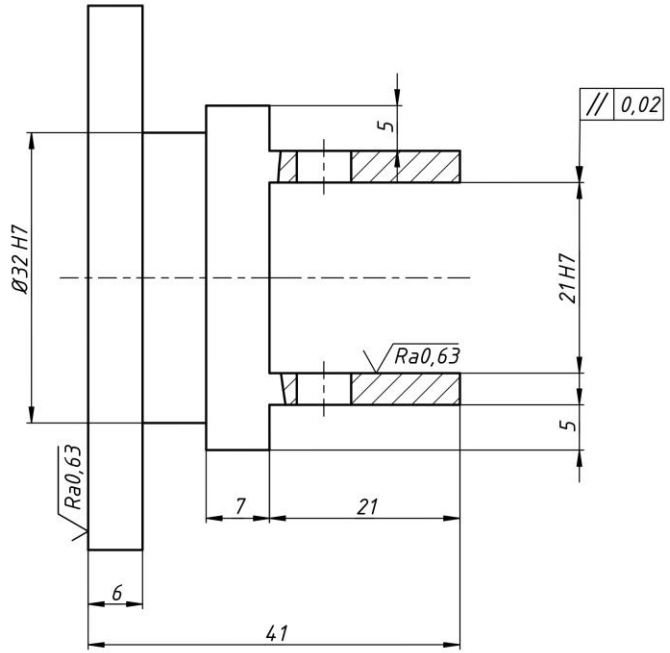
Подп. и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата | Инв. № подл

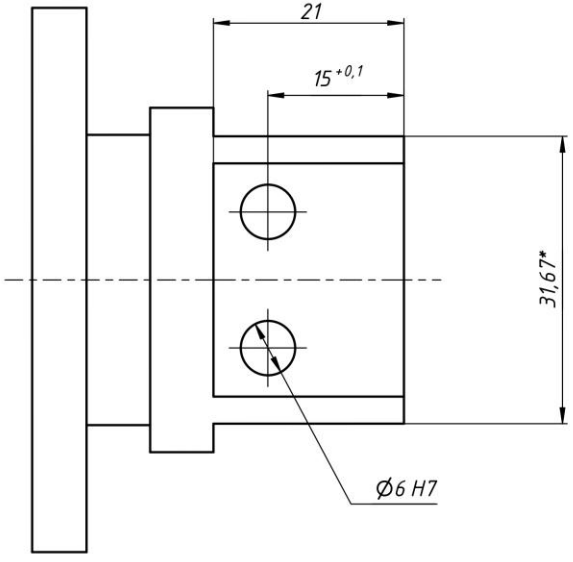
Изм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата	МІ0110.ДПБ.2000.001 СК		
Разроб.		Маркін Д.А.			Пристосування для визначення сил при магнітно-абразивному обробленні	Літера	Лист 1 / Листів 1
Перев.		Слободянюк І. В.					
Нач.отд.						КПІ ім. Ігоря Сікорського НН ММІ	
Н.контр							
Затв.							

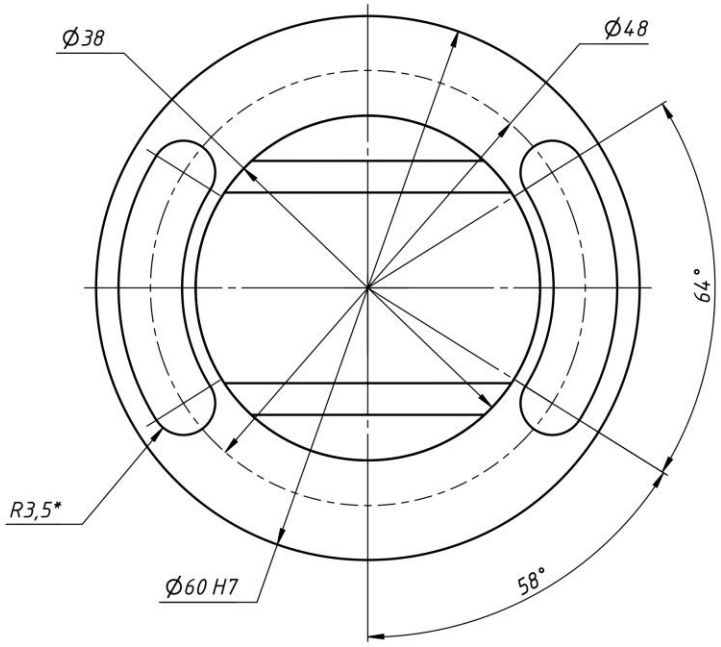
Копировал | Формат А4

Додаток Д
Розроблені креслення пристосування





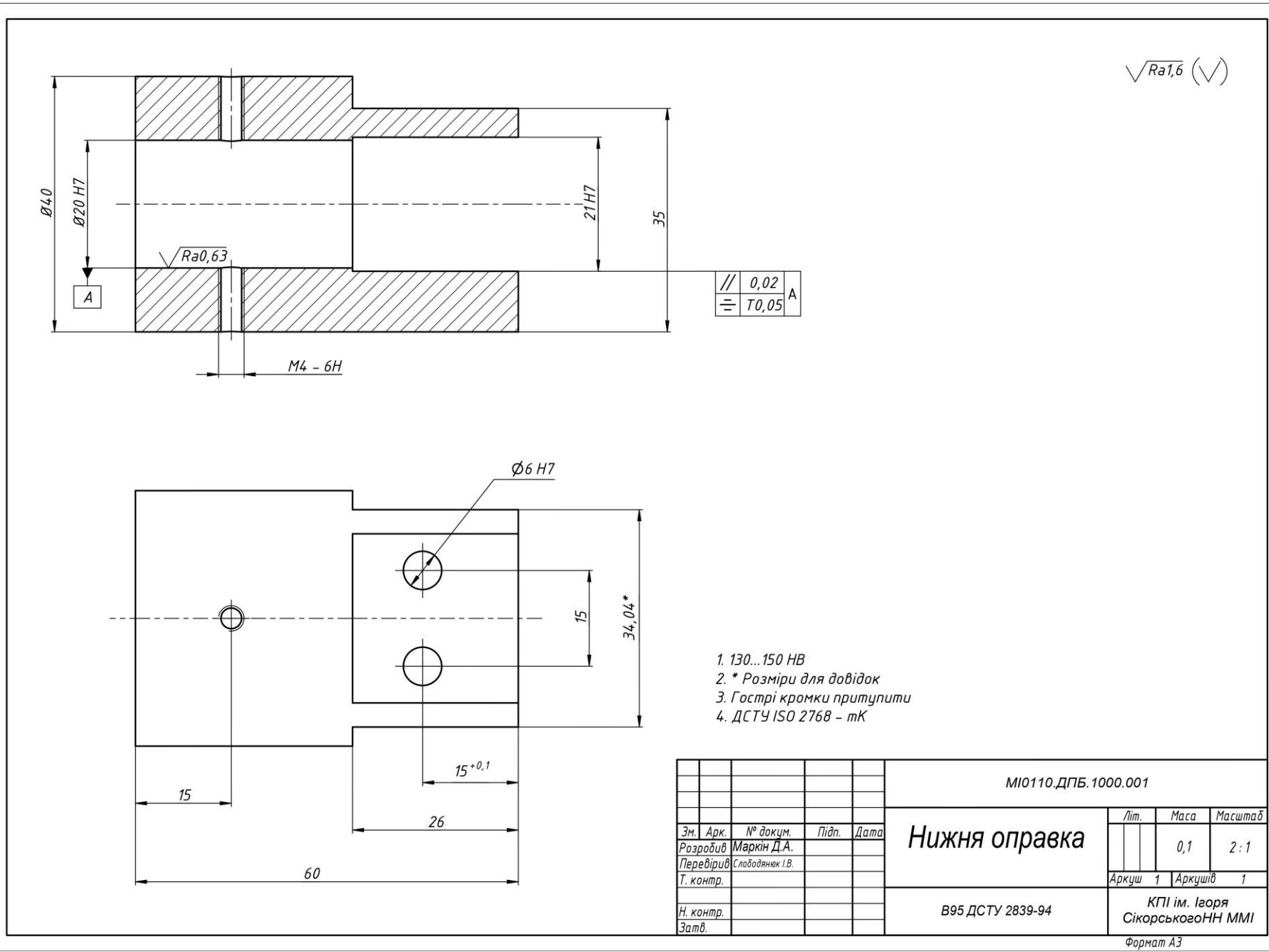


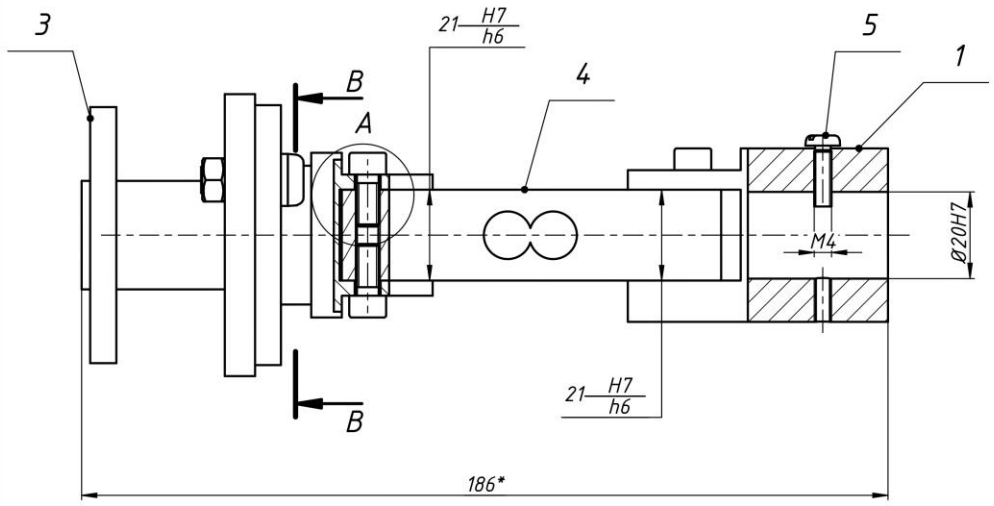


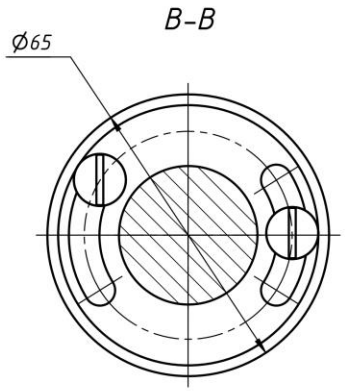
1. 130...150 НВ
2. * Розміри для довідок
3. Гострі кромки притупити
4. ДСТУ ISO 2768 – mK

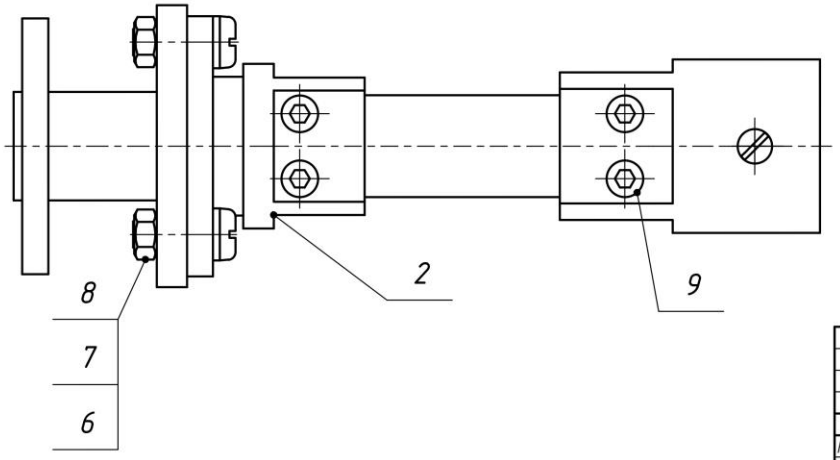
					МІ0110.ДПБ.1000.002			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Верхня оправка	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив		Маркін Д.А.					0,1	2 : 1
Перевірив		Слободянюк І.В.				Аркуш 1	Аркушів 1	
Т. контр.								
Н. контр.					В95 ДСТУ 2839-94	КПІ ім. Ігоря Сікорського НН ММІ		
Затв.								

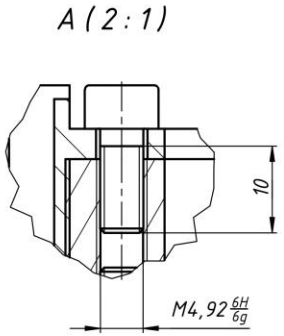
Формат А3


Ra1,6
Ø40
Ø20 H7
21H7
35
Ra0,63
A
// 0,02 A
⏥ T0,05
M4 - 6H
Ø6 H7
15
34,04*
15 +0,1
15
26
60
1. 130...150 HB
2. * Розміри для довідок
3. Гострі кромки притупити
4. ДСТУ ISO 2768 – mK
Зм. Арк. № докум. Підп. Дата
Розробив Маркін Д.А.
Перевірив Слободянюк І.В.
Т. контр.
Н. контр.
Затв.
МІ0110.ДПБ.1000.001
Нижня оправка
Літ. Маса Масштаб
0,1 2 : 1
Аркуш 1 Аркушів 1
В95 ДСТУ 2839-94
КПІ ім. Ігоря СікорськогоНН ММІ
Формат А3









1. * Розміри для довідок
2. ДСТУ ISO 2768 – mK

					МІ0110.ДПБ.2000.001 СК		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Пристосування для визначення сил при магнітно-абразивному обробленні	Літ.	Маса 0,4 / Масштаб 1:1
Розробив		Маркін Д.А.				Аркуш 1	Аркушів 1
Перевірив		Слободянюк					
Т. контр.							
Н. контр.					В95 ДСТУ 2839-94	КПІ ім. Ігоря Сікорського НН ММІ	
Затв.							

Формат А3

ГОСТ 3.1118 – 82 Форма1

Дубл.															
Взам.															
Подп.				Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Разраб.	Маркін Д.А.			MI01	КПІ ім.І.Сікорського, НН ММІ, гр. МІ-01	
Пров.	Слободянюк І.В.					
Утв.				**Корпус**		
Н. контр.						

М01																
М02	Код	ЕВ	МД	ЕН	Н. расх.	Ким	Код заготовки	Профиль и размеры					КД	МЗ		
								∅70×43					1	0.44 кг		
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции			Обозначение документа								
Б	Код, наименование оборудования							См.	Проф.	Р	УТ	КОИД	ЕН	ОП	Кшт.	Тпз.	Тшт.
А03	Х Х Х 005 Токарна з ЧПК															
Б04	HAAS ST-20							1	9149	5	1	1	100	500	0,65		
05	Торцювання															
06	Токарна операція															
07	Відрізка заготовки 40мм.															
08	прохідний різець STTCR 2020K 16, відрізний різець QD-NN1G60C25AY1, Трьохкулачковий патрон, Штангенциркуль															
09																
10	Х Х Х 010 Свердлильна															
11	HAAS VF-4SS							1	9149	5	1	1	100	500	0,65	
12	Свердлити отвори діаметром 7мм															
13	За два установа															
14	Свердло 7мм 460.1-0700-021A0-XM GC34, Планшайба, Штангенциркуль															
15																
16																
МК																

Дубл.																
Взам.																
Подп.																

КПІ ім.І.Сікорського, НН ММІ, гр. МІ-01

А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции	Обозначение документа										
Б	Код, наименование оборудования					ОМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт
К/М	Наименование детали, св. единицы или материала					Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н.рх
01	Х	Х	Х	015	Свердлильна											
02					HAAS VF-4SS	1	9149	5	1	1	100	500	0,65			
03	Свердлити отвори діаметром 7мм															
04	За два установа															
05	Свердло 7мм 460.1-0700-021А0-ХМ GC34, Планшайба, Штангенциркуль															
06																
07	Х	Х	Х	020	Тех.Контр.											
08	Контрольна операція. Перевірка розмірів															
09																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																

МК

ГОСТ 3.1118 – 82 Форма1

Дубл.				Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Взам.													
Подп.													

Разраб.	Маркін Д.А.		МІ01	КПІ ім.І.Сікорського, НН ММІ, гр.
Пров.	Слободянбк І.В.			
Утв.			**Верхня оправка**	
Н. контр.				

М01													
М02	Код	ЕВ	МД	ЕН	Н. расх.	Ким	Код заготовки	Профиль и размеры		КД	МЗ		
								∅65×43		1	0.38 кг		
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции		Обозначение документа						
Б	Код, наименование оборудования		См.	Проф.	Р	УТ	КОИД	ЕН	ОП	Кшт.	Тпз.	Тшт.	
А03	Х Х Х 005 Токарна з ЧПК												
Б04	HAAS ST-20		1	9149	5	1	1	100	500	0,65			
05	Торцювання												
06	Токарна операція												
07	Відрізка заготовки 41мм.												
08	прохідний різець STTCR 2020K 16, прохідний різець STFCR 2020K 16, канавочний різець QD-NN2J60C25A, відрізний різець QD-NN1G60C, Трьохкулачковий патрон, Штангенциркуль												
09													
10	Х Х Х 010 Фрезерна												
11	HAAS VF-4SS		1	9149	5	1	1	100	500	0,65			
12	Фрезерування пазів												
13	Кінцева фреза 1K223-0200-020-NG H10F 4мм, планшайба, штангенциркуль												
14													
15													
16													

МК

Дубл.			
Взам.			
Подп.			

КПІ ім.І.Сікорського, НН ММІ, гр.

	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции	Обозначение документа										
Б	Код, наименование оборудования					ОМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт
К/М	Наименование детали, св. единицы или материала					Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н.рх
01	Х	Х	Х	015	Фрезерна з ЧПК											
02					HAAS VF-4SS	1	9149	5	1	1	100	500	0,65			
03	Фрезерування лиски і свердління отворів															
04	Кінцева фреза 1K223-0200-020-NG H10F, свердло 860.1-0600-048A1-NM H10F, планшайба, штангенциркуль															
05																
06	Х	Х	Х	020	Фрезерна з ЧПК											
07					HAAS VF-4SS	1	9149	5	1	1	100	500	0,65			
08	Фрезерувати паз шириною 21мм та глибиною 26мм.															
09	Кінцева фреза 1K223-1600-050-NH H10F 16мм, планшайба, штангенциркуль															
10																
11	Х	Х	Х	025	Тех.Контр.											
12	Контрольна операція. Перевірка розмірів															
13																
14																
15																
16																
17																

МК

ГОСТ 3.1118 – 82 Форма1

Дубл.										
Взам.										
Подп.		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Разраб.	Маркін Д.А.		МІ01	КПІ ім.І.Сікорського, НН ММІ, гр. МІ-01	
Пров.	Слободянюк І.В.				
Утв.			**Нижня оправка**		
Н. контр.					

М01									
М02	Код	ЕВ	МД	ЕН	Н. расх.	Ким	Код заготовки	Профиль и размеры	КД	МЗ
								∅42×63	1	0.23 кг

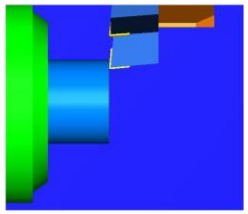
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции	Обозначение документа										
Б	Код, наименование оборудования					См.	Проф.	Р	УТ	КОИД	ЕН	ОП	Кшт.	Тпз.	Тшт.
А03	Х	Х	Х	005	Токарна з ЧПК										
Б04	HAAS VF-4SS					1	9149	5	1	1	100	500	0,65		
05	Торцювання														
06	Фрезерувати отвір діаметром 20 Н7 мм.														
07	Свердлити отвір діаметром 3,5, та нарізати різьбу М4.														
08	Фрезерувати лиску														
09	Свердлити отвір 6мм														
10	Відрізка заготовки довжиною 60мм і діаметром 40мм														
11	Прохідний різець QS-SMALL 1212E3, кінцева фреза 1K223-1600-050-NH H10F 16мм, мітчик М4,														
12	свердло 860.1-0600-048A1-NM H10F 6мм, відрізний різець QD-NN1G60C25AY1														
13	Планшайба, штангенциркуль														
14															
15															
16															

МК

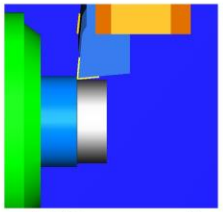
Дубл.																
Взам.																
Подп.																
													КПІ ім.І.Сікорського, НН ММІ, гр. МІ-01			
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции	Обозначение документа										
Б	Код, наименование оборудования					ОМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт
К/М	Наименование детали, св. единицы или материала					Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н.рх
01	X	X	X	010	Фрезерна з ЧПК											
02					HAAS VF-4SS	1	9149	5	1	1	100	500	0,65			
03	Фрезерувати паз шириною 21мм та глибиною 26мм.															
04	Кінцева фреза 1K223-1600-050-NH H10F 16мм															
05	Планшайба, штангенциркуль															
06																
07	X	X	X	015	Тех.Контр.											
08	Контрольна операція. Перевірка розмірів															
09																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																
МК																

Додаток Ж

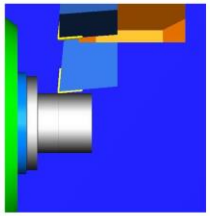
Технологічне забезпечення виготовлення верхньої оправки



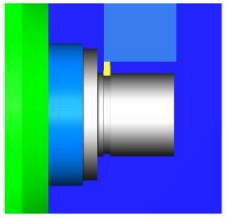
1. 005 Виконання операції підрізки торця



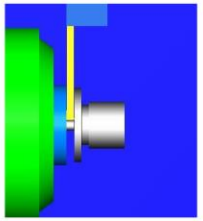
2. 005 Виконання операції чорнового точіння



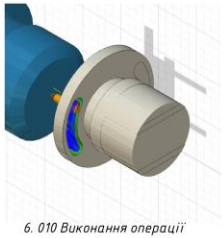
3. 005 Виконання операції чистового точіння



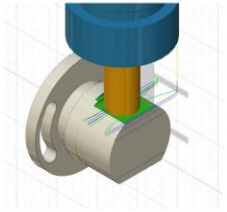
4. 005 Виконання операції підрізання канавки



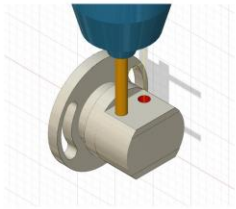
5. 005 Виконання операції відрізання заготовки



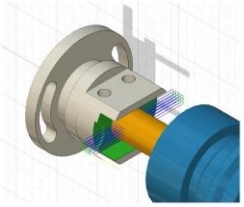
6. 010 Виконання операції фрезерування пазів



7. 015 Виконання операції фрезерування лиски



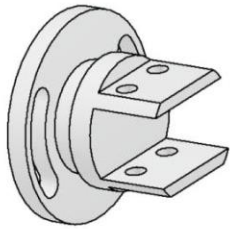
8. 015 Виконання операції свердління отворів



9. 020 Виконання операції фрезерування пазу

Режими різання

№	Верстат	Різальний інструмент	S, мм/об	n, об	V, м/хв	T, хв
005	HAAS ST-20	прохідний різець STFCR 2020K 16	0,25	4000	110	0,035
005	HAAS ST-20	прохідний різець STTCR 2020K 16	0,29	6000	126	0,02
005	HAAS ST-20	канавочний різець QD-NN2J60C25A	0,2	4000	95	0,0037
010	HAAS VF-4SS	кінцева фреза 1K223-0200-020-NG H10F	0,02	80000	503	0,06
015	HAAS VF-4SS	кінцева фреза 1K223-1600-050-NH H10F	0,03	80000	462	0,09
015	HAAS VF-4SS	свердло 860.1-0600-048A1-NM H10F	0,317	16100	602	0,04
020	HAAS VF-4SS	кінцева фреза 1K223-1600-050-NH H10F	0,205	25200	509	0,615



Модель верхньої оправки