

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інженерії транспорту та архітектури  
Кафедра технології машинобудування

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на здобуття ступеня вищої освіти магістра**

Удосконалення технологічного процесу виготовлення деталі  
Назва теми

«Шпindel GDZ-301M» із застосуванням верстатів з ЧПК

Рівень вищої освіти другий (магістр)

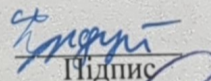
Галузь знань 13 механічна інженерія  
Шифр і назва галузі знань

Спеціальність 131 прикладна механіка  
Шифр і назва спеціальності  
Назва

Освітня програма «технології машинобудування»  
Назва

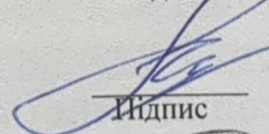
Шифр ДРМ.ФІТА.ПМ.24.18.ПЗ

Виконав студент 2 курсу група ПМТм-23-1  
Шифр

  
Підпис

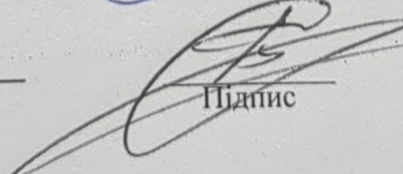
Ігор ФУРДУЙ  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник канд. техн. наук, доцент  
Науковий ступінь, звання

  
Підпис

Володимир МИЛЬКО  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

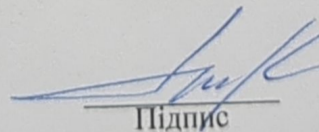
Нормоконтролер канд. техн. наук, доцент

  
Підпис

Сергій БИСЬ  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри  
технології машинобудування  
Назва

  
Підпис

Віталій ТКАЧУК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Дата «23» 12 2024

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії транспорту та архітектури

Кафедра технології машинобудування

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Галузь знань 13 механічна інженерія

Шифр і назва

Спеціальність 131 прикладна механіка

Шифр і назва

Освітня програма «технології машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТМ

Віталій ТКАЧУК

2 . 09 .2024

## ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Фурдую Ігору Олеговичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема дипломної роботи Розроблення технологічного процесу виготовлення деталі «Шпindel GDZ-301M» із застосуванням верстатів з ЧПК

керівник роботи Милько Володимир Володимирович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від 26 серпня 2024 р. № 60

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 10 грудня 2024

3 Вихідні дані до проекту (роботи) кресленик деталі Шпindel GDZ-301M та технічні вимоги до її виготовлення, обсяг випуску 4 тис.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1. Загальний розділ
2. Технологічний розділ
3. Конструкторський розділ
4. Дослідницький розділ
5. Охорона праці

5 Перелік графічного матеріалу: кресленик деталі із 3D моделлю (1 лист A1); графотехнологія (1 лист A1); кресленик карти наладки (1 лист A1); кресленик верстатного пристрою (1 лист A1); кресленик контрольного пристрою (1 лист A1)



# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

## ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ

Направляється студент Фурдуй Ігор Олегович на захист дипломного проєкту (роботи)  
(прізвище, ім'я, по батькові)  
за спеціальністю 131 - Прикладна механіка

На тему: Удосконалення технологічного процесу виготовлення деталі «Шпindelь GDZ-301M» із застосуванням верстатів з ЧПК

Дипломний проєкт (робота), рецензія і довідка про перевірку на плагіат додаються.

Декан факультету

  
(підпис)

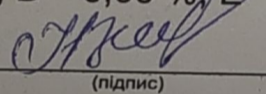
ОЛЕГ ПОЛІЩУК

(ім'я, прізвище)

### ДОВІДКА УСПІШНОСТІ

Фурдуй І. О. за період навчання на факультеті інженерії, транспорту та архітектури з 2023 по 2023 роки повністю виконав навчальний план спеціальності з таким розподілом оцінок за національною шкалою: відмінно 83,33 %, добре 16,67 %, задовільно 0,00 %.  
шкалою ЄКТС: А 87,50 %, В 6,25 %, С 6,25 %, D 0,00 %, E 0,00 %.

Методист факультету

  
(підпис)

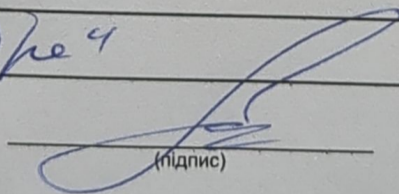
(ім'я, прізвище)

### ВИСНОВОК КЕРІВНИКА ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ (РОБОТИ) ТА ОБГРУНТУВАННЯ ОЦІНКИ

Студент Ігор Фурдуй повністю виконав завдання, яке виконав на період дипломного проєктування. На період його захисту роботи над проєктом показав здатність використовувати знання самостійно, аналізувати та досліджувати окремі елементи об'єкту та використовувати веродійства.

Оцінка дипломного проєкту (роботи) "добре"

Керівник дипломного проєкту

  
(підпис)

Меленко В.В.  
(ім'я, прізвище)

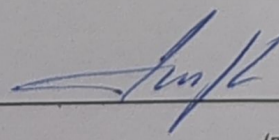
" 19 " 12 2024 р.

### ВИСНОВОК КАФЕДРИ ПРО ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ)

Дипломний проєкт (роботу) розглянуто. Студент Фурдуй І. О. допускається до захисту цього проєкту (роботи) в екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри

технології машинобудування  
(назва)

  
В.Ткачук  
(підпис, ім'я, прізвище)

" 19 " 12 2024 р.

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ КАФЕДРИ ТМ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатами звіту/звітів подібності щодо роботи, продукованими програмно-технічним засобом (ами) перевірки текстів на плагіат:

Назва кваліфікаційної роботи Удосконалення тех. процес. безпеки-908.  
 Автор Г. Гуржич „Шиндлер ВДЗ - 2014”

Освітня програма технології механічного виробництва  
 Спеціальність: 181 механічне машинобудування

Науковий керівник: В. Мельничко

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	f
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження: 13,7% 8877к плагіатів  
19% Антиплагіат

Дата 19.02.2014

Завідувач кафедри [Підпис] Віталій ГКАЧУК  
 Підпис Ім'я, прізвище

Гарант освітньої програми [Підпис] Володимир Блажич  
 Підпис Ім'я, прізвище

Керівник кваліфікаційної роботи [Підпис] Володимир Мельничко  
 Підпис Ім'я, прізвище

## РЕЦЕНЗІЯ

на дипломну магістерську роботу  
Фурдуя Ігора Олеговича

на тему Удосконалення технологічного процесу виготовлення деталі «Шпindelь GDZ-301M» із застосуванням верстатів з ЧПК

Тема роботи є актуальною і цікаво для сучасного виробництва. Робота скерована на вдосконалення технологічного процесу виготовлення деталі «Шпindelь GDZ-301M». У цій магістерській роботі автор запропонував та вирішив наступні задачі: запропоновано новий технологічний процес виготовлення деталі «Шпindelь GDZ-301M» із застосуванням верстатів з ЧПК, також спроектована ні верстатний та контрольний пристрої.

Графічна частина виконана на високому рівні із застосуванням SolidWorks. Креслення та пояснювальна записка повністю відповідають вимогам ДСТУ. Також у дослідному розділі проведено аналіз конструкції деталі «Шпindelь GDZ-301M» у середовищі SolidWorks. Встановлено що деталь буде працювати при робочому навантаженні та має достатню жорсткість і не потребуватиме додаткових конструкторських модернізацій, та зміни окремих її параметрів.

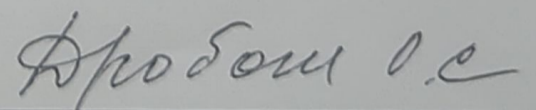
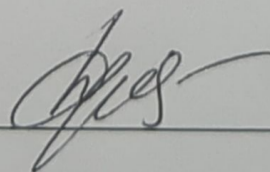
В розділі охорона праці приведено вимоги для продуктивної роботи.

Загальний висновок та оцінка

Робота виконана відповідно до завдання на високому науковому та інженерному рівні.

Рекомендується до захисту та в цілому робота заслуговує оцінки «відмінно»

Рецензент



«20» грудня 2024р.

Завідувачу кафедри

Ткачуку Виталию  
Кавловичу

здобувача вищої освіти (студента  
ПІБ, факультет, «курс», «група»)

Кудучи Ігоря Олександровича

## ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на академічний плагіат оповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та/або Anti-Plagiarism) і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

10.12.2024

дата

Кудучи

підпис

## АНОТАЦІЯ

Тема роботи: Розроблення технологічного процесу виготовлення деталі «Шпиндель GDZ-301М» з використання верстатів з ЧПК

У даній роботі розроблено технологічний процес виготовлення деталі «Шпиндель GDZ-301М» із використанням верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК). Вихідні дані для розробки включають креслення деталі, обсяги виробництва (4000 шт/рік), та вимоги до матеріалу – якісна легована сталь 40Х відповідно до ДСТУ 7806:2015.

Технологічний процес розроблено з урахуванням серійного типу виробництва. Основні операції механічної обробки, такі як точіння, фрезерування, шліфування та нарізання різьби, виконуються на сучасних верстатах із ЧПК, зокрема HAAS ST-30, HAAS VF-3 та Bernardo URS 500 N. Це дозволяє забезпечити високу точність виготовлення, відповідність кресленню, а також оптимізувати витрати часу на кожну операцію.

Процес обробки включає такі основні етапи: підготовка заготовки, чорнове та чистове точіння, фрезерування пазів і канавок, шліфування посадкових поверхонь для досягнення заданої шорсткості (Ra 0,16), а також термічна обробка для забезпечення необхідної твердості (51–56 HRC). Завершальний етап включає контроль якості та нанесення захисного покриття (хімічне окиснення).

Розроблений технологічний процес забезпечує ефективне використання обладнання, високу якість готових виробів, а також відповідає вимогам продуктивності для забезпечення обсягів виробництва у 4000 штук на рік.

Автор роботи: Ігор ФУРДУЙ

19.12.2024 р.  
/Підпис/ Дата

## ABSTRACT:

The topic of the work "Development of the technological process for manufacturing the component "Spindle GDZ-301M" using CNC machines."

The initial data for the development includes the part drawing, annual production volume (4000 pcs/year), and material requirements – high-quality alloy steel 40X according to DSTU 7806:2015.

The technological process is designed considering a serial production type. Key machining operations, such as turning, milling, grinding, and threading, are performed on modern CNC machines, including HAAS ST-30, HAAS VF-3, and Bernardo URS 500 N. This ensures high manufacturing precision, compliance with the drawing, and optimized time consumption for each operation.

The manufacturing process includes the following main stages: preparation of the blank, rough and finish turning, milling of grooves and slots, grinding of seating surfaces to achieve the specified surface roughness (Ra 0.16), and heat treatment to achieve the required hardness (51–56 HRC). The final stage includes quality control and the application of protective coating (chemical oxidation).

The developed technological process ensures efficient equipment utilization, high quality of finished products, and meets productivity requirements to achieve an annual production volume of 4000 pieces.

The author of the work  
Igor FURDUY

/Signature/ Date

19.12.2024 p.

# ЗМІСТ

## ВСТУП

### 1 ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Призначення та конструкція оброблюваної деталі

1.2 Аналіз технологічності деталі

1.2.1 Якісний аналіз

1.2.2 Кількісний аналіз

1.3 Визначення типу виробництва

### 2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Вибір та техніко–економічне обґрунтування методу отримання заготівлі

2.2 Аналіз базового технологічного процесу

2.3 Розрахунок припусків на обробку

2.4 Вибір обладнання та розрахунок його кількості

2.5 Техніко–економічне обґрунтування розробленого техпроцесу

2.6 Уточнення типу виробництва та встановлення його організаційної форми

2.7 Розрахунок режимів різання

2.8 Розрахунок технічної норми часу

2.9 Створення керуючої програми в САМ Esprit

2.10 Розроблення керуючої програми оброблення деталі у САМ ESPRIT

для токарного верстата з ЧПК HAAS ST20

### 3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Тиски самоцентруючі призматичні

3.1.1 Призначення та опис роботи пристосування

3.1.2 Розрахунок пристосування на точність

3.1.3 Розрахунок необхідного зусилля затискача

3.1.4 Розрахунок елементів пристосування на міцність

3.2 Пристосування установче універсальне

3.2.1 Призначення та опис роботи пристосування

3.2.2 Розрахунок пристосування на точність

## 4 НАУКОВО–ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

4.1 Дослідження напруженого стану та структурних змін у поверхневому шарі захисних покриттів у процесі МЕШ

4.2 Сучасні досягнення у сфері гібридних абразивних процесів обробки

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Заходи по забезпеченню нешкідливих та безпечних умов праці при роботі на металообробних верстатах

5.2 Загальні вимоги безпеки при експлуатації металообробних верстатів

## ВИСНОВОК

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

## ВСТУП

До технології машинобудування належать усі етапи процесу виготовлення машинобудівної продукції.

Технологія машинобудування має серйозну теоретичну основу, що включає вчення про типізацію технологічних процесів та групову обробку, про жорсткість і точність технологічної системи, про вплив механічної обробки на якість та експлуатаційні характеристики деталей, про припуски, шляхи підвищення продуктивності та економічності тощо. Задані форми деталі з необхідною точністю їх параметрів та необхідною якістю поверхневого шару досягаються переважно шляхом механічної обробки.

У процесі механічної обробки виникає найбільше проблем, пов'язаних із виконанням вимог до якості машин, заданих конструктором. Процес механічної обробки реалізується досить складною технологічною системою, що включає металорізальний верстат, верстатне технологічне оснащення, різальний інструмент і заготівлю.

На машинобудівних підприємствах одним з ефективних методів при фінішній обробці зміцнених поверхонь і струмопровідних матеріалів, що важко обробляються, є електроерозійне шліфування. Ефективність цього процесу визначається високою продуктивністю при потрібній точності та шорсткості поверхонь деталей машин згідно з технічними вимогами.

## Розділ 1 ЗАГАЛЬНИЙ

### 1.1 Призначення та конструкція оброблюваної деталі

Деталь шпindelь GDZ–301М використовується у механізмі затиску. Шпindelь призначений для повідомлення ріжучому інструменту обертального (головного) руху при свердлінні, зенкеруванні, розгортанні, цекування. Шпindelь працює в горизонтальному положенні та отримує обертання від зубчастої передачі, що знаходиться в коробці швидкостей верстата. Шпindelь встановлюється в коробці швидкостей на чотирьох кулькових радіально–упорних та одному роликовому конічному підшипниках кочення.

Упорні поверхні А і Б під радіально–упорні підшипники виконуються за 7 квалітетом точності та шорсткістю не більше  $R_a = 1,6$  мкм.

Допуск радіального биття на поверхні К не повинен перевищувати 0,02 мм щодо баз А і Б. Допуск співвісності циліндричних поверхонь А та Б не повинен перевищувати 0,008 мм щодо бази АБ.

Зовнішня М і внутрішня В поверхні виходу шпindelя виконуються по 7 кваліфікації з шорсткістю  $R_a = 1,6$  мкм.

Допуск непостійності діаметрів поверхонь А та Б у поздовжньому та поперечних перерізах – 0,007 мм.

Виконавчими є поверхні К і В. Основними базовими є поверхні А, Б, В.

Деталь виготовлена із якісної легованої сталі 40Х ДСТУ 7806:2015. Матеріал деталі має високу міцність, хорошу оброблюваність, малу чутливість до концентрації напруг, а для підвищення зносостійкості піддається термічній обробці.

У таблицях А.1 та А.2 у додатку А наведено хімічний склад та механічні властивості сталі 40Х.

### 1.2 Аналіз технологічності деталі

Деталь шпindelь GDZ–301М виготовляється із сортового прокату круглого перерізу та сталі 40Х. Вивчивши конструкцію деталі, я припускаю

замінити прокат на штампування. Конфігурація зовнішнього контуру не викликає значних труднощів при отриманні заготовки штампуванням.

За конструкцією деталь досить технологічна, допускає застосування високопродуктивних режимів обробки, має хороші базові поверхні для початкових операцій і досить проста за конструкцією.

Розраховуємо коефіцієнт точності ( $K_T$ ), коефіцієнт шорсткості ( $K_{ш}$ ) та коефіцієнт використання матеріалу ( $K_{вм}$ ).

Виконаємо ескіз деталі з нумерацією оброблюваних поверхонь (рис. 1.1) і складемо таблицю А.3 у додатку А із зазначенням основних характеристик поверхонь, що дає наочність і можливість перевірки правильності обчислень.

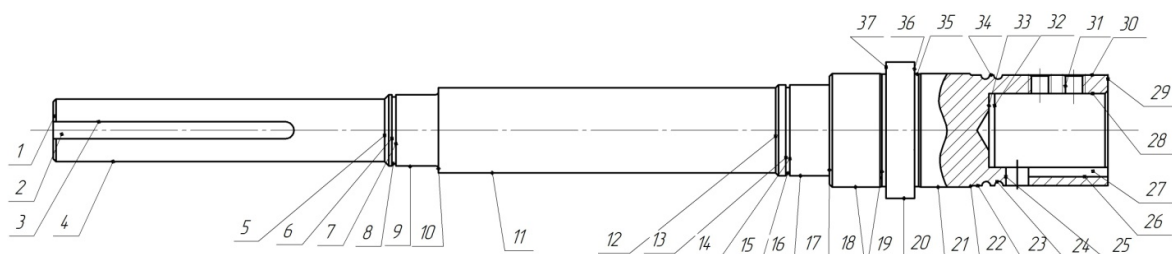


Рисунок 1.1 – Оброблювані поверхні деталі

Коефіцієнт точності обробки  $K_T$  визначається за такою формулою [1]

$$K_T = 1 - \frac{\sum n_i}{\sum T_i \cdot n_i}, \quad (1.1)$$

де  $n_i$  – кількість поверхонь, що обробляються;

$T_i$  – кваліфікація обробки.

Дані до визначення коефіцієнта точності обробки занесемо в таблицю А.4 у додатку А.

$$K_T = 1 - \frac{43}{499} = 0,91.$$

Оскільки коефіцієнт точності обробки відповідає умові  $K_T > 0,8$ , то деталь технологічна за точністю.

Коефіцієнт шорсткості поверхні визначається за формулою [1]

$$K_{ш} = \frac{\sum n_i}{\sum \omega_i n_i}, \quad (1.2)$$

де  $n_i$  – кількість поверхонь із позначенням шорсткості;

$\omega_i$  – значення шорсткості поверхні.

Дані визначення коефіцієнта шорсткості поверхні занесемо в таблицю А.5 у додатку А.

$$K_{ш} = \frac{43}{157,1} = 0,27.$$

Оскільки коефіцієнт шорсткості поверхні задовольняє умові  $K_{ш} < 0,32$ , то деталь технологічна за шорсткістю поверхні.

Коефіцієнт використання матеріалу [1]

$$K_{в.м.} = \frac{M_{дет}}{M_{заг} + M_{лит}}, \quad (1.3)$$

де  $M_{дет}$  – маса деталі, кг;

$M_{заг}$  – маса заготовлі, кг;

$M_{лит}$  – маса технологічних втрат матеріалу (облий, окалина, некратність, литники, прибутки і т. д.), кг.

Розрахуємо  $K_{в.м.}$  для деталі виготовленим штампуванням:

$$M_{дет} = 2,1;$$

$$M_{заг} = 3,4;$$

$$M_{лит} = 0,21;$$

$$K_{\text{в.м.}} = \frac{2,1}{3,4 + 0,21} = 0,58.$$

Розрахуємо  $K_{\text{в.м.}}$  для деталі виготовленої з прокату діаметром 56×377 мм:

$$M_{\text{заг}} = 7,287 \text{ кг.}$$

$$K_{\text{в.м.}} = \frac{2,1}{7,287} = 0,288.$$

З розрахунків видно, що у деталі виготовленої штампуванням коефіцієнт використання матеріалу вищий, ніж у деталі, виготовленої з прокату.

### 1.3 Визначення типу виробництва

Тип виробництва за ДСТУ 14.004:2018 характеризується коефіцієнтом закріплення операцій  $K_{з.о}$ , який показує відношення всіх різних технологічних операцій, що виконуються протягом місяця, до робочих місць.

$$K_{з.о} = \frac{\sum Q_i}{\sum P_i}, \quad (1.4)$$

де  $Q_i$  – кількість операцій, які необхідні до виготовлення даної деталі;

$P_i$  – кількість робочих місць, на яких виготовляється дана деталь.

а) Визначаємо такт випуску деталей

$$t_g = F_{\partial} \cdot 60 / N, \quad (1.5)$$

де  $F_{\partial}$  – дійсний річний фонд часу робочого обладнання (для однозмінного режиму  $F_{\partial} = 2070$  год [2]);

$N$  – обсяг випуску деталей на рік,  $N = 4000$  шт/рік;

$$t_g = 2070 \cdot 60 / 4000 = 31,05 \text{ хв};$$

б) Визначаємо коефіцієнт завантаження обладнання

$$\eta_{з.oi} = T_{um} / t_g, \quad (1.6)$$

де  $T_{um}$  – штучний час кожної операції виготовлення деталі, хв.

Якщо  $\eta_{з.oi} \geq 0,5$ , то  $Q_i = 1$ .

Якщо  $\eta_{з.oi} < 0,5$ , то  $Q_i = 1 / \eta_{з.oi}$ .

$Q_i$  округляється у меншу сторону до цілого числа.

Дані щодо існуючого заводського технологічного процесу про  $T_{um} / t_g$  та розрахункові дані  $\eta_{з.oi}$  та  $Q_i$  заносимо до таблицю А.6 у додатку А;

в) Визначимо коефіцієнт закріплення операції за формулою 1.4

$$K_{з.о} = \sum Q_i / \sum P_i = 138 / 13 = 10,61.$$

Оскільки  $10 \leq K_{з.о} \leq 20$ , то тип виробництва середньосерійний.

Для серійного виробництва розраховується оптимальна кількість деталей партії для одночасного запуску:

$$n = N \cdot a / F, \quad (1.7)$$

де  $N$  – обсяг випуску;

$a$  – необхідний запас на складі,  $a = 10$  днів;

$F$  – число робочих днів на рік,  $F = 255$  днів;

$$n = 4000 \cdot 10 / 255 = 156,9 \approx 157 \text{ шт.}$$

## РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ

2.1 Вибір та техніко–економічне обґрунтування методу отримання заготовлі

а) Визначаємо вартість заготовлі із прокату [2]

$$S_{заг1} = M + C_{o.з.}, \quad (2.1)$$

де  $M$  – витрати на матеріал заготовлі;

$C_{o.з.}$  – технологічна собівартість операцій правки, калібрування прутків, розрізання їх на штучні заготовлі.

$$C_{o.з.} = \frac{C_{n.з.} \cdot T_{шт(u-k)}}{60}, \quad (2.2)$$

де  $C_{n.з.}$  – наведені витрати на робоче місце, грн.;

$T_{шт(u-k)}$  – штучний чи штучно–калькуляційний час виконання заготовельної операції (правки, калібрування, розрізки та інших.).

$$C_{n.з.} = 2400 \text{ грн.};$$

$$T_{шт(u-k)} = 5 \text{ хв.};$$

$$C_{o.з.} = C_{o.з.} = \frac{2400 \cdot 5}{60} = 200 \text{ грн.}$$

Витрати на матеріал визначаються за масою прокату, потрібного на виготовлення деталі, і масою стружки, що здається.

$$M = Q \cdot S - \frac{(Q - q) \cdot S_{omx.}}{1000}, \quad (2.3)$$

де  $Q$  – маса заготовівлі, кг,  $Q = 7287$  кг;

$S$  – вартість матеріалу заготовівлі, грн,  $S = 2100$  грн/кг;

$q$  – маса готової деталі, кг,  $q = 2,1$  кг;

$S_{omx.}$  – вартість однієї тонни відходів, грн.,  $S_{omx.} = 570000$  грн/т;

$$S_{заг1} = 7,287 \cdot 2100 - \frac{(7,287 - 2,1) \cdot 570000}{1000} + 200 = 12546 \text{ грн};$$

б) Визначаємо вартість заготовівлі, отриманої штампуванням [2]

$$S_{заг2} = \left( \frac{C_i}{1000} \cdot Q \cdot k_T \cdot k_C \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_{II} \right) - (Q - q) \cdot \frac{S_{omx}}{1000}, \quad (2.4)$$

де  $C_i$  – базова вартість 1 тонни заготовок, грн,  $C_i = 2100000$  грн/т;

$Q$  – маса заготовівлі, кг,  $Q = 3,4$  кг;

$k_t$ ,  $k_c$ ,  $k_b$ ,  $k_m$ ,  $k_{II}$  – коефіцієнти, що залежать від класу точності, групи складності, маси, марки матеріалу та обсяг виробництва заготовок.

$$k_t = 1,05; k_c = 0,87; k_b = 0,73; k_m = 1,18; k_{II} = 1; [2]$$

$$S_{заг2} = \left( \frac{2100000}{1000} \cdot 3,4 \cdot 1,05 \cdot 0,87 \cdot 0,73 \cdot 1,18 \cdot 1 \right) - (3,4 - 2,1) \cdot \frac{570000}{1000} = 4877 \text{ грн.};$$

в) Економічний ефект використання різного типу заготовок

$$E_2 = (S_{заг1} - S_{заг2}) \cdot N, \quad (2.5)$$

де  $N$  – обсяг випуску,  $N = 4000$ ;

$$S_{заг1} = 12546 \text{ грн}, S_{заг2} = 4877 \text{ грн.}$$

З отриманих розрахунків видно, що отримання заготовки з прокату коштує дорожче, ніж штампування.

## 2.2 Розрахунок припусків на обробку

Заготівля – штампування на ГKM нормальної точності. Маса заготівлі – 3,4 кг, матеріал – сталь 40X. Відповідно до ДСТУ 9182:2022 визначаємо: клас точності штампування – T2, група сталі – M2, ступінь складності – C1, вихідний індекс.

Технологічний маршрут обробки поверхні діаметром  $40_{js6}^{(-0,008)}_{(-0,008)}$  складається з обточування попереднього та остаточного та шліфування попереднього та остаточного. Обточування проводиться у центрі на патроні, шліфування в центрах.

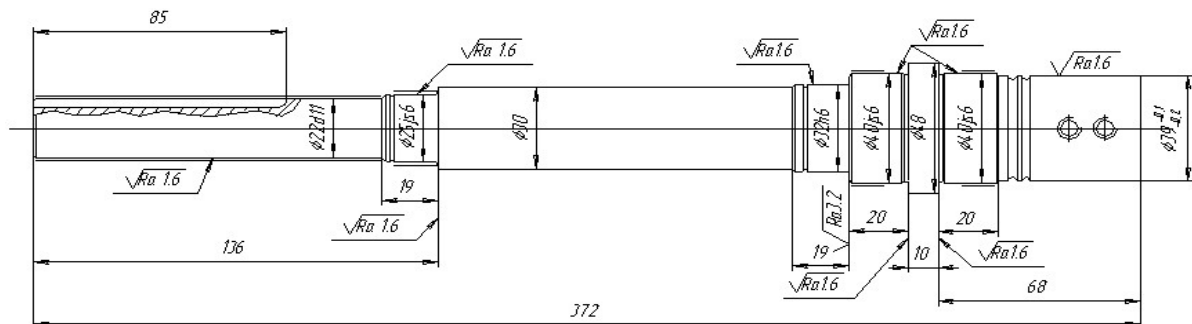


Рисунок 2.1 – Ескіз деталі шпинделя

Розрахунок припусків на обробку поверхні діаметром  $40_{js6}^{(-0,008)}_{(-0,008)}$  ведемо шляхом складання таблиці А.11 у додатку А, в яку послідовно записуємо технологічний маршрут обробки отвору та всі значення елементів припуску.

Значення  $R_z$  та  $T$ , що характеризують якість штампованих заготовок, становлять  $R_z = 200$  мкм,  $T = 300$  мкм [2]. Похибка установки  $\varepsilon_y$  в даному випадку дорівнюватиме нулю, тому ця величина з основної формули для розрахунку мінімальних припусків буде виключена.

Сумарне значення просторового відхилення заготівлі [2]

$$\rho_z = \sqrt{\rho_{cm}^2 + \rho_{кор}^2 + \rho_y^2}. \quad (2.6)$$

Похибка заготівлі зі зміщення становить  $\rho_{cm} = 1,2$  мкм [2].

Похибка заготівлі з короблення [2]

$$\rho_{кор} = \Delta k \cdot l, \quad (2.7)$$

де  $\Delta k$  – питома кривизна заготовки на 1 мм довжини,  $\Delta k = 0,6$  мкм [2];

$$\rho_{\delta} = 0,6 \cdot 88 = 0,05 \text{ мм.}$$

Похибка заготівлі під час центрування [2]

$$\rho_{\delta} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{\epsilon}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\delta}}{2}\right)^2}. \quad (2.7)$$

Допуск на розмір поверхні, яка використовується як базова, розраховується за формулою [2]

$$\delta_z = H_{e\delta} + I_{ui} + K_y. \quad (2.8)$$

Допуск заготовки за класом точності згідно з ДСТУ 9182:2022 становить

$$\delta_m = 1 \text{ мм.}$$

Елементи допусків при недоштампування та зносу штампів складають відповідно  $H_{e\delta} = 2,5$  мм,  $I_{ui} = 2,8$  мм [2].

Коливання усадки становить  $K_y = 1,0 \cdot 75 = 75$  мкм.

$$\delta_3 = 2,5 + 2,8 + 0,075 = 5,375 \text{ мм} = 5,4 \text{ мм.}$$

$$\rho_{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{5,4}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2} = 2,75 \text{ мкм.}$$

$$\rho_{\zeta} = \sqrt{1,2^2 + 0,05^2 + 2,75^2} = 3,00 \text{ мкм.}$$

Залишкові просторові відхилення:

після попереднього обточування  $\rho_1 = 0,06 \cdot 3000 = 180 \text{ мкм}$ ;

після остаточного обточування  $\rho_2 = 0,05 \cdot 3000 = 150 \text{ мкм}$ ;

після попереднього шліфування  $\rho_3 = 0,02 \cdot 3000 = 60 \text{ мкм}$ .

Розраховуємо мінімальні значення припусків, користуючись основною формулою [2]

$$2Z_{\min i} = 2(Rz_{i-1} + T_{i-1} + \rho_{i-1}). \quad (2.9)$$

Мінімальний припуск:

під попереднє обточування

$$2Z_{\min 1} = 2 \cdot (200 + 300 + 3000) = 2 \cdot 3500 \text{ мкм};$$

під остаточне обточування

$$2Z_{\min 2} = 2 \cdot (100 + 100 + 180) = 2 \cdot 380 \text{ мкм};$$

під попереднє шліфування

$$2Z_{\min 3} = 2 \cdot (50 + 50 + 150) = 2 \cdot 250 \text{ мкм};$$

під остаточне шліфування

$$2Z_{\min 4} = 2 \cdot (10 + 20 + 60) = 2 \cdot 90 \text{ мкм.}$$

Розрахунковий розмір  $d_p$  заповнюється починаючи з кінцевого (креслярського) розміру шляхом додавання мінімального розрахункового припуску кожного технологічного переходу:

$$d_{p3} = 39,992 + 0,180 = 40,172 \approx 40,17 \text{ мм};$$

$$d_{p2} = 40,17 + 0,50 = 40,67 \text{ мм};$$

$$d_{p1} = 40,67 + 0,76 = 41,43 \text{ мм};$$

$$d_{p3} = 41,43 + 7,00 = 48,43 \text{ мм}.$$

Записавши у відповідній графі розрахункової таблиці значення допусків за кожен технологічний перехід і заготівлю, у графі “Найменший граничний розмір” визначимо їх значення кожного технологічного переходу, округляючи розрахункові розміри збільшенням їх значень. Округлення виробляємо до того ж знака десяткового дробу, з яким надано допуск на розмір для кожного переходу. Найбільші граничні розміри обчислюємо додаванням допуску до округленого найменшого граничного розміру:

$$d_{\max 4} = 39,992 + 0,033 = 40,025 \text{ мм};$$

$$d_{\max 3} = 40,17 + 0,06 = 40,23 \text{ мм};$$

$$d_{\max 2} = 40,67 + 0,21 = 40,88 \text{ мм};$$

$$d_{\max 1} = 41,43 + 0,52 = 41,95 \text{ мм};$$

$$d_{\max 3} = 48,43 + 5,4 = 53,83 \text{ мм}.$$

Граничні значення припусків  $Z_{\max}^{np}$  визначаємо як різницю найбільших граничних розмірів,  $Z_{\min}^{np}$  – як різницю найменших граничних розмірів попереднього та виконуваного переходів:

$$2Z_{\max 4}^{np} = 40,23 - 40,02 = 210 \text{ мкм};$$

$$2Z_{\max 3}^{np} = 40,88 - 40,23 = 650 \text{ мкм};$$

$$2Z_{\max 2}^{np} = 41,95 - 40,88 = 1070 \text{ мкм};$$

$$2Z_{\max 1}^{np} = 53,83 - 41,95 = 11880 \text{ мкм};$$

$$2Z_{\min 4}^{np} = 40,17 - 39,992 = 178 \text{ мкм};$$

$$2Z_{\min 3}^{np} = 40,67 - 40,17 = 500 \text{ мкм};$$

$$2Z_{\min 2}^{np} = 41,43 - 40,67 = 760 \text{ мкм};$$

$$2Z_{\min 1}^{np} = 48,4 - 41,43 = 6970 \text{ мкм}.$$

Загальні припуски:

$$Z_{O \min} = \sum Z_{\min i}^{np} = 6970 \text{ мкм};$$

$$Z_{O \max} = \sum Z_{\max i}^{np} = 13810 \text{ мкм}.$$

Загальний номінальний припуск [2]

$$Z_{O \text{ном}} = Z_{O \min} + H_z - H_d. \quad (2.10)$$

Нижнє відхилення  $H_z = I_{ш} + K_y/2 = 2,8 + 0,075/2 = 2838 \text{ мкм}$ .

$$Z_{O \text{ном}} = 6970 + 2838 - 33 = 9775.$$

Номінальний діаметр заготівлі:

$$d_{z \text{ном}} = 39,992 + 9,775 = 49,797 \text{ мм}.$$

З даних розрахунку будемо схему графічного розташування припусків і допусків з обробки поверхні діаметром  $40 \text{ js}6 \begin{pmatrix} -0,008 \\ -0,008 \end{pmatrix}$  (рис. 2.2).

На інші поверхні деталі припуски та допуски приймаємо за таблицею (ДСТУ Б В.2.8-23:2009) та записуємо їх значення до таблиці А.12 у додатку А.

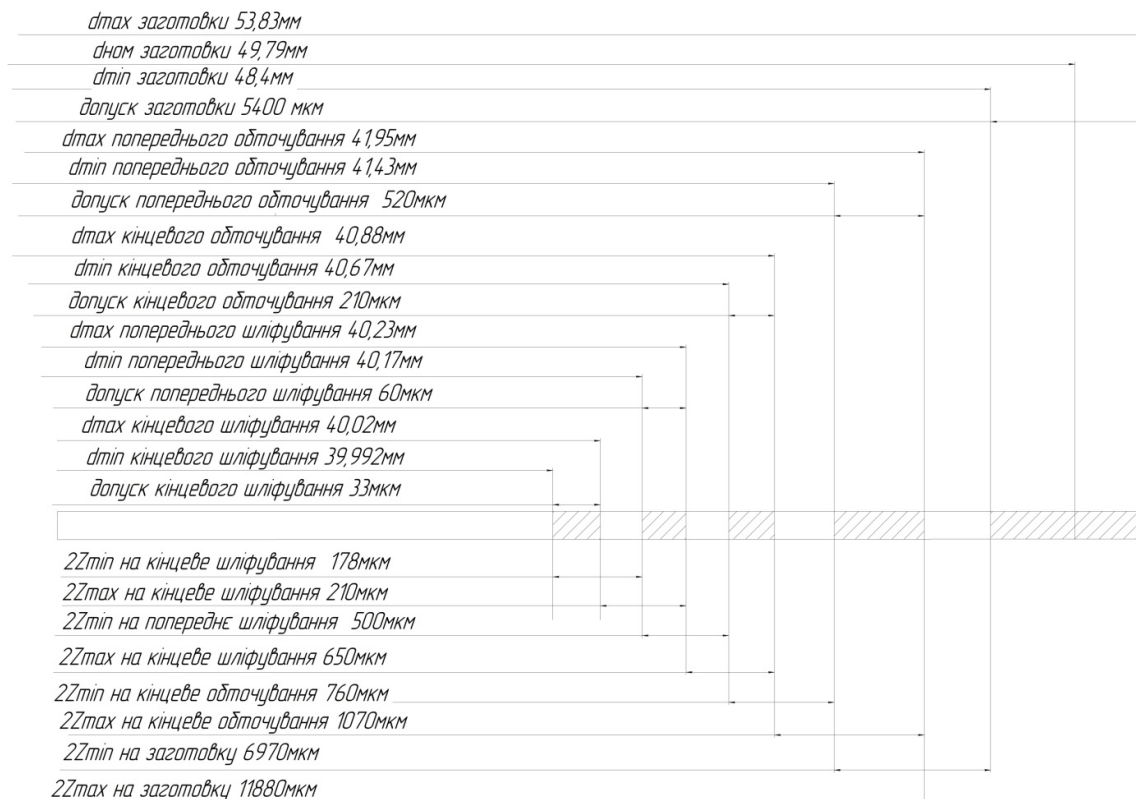


Рисунок 2.2 – Схема графічного розташування припусків

Креслення заготовки (штампування) шпинделя показано рис. 2.3.

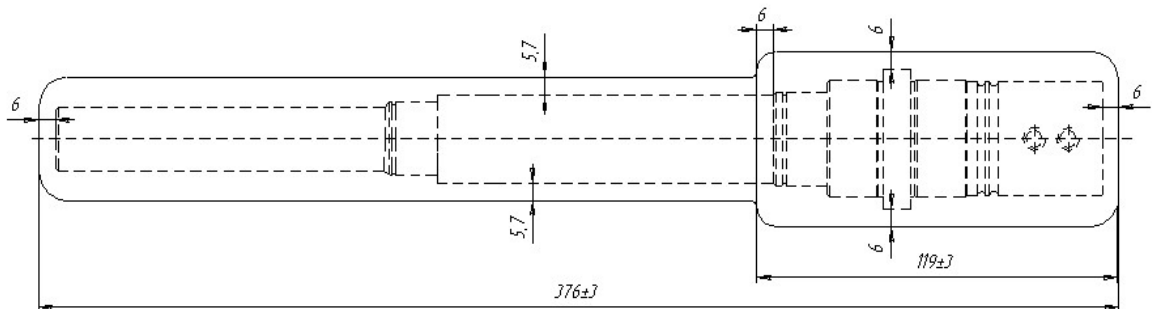


Рисунок 2.3 – Заготівля шпинделя з нарахованими припусками та допусками

### 2.3 Аналіз базового технологічного процесу

Аналіз існуючого технологічного процесу проведемо з метою забезпечення якості продукції.

Правильність складання технологічного процесу досягається за рахунок: раціонального методу одержання заготівлі; правильність вибору чорнових, чистових та проміжних баз на операціях технологічного процесу, правильність встановлення послідовності операцій, застосування високопродуктивного ріжучого інструменту з матеріалу ріжучої частини – твердий сплав та ін.

Вносячи свою пропозицію щодо покращення технологічного процесу, можна об'єднати деякі технологічні операції при обробці кількох поверхонь.

У результаті аналізу технологічного процесу було складено таблиці А.8, А.9 і А.10 у додатку А.

Операції “125 Розточна” та “130 Токарна” пропоную скасувати, так як потрібна точність паза 6D10 для подальшої обробки може бути досягнута на попередніх операціях. Необхідна шорсткість буде отримана на наступних стругальних і шліфувальних операцій. Верстат 2А554 пропоную замінити на вертикально–свердильний верстат моделі 2Р135Ф2. Наявність револьверної головки дозволяє проводити обробку отворів, не витрачаючи додаткового часу

на зміну інструменту. Так само застосування даного верстата дозволяє проводити обробку без попередньої розмітки та застосування кондуктора. Також заготівлю з прокату було замінено на штампування.

Аналіз наведених у базовому техпроцесі відомостей показує, що верстати, що використовуються на операціях, за габаритними розмірами, оброблюваної заготовки, точності і шорсткості поверхонь, досягаються відповідними необхідними умовам обробки заданої деталі.

#### 2.4 Вибір обладнання та розрахунок його кількості

Правильний вибір обладнання визначається його раціональним використанням у часі. Для кожного верстата в технологічному процесі повинні бути підраховані коефіцієнти завантаження верстата ( $\eta_c$ ), коефіцієнт використання обладнання за основним часом ( $\eta_0$ ), та коефіцієнт використання обладнання за потужністю ( $\eta_m$ ).

а) Коефіцієнт завантаження верстата визначається як відношення розрахункової кількості верстатів  $m_p$ , зайнятих на одній операції процесу, до прийнятого (фактичного) числа верстатів  $m_{np}$  [2]

$$\eta_3 = \frac{m_p}{m_{np}}. \quad (2.11)$$

Розрахункова кількість верстатів  $m_p$  визначається як відношення штучного часу за цією операцією  $T_{um}$  до такту випуску  $t_g$  [2]

$$m_p = \frac{T_{um}}{t_g}. \quad (2.12)$$

Розрахунок кількості верстатів та коефіцієнта завантаження для кожної операції зведемо до таблиці А.16 у додатку А.

б) Коефіцієнт використання устаткування за основним технологічним часом  $\eta_0$  свідчить про частку машинного часу, загалом, часу роботи верстата. Воно визначається як ставлення основного часу до штучно-калькуляційного (для великосерійного виробництва) [2]

$$\eta_0 = \frac{T_o}{T_{шт.к.}}, \quad (2.13)$$

Розрахунок кількості коефіцієнта використання устаткування здебільшого зведемо до таблиці А.17 у додатку А.

в) Коефіцієнт використання обладнання за потужністю приводу  $\eta_m$  – є відношенням необхідної потужності на приводі верстата  $N_{np}$  до потужності встановленого електродвигуна  $N_{cm}$

$$\eta_m = \frac{N_{np}}{N_{cm}}. \quad (2.14)$$

Розрахунок кількості коефіцієнта використання устаткування за потужністю приводу зведемо таблиці А.18 у додатку А.

Для досить наочного уявлення про процес будуються такі графіки:

- 1) Завантаження обладнання (рис. Б.1, додаток Б);
- 2) Використання обладнання за основним часом (рис. Б.2, додаток Б);
- 3) Використання обладнання за потужністю (рис. Б.3, додаток Б).



Рисунок 2.4 – Токарний з ЧПК HAAS ST-30

Токарний верстат із числовим програмним керуванням (ЧПК) HAAS ST-30 є сучасним високопродуктивним обладнанням, що використовується для обробки деталей середнього розміру. Його конструкція забезпечує високу жорсткість, точність та універсальність, що робить його ідеальним для серійного і дрібносерійного виробництва.

Основні технічні характеристики:

- Розмір патрона: 254 мм (10").
- Максимальний діаметр оброблюваного прутка: 76 мм (3").
- Максимальний діаметр оброблюваної деталі: 533 мм (21").
- Діаметр різання:
  - З револьверною головкою ВОР: 381 мм (15").
  - З револьверною головкою ВМТ65: 349 мм (13,75").
- Довжина обробки: до 826 мм (32,5").
- Переміщення по осях:
  - X: 239 мм (9,4").
  - Z: 826 мм (32,5").
- Швидкість шпинделя: до 3400 об/хв.
- Потужність шпинделя: 22,4 кВт (30 к.с.).
- Торець шпинделя: А2-6.
- Кількість інструментальних позицій: 12.
- Швидкість швидкого переміщення:
  - По осі X: 24 м/хв.
  - По осі Z: 24 м/хв.
- Габарити: 3835 × 1778 × 2007 мм.
- Маса: приблизно 6500 кг.

Переваги верстата:

1. Універсальність: здатність обробляти широкий діапазон деталей різної складності.
2. Висока точність і продуктивність: завдяки потужному шпинделю та високій швидкості переміщення.

3. Стабільність і жорсткість конструкції: забезпечують довговічність та якісну обробку навіть при великих навантаженнях.

Верстат HAAS ST-30 широко використовується у машинобудуванні, енергетиці та авіаційній промисловості завдяки своїй точності, продуктивності та гнучкості у налаштуванні.



Рисунок 2.5 – Вертикально-фрезерний верстат з ЧПК HAAS VF-3

Вертикально-фрезерний верстат з ЧПК HAAS VF-3 – це сучасне обладнання, яке забезпечує високу точність і продуктивність, призначене для виконання складних обробних операцій у різних галузях промисловості.

Основні технічні характеристики:

- Робочі переміщення:
  - По осі X: 1016 мм.
  - По осі Y: 508 мм.
  - По осі Z: 635 мм.
- Робочий стіл:
  - Розміри: 457 × 1219 мм.
  - Максимальне навантаження: до 1588 кг.

- Шпиндель:
  - Конус: ISO 40.
  - Максимальна швидкість обертання: 8100 об/хв.
  - Потужність двигуна: 22,4 кВт (30 к.с.).
  - Максимальний крутний момент: 122 Н·м при 2000 об/хв.
- Швидкість переміщення:
  - Прискорене переміщення по осях X, Y, Z: до 25,4 м/хв.
  - Максимальна швидкість подачі при різанні: 16,5 м/хв.
- Магазин інструментів:
  - Кількість позицій: 20 (стандартно), опціонально 30+1 або 50+1.
  - Максимальний діаметр інструмента:
    - 89 мм (з усіма сусідніми гніздами).
    - 127 мм (із порожніми сусідніми гніздами).
  - Максимальна вага інструмента: до 5,4 кг.
- Точність:
  - Позиціонування:  $\pm 0,005$  мм.
  - Повторюваність:  $\pm 0,0025$  мм.
- Габарити:
  - Довжина: 2692 мм.
  - Ширина: 2540 мм.
  - Висота: 2997 мм.
- Маса верстата: близько 7485 кг.

Особливості:

HAAS VF-3 вирізняється своєю універсальністю, високою жорсткістю та точністю обробки, що робить його ідеальним для серійного виробництва деталей із високими вимогами до точності. Верстат успішно використовується у машинобудуванні, енергетиці та авіабудуванні, забезпечуючи стабільну якість і ефективність.



Рисунок 2.6 – Круглошліфувальний верстат Bernardo URS 500 N

Круглошліфувальний верстат Bernardo URS 500 N призначений для високоточної обробки зовнішніх та внутрішніх циліндричних поверхонь деталей.

Нижче наведено основні технічні характеристики цього обладнання:

- Відстань між центрами: 500 мм;
- Висота центрів: 135 мм;
- Максимальний діаметр шліфування: 200 мм;
- Діапазон діаметрів внутрішнього шліфування: від 13 до 100 мм;
- Максимальна глибина внутрішнього шліфування: 125 мм;
- Кут повороту стола: від  $+3^\circ$  до  $-9^\circ$ ;
- Максимальний позовжній хід стола: 600 мм;
- Швидкість позовжнього переміщення стола: від 0,1 до 4 м/хв
- Потужність головного двигуна: 4 кВт
- Швидкість обертання шліфувального круга: від 25 до 20 000 об/хв
- Габаритні розміри (Д × Ш × В): 2150 × 1450 × 1700 мм
- Маса верстата: 2170 кг.

Цей верстат оснащений пристроєм для внутрішнього шліфування, що розширює його функціональні можливості. Основні компоненти включають

шліфувальний круг, фланець для шліфувального круга, 3-кулачковий патрон діаметром 200 мм, перетворювач частоти, відкритий та закритий люнети, пристрій для шліфування отворів, світлодіодну лампу, підставку для балансування, балансувальне оправлення, два нерухомих центра, охолоджувальний пристрій та захист від бризок.

Верстат Bernardo URS 500 N широко використовується в машинобудуванні, інструментальному виробництві та при виготовленні дрібносерійних деталей, забезпечуючи високу точність та якість обробки.

Таблиця 2.1 – Технологічне оснащення

Номер операції	Оснащення	Верстат
005	Токарна з ЧПК 1 Різцетримач DCLNR 2525M 19 2 Різець 2102-4036 Пластина CNMG 19 06 08-PR 4425 3. Окуляри ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 4. Кран	Токарний з ЧПК HAAS ST-30
010	Токарна з ЧПК 1, Різцетримач DIN69880 2. Різець 2102-4035 Пластина T5K10 SNMA-160412 3. Різець 2102-4036 Пластина T5K10 SNMA-120412 4. Різець 2102-4036 Пластина T5K10 SNMA-120412 5. Різець 2102-4035 Пластина T5K10 SNMA-160412 6. Утримувач DIN69880 Різець канавковий T15K6 7. Утримувач DIN69880 Різець канавковий T15K6 8. Окуляри	Токарний з ЧПК HAAS ST-20
015	Токарна з ЧПК 1 Різцетримач DCLNR 2525M 19 2 Різець 2102-4036 Пластина CNMG 19 06 08-PR 4425 3. Окуляри ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 4. Кран	Токарний з ЧПК HAAS ST-20
020	Вертикально-фрезерна з ЧПК 1. Свердло центрувальне 4мм P6M5 2. Свердло DNC130-156-Ø13 3. Свердло DCN160-192-Ø21 4. Зенківка DIN334 ДСТУ 2233-93 5. Зенкер 2320-2571	Вертикально-фрезерувальний з ЧПК HAAS VF-3

	6 Розгортка 2363-3448 Ø16H9 7. Свердло DCN160-192-Ø17,4 8. Фреза кінцева P6M5 KM2 Ø25 9. Окуляри ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 10. Кран	
025	Вертикально-фрезерна з ЧПК 1.Зенківка DIN336 DIN334 ДСТУ 2233-93 2. Цековка GB4260-84 Ø35 3. Мітчик 2621-1741 M20 4. Окуляри ДСТУ 12.4.001-00 5. Кран	Вертикально-фрезерувальний з ЧПК HAAS VF-3
030	Вертикально-фрезерна з ЧПК 1. Свердло центрувальне 4мм P6M5 2. Свердло DNC130-156-Ø21 3. Зенківка DIN336 ДСТУ 21543:2008 4. Мітчик TaeguTec M24x1,5 HSSE TiN 6H 5. Фреза кінцева P6M5 KM2 Ø30 6. Нутромір 7. Окуляри ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 8.Кран	Вертикально-фрезерувальний з ЧПК HAAS VF-3
035	Внутрішньошліфувальна 1. Шліфувальний круг PA600У 2.Нутромір 400мм ДСТУ ГОСТ 17215:2009 3. Окуляри ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 4. Кран	Внутрішньошліфувальний Bernardo URS 1000 N
040	Круглошліфувальна 1. Шліфувальний круг 25A K/L 35мм 2. Окуляри ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 3. Кран	Круглошліфувальний Bernardo URS 500 N

## 2.5 Техніко–економічне обґрунтування розробленого техпроцесу

Критерієм оптимальності та техніко–економічного обґрунтування технологічного процесу є мінімум наведених витрат на одиницю продукції.

Як собівартість розглядається технологічна собівартість, що включає змінюють за варіантами статті витрат. Часові наведені витрати можна визначити за формулою [2]

$$C_{n.з.} = C_з + C_{ч.з.} + E_H (K_c + K_з), \quad (2.15)$$

де  $C_з$  – основна та додаткова зарплата нарахуваннями, грн/рік;

$C_{ч.з.}$  – годинні витрати з експлуатації робочого місця, грн/рік;

$E_H$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень (у машинобудуванні  $E_H = 0,15$ );

$K_c, K_3$  – питомі часові капітальні вкладення відповідно до верстата і будівлі, грн/рік.

Основна та додаткова зарплата з нарахуванням та врахуванням багатOVERстатного обслуговування розраховується за формулою [2]

$$C_3 = \varepsilon \cdot C_{T\Phi} \cdot k \cdot y; \quad (2.16)$$

де  $\varepsilon$  – коефіцієнт, що враховує додаткову зарплату,  $\varepsilon = 1,53$ ;

$C_{T\Phi}$  – годинна тарифна ставка верстатника–відрядника відповідного розряду, грн/рік;

$k$  – коефіцієнт, що враховує зарплату наладчика, для серійного виробництва  $k = 1$ ;

$y$  – коефіцієнт, що враховує оплату робітника при багатOVERстатному обслуговуванні,  $y = 1$ .

Часові витрати на експлуатацію робочого місця [2]

$$C_{ч.з.} = C_{ч.з.}^{\delta.n} \cdot k_M, \quad (2.17)$$

де  $C_{ч.з.}^{\delta.n}$  – практичні годинні витрати на базовому робочому місці, грн/рік;

$k_i$  – коефіцієнт, що показує, у скільки разів витрати, пов'язані з роботою даного верстата, більше, ніж аналогічні витрати у базового верстата, приймається за додатком 2 [2].

$C_{ч.з.}^{\delta.n} = 612$  грн/год – для середньосерійного виробництва.

Часові витрати на експлуатацію робочого місця у разі зниженого завантаження верстата ( $\eta_3 < 60\%$ ) повинні бути скориговані за допомогою коефіцієнта  $\varphi$ . У цьому випадку скориговані витрати за годину (грн/рік)

$$C_{ч.з.}^{\kappa} = C_{ч.з.} \cdot \frac{\varphi}{1,14}, \quad (2.18)$$

$$\text{де } \varphi = 1 + \frac{\alpha(1 - \eta_3)}{\eta_3} \text{ – поправочний коефіцієнт;} \quad (2.19)$$

$\alpha$  – частка постійних витрат у собівартості вартових на робочому місці, які приймаються за додатком 2 [2];

$\eta_3$  – коефіцієнт завантаження верстата.

Капітальні вкладення будівлі (грн/год) [2]

$$K_c = \frac{Ц}{F_d \cdot \eta_3}, \quad (2.20)$$

Капітальне вкладення до будівлі (грн/год) [2]

$$K_3 = \frac{F \cdot 78,4 \cdot 4000}{F_d \cdot \eta_3}, \quad (2.21)$$

де  $Ц$  – балансова вартість верстата, грн;

$F$  – виробнича площа, яку займає верстат з урахуванням проходів,  $\text{м}^2$ ;

$$F = f \cdot k_f; \quad (2.22)$$

$f$  – площа верстата у плані,  $\text{м}^2$ ;

$k_f$  – коефіцієнт, що враховує додаткову виробничу площу проходів;

$F_D$  – дійсний річний фонд часу,  $F_D = 2070$  год;

$\eta_3$  – коефіцієнт завантаження верстата.

Технологічна собівартість операції технічної обробки (грн)

$$C_o = \frac{C_{н.з.} \cdot T_{шт}}{60 \cdot k_B}; \quad (2.23)$$

де  $T_{шт}$  – штучний або штучно–калькуляційний час на операцію, хв;

$k_B = 1,3$  – коефіцієнт виконання норм.

Наведена річна економія (економічний ефект на програму), грн [2]

$$E_{рік} = (C_0^1 - C_0^2)N, \quad (2.24)$$

де  $C_0^1, C_0^2$  – технологічна собівартість порівнюваних операцій, грн.

Зробимо розрахунок технологічної собівартості для операції “130 Сverdлильна” на верстаті HAAS VF 3 таг s операції “125 Сverdлильна” на проектованого техпроцесу.

а) Базовий варіант.

Вихідні дані:

балансова вартість верстата  $C = 35000000 \cdot 1,1 = 38500000$  грн;

площа верстата у плані  $f = 4,45$  м<sup>2</sup>;

штучний час на операцію  $T_{шт} = 2,4$  хв;

коефіцієнт, що враховує додаткову площу проходів  $k_f = 3$ ;

частка постійних витрат у собівартості вартових на робочому місці  
 $\alpha = 0,34$ ;

коефіцієнт  $k_m = 1,6$ ;

годинна тарифна ставка верстатника–відрядника 3-го розряду  
 $C_{тф} = 922,1$  грн/рік;

коефіцієнт завантаження обладнання  $\eta_3 = 0,08$ ;

обсяг виробництва  $N = 4000$  штук на рік;

дійсний річний фонд часу роботи обладнання  $F\partial = 2070$  год.

Розраховуємо основну та додаткову зарплату з нарахуванням та врахуванням багатостатного обслуговування

$$C_3 = \varepsilon \cdot C_{T\phi} \cdot k \cdot y = 1,53 \cdot 922,1 \cdot 1 \cdot 1 = 1410,8 \text{ грн/год.}$$

Розраховуємо годинні витрати з експлуатації робочого місяця

$$C_{ч.з.} = C_{ч.з.}^{б.п} \cdot k_M = 612 \cdot 1,6 = 979,2 \text{ грн/год.}$$

Розраховуємо скориговані годинні витрати на експлуатацію робочого місяця

$$C_{ч.з.}^к = C_{ч.з.} \cdot \frac{\varphi}{1,14};$$

$$\varphi = 1 + \frac{\alpha(1 - \eta_3)}{\eta_3} = 1 + \frac{0,34 \cdot (1 - 0,08)}{0,08} = 4,91;$$

$$C_{ч.з.}^к = 979,2 \cdot \frac{4,91}{1,14} = 4217 \text{ грн/год.}$$

Розраховуємо капітальні вкладення у верстат

$$K_c = \frac{Ц}{F_d \cdot \eta_3} = \frac{38500000}{2070 \cdot 0,08} = 232488 \text{ грн/год.}$$

Розраховуємо капітальні вкладення у будівлю

$$K_3 = \frac{F \cdot 78,4 \cdot 4000}{F_d \cdot \eta_3} = \frac{4,45 \cdot 3 \cdot 78,4 \cdot 4000}{2070 \cdot 0,08} = 25281 \text{ грн/год.}$$

Визначаємо часові наведені витрати

$$C_{n.з.} = C_3 + C_{ч.з.}^k + E_H (K_c + K_3) = 1410,8 + 4217 + 0,15 \cdot (232488 + 25281) = 44293 \text{ грн/год.}$$

Визначаємо технологічну собівартість операції обробки

$$C_o = \frac{C_{n.з.} \cdot T_{ум}}{60 \cdot k_B} = \frac{44293 \cdot 2,4}{60 \cdot 1,3} = 1362 \text{ грн.}$$

б) Проектований варіант.

Вихідні дані:

балансова вартість верстата  $Ц = 3000000 \cdot 1,1 = 3300000$  грн;

площа верстата у плані  $f = 3,91 \text{ м}^2$ ;

штучний час на операцію  $T_{ум} = 2,1$  хв;

коефіцієнт, що враховує додаткову площу проходів  $k_f = 3,5$ ;

частка постійних витрат у собівартості вартових на робочому місці  $\alpha = 0,22$ ;

коефіцієнт  $k_m = 0,7$ ;

годинна тарифна ставка 4-го розряду  $C_{ТФ} = 1072,4$  грн/год;

коефіцієнт завантаження обладнання  $\eta_3 = 0,06$ ;

обсяг виробництва  $N = 4000$  штук на рік;

дійсний річний фонд часу роботи обладнання  $F_d = 2070$  год.

Розраховуємо основну та додаткову зарплату з нарахуванням та врахуванням багатOVERстатного обслуговування

$$C_3 = \varepsilon \cdot C_{ТФ} \cdot k \cdot y = 1,53 \cdot 1072,4 \cdot 1 \cdot 1 = 1640,8 \text{ грн/год.}$$

Розраховуємо годинні витрати з експлуатації робочого місяця

$$C_{ч.з.} = C_{ч.з.}^{б.п} \cdot k_M = 612 \cdot 0,7 = 428,4 \text{ грн/год.}$$

Розраховуємо скориговані годинні витрати на експлуатацію робочого місяця

$$C_{ч.з.}^к = C_{ч.з.} \cdot \frac{\varphi}{1,14};$$

$$\varphi = 1 + \frac{\alpha(1 - \eta_3)}{\eta_3} = 1 + \frac{0,22 \cdot (1 - 0,06)}{0,06} = 4,45;$$

$$C_{ч.з.}^к = 428,4 \cdot \frac{4,45}{1,14} = 1672 \text{ грн/год.}$$

Розраховуємо капітальні вкладення у верстат

$$K_c = \frac{Ц}{F_D \cdot \eta_3} = \frac{33000000}{2070 \cdot 0,06} = 267500 \text{ грн/год.}$$

Розраховуємо капітальні вкладення у будівлю

$$K_3 = \frac{F \cdot 78,4 \cdot 4000}{F_D \cdot \eta_3} = \frac{3,91 \cdot 3,5 \cdot 78,4 \cdot 4000}{2070 \cdot 0,06} = 34554 \text{ грн/год.}$$

Визначаємо часові наведені витрати

$$C_{н.з.} = C_3 + C_{ч.з.}^к + E_H (K_c + K_3) = 1640,8 + 1672 + 0,15 \cdot (267500 + 34554) = 48620,9 \text{ грн/год.}$$

Визначаємо технологічну собівартість операції технічного оброблення

$$C_o = \frac{C_{н.з.} \cdot T_{шт}}{60 \cdot k_B} = \frac{48620,9 \cdot 2,1}{60 \cdot 1,3} = 1309 \text{ грн.}$$

Результати визначення технологічних собівартостей за відмінними операціями зіставляючих варіантів технологічного процесу наводимо в таблиці А.18 в додатку А.

Річний економічний ефект від впровадження проектного техпроцесу

$$E_{рик} = (C_0^1 - C_0^2) \cdot N = (20568,2 - 6186) \cdot 4000 / 1000000 = 57,5 \text{ млн.грн}$$

## 2.6 Уточнення типу виробництва та встановлення його організаційної форми

Кількість робочих місць, що закріплюються для виготовлення даної деталі, визначається з числа механічних операцій, і приймаємо рівне  $\Sigma P_i = 16$ .

Визначення типу виробництва було докладно описано у пункті 1.3.

Уточнення типу виробництва для техпроцесу, що розробляється, наведено в таблиці А.19 у додатку А.

Коефіцієнт закріплення операції за формулою

$$K_{з.о} = \Sigma Q_i / \Sigma P_i = 118 / 11 = 10,73.$$

Так як  $10 \leq K_{з.о} \leq 20$ , то приймаємо для деталі шпиндель GDZ–301M обсягом випуску 2000 штук на рік середньосерійний тип виробництва.

Для серійного виробництва характерне виробництво серій виробів, які регулярно повторюються через певний проміжок часу. Характерна ознака серійного виробництва – виконання на робочих місцях декількох операцій, що повторюються.

Кількість деталей у партії для одночасного запуску (періодичність запуску днями  $a = 6$  днів):

$$n = N \cdot a / F = 4000 \cdot 6 / 255 = 94 \text{ шт.}$$

Приймаємо  $n = 95$  шт.

## 2.7 Розрахунок режимів різання

а) Розрахунково–аналітичний метод.

Зробимо розрахунок режимів різання на операцію “115–Токарна” на верстаті HAAS ST-30 для свердління отвору діаметром 20 (діаметр 26H7) на довжину  $L = 42,3$ мм. Сталь 40X, HB = 217, свердло P6M5. DNC130-156-Ø13

1) При свердлінні глибина різання визначається за такою формулою [3]

$$t = 0,5 \cdot D, \text{ мм}; \quad (2.25)$$

$$t = 0,5 \cdot 20 = 10 \text{ мм};$$

2) Подачу вибираємо максимально допустиму за міцністю свердла  $s = 0,22$  мм/об [3, С. 277];

3) Швидкість різання розраховують за емпіричною формулою [3]

$$v = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot S^y} \cdot K_v, \text{ м/хв.} \quad (2.26)$$

$$C_v = 9,8; q = 0,4; y = 0,5; m = 0,2; T = 50 \text{ хв.}$$

Значення коефіцієнта  $C_v$  і показників ступеня  $x$ ,  $y$  і  $m$  наведені в табл. 28 [3,]. Значення періоду стійкості  $T$  наведено у табл. 30 [3].

Коефіцієнт  $K_v$  є добутком коефіцієнтів, що враховують вплив матеріалу заготовлі  $K_{Mv}$  [3], матеріалу інструменту  $K_{Iv}$  [3], глибину свердління  $K_{lv}$  [3]:

$$K_v = K_{Mv} \cdot K_{Iv} \cdot K_{lv} \quad (2.27)$$

$$K_v = 0,67 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,67;$$

$$v = \frac{9,8 \cdot 20^{0,4}}{50^{0,2} \cdot 0,22^{0,5}} \cdot 0,67 = 31,75 \text{ м/хв.};$$

4) Крутний момент визначаємо за формулою [3]

$$M_{кр} = 10 \cdot C_m \cdot D^q \cdot s^y \cdot K_p, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.28)$$

$$C_m = 0,0345, q = 2,0, y = 0,8; K_p = K_{Mp} = 1,22;$$

5) Осьову силу визначаємо за формулою [3]

$$P_o = 10 \cdot C_p \cdot D^q \cdot s^y \cdot K_p, \text{ Н} \quad (2.29)$$

$$C_p = 68; q = 1,0; y = 0,7; K_p = K_{Mp} = 1,22.$$

Значення коефіцієнтів  $C_m$  та  $C_p$  та показників ступеня наведені у таблиці 32 [3]. Значення коефіцієнта  $K_{Mp}$  наведено у таблиці 9 [3].

$$M_{кр} = 10 \cdot 0,0345 \cdot 20^2 \cdot 0,22^{0,8} \cdot 1,22 = 50,14 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$P_o = 10 \cdot 68 \cdot 20 \cdot 0,22^{0,7} \cdot 1,22 = 5749 \text{ Н};$$

6) Потужність різання визначають за формулою [3]

$$N_e = \frac{M_{кр} \cdot n}{9750}, \text{ кВт} , \quad (2.30)$$

де частота обертання інструменту

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D}, \text{ хв}^{-1} \quad (2.31)$$

$$n = \frac{1000 \cdot 31,75}{3,14 \cdot 20} = 506 \text{ хв}^{-1}.$$

За паспортом верстата вибираємо частоту обертання  $n = 500 \text{ хв}^{-1}$ .

$$N_e = \frac{50,14 \cdot 500}{9750} = 2,57 \text{ кВт};$$

7) Уточнення швидкості різання за прийнятою частотою обертання шпинделя

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \text{ м/хв} \quad (2.32)$$

$$v = \frac{3,14 \cdot 20 \cdot 500}{1000} = 31,4 \text{ м/хв}.$$

б) Табличний спосіб

Зробимо розрахунок режимів різання на операцію “130–Свердлильна” на верстаті 2А554 для свердління отвору діаметром 4,7 під різьблення М6–7Н на довжину  $L = 7,55$  мм. Сталь 40Х, НВ = 217, свердло Р6М5.

1) Розрахунок довжини робочого ходу  $L_{p.x}$  [4]

$$L_{p.x} = L_{piz} + y + L_{don}, \quad (2.33)$$

де  $L_{piz}$  – довжина різання,  $L_{piz} = 7,55$  мм;

$y$  – довжина підведення, врізання та перебігу інструменту,  $y = 3$  мм [4];

$L_{don}$  – додаткова довжина ходу,  $L_{don} = 0$ ;

$$L_{p.x} = 7,55 + 3 = 10,55 \text{ мм}.$$

2) Визначення подачі на оборот шпинделя верстата  $S_o$  за картою С–2 [4]:

$$S_o = 0,14 \text{ мм/об}.$$

3) Визначення стійкості інструменту  $T_p$  картою С–3 [4]:

$$T_p = T_m \cdot \lambda, \quad (2.34)$$

де  $T_m$  – стійкість у хвилинах машинної роботи верстата,  $T_m = 20$  хв;

$\lambda$  – коефіцієнт часу різання інструменту.

$$\lambda = \frac{L_p}{L_{p.x.}} = \frac{7,55}{10,55} = 0,72.$$

Оскільки  $\lambda > 0,7$ , то його можна не враховувати. Приймаємо  $T_p \approx T_m = 20$  хв.

4) Визначення швидкості різання картою С-4 [4]:

$$v = v_{табл} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \quad (2.35)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт, що залежить від оброблюваного матеріалу,  $K_1 = 0,7$ ;

$K_2$  – коефіцієнт, що залежить від стійкості та марки твердого сплаву,  
 $K_2 = 1,25$ ;

$K_3$  – коефіцієнт, який залежить від виду обробки,  $K_3 = 1$ .

$$v_{табл} = 25 \text{ м/хв.}$$

$$v = 25 \cdot 0,7 \cdot 1,25 \cdot 1 = 21,9 \text{ м/хв.}$$

5) Розрахунок числа оборотів шпинделя верстата:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 21,9}{3,14 \cdot 4,7} = 1484 \text{ хв}^{-1}.$$

де  $D$  – діаметр отвору.

6) Уточнення числа оборотів шпинделя за паспортом верстата:

$$n = 1500 \text{ хв}^{-1}.$$

7) Уточнення швидкості різання за прийнятою частотою обертання шпинделя

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{3,14 \cdot 4,7 \cdot 1500}{1000} = 22 \text{ м/хв.}$$

8) Розрахунок основного машинного часу обробки  $t_m$  за хв.

$$t_m = \frac{L_{p.x.}}{S_o \cdot n} = \frac{10,55}{0,14 \cdot 1500} = 0,05 \text{ хв.} \quad (2.36)$$

9) Визначаємо величину окружної сили різання картою С-5 [4]

$$P_0 = P_{табл} \cdot K_p, \quad (2.37)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт, що залежить від оброблюваного матеріалу,  $K_p = 1,1$ ;

$$P_{табл} = 225 \text{ кг,}$$

$$P_0 = 225 \cdot 1,1 \cdot 10 = 2475 \text{ Н.}$$

10) Визначаємо потужність різання картою С-6 [10]

$$N_{різ} = N_{табл} \cdot K_N \cdot \frac{n}{1000} \text{ кВт.} \quad (2.38)$$

$$N_{різ} = 0,7 \cdot 1,1 \cdot \frac{1500}{1000} = 1,15 \text{ кВт.}$$

Розрахунки за іншими операціями заносимо до таблиці А.13 у додатку А.

### 1.8 Розрахунок технічної норми часу

У серійному виробництві визначається норма штучно-калькуляційного часу за формулою [2]

$$T_{ш.к.} = \frac{T_{п.з.}}{n} + T_{шт}, \quad (2.39)$$

де  $T_{п.з.}$  – підготовчо–заклучний час, хв;

$n$  – кількість деталей у партії, шт.

Норма штучного часу:

$$T_{шт} = T_o + T_{доп} + T_{об} + T_{відп}, \quad (2.40)$$

де  $T_o$  – основний час, хв;

$T_{відп}$  – час перерв на відпочинок та особисті потреби, хв;

$T_{доп}$  – допоміжний час, хв;

$T_{об}$  – час обслуговування робочого місця, хв.

Допоміжний час складається з:

$$T_{доп} = T_{вз} + T_{з.відк.} + T_{уп} + T_{вим}, \quad (2.41)$$

де  $T_{вз}$  – час на встановлення та зняття деталі, хв;

$T_{з.відк.}$  – час на закріплення та відкріплення деталі, хв;

$T_{уп}$  – час прийому управління, хв;

$T_{вим}$  – час вимірювання деталі, хв.

Оперативний час:

$$T_{оп} = T_o + T_{доп}, \quad (2.42)$$

Основний час визначається з розрахунків режимів різання (див. таблицю А.13 додатку А):

$$T_o = \sum t_{mi} \quad (2.43)$$

де  $t_{mi}$  – машинний основний час на виконання  $i$ -го переходу в операції.

Розрахуємо норму штучно-калькуляційного часу для операції “120-Фрезерна”, що виконується на вертикально-фрезерному верстаті HAAS VF-3. Виробництво середньосерійне. Маса деталі 2,1 кг. Кількість деталей у настроювальній партії  $n = 157$  штук. 30 % деталей контролюється калібром 18P9. Деталь встановлюється у лещатах. Основний час  $T_o = 3,5$  хв.

Визначаємо склад підготовчо-заключного часу [2]: встановлення лещат – 12 хв; встановлення фрези – 2 хв; отримання інструменту та пристроїв до початку роботи та здача їх після завершення роботи [2] – 7 хв.  
 $T_{п.з.} = 12 + 2 + 7 = 21$  хв.

Час на встановлення та зняття деталі, закріплення її та відкріплення [2]:  
 $T_{у.с} + T_{з.о} = 0,18$  хв.

Час на прийоми управління [2]: увімкнути та вимкнути верстат кнопкою – 0,01 хв; підвести та відвести фрезу до деталі – 0,08 хв.  
 $T_{уп} = 0,01 + 0,08 = 0,09$  хв.

Час, витрачений вимірювання деталі [2], дорівнює 0,09 хв; при 30 % контрольованих деталей отримаємо  $T_{із} = 0,09 \cdot 0,3 = 0,03$  хв.

Поправочний коефіцієнт на допоміжний час за середньосерійного виробництва  $k = 1,85$  [2]. Допоміжний час з урахуванням поправного коефіцієнта

$$T_{в} = k \cdot (T_{у.с} + T_{з.о} + T_{уп} + T_{із}) = 1,85 \cdot (0,18 + 0,09 + 0,03) = 0,56 \text{ хв.}$$

$$\text{Оперативний час } T_{оп} = T_o + T_{в} = 3,5 + 0,56 = 4,06 \text{ хв.}$$

Час на обслуговування робочого місця ( $T_{об}$ ) та на відпочинок та особисті потреби ( $T_{ом}$ ) становлять 7,6 % від оперативного часу ( $T_{оп}$ ) [2]

$$T_{об} + T_{ом} = 0,076 \cdot 4,06 = 0,31 \text{ хв.}$$

Визначимо штучний час

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{об} + T_{ом} = 4,06 + 0,31 = 4,37 \text{ хв.}$$

Визначимо штучно-калькуляційний час

$$T_{шт-к} = T_{п.з./n} + T_{шт} = 21/157 + 4,37 = 4,5 \text{ хв.}$$

Для решти операцій техпроцесу норми технічного часу розраховуємо аналогічним чином. Результати заносимо до таблицю А.14 у додатку А.

## 2.10 Розроблення керуючої програми оброблення деталі у CAM ESPRIT для токарного верстата з ЧПК HAAS ST20

Розроблення програми оброблення у CAM-системах є важливим етапом підготовки виробництва, що забезпечує ефективність та точність виготовлення деталей. У даній роботі розглянуто розробку програми для оброблення деталі «Шпиндель GDZ-301M» зі сталі 40X у CAM ESPRIT для токарного верстата HAAS ST20.

### Етапи розроблення програми у CAM ESPRIT

#### 1. Імпорт креслення або 3D-моделі деталі:

Завантаження 3D-моделі шпинделя у CAM ESPRIT. Встановлення координатної системи та базової точки для обробки.

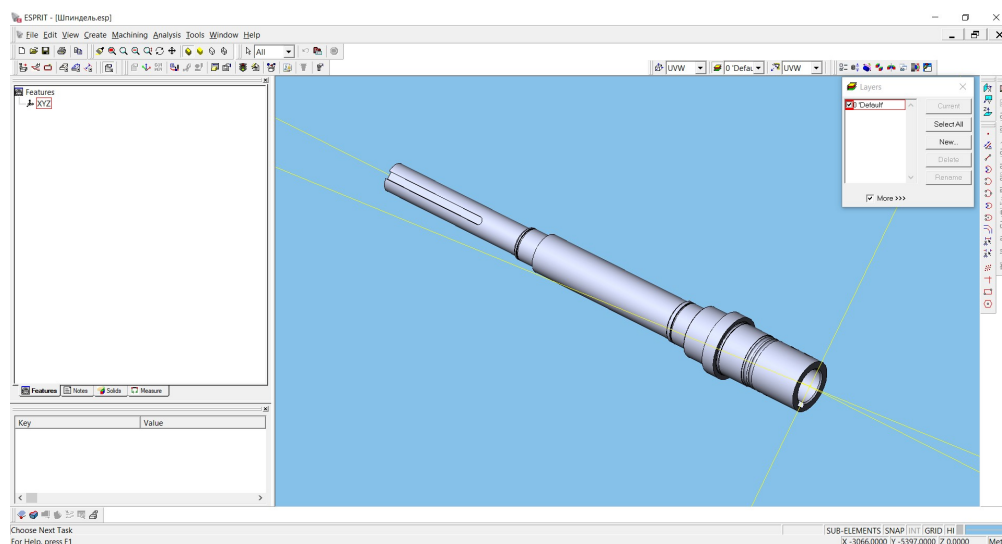


Рисунок 2.7 - Завантаження 3D-моделі шпинделя у CAM ESPRIT

#### 2 Визначення стратегії оброблення:

Чорнова обробка: зняття основного об'єму матеріалу для формування базової форми.

Чистова обробка: доведення поверхонь до заданих розмірів і забезпечення високої якості.

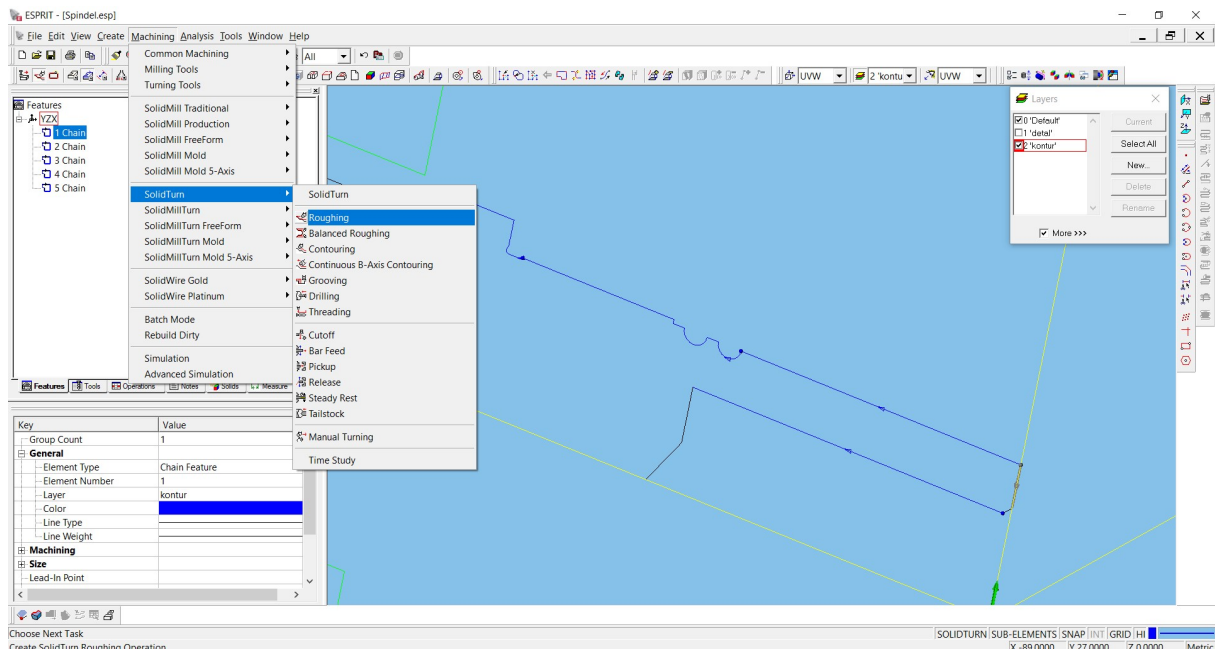


Рисунок 2.8 - Чорнова обробка

Вибір режимів різання:

Швидкість різання: 180–250 м/хв (рекомендовано для сталі 40Х).

Подача: 0,2–0,4 мм/об.

Глибина різання: 2–3 мм для чорнової та 0,5–1 мм для чистової обробки.

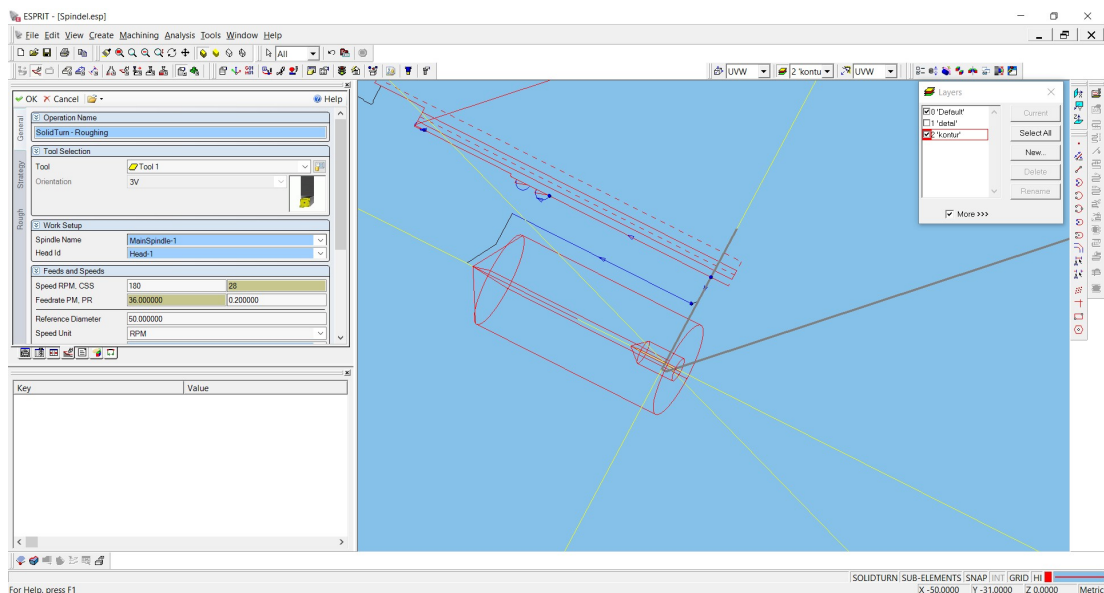


Рисунок 2.9 - Вибір режимів різання

Створення траєкторій інструменту:  
Налаштування траєкторій з урахуванням геометрії деталі та доступного інструменту.

Оптимізація рухів для мінімізації часу обробки.

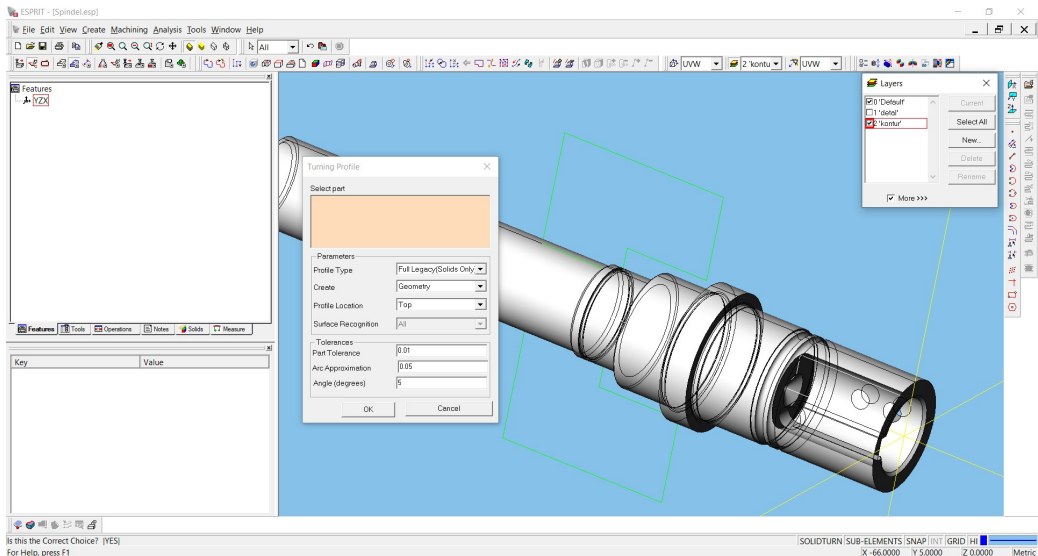


Рисунок 2.10 – Створення траєкторій інструменту

Симуляція процесу оброблення:  
Проведення віртуальної симуляції для перевірки траєкторій, уникнення колізій та перевірки якості обробки.

Аналіз напружень у зоні різання та можливих температурних піків.

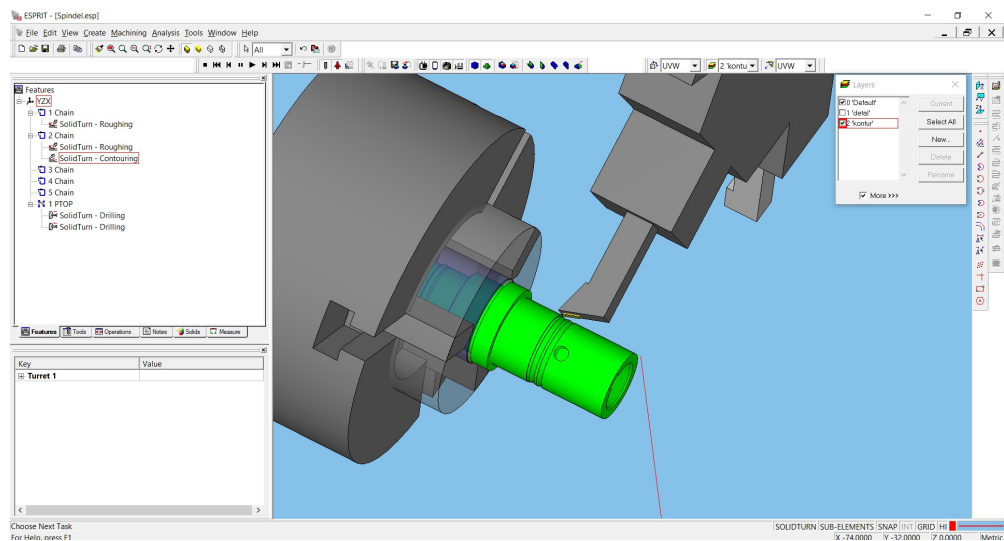


Рисунок 2.10 – Симуляція процесу оброблення

### 3. Генерація G-коду

Генерація G-коду, оптимізованого для ЧПК HAAS ST20:

G21 ; Метрична система вимірювань

G50 S2000; Обмеження швидкості обертання

G96 S180 M03; Постійна швидкість різання

G01 X50 Z-10 F0.3; Лінійна подача

...

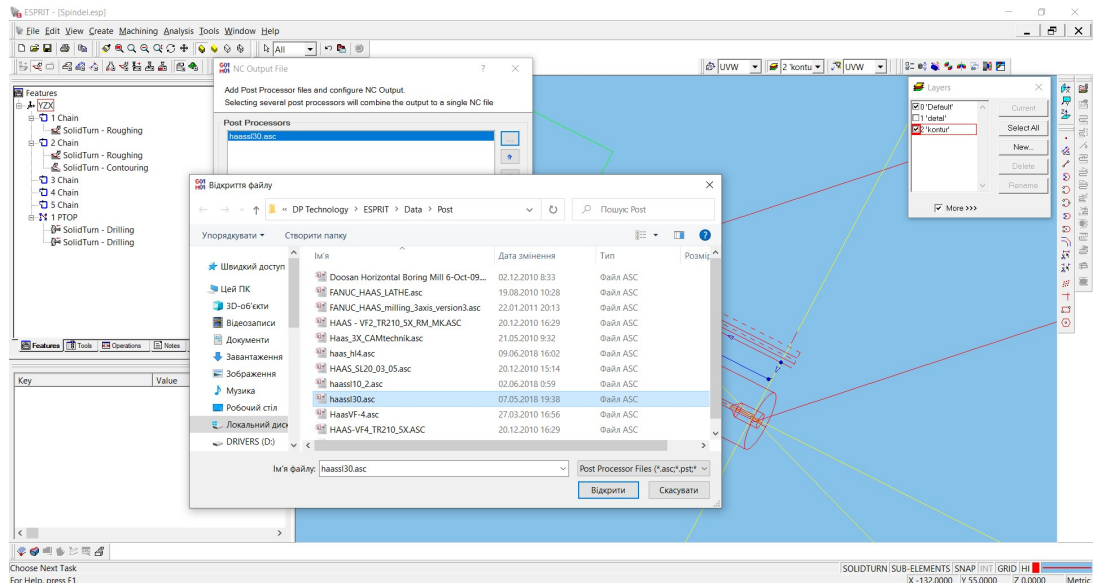


Рисунок 2.11 – Генерація G-коду

Додано команди для включення охолодження, зміни інструментів і завершення програми.

### 4. Впровадження програми на верстаті

Передача програми:

Використання USB-накопичувача або мережевого підключення для завантаження G-коду на верстат.

Тестове виконання:

Проведення тестової обробки для перевірки відповідності програми геометрії деталі.

Фінальна обробка:



## 3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Тиски самоцентруючі призматичні

#### 3.1.1 Призначення та опис роботи пристосування

Тиски самоцентруючі призматичні з пневматичним приводом призначені для закріплення деталей типу “Вал” і правильного автоматичного центрування при механічній обробці на фрезерних, свердлильних та інших верстатах.

Корпусні деталі лещат виготовляються із чавуну. Губки виготовляються сталевими. Установка лещат на столі верстата здійснюється за допомогою шпонок, кріплення – за допомогою болтів. Силовий механізм є пневмоприводом двосторонньої дії.

Оброблювана деталь вставляється в лещата між двома призматичними губками 10. Потім обертанням рукоятки 2 проти годинникової стрілки підводимо і злегка затискаємо деталь. Через ніпель подається потік повітря, який чинить тиск на поршень. Поршень починає рухатися і надає руху ходовий гвинт і з ним разом праву губку, забезпечуючи необхідне зусилля затиску.

#### 2.1.2 Розрахунок пристосування на точність

При розрахунку пристроїв на точність сумарна похибка  $\sum \varepsilon$  при обробці деталі не повинна перевищувати величину допуску  $T$  розміру  $\sum \varepsilon < T$ .

Для розрахунку точності пристосування скористаємося такою формулою [6]

$$\varepsilon_{PP} \leq T - k_T \sqrt{(k_{T1} \varepsilon_B)^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_V^2 + \varepsilon_I^2 + \varepsilon_{PI}^2 + (k_{T2} \omega)^2}, \quad (3.1)$$

де  $T$  – допуск виконуваного розміру, мм;

$\varepsilon_A$  – похибка базування;

$\varepsilon_3$  – похибка закріплення;

$\varepsilon_V$  – похибка установки пристосування на верстаті;

$\varepsilon_I$  – похибка через зношування настановних елементів пристосування;

$\varepsilon_{III}$  – похибка від перекосу інструменту;  
 $\omega$  – економічна точність обробки;  
 $k_T$  – коефіцієнт, що враховує відхилення розсіювання значень складових величин від закону нормального розподілу;

$k_{T1}$  – коефіцієнт, що враховує зменшення граничного значення похибки базування при обробці на налаштованих верстатах;

$k_{T2}$  – коефіцієнт, що враховує частку похибки обробки сумарної похибки, викликані чинниками, незалежними від пристосування.

У даному пристрої при фрезеруванні паза 6D10 необхідно забезпечити допуск симетричності паза щодо поверхні “А” не більше 0,05.

Похибка базування  $\varepsilon_B = 0$ , так як заготівля базується в самоцентруючому пристрої.

Похибка закріплення  $\varepsilon_3 = 0,075$  [6].

Похибка установки  $\varepsilon_Y = 0,06$  [6].

Похибка від перекосу інструменту  $\varepsilon_{III} = 0$ , тому що відсутні напрямні елементи інструменту.

Похибка через зношування настановних елементів пристосування  $\varepsilon_s = 0,015$  [6].

Економічна точність обробки  $\omega = 0,036$  – фрезерування за 10 квалітетом.

Значення коефіцієнтів:  $k_T = 1,2$ ;  $k_{T1} = 0,8$ ;  $k_{T2} = 0,6$  [6].

Допустима похибка виготовлення пристосування

$$\begin{aligned} \varepsilon_{IP} &\leq T - k_T \cdot \sqrt{(k_{T1}\varepsilon_B)^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_Y^2 + \varepsilon_I^2 + \varepsilon_{III}^2 + (k_{T2}\omega)^2} = 0,05 - 1,2 \times \\ &\times \sqrt{(0,8 \cdot 0)^2 + 0,075^2 + 0,06^2 + 0,015^2 + 0 + (0,6 \cdot 0,036)^2} = \\ &= 0,05 - 0,12 = 0,07 \text{ мм.} \end{aligned}$$

### 3.1.3 Розрахунок необхідного зусилля затискача

Розрахункова схема пристосування показано рис. 3.1.

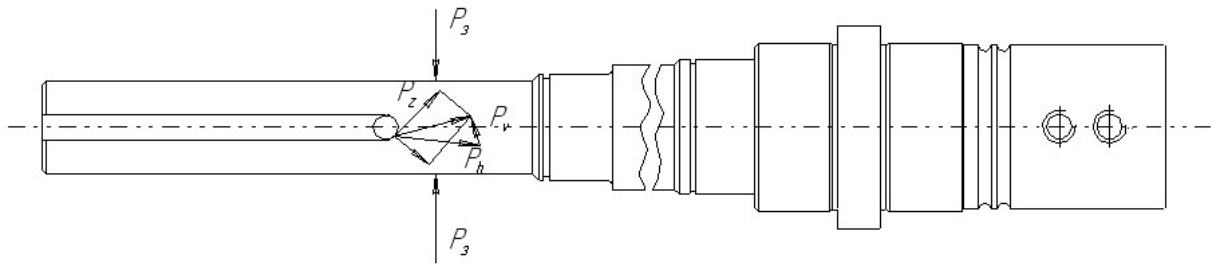


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема пристосування

Оброблювана деталь знаходиться в рівновазі внаслідок дії сил, що виникають у процесі обробки, так і затиску і реакції опор. Основними силами процесу обробки є сили різання. При розрахунку сил затиску рідко враховуються сили ваги, відцентрові та інерційні, що виникають за певних умов обробки. При обробці складова ріжучої сили  $P_v$  спрямована назустріч затискач силі  $P_z$ , а складова  $P_h$  прагне зрушити заготівлю в горизонтальному напрямку, цьому протидіють сили тертя в точках затиску.

Величина сил затиску розраховується виходячи з умови рівноваги всіх перерахованих сил при повному збереженні контакту базових поверхонь оброблюваної деталі з настановними елементами пристосування та при виключенні можливості зсуву в процесі обробки. При розрахунках слід враховувати коефіцієнт запасу  $K$ , який визначається за формулою [7]

$$K = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6, \quad (3.2)$$

де  $K_0 = 1,5$  – коефіцієнт гарантованого запасу [7];

$K_1 = 1,2$  – коефіцієнт, що враховує збільшення сил різання через випадкові нерівності;

$K_2 = 1,3$  – коефіцієнт, що враховує затуплення ріжучого інструмента;

$K_3 = 1$  – коефіцієнт, що враховує переривчастість різання;

$K_4 = 1$  – коефіцієнт, що враховує сталість сил затиску;

$K_5 = 1$  – коефіцієнт, що враховує ергономічність механізму;

$K_6 = 1$  – коефіцієнт, що враховує вид опор пристосування.

$$K = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 1,3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 2,34.$$

У загальному вигляді сила затиску визначається як [8]

$$W = \frac{K \cdot P_v - f_1 \cdot Ph}{f_1 + f_2} \text{ Н}, \quad (3.3)$$

Складові сил різання  $P_v$  та  $Ph$  визначаємо з розрахунків сил різання:

$$P_v = 520 \text{ Н}, \quad Ph = 1338 \text{ Н}.$$

$f_1 = f_2 = 0,2$  – коефіцієнти тертя у затискній та опорній площинах.

$$W = \frac{2,34 \cdot 520 - 0,2 \cdot 1338}{0,2 + 0,2} = 2373 \text{ Н}.$$

Зусилля, що розвивається пневмоприводом, визначається за такою формулою:

$$Q = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) p \eta, \quad (3.4)$$

де  $D$  – діаметр поршня, ( $D = 100$  мм);  $d$  – діаметр штока, ( $d = 30$  мм);  $p$  – тиск стисненого повітря, МПа, ( $p = 0,6$  МПа);  $\eta = 0,85$  – ККД.

Підставляючи числові значення, розраховуємо необхідне зусилля затиску:

$$Q = \frac{\pi}{4} (100^2 - 30^2) \cdot 0,6 \cdot 0,85 = 3642 \text{ Н}.$$

Так як  $Q > W$ , отже це зусилля притиску повністю забезпечує статичне положення деталі в пристосуванні.

### 3.1.4 Розрахунок елементів пристосування на міцність

Зробимо розрахунок різьблення на штоку за формулою [7]

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot \alpha \cdot Q}{\pi \cdot [\sigma_p]}} \text{ мм,} \quad (3.5)$$

де  $d_1$  – внутрішній діаметр різьблення на штоку;

$\alpha$  – коефіцієнт затяжки ( $\alpha = 2,25$ );

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,25 \cdot 3643}{3,14 \cdot 60}} = 13,2 \text{ мм.}$$

У пристосуванні на штоку використовується болт М20, отже міцність забезпечена.

Зробимо розрахунок болтів кріплення кришки циліндра за формулою [7]

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot \alpha \cdot Q}{z \cdot \pi \cdot [\sigma_p]}} \text{ ,} \quad (3.6)$$

де  $d_2$  – внутрішній діаметр різьблення болтів;

$z$  – число болтів ( $z = 6$ ).

У пристосуванні для кріплення кришок використовуються болти М8, отже міцність забезпечена.

## 2.2 Пристосування установче універсальне

### 2.2.1 Призначення та опис роботи пристосування

Даний контрольний пристрій є універсальним і призначений для комплексної перевірки тіл обертання на биття. Похибки виміру допускаються в межах 8 ... 30 % поля допуску на контрольований розмір.

Пристосування складається з нерухомої основи 1 на якому встановлені призми 4 і 9. Деталь встановлюється на призмі 4, потім за допомогою обертання рукоятки 23 до деталі підводиться призма 9. До поверхні деталі

підводиться штатив з індикатором, деталь повертається і вимірюється вимір биття поверхні.

### 3.2.2 Розрахунок пристосування на точність

Розрахунок контрольного пристрою на точність зводиться до визначення паралельності наконечника індикатора та площини основи індикаторної стійки.

Відхилення від паралельності осі та поверхні індикаторної стійки визначимо за формулою:

$$\delta = \sqrt{\delta_B^2 + \delta_3^2 + \delta_{IP}^2}, \quad (3.7)$$

де  $\delta_B = 0,0015$  – похибка базування;

$\delta_3 = 0,001$  – похибка закріплення;

$\delta_{IP} = 0,002$  – регламентована похибка виготовлення пристосування з урахуванням зносу робочих поверхонь опор та вимірювального устрою.

$$\delta = \sqrt{0,0015^2 + 0,001^2 + 0,002^2} = 0,0027 \text{ мм.}$$

Похибка вимірювання допускається в межах 8 ... 30 % поля допуску на контрольований об'єкт. У нашому випадку допуск биття  $\delta_{\text{потріб}} = 0,01$  мм.

Таким чином, аналіз пристосування контролю допуску на точність показує відповідність похибки вимогам, так як  $\delta = 0,0027$  мм, що становить 27 % поля допуску на контрольований параметр.

## 4 НАУКОВО–ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

### 4.1 Дослідження напруженого стану та структурних змін у поверхневому шарі захисних покриттів у процесі МЕШ

Механічна ерозія шляхом шліфування (МЕШ) є технологічним процесом, що широко застосовується для покращення властивостей поверхневого шару матеріалів, зокрема захисних покриттів. У ході процесу МЕШ відбувається суттєве навантаження на поверхневий шар, що спричиняє напружений стан та структурні зміни в матеріалі. Метою даного дослідження є аналіз впливу МЕШ на напружений стан і структуру поверхневого шару захисних покриттів.

Накладення магнітного поля на зону обробки супроводжується цілим рядом змін, що відбуваються як у структурі матеріалу, що обробляється, так і в перерозподілі енергій, що впливають на матеріал і його структуру. Значні зміни відбуваються при комбінованому впливі енергій електричних та магнітних полів спільно з абразивним шліфуванням, яке можна вважати поєднанням різання з пластичним та пружним деформуванням. Така обробка найбільш прийнятна для сталей та сплавів, що мають підвищену зносостійкість, та в'язких матеріалів, обробка яких, особливо на фінішних операціях, викликає труднощі. До таких матеріалів відносяться захисні газотермічні покриття.

На зміну мікроструктури обробленої поверхні впливають параметри режимів обробки МЕШ: спільне механічне різання зернами шліфувального кола, розрядів технологічного струму і вплив зовнішнього магнітного поля. Дія абразивних зерен інструмента обумовлює рельєф поверхні, типовий шліфування. Безпосередній вплив електричних розрядів формує на поверхні сліди як ерозійних лунок і канавок. Під дією сил магнітного поля на розплав тонкого поверхневого шару відбувається його викид із зони шліфування або розтікання по обробленій поверхні.

У процесі обробки з накладенням магнітного поля може відбуватися утворення дрібнодисперсних фаз поверхневих шарів деталі. Тому в результаті раціонального використання цих перетворень можна підвищити фізико–

механічні властивості матеріалу поверхні оброблюваних деталей, що особливо працюють на зносостійкість.

Важливою проблемою є подальше вивчення впливу магнітних та електричних полів на оброблювану поверхню, мікроструктуру та фізико-механічні властивості поверхневого шару матеріалів та створення на цій базі нових комбінованих способів обробки, що підвищують продуктивність та якість.

Обробка дослідних зразків із нанесеними на них газотермічними покриттями проводилася на модернізованому універсально-заточному верстаті 3E642E.

Як інструмент застосовувалося абразивне струмопровідне коло марки ПП250×25×32–5C25CT6КАЛ. Параметри мікроструктури визначали за фотографіями, отриманими на мікроскопі Stemi–2000C і інвертованому металографічному мікроскопі МЕТАМ ЛВ–32(Ю–33.25.416). Зразками служили прямокутні заготовки, зміцнені газополум'яним напиленням порошком марки ПГ–СР4 і ПГ–СР2, оплавлені ацетиленовим пальником і без оплавлення.

Обробку поверхонь зразків проводили відповідно до схеми, представленої на рис. 4.4.

Режими МЕШ, у яких проводилася обробка, представлені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Режимы МЕШ

$n, \text{хв}^{-1}$	$S, \text{м/хв}$	$I, \text{А}$	$t, \text{мм}$	$B, \text{Тл}$
2000	0,12	5	0,005	0,01
3000	1,4	10	0,025	0,15
4000	2,8	15	0,05	0,2

Закономірності формування поверхневого шару покриттів при МЕШ визначається дією технологічних режимів, а саме технологічного струму –  $I$ , магнітною індукцією –  $B$ , частотою обертання струмопровідного кола –  $n$ , глибиною шліфування –  $t$ , поздовжньою подачею –  $S$ .

При МЕШ газотермічних захисних покриттів поверхневий шар піддається значним температурним впливам, які впливають на структурний та фазовий склад покриття та основного металу. Дослідженнями встановлено, що домінуючий вплив на теплоутворення у зоні обробки надає технологічний струм.

Досліджувався вплив різних технологічних режимів МЕШ на зміну мікроструктури газотермічного захисного покриття ПГ–СР 4.

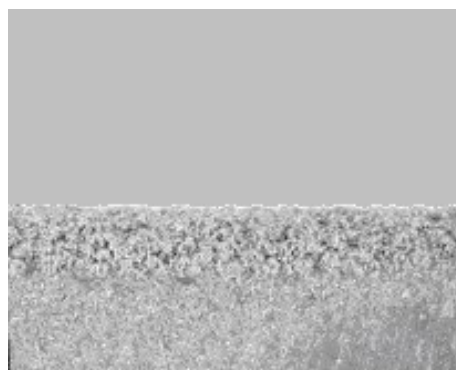
На рис. 4.1 показано поверхню після обробки МЕШ на чорнових режимах ( $I = 15 \text{ А}$ ,  $B = 0,2 \text{ Тл}$ ,  $S = 0,12 \text{ м/хв}$ ,  $t = 0,05 \text{ мм}$ ,  $n = 2000 \text{ хв}^{-1}$ ).

На поверхні покриття чітко видно оплавлені ділянки, які є результатом теплового впливу технологічного струму  $I$ .

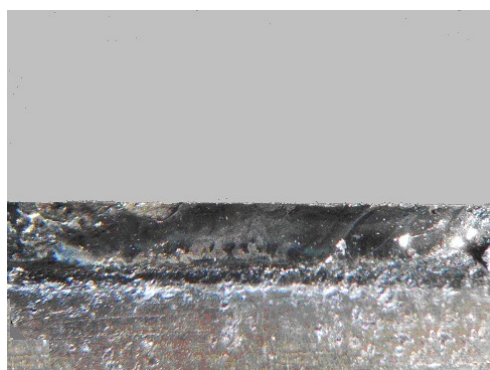
На рис. 4.2 показано мікроструктуру поверхні газотермічного захисного покриття ПГ–СР 2.



Рисунок 4.1 – Поверхня газотермічного захисного покриття після чорнової обробки МЕШ ( $\times 60$ )



*a)*



*б)*

Рисунок 4.2 – Мікроструктура газотермічного захисного покриття ПГ–СР2 до обробки (*a*) та після обробки (*б*) МЕШ ( $\times 60$ )

На фотографії мікроструктури газотермічного захисного покриття ПГ–СР2 до обробки видно, що покриття має поверхневу пористість.

При магнітно–електричному шліфуванні відбувається оплавлення поверхневого шару захисного газотермічного покриття, мікрочастинки порошку сплавляються між собою, утворюючи однорідну оболонку на поверхні зразка. Поверхнева пористість у своїй зменшується.

В результаті МЕШ технологічні режими впливають на формування мікроструктури трьох зон зразка: перша зона являє собою матеріал самого покриття, друга зона – основний матеріал зразка, третя зона – проміжна, розташована між першою та другою зоною (рис. 4.3).

Перша зона зазнає значних температурних впливів. Тепловий потік, що виникає від дії технологічного струму і механічної енергії обертового струмопровідного абразивного кола, поширюється до центру зразка в зону 2. Різні коефіцієнти теплопровідності основного матеріалу зразка та матеріалу покриття впливають на процес охолодження. Внаслідок чого виникає зміна мікроструктури газотермічного захисного покриття.

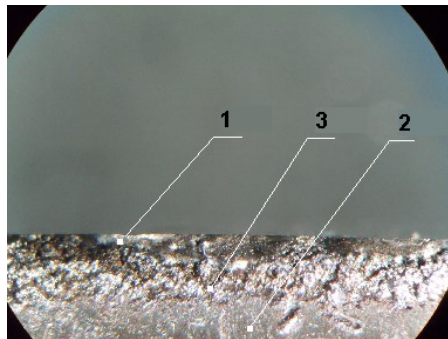


Рисунок 4.3 – Зони впливу технологічних режимів МЕШ ( $\times 60$ )

На рис. 4.4 показана поверхня покриття ПГ–СР4 оброблена МЕШ при наступних режимах ( $I = 20$  А,  $B = 0,15$  Тл,  $S = 0,12$  м/хв,  $t = 0,025$  мм,  $n = 4000$  хв<sup>-1</sup>). Шорсткість поверхні знаходиться в межах  $Ra = 0,44 \dots 0,57$  мкм. На поверхні покриття явно видно мікротріщини та електроерозійні лунки, що

утворилися за рахунок дії технологічного струму і сил різання при МЕШ. Мікротріщини на поверхні покриття є негативним явищем, тому потрібне вивчення та оптимізація технологічних режимів МЕШ.

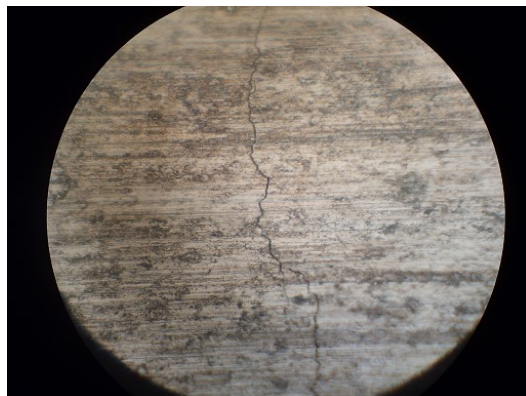
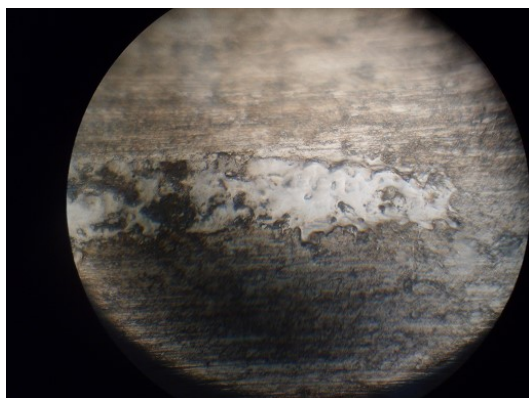
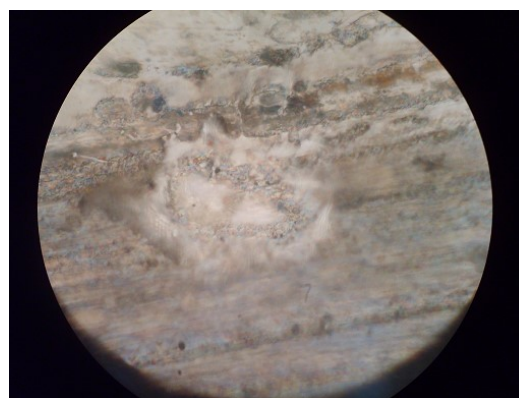


Рисунок 4.4 – Мікротріщина на поверхні покриття ПГ–СР4 після обробки МЕШ ( $\times 1000$ )

Електроерозійні лунки різної форми показані рис. 4.5.



а)



б)

Рисунок 4.5 – Електроерозійні лунки на поверхні покриття ПГ–СР4 після МІШ ( $\times 1000$ )

Електроерозійні лунки на поверхні покриття утворюються в процесі МЕШ за рахунок дії технологічного струму та магнітної індукції. У процесі різання мікростружка, що утворилася, замикає ланцюг “електрод–інструмент –

поверхня покриття”, в результаті утворюється контактний місток, який під дією технологічного струму розігрівається, відбувається мікророзряд і на поверхні утворюється електроерозійна лунка, (рис. 4.5 (б)). На розміри та форму лунки впливають магнітна індукція, частота обертання струмопровідного абразивного кола, глибина різання та поздовжня подача.

При впливі магнітної індукції на контактний місток відбувається його зміщення у напрямі дії електромагнітної сили. Внаслідок цього утворюється поперечний слід, показаний рис. 4.5(а). Аналогічний слід утворюється у напрямі обертання струмопровідного абразивного кола.

В процесі МЕШ при великих величинах технологічного струму на поверхні покриття утворюється оксидна плівка (рис. 4.6). Хімічний склад плівки потребує подальших досліджень.

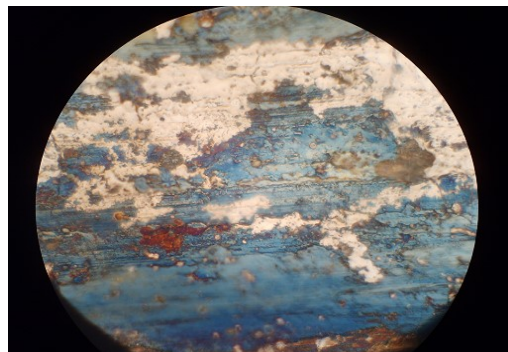


Рисунок 4.6 – Оксидна плівка на поверхні покриття після МЕШ ( $\times 500$ )

#### 4.2 Сучасні досягнення у сфері гібридних абразивних процесів обробки

Динамічний розвиток гібридних абразивних процесів обробки зумовлений впровадженням нових важкооброблюваних матеріалів та необхідністю вдосконалення технологічних параметрів існуючих виробничих процесів. Ця тенденція особливо помітна у методах абразивної обробки, які часто підтримуються ультразвуковими вібраціями, електрохімічним розчиненням або електричними розрядами.

Гібридні процеси електроіскрово-абразивної обробки

Гібридні процеси електроіскрово-абразивної обробки базуються на одночасній та контрольованій взаємодії електричних розрядів (видалення матеріалу шляхом нагрівання, плавлення, випаровування та затвердіння) і механічного впливу абразивних зерен. Механічний вплив може здійснюватися за допомогою зв'язаного абразиву (шліфувальних кругів, брусків, стрічок, щіток з абразивом) або незв'язаного абразиву, змішаного з діелектричною рідиною.

У випадку незв'язаних абразивних зерен вони рухаються разом із діелектричною рідиною і впливають на оброблюваний матеріал. Крім того, якщо абразивне зерно знаходиться в зоні електричного розряду (вибуху), воно отримує додаткову кінетичну енергію, що покращує процес шліфування.

Якщо додатково застосовуються ультразвукові вібрації електродного інструмента, оброблюваної деталі або діелектричної рідини, у зоні обробки можуть виникати явища кавітації після досягнення певного порогу. У зоні кавітації відбувається формування, ріст і вибухове схлопування газових бульбашок. У результаті локально створюється високий тиск ( $\sim 1000$  кг/см<sup>2</sup>), висока температура ( $\sim 5000$  К) та швидкість зміни температури, яка може досягати  $10^7$  К/с.

Іншими словами, кавітація суттєво змінює фізичні умови у зоні обробки, покращуючи ефективність і точність процесу [16].

Незалежно від механічного впливу абразивних зерен на оброблюваний матеріал, у зоні обробки під час електророзрядних явищ спостерігаються такі процеси, як нагрівання, плавлення, випаровування та затвердіння матеріалу. Нагрітий матеріал стає більш схильним до деформацій під дією ударів абразивних зерен, а розплавлений матеріал ефективніше видаляється (виштовхується) з ерозійних кратерів потоком діелектричної рідини, особливо за умов появи кавітації (кавітаційна ерозія) [17, 18].

Проте в процесі електроіскрової обробки у суміші діелектричної рідини та абразивних зерен внесок механічного впливу абразивних зерен є невеликим через їхню низьку кінетичну енергію (зерна дуже легкі), що утворюється в

результаті руху діелектричної рідини або виникнення кавітаційних явищ. У таких умовах їхній вплив на зняття припуску зазвичай також є незначним.

Важливим фактором у процесі є вплив порошку (включаючи абразивні зерна) на розподіл електричного поля у міжелектродному проміжку. Цей вплив змінює розподіл енергії розрядів між електродним інструментом та оброблюваною деталлю [16]. Аналіз результатів показує, що більша частина енергії передається оброблюваній деталі, ніж електродному інструменту.

Таким чином, при додаванні порошку до діелектричної рідини товщина міжелектродного проміжку та діаметр кратерів збільшуються, тоді як глибина кратерів зменшується (об'єм залишається незмінним). Це підвищує ефективність обробки, покращує якість поверхні та мінімізує зношування електродного інструменту. Крім того, при використанні відповідного порошку (наприклад, абразивного TiC із твердістю 3200 HV і розміром зерен 10 мкм) він може частково розплавитися і інтегруватися в поверхневий шар оброблюваної деталі (середня температура в зоні розряду може досягати 12 000 K). Така модифікація покращує властивості поверхні, наприклад, підвищує твердість, зменшує білий шар і покращує зносостійкість.

Однак через ці ефекти електроіскрова обробка із застосуванням вільних абразивних зерен рідко використовується на практиці. Введення порошкового матеріалу в діелектричну рідину значно покращує процес обробки, але не за рахунок механічного впливу абразивних зерен.

Процеси, такі як шліфування та електроіскрово-абразивне різання, де механічний вплив абразивних зерен є важливим і практично застосовним, будуть описані нижче.

Схема видалення матеріалу в процесі AEDG із використанням шліфувального круга з алмазами на бронзовій зв'язці

Абразивно-електроіскрове шліфування (AEDG) поєднує електроіскрову обробку (EDM) та абразивне шліфування для досягнення видалення матеріалу. Процес базується на використанні шліфувального круга з алмазами на бронзовій зв'язці, який одночасно виконує функції електрода для

електроіскрового розряду та інструмента для механічного шліфування. Нижче описано механізм видалення матеріалу:

Компоненти процесу

1. Шліфувальний круг із алмазами на бронзовій зв'язці:
  - Круг виготовлений із бронзової матриці з вбудованими алмазними частинками.
  - Використовується як абразивний інструмент та електрод для генерації електроіскрових розрядів.
2. Електроіскровий розряд:
  - Високоінтенсивні іскри, які утворюються між кругом і заготовкою, викликають локальне нагрівання, плавлення, випаровування та повторне затвердіння матеріалу.
  - Розряди відбуваються у діелектричній рідині, яка охолоджує систему і видаляє відходи.
3. Механічне шліфування:
  - Алмазні частинки забезпечують механічне видалення матеріалу, сприяючи усуненню розплавленого та розм'якшеного шару на поверхні заготовки.
4. Діелектрична рідина:
  - Сприяє генерації електричних розрядів.
  - Видаляє ерозійні залишки та забезпечує охолодження системи.

Механізм видалення матеріалу

1. Термічна ерозія:
  - Електроіскрові розряди генерують інтенсивне локальне нагрівання (до 12 000 К), яке викликає плавлення та випаровування матеріалу заготовки.
  - Після цього утворюються переплавлені шари, які затвердівають на поверхні.
2. Механічне шліфування:
  - Алмазні частинки знімають розм'якшений матеріал, видаляючи переплавлені шари та ерозійні кратери.

- Це забезпечує вищу якість поверхні порівняно зі звичайними EDM-процесами.

### 3. Поєднання ефектів:

- Комбінація термічних та механічних дій дозволяє ефективно видаляти матеріал.
- Зменшується зношування інструмента порівняно зі звичайним шліфуванням через зменшення контактних сил.

### 4. Кавітаційні ефекти (опціонально):

- При застосуванні ультразвукових вібрацій до діелектричної рідини або електрода кавітаційні явища можуть посилювати видалення матеріалу завдяки інтенсивним ударним силам.

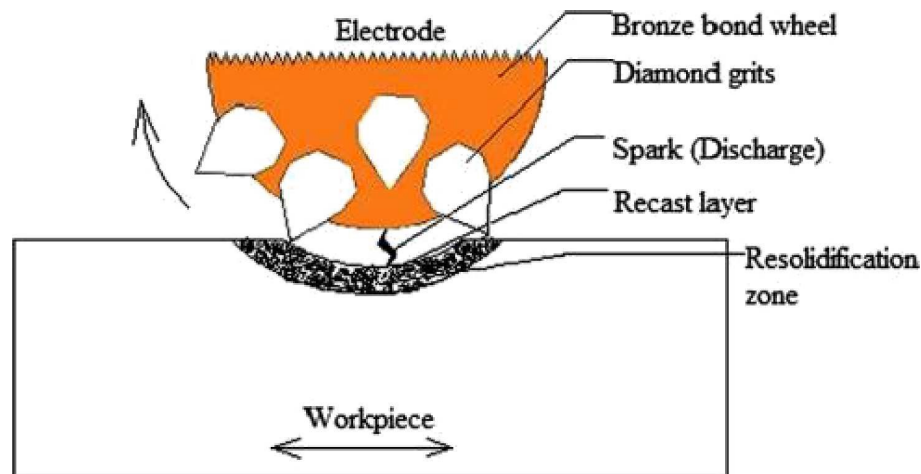
### Переваги AEDG із бронзовим кругом з алмазами

- Вищі швидкості зняття матеріалу порівняно з EDM чи шліфуванням окремо.
- Покращення якості поверхні завдяки механічному поліруванню алмазними частинками.
- Подовження терміну служби інструмента завдяки зменшенню термічних та механічних навантажень.
- Можливість обробки твердих і крихких матеріалів, таких як суперсплави, кераміка та композити.

Цей гібридний процес є надзвичайно ефективним для прецизійної обробки важкооброблюваних матеріалів, таких як компоненти для авіакосмічної галузі, медичні імпланти та високопродуктивні інструменти.

Механізм видалення матеріалу в процесі AEDG є складним через взаємозалежність механічної та термічної енергії, що призводить до зняття припуску [16-17]. У випадку шліфування шліфувальний круг із металевою матрицею підключається до катода імпульсного генератора (Рис. 4.7). Завдяки новим практичним застосуванням цього процесу проводяться дослідження, спрямовані на моделювання та оптимізацію.

Було розроблено математичну модель. Вона побудована на основних принципах видалення припуску за допомогою електроіскрової обробки (EDM) та традиційного шліфування. Доведено, що домінуючу роль у видаленні припуску відіграє енергія електроіскрового розряду. Результати розрахунків за цією моделлю не відрізняються від емпіричних даних більш ніж на 2,75%. З результатів проведених досліджень можна зробити висновок, що абразивні зерна видаляють з оброблюваної деталі шар переплавленого матеріалу [17] (Рис. 4.7).



- Electrode → Електрод
- Bronze bond wheel → Бронзове зв'язувальне колесо
- Diamond grits → Алмазні зерна
- Spark (Discharge) → Іскра (Розряд)
- Recast layer → Переплавлений шар
- Resolidification zone → Зона повторного затвердіння
- Workpiece → Заготовка

Рисунок 4.7 – Схема видалення матеріалу в процесі AEDG із використанням шліфувального круга з алмазами на бронзовій зв'язці

Поверхні оброблених зразків були досліджені за допомогою скануючого електронного мікроскопа зі збільшенням 1000х. Отримані фотографії дозволили визначити ступінь видалення переплавленого шару. Було виділено три випадки (Рис. 4.8):

- А – глибина шліфування більша за товщину переплавленого шару,
- В – глибина шліфування дорівнює товщині переплавленого шару,

С – глибина шліфування менша за товщину переплавленого шару.

Практичне значення мають лише випадки А і В. У випадку С переплавлений шар залишається на поверхні. Цей шар зазвичай не є зносостійким, що знижує якість поверхневого шару.

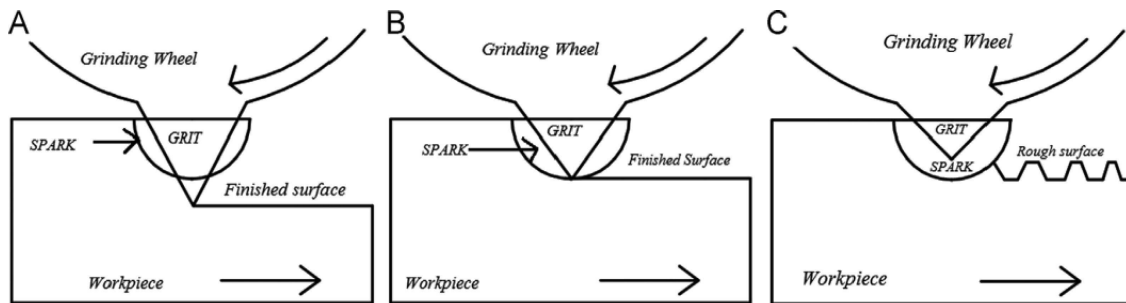


Рисунок 4.7 – Схема шліфувального процесу: (А) Глибина різання більша за радіус кратера, (В) Глибина різання дорівнює радіусу кратера, (С) Глибина різання менша за радіус кратера.

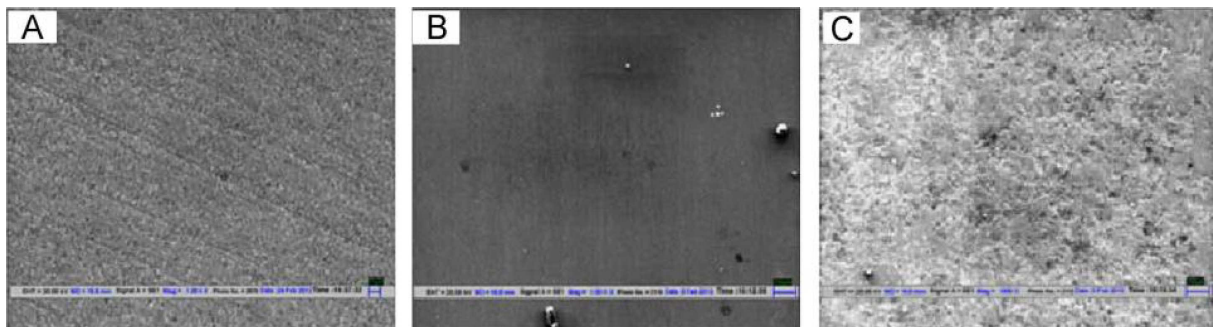


Рисунок 4.8 – SEM-фотографія поверхні після AEDG:

- А – поверхня, коли глибина шліфування була більшою за товщину переплавленого шару ( $V_w = 4,9-8,8$  мг/хв,  $v_p = 0,45-0,75$  м/хв,  $V_n = 1,57-3,14$  м/хв,  $I = 3-6$  А,  $D = 0,40-0,72$ ,  $t_{on} = 100-300$  мкс).
- В – поверхня, коли глибина шліфування дорівнювала товщині переплавленого шару ( $V_w = 8,1-9,5$  мг/хв,  $v_p = 0,45-0,90$  м/хв,  $V_n = 0,79-3,93$  м/хв,  $I = 4-5$  А,  $D = 0,40-0,56$ ,  $t_{on} = 300-400$  мкс).
- С – поверхня, коли глибина шліфування була меншою за товщину переплавленого шару ( $V_w = 6,9-14,1$  мг/хв,  $v_p = 0,45-0,7$  м/хв,  $V_n = 1,57-3,14$  м/хв,  $I = 4-6$  А,  $D = 0,40-0,77$ ,  $t_{on} = 300-400$  мкс).

Незважаючи на великий потенціал, електроерозійна обробка дротом (WEDM) не широко застосовується для обробки авіаційних деталей з високою швидкістю обертання. Причиною є знижена втомна міцність поверхневого шару через утворення переплавленого шару. Для покращення властивостей поверхневого шару було запропоновано використовувати WEDM із дротом на основі алмазно-металевого покриття [17]. Такий дріт зазвичай використовується для прецизійного різання напівпровідників і має діаметр 180 мкм (сталевий сердечник із алмазними зернами розміром 50 мкм на нікелевій зв'язці).

Дослідження проводилися для сталі SAE 1018 і нікелевих сплавів (Nickel 600) з метою перевірки наявності переплавленого шару, який є неприпустимим для рухомих частин в авіаційній промисловості. У випадку WEDM був присутній переплавлений шар товщиною 5 мкм. При використанні тих самих параметрів в AWEDM переплавлений шар був відсутній.

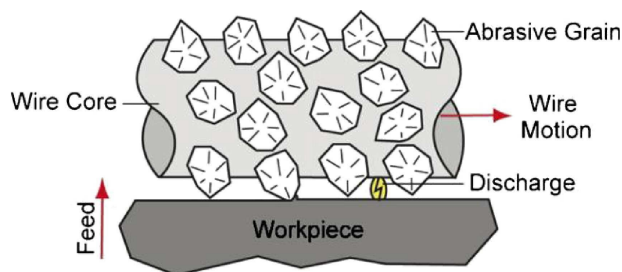


Рисунок 4.9 – Схема зони обробки в AWEDM (Абразивно-дротяна електроіскрова обробка)

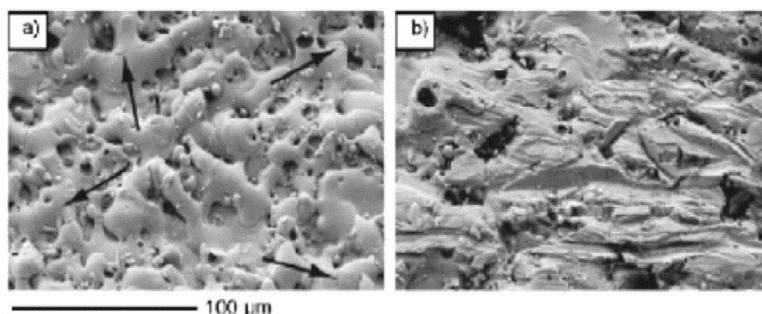


Рисунок 4.10 – Фотографії поверхні сталі SAE 1018 після обробки:  
**а)** після WEDM (електроіскрова обробка дротом). **б)** після AWEDM (абразивно-дротяна електроіскрова обробка).

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 5.1 Принципи державної політики у сфері охорони праці

Одним із ключових завдань держави є забезпечення життя та здоров'я громадян у процесі їхньої трудової діяльності шляхом створення безпечних і комфортних умов праці.

Охорона праці виступає важливим суспільним фактором, оскільки навіть значні досягнення у трудовій сфері не можуть компенсувати втрату здоров'я або життя працівника. Людське життя та здоров'я є унікальними і незамінними, тому їх збереження має бути пріоритетом для всіх. Важливо пам'ятати, що нещасні випадки та аварії на підприємствах призводять не лише до втрати робочих кадрів, підготовка яких потребувала значних ресурсів, але й позбавляють сім'ї їхніх годувальників, завдаючи непоправної шкоди як суспільству, так і окремим родинам.

Охорона праці має також важливий економічний аспект. Вона сприяє зниженню витрат на лікарняні, забезпечує високу продуктивність праці та мінімізує необхідність компенсацій за роботу в шкідливих або небезпечних умовах. Турбота про безпеку працівників є запорукою стабільності підприємств, підвищення їхньої ефективності та соціальної відповідальності перед суспільством.

Державна політика в сфері охорони праці базується на положеннях Конституції України і має на меті забезпечення належних, безпечних і здорових умов праці, попередження нещасних випадків і професійних захворювань. Гарантоване Конституцією право громадян України на безпечну працю реалізується через систему заходів, яка включає правові, соціально-економічні, організаційно-технічні, санітарно-гігієнічні та лікувально-профілактичні дії, спрямовані на збереження життя, здоров'я та працездатності працівників під час виконання їхніх трудових обов'язків.

Основні принципи державної політики у сфері охорони праці визначаються не лише як конституційні норми, а й як багатокomпонентна

система підходів, спрямованих на формування ефективного середовища захисту працівників. Вони включають створення умов, які мінімізують ризики для життя та здоров'я, та забезпечення дотримання норм законодавства, що регулюють трудову діяльність. Таким чином, охорона праці стає інтегрованою частиною соціально-економічного розвитку країни, сприяючи підвищенню якості трудового середовища та збереженню здоров'я працівників.

Державна політика у сфері охорони праці ґрунтується на ключових принципах, спрямованих на забезпечення безпеки, здоров'я працівників та покращення умов праці:

1. Пріоритет здоров'я та життя працівників  
Забезпечення захисту життя і здоров'я працівників як найвищої цінності. Роботодавці несуть повну відповідальність за створення належних, безпечних і здорових умов праці на всіх етапах виробничої діяльності.

2. Забезпечення промислової безпеки  
Постійний моніторинг і технічний контроль за станом технологій, обладнання, процесів і продукції. Забезпечення підтримки підприємств у розробці і впровадженні сучасних, безпечних та нешкідливих умов праці.

3. Комплексний підхід до охорони праці  
Реалізація заходів у межах загальнодержавних, галузевих і регіональних програм, враховуючи досягнення у сфері науки, техніки, екології, економічної та соціальної політики.

4. Соціальний захист працівників  
Гарантування повного відшкодування шкоди працівникам, які постраждали від нещасних випадків на виробництві чи професійних захворювань. Забезпечення страхового покриття і соціальної підтримки.

5. Уніфіковані вимоги до охорони праці  
Встановлення єдиних стандартів охорони праці, які застосовуються до всіх суб'єктів господарювання незалежно від їхнього виду діяльності, розміру чи форми власності.

6. Адаптація роботи до можливостей працівника  
Пристосування трудових процесів до фізичних, психологічних та індивідуальних можливостей працівників для збереження їхнього здоров'я та продуктивності.

7. Економічне стимулювання охорони праці Використання економічних механізмів управління охороною праці, фінансування державою заходів у цій сфері, залучення добровільних внесків та інших джерел, що не суперечать законодавству.

8. Інформаційна та освітня діяльність Організація систематичного інформування громадян про питання безпеки праці, проведення навчання, підвищення кваліфікації та професійної підготовки працівників з охорони праці.

9. Взаємодія державних і громадських структур Координація діяльності органів державної влади, громадських організацій та установ, що займаються питаннями безпеки праці, гігієни та охорони здоров'я.

10. Міжнародний досвід і співпраця Використання та впровадження найкращих світових практик і стандартів для покращення умов праці, забезпечення безпеки на основі міжнародного співробітництва.

Ці принципи формують основу для ефективного управління охороною праці, знижують ризики на робочих місцях і сприяють розвитку культури безпеки в суспільстві.

## 5.2 Заходи по організації безпечних умов праці на виробництві

Виробниче середовище – це простір, у якому працівник виконує свої професійні обов'язки за певних умов праці, використовуючи інструменти, обладнання, матеріали та створюючи кінцевий продукт.

Виробнича безпека забезпечує захист здоров'я і життя працівників та інших осіб, а також майна підприємства від впливу шкідливих і небезпечних виробничих факторів. Небезпечний виробничий фактор – це фактор, що під час впливу на людину може спричинити раптове погіршення здоров'я, травми або летальний наслідок. Шкідливий виробничий фактор – це фактор, який при тривалому впливі здатний викликати зниження працездатності, розвиток професійних захворювань або інші негативні наслідки для здоров'я працівника і його нащадків.

При збільшенні таких характеристик, як концентрація, рівень чи тривалість дії, шкідливий виробничий фактор може перетворитися на небезпечний.

Згідно з ДСТУ 2293:2014 «Охорона праці. Терміни та визначення основних понять», шкідливі та небезпечні виробничі фактори поділяються за природою впливу на такі групи:

- Фізичні – пов'язані з механічними, температурними, шумовими чи радіаційними впливами;
- Хімічні – включають вплив токсичних речовин, газів, пилу та інших хімічних компонентів;
- Біологічні – фактори, пов'язані з мікроорганізмами, вірусами, рослинами чи тваринами;
- Психофізіологічні – чинники, що впливають на психічний стан та фізичне самопочуття працівників, зокрема стрес, перевтома чи надмірні навантаження.

Ця класифікація дозволяє ідентифікувати та оцінювати фактори ризику для розробки ефективних заходів безпеки праці.

До фізичних небезпечних та шкідливих виробничих факторів належать рухомі механізми та машини, підвищена загазованість і запиленість повітря робочих приміщень, рухомі елементи виробничого обладнання, знижена чи підвищена температура матеріалів, поверхонь устаткування або повітря робочої зони. Серед них також виділяються підвищений рівень іонізуючого випромінювання, вібрації, шуму, ультразвукових та інфразвукових коливань, вплив статичної електрики, електромагнітного випромінювання, інфрачервоної чи ультрафіолетової радіації. Важливими факторами є підвищена чи знижена вологість, барометричний тиск, іонізація та рухомість повітря, небезпечно високі значення напруги в електричному колі, підвищена напруженість магнітного чи електричного полів. Також вплив чинять недостатність природного або штучного освітлення робочої зони, пряме чи відбите випромінювання, що створює засліплюючу дію, або надмірна яскравість світла.

Усі ці фактори можуть мати негативний вплив на працівників і потребують врахування в системах охорони праці [3].

Хімічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори включають хімічні речовини, які за своїм впливом на організм людини поділяються на сенсibiliзуючі, загальнотоксичні, канцерогенні, подразнюючі, мутагенні та такі, що впливають на репродуктивну функцію.

Біологічними небезпечними та шкідливими виробничими факторами є патогенні макроорганізми (тварини і рослини), а також мікроорганізми, такі як віруси, бактерії, мікроскопічні гриби, та продукти їх життєдіяльності.

Психофізіологічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори включають нервово-психічні перевантаження, серед яких розумове перенапруження, монотонність праці, перенапруження органів чуття, емоційні навантаження, а також постійні фізичні статичні й динамічні перевантаження.

Вплив зазначених виробничих факторів може призводити до зниження працездатності, серйозного погіршення стану здоров'я, розвитку професійних захворювань, травм та навіть летальних випадків.

Система охорони праці та техніки безпеки на підприємствах спрямована на мінімізацію та усунення впливу виробничих факторів на працівників. Це досягається шляхом реалізації профілактичних санітарно-гігієнічних і технічних заходів, організації оптимальних умов праці, аналізу причин травматизму та професійних захворювань, а також розробки заходів, що унеможливають їх повторне виникнення.

В сучасних умовах важливу роль відіграє розвиток машинобудівної промисловості України, яка є одним із ключових напрямків виробництва та ремонту як цивільної, так і військової техніки. Створення безпечних і нешкідливих умов праці на цих підприємствах сприяє підвищенню комфорту та продуктивності працівників, а також забезпечує високий економічний ефект від реалізації заходів із підтримання та покращення умов праці.

Всі технологічні процеси в машинобудівній галузі повинні відповідати загальним правилам, які застосовуються до всіх сфер господарства;

міжгалузевим нормативним актам, що регулюють кілька галузей; а також галузевим правилам, які враховують специфіку конкретної галузі виробництва.

Технологічний процес виготовлення будь-якої деталі включає кілька етапів: отримання заготовки, механічну обробку на металорізальних верстатах, контроль якості продукції, транспортування і складування.

Шкідливими виробничими факторами під час роботи в механічних цехах є забруднення повітря робочого приміщення абразивним і металевим пилом, що утворюється в процесі абразивної обробки. Пил піднімається в повітря і може потрапляти до організму людини через дихальні шляхи або стравохід. У зоні обробки відбувається значне виділення тепла, а також можливе відлітання розігрітих частинок металу, що становить небезпеку для органів зору та може спричинити мікроопіки при потраплянні цих частинок на шкіру через їхню високу температуру [1].

Під час транспортування заготовок у зоні механічної обробки можуть виникати травми через неуважність або недбалість персоналу, забруднення навколишнього середовища транспортними засобами, а також використання несправного або застарілого обладнання. Можливе виділення шкідливих речовин, таких як електроліт із негерметичних акумуляторних батарей, або відпрацьовані гази двигунів внутрішнього згорання.

Додатковими небезпечними факторами є використання застарілих редукторів, тросів чи іншого обладнання з простроченим терміном експлуатації. Також існує ризик ураження електричним струмом від електричного обладнання, устаткування та машин. Забезпечення належного технічного стану обладнання та дотримання правил безпеки є важливими заходами для мінімізації цих ризиків.

Використання мастильно-охолоджувальних рідин може спричинити їх розбризкування, що становить загрозу для зору працівників і може викликати подразнення шкіри у тих, хто перебуває поруч. Однак ці рідини також мають позитивний ефект, зменшуючи або повністю усуваючи поширення пилу, оскільки пил стікає разом із рідиною. Це особливо актуально під час

шліфування поверхонь, коли в зоні різання утворюється велика кількість абразивного та металевого пилу, що є значною загрозою.

Зона різання є основною небезпечною ділянкою під час виконання механічних операцій, тому важливо дотримуватись правил експлуатації обладнання. Додаткові ризики створюють рухомі частини верстатів і пристрої, призначені для закріплення деталей або інструментів. Задля забезпечення безпеки необхідно регулярно контролювати технічний стан обладнання та дотримуватись встановлених норм безпечної роботи.

### 5.3 охорона праці при роботі на металорізальних верстатах

Металорізальні верстати, які працюють від електромережі, можуть становити небезпеку ураження електричним струмом для працівників. Щоб уникнути цього, необхідно забезпечити захисне заземлення всіх електричних елементів обладнання або встановити систему автоматичного відключення живлення, яка спрацьовує при появі небезпечної напруги на металевих частинах верстатів.

Дотримання правил безпечного монтажу, експлуатації обладнання та виконання вимог нормативних документів з охорони праці і техніки безпеки є важливим заходом для попередження потенційно небезпечних ситуацій, які можуть впливати на здоров'я і безпеку працівників, а також на стан навколишнього середовища.

#### Загальні вимоги безпеки під час експлуатації металообробних верстатів

Безпечна експлуатація металообробних верстатів регламентується Державним стандартом України EN 13788:2008 «Металообробні верстати. Безпека. Верстати токарні багатошпиндельні автоматичні», а також Правилами охорони праці під час роботи з інструментом, пристроями та абразивним інструментом. Додаткові вимоги безпеки враховуються залежно від конструкційних особливостей верстатів і умов їх експлуатації та зазначаються в нормативно-технічній документації.

Металообробні верстати та усі види верстатних пристроїв (кондуктори, патрони, планшайби, магнітні плити, оправки тощо) повинні відповідати чинним вимогам з охорони праці [4]. Забороняється виконувати роботи на несправних верстатах або верстатах із пошкодженими чи незакріпленими огороженнями.

На місцях підключення переносних електроприймачів до електромережі повинні бути розміщені написи, які вказують напругу мережі та вид струму. Струмопровідні частини обладнання повинні бути ізольовані або огорожені, а металеві частини, що можуть потрапити під напругу через пошкодження ізоляції, мають бути заземлені або занулені. Штепсельні вилки й розетки повинні відповідати параметрам напруги електромережі.

Виробничі приміщення не повинні використовувати рубильники відкритого типу або ті, що мають прорізи у кожухах для ножів чи рукояток.

Під час ремонту обладнання та заміни робочих частин верстати мають бути вимкнені й знеструмлені відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

Стационарні верстати слід встановлювати на міцних фундаментах чи підмурках, вони повинні бути вивірені, надійно закріплені та пофарбовані згідно з ДСТУ ISO 6309:2007 «Протипожежний захист. Знаки безпеки. Форма та колір». Внутрішні поверхні дверцят, що закривають рухомі елементи верстатів, також повинні бути пофарбовані з нанесенням знаків безпеки відповідно до зазначених вимог.

#### 5.4 Розрахунок захисного заземлення для верстата HAAS ST 30

Даний розрахунок виконується для забезпечення безпечної експлуатації верстата HAAS ST 30, відповідно до нормативних вимог.

Крок 1: Розрахунок струму короткого замикання ( $I_{кз}$ )

Формула: 
$$I_{кз} = U_x / R_x$$

Де:  $U_x$  – фазна напруга, 230 В;

$R_x$  – опір заземлення, приймаємо 4 Ом.

Розрахунок:  $I_{kx} = 230 / 4 = 57.5$  А

Крок 2: Перевірка перетину заземлювального провідника

Згідно з нормативними документами, для струму 57.5 А мідний провідник повинен мати перетин не менше 16 мм<sup>2</sup>.

Крок 3: Розрахунок заземлювального пристрою

Типовий пристрій заземлення включає вертикальні електроди, з'єднані горизонтальними смугами.

Формула:  $R_x = \rho / L_{ex} + 1 / n$

Де:

$\rho$  – питомий опір ґрунту (наприклад, для глини – 100 Ом·м);

$L_{ex}$  – ефективна довжина електродів;

$n$  – кількість електродів.

Припустимо, використовуються три електроди довжиною 3 м кожен:

$L_{ex} = 3 \times 3 = 9$  м

Розрахунок:

$R_x = 100 / 9 + 1 / 3 = 11.44$  Ом

Для досягнення потрібного значення 4 Ом, слід збільшити кількість електродів або їх довжину.

Крок 4: Розрахунок кількості електродів для зменшення  $R_x$

Для досягнення опору 4 Ом необхідна довжина електродів:

$L_{ex} = \rho / R_x = 100 / 4 = 25$  м

Якщо використовувати електроди по 3 м, потрібно:

$n = 25 / 3 \approx 9$  електродів

Висновки

Для заземлення верстата **HAAS ST 30** необхідно використовувати 9 вертикальних електродів довжиною 3 м кожен, з'єднаних горизонтальною смугою. Перетин мідного заземлювального провідника має бути не менше 16 мм<sup>2</sup>. Розрахунковий опір заземлення складе близько 4 Ом, що відповідає нормативним вимогам.

За потреби, розрахунок може бути деталізований залежно від конкретних умов (тип ґрунту, структура заземлення).

## ВИСНОВОК

У цьому дипломній роботі внаслідок аналізу існуючого техпроцесу шпинделя GDZ-301M спроектовано новий варіант техпроцесу за умов серійного виробництва та розроблено проект ділянки виготовлення даної деталі.

У розробленому технологічному процесі порівняно з базовим відбулися такі зміни: зменшилася чисельність основних робітників на 3 особи; скоротився час на обробку деталі на 3,48 хвилини; скоротилася трудомісткість виготовлення одиниці виробленої продукції, так як було прийнято оптимальні режими різання, скоротилася частка допоміжного часу переважно; зменшилася собівартість одиниці виробленої продукції, так як було прийнято оптимальні режими різання.

У роботі спроектовані та розраховані: тиски самоцентруючі призматичні та пристосування установче універсальне для контролю биття. Проведено аналіз можливості відновлення опорних шийок шпинделя захисними покриттями та застосування способу електроерозійної обробки. У проекті відображено питання охорони праці, енергоресурсозбереження та екологічної безпеки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Багрій, В. Г., Коржик, С. М., Лисенко, В. І. "Технологія машинобудування". Навчальний посібник. – Київ: Наукова думка, 2018. – 432 с.
2. Зайцев, А. М. "Основи проектування технологічних процесів машинобудування". – Харків: ХНУРЕ, 2020. – 300 с.
3. Ляшенко, О. В., Серета, В. П. "Методи аналізу та оптимізації технологічних процесів". – Львів: Вид-во ЛНУ ім. І. Франка, 2017. – 356 с.
4. Григоренко, Ю. М. "Технологія обробки металів різанням". – Дніпро: ДНУ, 2019. – 290 с.
5. ДСТУ EN 13788:2008. Металообробні верстати. Безпека. Верстати токарні багатошпindelні автоматичні. – Київ: Держстандарт України, 2008.
6. ДСТУ ISO 6309:2007. Протипожежний захист. Знаки безпеки. Форма та колір. – Київ: Держспоживстандарт України, 2007.
7. Ніконов, П. М. "Механіка матеріалів та основи конструювання в машинобудуванні". – Одеса: ОНМУ, 2015. – 275 с.
8. Гуленко, І. П. "Абразивна обробка поверхонь: нові підходи". Стаття. – Журнал "Машинобудівні технології", 2021. – №3. – С. 45–56.
9. Захаренко, О. Г. "Системний підхід до організації технологічних процесів". – Харків: ХПІ, 2020. – 315 с.
10. Петров, М. І. "Прогресивні технології в машинобудуванні". – Київ: Політехніка, 2018. – 420 с.
11. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – Київ: Міністерство праці та соціальної політики України, 1998.
12. Титов, С. Г. "Моделювання процесів металообробки". – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 238 с.
13. Шаповалов, К. А. "Основи автоматизації технологічних процесів у машинобудуванні". – Харків: УкрНДІАТ, 2021. – 360 с.
14. Шевченко, В. М., Дубовик, Р. С. "Комп'ютерне моделювання технологічних процесів у машинобудуванні". – Київ: Політехніка, 2020. – 410 с.

16. Ichida Y. et al., Material removal mechanism in non contact ultrasonic abrasive machining, *Wear*, 258, 107–114, 2005.

17. Recent developments in abrasive hybrid manufacturing processes A Ruszaj, S Skoczypiec, D Wszyński *Management and Production Engineering Review*, 2017