

# МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

## Сумський державний університет

Центр заочної, дистанційної та вечірньої форм навчання

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра технології машинобудування, верстатів та інструментів

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Віталій ІВАНОВ

\_\_\_\_\_ 2023 р.

### КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності \_\_\_\_\_ 131 «Прикладна механіка»

освітньо-професійної програми \_\_\_\_\_ «Технологія машинобудування»

на тему: Удосконалення технологічного процесу виготовлення гільзи НВЕ 24-00-09-01 шляхом автоматизації вибору різального інструменту та режимів різання на механічних операціях

Здобувача групи \_\_\_\_\_ ТМ.мз-21с \_\_\_\_\_ Калініченко Андрій Ігорович  
(шифр групи) (прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ Андрій КАЛІНІЧЕНКО  
(підпис) (Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник \_\_\_\_\_ ст. викладач, канд. техн. наук Андрій ДОВГОПОЛОВ \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_ ст. викладач кафедри прикладної екології та \_\_\_\_\_  
з питань природозахисних технологій, канд. техн. наук  
охорони праці Віра ФАЛЬКО \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ доцент кафедри, канд. техн. наук, доцент, \_\_\_\_\_  
Олександр ІВЧЕНКО \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Суми – 2023

**ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ УКРАЇНИ**  
**Сумський державний університет**

Інститут, факультет	<u>Центр заочної, дистанційної та вечірньої форм навчання</u>
Кафедра	<u>Технології машинобудування, верстатів та інструментів</u>
Освітній ступінь	<u>магістр</u> (назва)
Спеціальність	<u>131 – прикладна механіка</u> (шифр і назва)
Освітня програма	<u>технології машинобудування</u> (назва освітньої програми, за наявності)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Віталій ІВАНОВ

\_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**ДО КВАЛІФІКАЙНОЇ РОБОТА СТУДЕНТА**

**Калініченко Андрій Ігорович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення технологічного процесу виготовлення  
гільзи НВЕ 24-00-09-01 шляхом  
автоматизації вибору різального інструменту та  
режимів різання на механічних операціях

Керівник роботи Довгополов Андрій Юрійович канд. техн. наук  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «30» листопада 2023 року за № 1381-VI

2. Строк подання студентом роботи «10» грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи креслення деталі гільза НВЕ24-00-09-01  
типовий технологічний процес деталі гільза НВЕ24-00-09-01

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Виконати аналіз службового призначення деталі гільза НВЕ24-00-09-01 та технології її оброблення

2. Удосконалити технологічний процес виготовлення деталі гільза.

3. Виконати підбір актуального обладнання на операції механічної обробки та автоматизований підбір ріжучого інструменту та режимів різання для обраних операцій

4. Провести віртуальний експеримент спрямований на дослідження оптимальних режимів при заданій шорсткості поверхні деталі

5. Експериментально дослідити вплив режимів різання на шорсткість, стійкість різального інструменту, температуру різання, силу різання та час оброблення для чистової токарної обробки.

6. Консультанти розділів роботи (проєкту)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	Фалько В. В., ст. викладач кафедри ЕтаПТ		

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи (проєкту)	Примітка
1	Вступ	25.09.2023	Виконано
2	Виконати аналіз службового призначення деталі гільза та технології її оброблення	10.09.2023	Виконано
3	Удосконалити технологічний процес виготовлення деталі гільза	15.10.2023	Виконано
4	Формулювання загальних висновків	10.11.2023	Виконано
5	Підготовка доповіді	04.12.2023	Виконано
6	Підготовка презентації	05.12.2023	Виконано
7	Оформлення роботи	06.12.2020	Виконано

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Андрій КАЛІНІЧЕНКО

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Андрій ДОВГОПОЛОВ

\_\_\_\_\_ (підпис)

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра становить 94 сторінки, в тому числі 30 рисунки, 22 таблиць, бібліографії із 42 джерел на п'яти сторінках, п'яти додатків на 32 сторінках.

**Актуальність теми.** Деталь гільза НВЕ24-00-09-01 є частиною вакуумного насоса. Даний насос застосовується для перекачування рідин. Основною задачею технології машинобудування, як галузі інженерного знання є вдосконалення або розробка ефективних технологічних процесів механічної обробки, що враховують сучасні надбання науки та техніки. Розробка більш продуктивних технологічних процесів є складною багатокритеріальною задачею, рішення якої потребує проведення наукових досліджень на основі методики планування експерименту, пошуку автоматизованих рішень з підбору різального інструменту та визначення режимів механічної обробки. В даній роботі запропоновано реалізувати вдосконалення технологічного процесу механічної обробки деталі із застосуванням більш ефективного ріжучого інструменту, оптимізації режимів обробки у відповідності до найбільшої продуктивності обробки, що є актуальною інженерно технічною задачею.

**Мета роботи.** Провести удосконалення технологічного процесу виготовлення гільзи НВЕ 24-00-09-01 шляхом автоматизації вибору різального інструменту та режимів різання на токарній операції.

**Методи дослідження.** При виконанні дипломного проекту були використані основні положення технології машинобудування, була реалізована методика автоматизованого розрахунку приписку за методом професора Кована, було виконано автоматизований пошук різальних пластин та різців у середовищі програми Sandvik Tool Guide. Планування експериментального дослідження було виконано за методикою повнофакторного експерименту. Було проведено віртуальний експеримент у середовищі програми емулятора процесу точіння Start. Обробка отриманих результатів була виконана на основі дисперсійного аналізу у програмному середовищі Minitab.

**Наукова новизна одержаних результатів:** на основі дисперсійного аналізу було визначено домінуючий вплив технологічних факторів на шорсткість обробленої поверхні, стійкість різального інструменту, температуру в зоні різання, тангінціальну

складову сили різання та основний час механічного оброблення для чистової токарної операції.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає у тому, що на основі експериментальних досліджень сформульовані рекомендації, для виконання автоматизованого підбору ріжучого інструменту та режимів обробки, визначено значення раціональних режимів різання при точінні для деталі гільза НВЕ 24-00-09-01, що дозволило забезпечити більшу стійкості різального інструменту та підвищення продуктивності і забезпечити задану шорсткість обробленої поверхні на чистовій токарній операції.

ГІЛЬЗА, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, РІЗАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ,  
ТОКАРНА ОПЕРАЦІЯ, ДИСПЕРСІЙНИХ АНАЛІЗ, ШОРСТКІСТЬ, ОБРОБЛЕННЯ

## **ABSTRACT**

The master's thesis is 94 pages, including 30 figures, 22 tables, a bibliography of 42 sources on five pages, and five appendices on 32 pages.

Actuality of the topic. The detail of the sleeve HBE24-00-09-01 is a part of the vacuum pump. This pump is used for pumping liquids. The main task of mechanical engineering technology, as a field of engineering knowledge, is to improve or develop effective technological processes of machining, taking into account modern achievements of science and technology. The development of more productive technological processes is a complex multi-criteria task, which requires conducting scientific research based on the methodology of planning an experiment, finding automated solutions for selecting a cutting tool and determining the parameters of machining. This work proposes improving the technological process of machining the part with a more effective cutting tool and optimising cutting parameters following the highest processing productivity, which is an urgent engineering and technical task.

The goal of the work. To improve the manufacturing process of the HBE 24-00-09-01 sleeve by automating the selection of the cutting tool and cutting modes in the turning operation.

Research methods. During the implementation of the diploma project, the main provisions of mechanical engineering technology were used, the method of automated calculation of the postscript according to Professor Kovan's method was implemented, and the automated search for cutting inserts and cutters was performed in the environment of the Sandvik Tool Guide program. The planning of the experimental study was carried out according to the method of a complete factorial experiment. A virtual experiment was conducted in the environment of the Start turning emulator program. The results that were obtained were processed based on variance analysis in the Minitab software environment.

. The scientific novelty of the obtained results: based on dispersion analysis, the dominant influence of technological factors on the roughness of the machined surface, the stability of the cutting tool, the temperature in the cutting zone, the tangential component of the cutting force and the main machining time for the finishing turning operation were determined.

The practical significance of the obtained results is that, on the basis of experimental studies, recommendations were formulated for the automated selection of cutting tools and processing

modes. The value of rational cutting modes during turning was determined for the part of the HVE 24-00-09-01 sleeve. This made it possible to ensure more excellent stability cutting tool, increase productivity, and ensure the specified roughness of the machined surface in the finishing turning operation.

SLEEVE, TECHNOLOGICAL PROCESS, CUTTING TOOL, TURNING OPERATION, ANOVA, ROUGHNESS, MACHINING

## ЗМІСТ

.....	с.
ВСТУП.....	10
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ.....	13
1.1 Аналіз службового призначення машини, вузла, деталі. Опис їх конструктивних особливостей та умов експлуатації .....	13
1.2 Аналіз технічних умов та вимог до конструкції деталі. Визначення технологічних завдань щодо її виготовлення .....	17
1.3 Характеристика типу та організаційної форми виробництва.....	18
1.4 Аналіз технологічності конструкції деталі.....	19
1.5 Аналіз існуючого технологічного процесу виготовлення деталі.....	20
1.6 Висновок та завдання для удосконалення технологічного процесу виготовлення деталі .....	21
2 УДОСКОНАЛЕННЯ ІСНУЮЧОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ.....	22
2.1 Літературний огляд сучасних досліджень по оброблюваності матеріалів на високопродуктивному обладнанні з ЧПК з використанням сучасного різального інструменту.....	22
2.2 Складання варіантів технологічних маршрутів та вибір оптимального .....	27
2.3 Обґрунтування способу отримання, розрахунок та формулювання технічних вимог на виготовлення первинної заготовки .....	29
2.4 Розрахунок припусків на оброблення поверхні обертання .....	32
2.5 Призначення та обґрунтування схем базування та закріплення заготовки	32
2.6 Обґрунтування та вибір моделей металорізальних верстатів .....	34
2.7 Обґрунтування та вибір верстатних пристроїв, різального та вимірювального інструментів.....	36
2.8 Визначення режимів різання та технічне нормування операцій.....	41
2.9 Висновок .....	46



3 ДОСЛІДЖЕННЯ СПРЯМОВАНЕ НА УДОСКОНАЛЕННЯ ІСНУЮЧОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ .....	47
3.1 Методологія дослідження та планування експерименту .....	47
3.2 Експериментальне дослідження .....	51
3.3 Обґрунтування вибору різального інструменту та режимів на основі результатів експерименту.....	55
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	57
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	58
Додаток А_ЗАЯВА ТА ІНФОРМАЦІЙНА ДОВІДКА .....	63
Додаток Б КРЕСЛЕННЯ ДЕТАЛІ .....	66
Додаток В КРЕСЛЕННЯ ЗАГОТОВКИ.....	68
Додаток Д РЕЗУЛЬТАТИ ВІРТУАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ .....	79
Додаток Є ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	81

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Деталь гільза НВЕ 24-00-09-01 є частиною насосного агрегату. Даний насос застосовується для перекачування рідин і газів в нафтовій та газовій галузях. Також даний насос може застосовуватись у системах водопостачання та водовідведення для перекачування води, що робить можливим його застосування у побутових галузях [1,2]. Оскільки насоси типу НК є достатньо поширеними у різноманітних сферах, потреба галузей економіки та попит на обслуговування та ремонт деталей та вузлів даного типу насосів є достатньо високою. Це в свою чергу створює попит на дослідження та оптимізацію процесів пов'язаних з виготовленням необхідних деталей та вузлів. Щоб задовольнити наявний попит необхідно спрямовувати дослідження на процеси техніко-економічної оптимізації, в тому числі і процесів механічної обробки деталей. Крім того необхідного ефекту можна досягнути за рахунок створення перспективних та прогресивних технологічних процесів виготовлення деталі, що містять у собі застосування нового обладнання, більш прогресивних методів обробки, оптимізації методів отримання заготовки, застосування більш ефективного ріжучого інструменту, оптимізації режимів обробки у відповідності до найбільшої продуктивності обробки [3]. Також мають місце вдосконалення процесів пов'язаних з формоутвореннями виробів та зміною фізико-механічних властивостей матеріалу деталі [3,4]. Все це визначає спектр перспективних досліджень метою яких є вирішення вищезазначених завдань. Автоматизація вибору різального інструменту та режимів різання на механічних операціях є достатньо актуальним питанням для досліджень, оскільки дозволяє вирішити одразу декілька важливих аспектів пов'язаних з оптимізацією технологічних процесів. Автоматизації підбору інструментів та режимів можна досягти шляхом використання сучасного програмного забезпечення, чим в свою чергу можна підвищити економічну ефективність процесів механічної обробки деталей.

**Об'єкт дослідження** – технологічний процес виготовлення деталі гільза НВЕ 24-00-09-01, токарна операція з ЧПК.

**Предмет дослідження** – ріжучий інструмент, режими різання та їх вплив на фактори в ході чистової токарної обробки, раціональність аналітично розрахованих режимів.

**Мета дослідження.** Удосконалення технологічного процесу виготовлення деталі гільзи НВЕ 24-00-09-01 шляхом автоматизації вибору різального інструменту та режимів різання на механічних операціях

**Завдання дослідження:**

1) виконати аналіз типового технологічного процесу виготовлення деталі гільзи, визначити недоліки існуючого технологічного процесу;

2) розробити більш ефективний технологічний процес виготовлення деталі;

3) здійснити вибір сучасного металообробного обладнання на операції механічної обробки та автоматизований підбір ріжучого інструменту та режими різання для обраних операцій;

4) дослідити вплив режимів різання на шорсткість обробленої поверхні, температури різання, сили різання та час оброблення, шляхом проведення віртуального експерименту у середовищі програми емулятора процесу точіння Start;

5) дослідити вплив режимів різання на шорсткість, стійкість різального інструменту, температуру різання, силу різання та час оброблення для чистової токарної обробки, шляхом аналізу результатів засобами дисперсійного аналізу.

**Методи дослідження.** Дослідження у рамках кваліфікаційної роботи проводилися на основі теоретичних та практичних положеннях технології машинобудування та теорії різання. Розрахунок припусків заготовки виконувалися автоматизованим способом з використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Автоматизований вибір різального інструменту та режимів різання виконувався засобами програми Sandvik Coromant «ToolGuide». Планування експерименту здійснювалося за методикою повнофакторного експерименту. Аналіз значущості технологічних факторів здійснювався засобами дисперсійного аналізу.

**Наукова новизна одержаних результатів:** в ході виконання кваліфікаційної роботи було виконано автоматизований підбір ріжучого інструменту та режимів

різання для механічних операцій. У результаті обробки даних експериментального дослідження засобами дисперсійного аналізу було отримано графіки значущості впливу швидкості різання та подачі на шорсткість обробленої поверхні, температури різання, тангенціальної складової сили різання, та часу механічної обробки, що дозволило визначити раціональний режим різання для чистової токарної обробки поверхні при заданій шорсткості.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає у тому, що на основі експериментальних досліджень було сформульовано рекомендації, щодо вибору ріжучого інструменту та режимів різання. Було визначено раціональні режими різання при точінні гільзи НВЕ 24-00-09-01, що дозволило забезпечити більшу стійкість різального інструменту та підвищити продуктивність технологічного процесу механічної обробки та забезпечити шорсткість обробки на чистовій токарній операції.

**Особистий внесок магістранта.** Магістрантом було виявлено недоліки існуючого технологічного процесу виготовлення гільзи НВЕ 24-00-09-01. Були запропоновані нововведення, що включають в себе удосконалення технологічного процесу виготовлення деталі. Виконано автоматизований підбір різального інструменту та режимів різання. Досліджено вплив режимів швидкості та подачі на фізичні та техніко-економічні показники процесу різання. Сформульовано рекомендації щодо підвищення продуктивності технологічного процесу.

**Апробація роботи.** Немає.

**Публікації.** Немає.

## 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

1.1 Аналіз службового призначення машини, вузла, деталі. Опис їх конструктивних особливостей та умов експлуатації

Деталь гільза використовується у вакуумному насосі, який є складовою насосного агрегату системи подачі рідини або повітряно-механічної піни з баку пожежної автоцистерни АЦ-40 (53228)-264, призначеної для доставлення особового складу пожежного розрахунку, засобів на оснащення необхідного для гасіння пожежі.

Деталь гільза входить до вузла вакуумного насосу електроприводом. Вакуумний насос використовується на першій ступені і слугує для забору води з відкритої водойми. В основу роботи насоса закладено принцип створення області розрідженого тиску у порожнині для подальшого заповнення водою. Існує п'ять основних типів вакуумних насосів, зокрема вод кільцеві, струменеві, поршневі, діфрагменні та шиберні. Розглянута деталь гільза використовується у шиберному насосі. Превагою шиберних насосів є автономність, можливість підключення різних типів приводів. Основними недоліками шиберних насосів є ймовірність потрапляння води у робочу порожнину, утворення іржі на поверхні пазів ротора, що може стати причиною заїдання або заклинювання лопаток ротора.

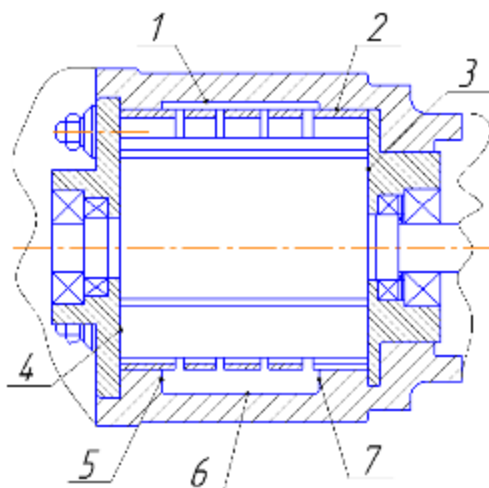


Рисунок 1.1 – Складальна одиниця вузла шаберного насоса

Гільза використовується у якості порожнина пожежного насоса з якої відкачується повітря. В середині гільзи обертається ротор, що являє собою циліндричну втулку з радіально прикріпленими лопатями, що називаються шиберами. Захоплене лопатями повітря у порожнині гільзи (рис.1.2) виводиться з неї через радіально розміщені пази. У результаті у порожнині гільзи створюється область розрідженого тиску, в яку всмоктується вода.

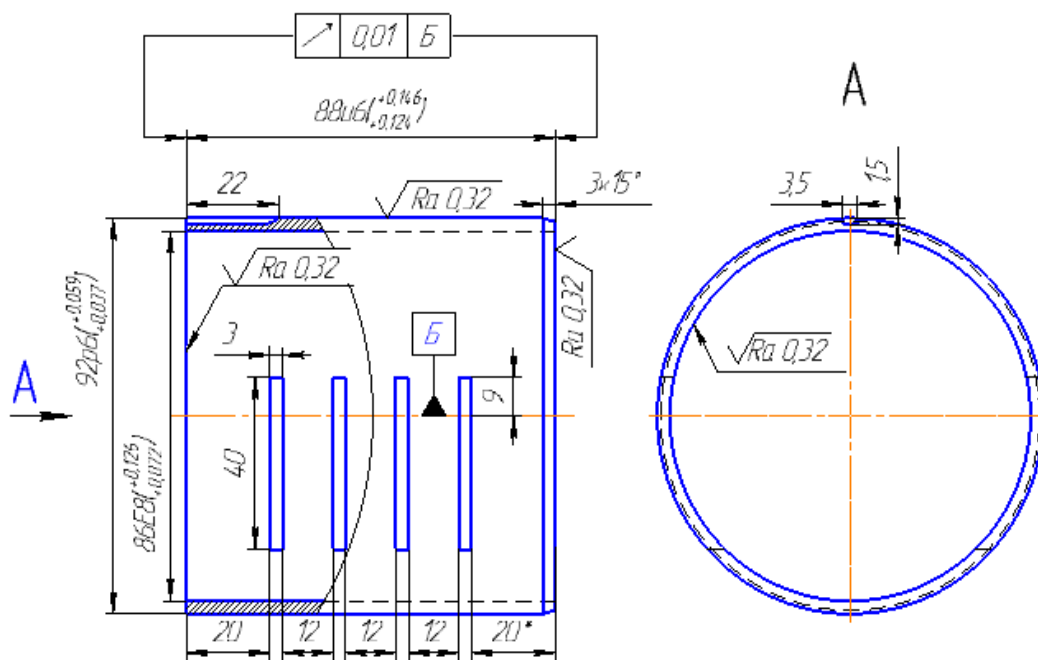


Рисунок 1.2 – Ескіз деталі гільза НВЕ 24-00-09-01

Виконаємо умовну нумерацію поверхонь деталі для подальшого аналізу основних та допоміжних конструкторських баз та вільних поверхонь (рис.1.3). Нумерація поверхонь відбувається за годинниковою стрілкою.

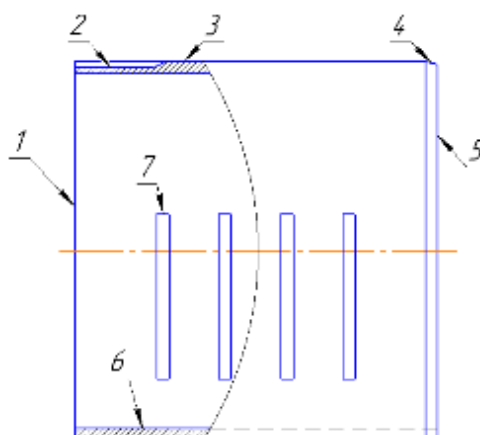


Рисунок 1.3 – Нумерація поверхонь деталі гільзи НВЕ 24-00-09-01

Аналіз службового призначення поверхонь деталі, точності та якості оброблених поверхонь здійснюється з посиланням на рис.1.2, нумерація поверхонь – рис.1.3.

Поверхні 1 і 5 є торцями деталі. Службове призначення цих поверхонь полягає базуванні лівої та правої кришки корпусу насоса. Ці поверхні забезпечують щільність прилягання торцевих поверхонь приєднаних деталей, тому мають низьку шорсткість поверхні Ra 0,32 мкм.

Поверхня 2 слугує для кращого базування деталі, тобто використовується для визначення положення деталі у корпусі.

Зовнішня поверхня 3 щільно прилягає до внутрішньої циліндричної поверхні корпусу насоса, забезпечуючи точність розміщення деталі у корпусі насоса. Високі вимоги до щільності прилягання циліндричних поверхонь гільзи та корпусу (посадка з натягом) обумовили необхідність механічної обробки цієї поверхні з точністю по 6-ому (р6) квалітету з шорсткістю Ra 0,32 мкм.

Поверхня 4 – фаска, призначена для спрощення процесу встановлення та напрямлення гільзи у корпусі насоса.

Поверхня 6 – внутрішня поверхня гільзи має 8-й квалітет точності, що обумовлено необхідністю забезпечення щільності прилягання лопатей ротора насоса. Низька шорсткість поверхні (Ra 0,32 мкм) дозволяє забезпечити якісну роботу лопатей (шаберів) всередині гільзи. Важливість забезпечення якісного контакту внутрішньої поверхні гільзи та лопатей ротора обумовлена необхідністю створюватись вакуум. У іншому разі, за умови не виконання вимоги кресленика то якості внутрішньої поверхні гільзи повітря буде проходити крізь мікронерівності обробленої поверхні що унеможливить створення зони розрідженого тиску та призведе до непрацездатності усього насоса.

Поверхня 7 – це отвори, саме через які повітря виходить(відкачується) з гільзи.

Базування деталі у корпусі насоса здійснюється по по поверхнях 1, 2, 3 та 5, що позбавляє її шести ступенів вільності (табл. 1.2). Таким чином отримуємо напрямну та подвійну напрямну бази (табл.1.2)

Для зручності занесемо данні про бази до таблиць 1.1, 1.2, 1.3 та 1.4

Таблиця 1.1 – Основні та допоміжні бази деталі

Основні конструкторські бази	Допоміжні конструкторські бази	Вільні поверхні
1, 2, 3, 5	6	7, 8, 9, 10

Таблиця 1.2 – Характеристика баз за числом ступенів вільності

Найменування бази	Ступінь вільності, що позбавляється	Вид поверхні, що реалізує базу	Поверхня деталі
Опорна	1 (1 перем.)	Площина	1, 5
Подвійна напрямна	4 (2 перем. та 2 оберт.)	Довгий циліндр	3
Опорна	1 (1 оберт.)	Канавка	2

Таблиця 1.3 – Матриця відповідності

№ поверхні	Міра свободи	База
1, 5	I	Опорна
3	II, III, V, VI	Подвійна напрямна
2	IV	Опорна

Таблиця 1.4 – Матриця зв'язків

База	X	Y	Z	Рухи
ОБ	0	0	0	↷
	1	0	0	↔
ПНБ	0	1	1	↷
	0	1	1	↔
ОПБ	1	0	0	↷
	0	0	0	↔



1.2 Аналіз технічних умов та вимог до конструкції деталі. Визначення технологічних завдань щодо її виготовлення

За результатами вивчення робочого креслення деталі гільзи було визначено, що фронтальна проекція та розрізи є достатньо інформативними для виготовлення деталі правильно розміщені та оформлені згідно ДСТУ Б А.2.4-4-2009.

Виходячи з факту що до усіх поверхонь проставлені розміри, наведені позначення точності розмірів та вказані вимоги до якості оброблених поверхонь можна зробити висновок що кресленик виконано з дотриманням вимог.

Конструктором вірно вказані технічні вимоги, зазначені точність взаємного розташування поверхонь та розмірна точність. Зокрема при порушенні вимоги щодо забезпечення лінійних розмірів пазів 20 або 12 (рис.1.5) відбудеться зміщення положення шаберів, які у них монтуються. Як наслідок деталь не зможе виконати свого службового призначення.

Виходячи з конструктивного призначення внутрішньої поверхні гільзи призначення шорсткості цієї поверхні на рівні Ra 0,32 мкм є виправданим, оскільки по цій поверхні будуть ковзати лопаті ротора. Поєднання точності по 8-ому квалітету та низької шорсткості дозволяє забезпечити відкачування повітря з порожнини насоса та знизити тертя внутрішньої стінки гільзи та лопатей ротора. Збільшення шорсткості призведе до зростання температури на контактних поверхнях, перетікання повітряних мас і як наслідок зниження продуктивності роботи насоса, а в подальшому зниження терміну його ефективної роботи.

Важливе значення з огляду на службове призначення деталі відіграє поверхня 2 (рис 1.2), оскільки саме завдяки ній визначається положення деталі у складальній одиниці. Зміщення деталі призведе до втрати працездатності складальної одиниці.

З аналізу кресленика бачимо, що на всіх поверхнях деталі має бути забезпечена висота мікронерівностей обробленої поверхні на рівні Ra 0,32 мкм, що обумовлено службовим призначенням деталі. Оскільки гільза слугує для створення вакууму. Тими

ж міркуваннями обумовлені високі вимоги до геометричної точності діаметральних розмірів  $\varnothing 86 \begin{pmatrix} +0,126 \\ +0,072 \end{pmatrix}$ ,  $\varnothing 92 \begin{pmatrix} +0,059 \\ +0,037 \end{pmatrix}$  та  $88 \begin{pmatrix} +0,146 \\ +0,124 \end{pmatrix}$ .

Підводячи підсумок слід зауважити, що за результатами формального та функціонального аналізу вимог креслення можна дійти висновку, що наявні вимоги креслення є обґрунтованими і не потребують корегування.

### 1.3 Характеристика типу та організаційної форми виробництва

Визначимо тип та форму організації виробництва за табличним методом. Для цього у якості вихідної інформації використаємо значення річного обсягу випуску деталі та її масу. З річною програмою випуску  $N_p = 200$  шт та з масою деталі 0,55 кг тип виробництва буде відповідати дрібносерійному.

Виходячи із визначення серійного виробництва - це виробництво, при якому виготовлення виробів відбувається серіями або партіями, які складаються з однотипних та однойменних виробів, подібних за конструкцією та розмірами, одночасно запусчених у виробництво. В залежності від загальної кількості, інтенсивності та частоти запуску серій та організаційної форми виробництва виділяють дрібносерійне, середньосерійне і великосерійні типи виробництв. Характерною рисою дрібносерійного виробництва є обмежена номенклатура випуску продукції, яка випускається партіями що періодично повторюються з відносно великим обсягом випуску. Коефіцієнт закріплення операції може змінюватись у діапазоні 20-40. Сам виробничий процес характеризується використанням у більшій мірі універсального обладнання і у меншій – верстатами з ЧПК. Дрібносерійне виробництво характеризується обмеженою номенклатурою продукції, що випускається періодично повторюваними партіями, і відносно великим обсягом випуску. Коефіцієнт закріплення операцій становить 20 - 40. У цьому типі виробництва активно використовується універсальне обладнання та верстати з ЧПК. При виконання операцій механічного оброблення використовується як універсальний так і спеціальний різальний інструмент, а при операційному контролі або на операціях

відділу технічного контролю застосовується універсальний, мірний та спеціальний інструмент.

Розрахункову кількість деталей у партії розраховуємо за формулою:

$$N = \frac{N \cdot a}{259} \quad (1.1)$$

де  $a = 24$  дні – періодичність запуску деталей у виготовлення [1]

$$N_{\text{парт.р}} = \frac{200 \cdot 24}{259} = 20 \text{ шт.}$$

#### 1.4 Аналіз технологічності конструкції деталі

Аналіз технологічності конструкції деталі є важливою складовою при створенні нового чи удосконаленні існуючого технологічного процесу. Основною задачею аналізу деталі на технологічність є оцінка можливості та доступності здійснення механічних операцій на наявному чи запланованому до придбання обладнанні та технологічному оснащенні. Удосконалення технологічності конструкції дозволяє зменшити трудомісткість і собівартість виробництва деталі. Беручи до уваги службове призначення деталі гільза, ми не зможемо спростити елементи конструкції деталі, оскільки це може призвести до неможливості її застосування

Проведемо якісну оцінку технологічності конструкції деталі:

- Усі оброблювані поверхні деталі вже мають необхідні значення точності геометричних розмірів та шорсткості обробленої поверхні;
- Для отримання необхідних геометричних розмірів із зазначеною точністю у межах поля допуску достатньо використати стандартизований різальний інструмент. К
- Деталь має відносно просту конфігурацію, що забезпечує вільний доступ різального інструменту для здійснення процесу механічного оброблення на усіх механічних операціях;

Найбільш точними розмірами поверхонь деталі є внутрішня циліндрична поверхня  $\varnothing 86 \begin{pmatrix} +0,126 \\ +0,072 \end{pmatrix}$ , зовнішня циліндрична поверхня  $\varnothing 92 \begin{pmatrix} +0,059 \\ +0,037 \end{pmatrix}$  та лінійний розмір  $88 \begin{pmatrix} +0,146 \\ +0,124 \end{pmatrix}$  з допуском торцевого биття 0,01 мм відносно осі деталі. До усіх поверхонь деталі висуваються високі вимоги по шорсткості обробленої поверхні на рівні Ra 0,32 мкм, крім поверхонь пазів.

Виходячи зі службового призначення деталі та аналізу технічних вимог креслення можна дійти висновку що: призначена конструктором розмірна і геометрична точність забезпечать нормальну роботу деталі та виконання її службового призначення, призначений матеріал деталі відповідає експлуатаційним вимогам.

### 1.5 Аналіз існуючого технологічного процесу виготовлення деталі

Проведемо аналіз базового технологічного процесу, що використовувався для виробництва деталі направляючий апарат на підприємстві. У базовому процесі послідовність операцій технологічного процесу цілком відповідає загальноприйнятим. Технологічний процес виготовлення деталі та обладнання операції наведено в таблиці 1.5

Таблиця 1.5 – Базовий технологічний процес

<b>№ операції</b>	<b>Найменування операції</b>	<b>Обладнання</b>
005	Заготівельна	-
010	Токарна чорнова	Верстат 16A20
015	Токарна чорнова	Верстат 16A20
020	Контроль ВТК	Стіл ВТК
025	Токарна чистова	Верстат 16A20
030	Контроль ВТК	Стіл ВТК
035	Фрезерна	6P82Г
040	Слюсарна	Верстак слюсарний
045	Фрезерна	6P82Г
050	Контроль ВТК	Стіл ВТК

Основними недоліками базового технологічного процесу є використання застарілого металообробного обладнання, що не дозволяє підвищити продуктивність механічної обробки. Основною причиною обмеження збільшення продуктивності застарілого обладнання є його моральна та фізична застарілість, високий ризик виникнення відмов у роботі обладнання, у разі збільшення навантаження та неможливість забезпечити високопродуктивні режими механічної обробки з використанням сучасного різального інструменту.

1.6 Висновок та завдання для удосконалення технологічного процесу виготовлення деталі

Отже, в ході виконання дипломного проекту потрібно виконати наступні завдання:

- Визначитись із заготовкою та методом її отримання, що буде відповідати типу виробництва та буде максимально економічно доцільним.
- Удосконалити технологічний процес виготовлення деталі гільза, визначити доцільний варіант реалізації технологічного процесу;
- Визначити моделі сучасного металорізального обладнання для заміни застарілого обладнання базового технологічного процесу;
- Реалізувати автоматизований вибір продуктивного різального інструменту для обробки поверхонь обертання на токарних операціях у середовищі програмного продукту Sandvik Tool Guide;
- Розрахувати норми часу для механічних операцій.
- Виконати планування експериментального дослідження за методикою повнофакторного експерименту
- Провести віртуальний експеримент по дослідженню впливу режимів різання для різального інструменту обраного шляхом автоматизованого вибору, на шорсткість обробленої поверхні, тангенціальну складову сили різання, температура різання, стійкість інструменту, час оброблення

## 2 УДОСКОНАЛЕННЯ ІСНУЮЧОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

2.1 Літературний огляд сучасних досліджень по оброблюваності матеріалів на високопродуктивному обладнанні з ЧПК з використанням сучасного різального інструменту

Методи чистової обробки можна віднести до методів, які називаються мікротехнологіями та нанотехнологіями. Ці терміни також означають технології виробництва, які досягають точності розмірів у мікрометрах або нанометрах. В обох випадках (мікро- та нанотехнології) в основному є два шляхи. Це або видалення відповідного поверхневого шару, або додавання (наприклад, покриття) поверхневого шару в заданих співвідношеннях розмірів. Метою чистової обробки є поліпшення форми, розмірів і якості поверхні. Як правило, під час обробки ми видаляємо лише дрібні частинки матеріалу. Вони створюють невеликий опір різанню, викликають лише невеликі деформації заготовки, інструменту та верстата, і таким чином гарантують високу точність заготовки. Досягнута шорсткість поверхні зазвичай дуже низька, менше  $Ra = 0,8$  мкм. Готова поверхня має високу якість, рівний зовнішній вигляд, а іноді навіть дзеркально глянцева, що не завжди необхідно, тому що поверхня, отримана дрібним рифленням (звичайно, також після фінішної обробки), краще утримує так звану мастильну плівку, що зменшує тертя та знос таких рухомих контактуючих поверхонь, коли вони використовуються в машинах [1]. Відхилення від ідеального значення обраної змінної визначають точність. Відхилення від ідеального значення є неточностями. У випадку точних технологій – це фізичні, геометричні величини. Об'єктів з точно визначеними розмірами не існує. Точним розміром є нульове відхилення від заданої міри. Скільки становить нульове відхилення? Десята, сота, тисячна міліметра? А ще є десята, сота, тисячна мікрометра, тож ми можемо продовжувати до нескінченності. Існують лише розміри, що підпадають під певний вибраний допуск, менший за найбільше допустиме відхилення. Ми вважаємо такі розміри точними. Точність - це в основному сеанс

(відносини). Якщо розмір із зазначеного інтервалу, ми вважаємо його точним. Отже, точність – це людське поняття. Точність – це те, наскільки близьке значення до його справжнього значення. Точність – це те, наскільки повторюваним є вимірювання. Відомі такі фізичні причини неточності розмірів інженерних компонентів [2].

- Геометричні неточності використовуваних засобів, машин, інструментів, заготовок. Це неточності розмірів і форм, такі як площинність, циліндричність, конусність, перпендикулярність, відхилення від параболоїда, гіперболоїда, відхилення від евольвенти тощо.

- Довільна неоднорідність заготовки, наприклад, хімічний склад, структура, наявність напруги, температури, електричного, ультразвукового або іншого поля.

- Статичні або динамічні відхилення бажаного взаємного положення матеріалу (заготовки) і різальної кромки інструменту в системі координат верстата. Наприклад, помилки, відсутність чіткості рухомих частин, вібрація члена системи або передача з оточення.

- Втрата геометричної форми (деформація) елементів робочої системи внаслідок технологічних сил, тепла та ерозії (знос — втрата частинок).

- Деформації заготовки внаслідок зняття внутрішніх напруг і дії зовнішніх сил. Внутрішні напруги можна зняти шляхом видалення матеріалу, структурних змін, видалення тощо.

Як ми виготовляємо прецизійні деталі? Ми виготовляємо точні деталі, коли причини неточностей усунені настільки, що відхилення форми, розмірів і положення елементів (елементів) виробу — деталей — знаходяться в заданих межах (допусках). Технічно та економічно це не завжди можливо.

Є багато досліджень і внесків, які стосуються питання точності в механічній обробці. Деякі публікації ми відібрали так, щоб вони склали широку мозаїку представленої тематики. Однією з причин, чому оброблені поверхні виходять із плоскості під час фрезерування, є відхилення ріжучого інструменту під впливом сили різання та низької жорсткості верстата. Цю проблему було запропоновано вирішити за допомогою автономної компенсації траєкторії інструменту, напівемпіричної

моделі на основі теорії Армареро та моделі відхилення верстата [3]. Використання ультразвуково-вібраційної технології в фінішних операціях є перспективним способом забезпечення високої геометричної точності та шорсткості обробленої поверхні [4]. Повідомлялося, що шорсткість обробленої поверхні значно покращується за допомогою полірування кулькою з ультразвуковою вібрацією (UVA) від 0,122 м до 0,022 м [5,6]. Фізична природа позитивного впливу УФА обробки на морфологію обробленої поверхні базується на зменшенні сили тертя [7]. Хоча швидкість різання та подача вплинули на шорсткість поверхні, амплітуда ультразвукових коливань під час UVA фрезерування виявляється більш значною [8,9].

Позитивний вплив UVA-технології на шорсткість поверхні та зменшення поверхневих тріщин можна покращити за допомогою техніки MQL [7,10,11]. Структурні та рухові похибки верстатів з ЧПК відіграють істотну роль у забезпеченні точності обробленої поверхні. Яскольські та ін. вказано, що на площинність поверхні та відхилення від вертикальної паралельності, які були виміряні 3D-сканером, істотно впливають верстати [12]. Поєднання 3D-сканування з CAD-моделлю техніки зворотного проектування [13] показує хорошу надійність при оцінці відхилень форми та розміру оброблених поверхонь [14]. Однак слід враховувати, що безперервність моделі CAD впливає на точність при обробці криволінійних поверхонь, а саме B-сплайнів і кривих Без'є. На практиці безперервність моделі CAD призводить до відхилення поверхні, яке може змінюватися до 60 м, але не впливає на шорсткість поверхні [15]. Dong та ін. Повідомляється, що на шорсткість поверхні довільної форми під час фрезерування значною мірою впливають локальний кут нахилу та кут нахилу фрези [16]. Хоча 3D-сканування є надійним методом вимірювання, воно потребує дорогого обладнання. В якості альтернативного методу вимірювання для контролю точності геометрії інструменту було запропоновано використовувати тригерний сенсорний щуп, інтегрований в систему керування ЧПУ [17], або лазерні вимірювальні прилади чи інтерферометри для контролю кутових похибок, похибок горизонтальної та вертикальної прямолінійності, похибок паралельності [18]. ] та



похибки перпендикулярності [19]. Ще один спосіб вплинути на точність обробки та підвищити її – це передбачити швидкість подачі та час циклу з урахуванням динаміки інтерполятора за допомогою фільтра низьких частот на основі кінцевої імпульсної характеристики, який оцінює більш ніж на 90% більш точний час циклу, ніж передбачення на основі САМ [20]. Голуб та ін. встановлено, що округлість обробленої поверхні під час фрезерування на верстаті з ЧПК можна покращити на 40% за допомогою об'ємної компенсації супроводжується інтерферометром із самовідстеженням LaserTRACER [21]. Лу та ін. запропонував модель помилки системи багатотільних частин (MBS), яка використовується для ідентифікації загальних геометричних помилок, які були виявлені за допомогою глобального аналізу чутливості за значенням і розглянуті в сервосистемі Beckhoff TwinCAT для моделі помилки компенсації прямолінійності з використанням методу інтерполяції B-сплайн [22]. В результаті геометрична похибка в напрямку X руху верстата з ЧПК була значно зменшена; однак запропонована модель компенсації не враховувала вплив параметрів різання та теплового розширення вузлів верстатів з ЧПК, а також теплового розширення різального інструменту [23,24]. Однак Zhao et al. встановлено, що теплове подовження ріжучого інструменту при розігріві верстата може досягати до 130 м в осьовому напрямку [25]. Ці висновки були підтверджені за допомогою кінцево-елементного моделювання (FEM) у програмному забезпеченні Ansys на основі вимірювання температури шпиндельного вузла за допомогою термопарних датчиків. Нагрівання деталей шпинделя до 78 С пояснює теплове подовження шпиндельного вузла фрезерного верстата з ЧПК, хоча цю температуру можна знизити системою охолодження до 16 С [26]. Інше дослідження верстатів на основі датчиків показало близько 45 С і теплову похибку до 75 м [27]. Вплив основних джерел тепла, таких як зміни температури навколишнього середовища, обертання шпинделя та дії приводу подачі X, Y і Z, також було враховано для оцінки моделі деформації по п'яти осях фрезерного центру з ЧПК. На основі моделі множинної лінійної регресії (MLR) для компенсації програмного забезпечення на основі коду Python термічних переміщень фрезерного центру з ЧПК термічні похибки були зменшені до 62%, 56%

і 73% у X, Y і Z напрямків відповідно [28]. Дослідження особливостей впливу технологічних параметрів на точність розмірів і якість поверхні при фрезеруванні на верстаті з ЧПК передбачає, що збільшення швидкості різання викликає збільшення розкиду розмірності. Навпаки, збільшення подачі на зуб зменшує відхилення від номінального розміру [29]. Розкид розмірів може відбуватися через відносно низьку жорсткість машинних вузлів при певних параметрах різання, що призводить до стукоту вібрацій і поганої якості поверхні. Рок запропонував передбачити регенеративне чатування за допомогою симуляції апаратного забезпечення в циклі за допомогою моделі різання на основі dextral. Однак експериментальне дослідження не підтвердило цю модель [30]. Одним із можливих способів зменшення вібрації тріскотіння є використання технології цифрового близнюка, яка була реалізована шляхом поєднання CAD-моделі обробленої деталі та циклу зондування під час фрезерування [31] з оптимізацією параметрів різання та компенсацією похибок [32]. Надійний метод компенсації похибки обробки при обробці кривих поверхонь може бути використаний для прогнозування похибки лічильника на основі ідентифікації моделі та кінематичного аналізу верстата, що дозволяє зменшити похибку лічильника на 61% до 3 м [33].

Yeh та ін. показують, що циклічний ітеративний навчальний метод керування контуром, реалізований через керування приводом синхронного двигуна з постійними магнітами (PMSM), забезпечує 80% зменшення помилки контуру порівняно з пропорційно-інтегральним керуванням [34,35]. Для високої ефективності та енергозбереження процесу обробки запропоновано реалізувати оптимізацію на основі багатоцільових параметрів. Враховуючи продуктивність машини, довговічність інструменту та вимоги до процесу обробки, було виконано багатоцільовий загальний алгоритм для вирішення Парето-розв'язку цільової моделі. У результаті були визначені оптимальні параметри різання для чорнового та напівчистового фрезерування [36]. За останні кілька років метод штучного інтелекту знайшов своє застосування як техніка глибокого навчання для оцінки точності та якості поверхні при обробці. Поєднання моделі кутового поля Грама (GAF) і навченої

згорткової нейронної мережі (CNN) показало хороші результати в прогнозуванні умов обробки. GAF дозволив передавати сигнали системи керування верстатом з ЧПК у зображеннях обробленої поверхні, що відбувалося за алгоритмом CNN. Навчена класифікаційна модель CNN призвела до запам'ятовування, прецизійності та точності зі значеннями 75%, 88% та 94% відповідно для прогнозування якості поверхні заготовки та поломки інструменту [37] та довговічності інструменту [38]. В даний час різні типи зносу інструментів можна передбачити за допомогою штучних нейронних мереж і виміряти в режимі реального часу. Для цього розроблено комплексні сенсорні системи, що вимірюють акустичну емісію та прискорення [39]. Незважаючи на те, що ефект виділення тепла в агрегатах верстатів відомий і вивчений, існує дуже мало досліджень, які відповідають впливу теплового розширення верстата на точність і шорсткість поверхні обробленої поверхні.

## 2.2 Складання варіантів технологічних маршрутів та вибір оптимального

Вихідною інформацією для викання для цього підпункту кваліфікаційної роботи є розуміння технології обробки типових деталей. У основі побудови технологічного процесу механічної обробки лежать принципи диференціації чи концентрації механічних операцій. Так для одиничного та дрібносерійного типів виробництв характерно застосування принципу концентрації механічних операцій, що передбачає, зокрема виконання на одному робочому місці більшої кількості операцій. Це пов'язано з недоцільністю зайвого переміщення заготовок від верстата до верстата. Натомість при диференціації механічних операцій, механічні операції розбиваються на більшу кількість дрібніших операцій, що є доцільним при великосерійному та масовому виробництві, коли обладнання налаштовується на один чи декілька простих ходів [41].

При проектуванні маршрутного технологічного процесу необхідно враховувати наступні обставини:

- Здійснювати проектування з дотриманням принципу поетапності, що передбачає послідовне виконання спочатку чорнових, а потім чистових операцій;
- На чорнових операціях виконується обробка чорнових баз.
- При виборі баз треба керуватися принципами постійності та суміщення баз.

Базовий технологічний процес деталі гільза складений з дотриманням принципу стадійності та послідовності видалення припуску. Однак залишається потенціал до концентрації технологічних переходів. В удосконаленому технологічному процесі (табл.2.1) виготовлення деталі гільза запропоновано на Установі А операції 010 Токарна чорнова виконати підрізання торця для формування встановлювальної бази з закріпленням по зовнішній діаметральній поверхні. На Установі Б, пере закріпити деталь виконати підрізання торця з припуском на чистову обробку витримавши розмір 90, та розточити внутрішній отвір, формуючи технологічну базу з припуском під чистову обробку. Розлогий опис змісту операцій та переходів наведено у таблиці 2.2

Таблиця 2.1 – Прийнятий технологічний процес обробки деталі гільза

<b>№ операції</b>	<b>Найменування операції</b>	<b>Запропоноване обладнання</b>
005	Заготівельна	-
010	Токарна чорнова	Верстат 16A20
015	Контроль ВТК	Стіл ВТК
020	Токарна напівчистова з ЧПК	DOOSAN PUMA 2600
025	Контроль ВТК	Стіл ВТК
030	Токарна чистова з ЧПК	DOOSAN PUMA 2600
035	Фрезерна з ЧПК	HAAS VF1
040	Слюсарна	Верстак слюсарний
045	Контроль ВТК	Стіл ВТК

Таблиця 2.2 – Деталізація переходів механічних операцій технологічного процесу виготовлення деталі гільза

Нумерація та назва операції	Зміст операції та переходів
010 Токарна чорнова	Установ А Встановити, закріпити, зняти 1. Підрізати торець Ø95/Ø83 як чисто; 2. Розточити отвір Ø83на прохід витримавши розмір Ø85H14; Установ Б Закріпити на розтискання за Ø85H14 1. Підрізати торець Ø95/Ø83 витримавши розмір 90 мм; 2. Точити Ø95 на прохід витримавши розмір Ø93,5 h14;
020 Токарна напівчистова з ЧПК	Установ А Встановити, закріпити, зняти Закріпити на розтискання за Ø85H14 1. Підрізати торець Ø93,5/Ø85 витримавши розмір 89h8 та шорсткість Ra 0,32мм 2. Точити Ø93,5 на прохід витримавши розмір Ø92,5h8 Установ Б Закріпити на затискання за Ø92,5 h8 1. Підрізати торець Ø92,5/Ø85 витримавши розмір 88u6 та шорсткість Ra 0,32; 2. Розточити Ø85H14 на прохід витримавши розмір Ø86E8 та шорсткість c
030 Токарна чистова за ЧПК	Закріпити на розтискній оправці за Ø86E8 1. Точити Ø92,5h8 на прохід витримавши Ø92 p6; 2. Точити фаску 3x15°.

### 2.3 Обґрунтування способу отримання, розрахунок та формулювання технічних вимог на виготовлення первинної заготовки

Вартість виготовлення заготовки значною мірою залежить від способу її отримання. Раціональний вибір способу отримання заготовки може підвищити коефіцієнт використання матеріалу та зменшити трудомісткість подальшої механічної обробки. Визначальними при виборі методу отримання заготовки є конфігурація, форма та розміри деталі. При виборі способу отримання заготовки слід прагнути до наближення форми та розмірів заготовки до форм та розмірів деталі

Заготовка повинна бути максимально наближеною по формі та розмірам до деталі, щоб зменшити її собівартість і коефіцієнт використання матеріалу.

Для ефективного вибору заготовки необхідно одночасно враховувати всі вищезгадані фактори.

Використовуючи літературу [40] проведемо розрахунки заготовки.

З огляду на конфігурацію деталі виглядає доцільним у якості вихідної заготовки отбрати труний прокат. Згідно стандарту ДСТУ 3667-97, Точність діаметральних та лінійних розмірів гарячекатаного прокату відповідає 12-14-му квалітету, холоднотягнутого - 9-12-му квалітету.

Розглянемо деякі варіанти можливих ескізів заготовки трубного гарячекатаного прокату.

1) За ДСТУ 3667-97 гарячекатаний прокат сталі 40Х13 має товщину стінки 12 мм, загальна маса одного погонного метра заготовки складає 24,57 кг. Оскільки для промислових замовників відвантаження продукції металургійного комбінату здійснюється кратно, довжини труби, при визначенні загальної маси заготовки врахуємо що її ваго за 4 м буде складати 98,23 кг (рис.2.1).



Рисунок 2.1 – Ескіз заготовки з гарячекатаного прокату

Коефіцієнт використання матеріалу [40]:

$$K_{BK} = \frac{M_d}{M_{zag}} \quad (2.1)$$

де:  $M_d$  – маса деталі (по завданню);

$M_{\text{заг}}$  – маса заготовки, яка визначається за формулою:

$$M_{\text{заг}} = V \times r \quad (2.2)$$

де:  $V$  – об'єм заготовки,  $\text{мм}^3$ ;

$r = 7,65 \cdot 10^{-6}$  – питома вага матеріалу деталі,  $\text{кг}/\text{мм}^3$ .

Так як заготовка – труба, то її масу будемо визначати шляхом віднімання об'єму меншого циліндра від об'єму більшого:

$$V = V_1 - V_2 \quad (2.3)$$

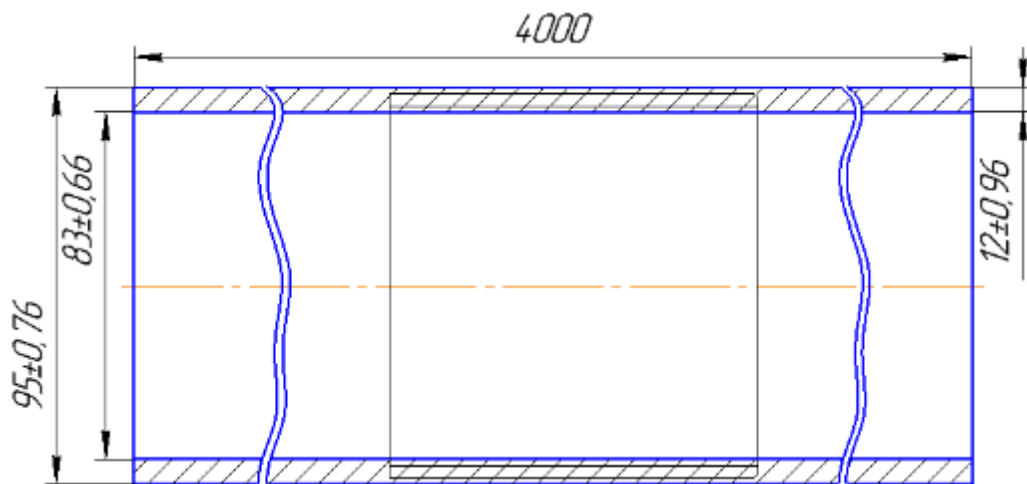
$$V_1 = \pi \cdot r^2 \cdot h = 3,14 \cdot 47,5^2 \cdot 93 = 658870 \text{ мм}^3$$

$$V_2 = \pi \cdot r^2 \cdot h = 3,14 \cdot 41,5^2 \cdot 93 = 502931 \text{ мм}^3$$

$$V = V_1 - V_2 = 658870 - 502931 = 155939 \text{ мм}^3$$

$$M_{\text{заг}} = V \times r = 155939 \cdot 7,65 \cdot 10^{-6} = 1,2 \text{ кг}$$

$$K_{\text{ВК}} = \frac{M_{\text{д}}}{M_{\text{заг}}} = \frac{0,55}{1,2} = 0,46;$$



1. Клас заготовки – 6
2. Кривизна будь-якої ділянки труби на 1 м довжини не повинна перевищувати 1 мм
3. Твердість –  $\text{HV } 10^{-1} = 217 \text{ МПа}$

Рисунок 2.2 – Кресленик заготовки для деталі гільза з технічними вимогами

## 2.4 Розрахунок припусків на оброблення поверхні обертання

Виконаємо розрахунок припуску для операції 0Припуски на операції чорнове точіння для діаметрального розміру  $\varnothing 92 \begin{matrix} +0,059 \\ +0,037 \end{matrix}$  розрахуємо за допомогою ЕОМ

Заносимо вихідні данні до програми(див. рис.2.3)

Рисунок 2.3 – Вихідні дані

Результати розрахунку покажемо у вигляді копії зображення екрану ЕОМ(див. рис. 2.4)

Расчётные данные							Окончательно принятые данные для детали				
	Rz, мкм	h, мкм	Погр., мкм	z(min),мкм	d(min),мм	Td, мкм	d(max),мм	d(min),мм	z(max),мкм	z(min),мкм	
Прокат	125	100	88	---	92,3532	2200	94,55	92,35	---	---	
Точен. тонк.	3,2	0	0	313	92,0402	35	92,075	92,04	2475	310	
Шлиф. тонк.	0,8	2	0	3,2	92,037	0,022	92,037022	92,037	37,978	3	
							Суммарные припуски, мкм		2512,978	313	

Рисунок 2.4 – Розрахунок припусків

## 2.5 Призначення та обґрунтування схем базування та закріплення заготовки

Обираємо операції 020 Токарна напівчистова з ЧПК, та 030 Токарна чистова з ЧПК для подальшого розгляду. На операції 020 здійснюється токарна обробка діаметру  $\varnothing 95$  мм та забезпечується лінійний розмір L90, та розточування внутрішньої циліндричної поверхні  $\varnothing 83$  мм, з дотриманням лінійного розміру L90 мм.



Проведемо аналіз способів закріплень та базування заготовки на розглянутій операції. Під час механічної операції виконується обробка (внутрішній) діаметр  $\varnothing 83$  мм, тому затиснення деталі може бути здійснене з використанням зовнішніх циліндричних поверхонь заготовки. Діаметральними розмірами що задовільняє можливість закріплення є  $\varnothing 95$  мм та  $\varnothing 83$ .

Заготовка закріплюється на затискання з упором в торець, який виконує функцію встановлювальної бази в той час як циліндрична поверхня буде реалізовувати подвійну опору базу.

Виконаємо аналіз закріплення та базування для токарної 030 з ЧПК.

Розглянемо можливі схеми базування і закріплення при обробці заготовки.

З огляду на конструкцію деталі найкраще вионати кріплення заготовки трикулачковому патроні на розтиснення, що позбавить заготовку 5 ступенів вільності.

З закріпленням в трикулачковому патроні похибка базування у радіальному напрямі буде відсутня.

Визначимо похибку базування на розмір  $L = 3$  та  $L = 4$  мм, що визначається допуском на розмір  $L = 23$  мм:

$$\varepsilon_{63,4} = T_{13} = - 0,43 < T_{3,4} = + 0,52 \text{ мм.}$$

Можемо дійти висновку що похибки базування буде менше ніж значення допуску.

Розглянемо альтернативний спосіб закріплення заготовки.

Похибка базування на розмір  $L = 3$  та  $L = 4$  мм визначається допуском на розмір  $L = 13$  мм:

$$\varepsilon_{63,4} = T_{13} = - 0,43 < T_{3,4} = + 0,1 \text{ мм.}$$

Значення допуску є менше значення похибки.

У порівнянні цих двох методів краще буде використовувати перший, оскільки в ньому буде більша площа контакту деталі з патроном. Таким чином, ми обираємо перший спосіб закріплення та базування.

## 2.6 Обґрунтування та вибір моделей металорізальних верстатів

Підбір верстатів для механічних операцій виконуємо з дотриманням наступних вимог методичних вказівок [42]. Необхідно:

- Врахувати методи оброблення поверхонь деталі;
- Визначити чи є достатньою потужність двигуна обраного металорізального для здійснення процесу різання, та чи буде забезпечена потужність різання.
- Звернути увагу на габарити робочої зони верстату та достатність простору для проведення необхідного оброблення якомога більшого числа поверхонь за 1 установ;
- Переконатися що обраний верстат відповідає визначеному типу виробництва й його використання є доцільним;
- Уточнити чи кількість різальних інструментів необхідних для механічної операції не має перевищувати ємність магазину обраного верстата.

У базовому технологічному процесі для токарної обробки використовуються токарно гвинторізні верстати моделі 16К20, що призначені для токарної обробки зовнішніх (діаметром  $> 400$  мм) та внутрішніх поверхонь (довжиною  $> 1000$  мм) зі ступінчатими і криволінійними профілями в осьових перерізах. Для проведення модернізації обладнання на механічних операціях 020 Токарна напівчистова з ЧПК та 030 Токарна чистова з ЧПК визначаємо що токарний верстат DOOSAN PUMA 2600 відповідає технологічним вимогам на розглянуті операції. У таблиці 2.3 виконаємо порівняння характеристик обох верстатів.

Таблиця 2.3 – Порівняння характеристик верстатів токарно-гвинторізного верстата 16К20 та токарного обробляючого центру DOOSAN PUMA 2600

<b>Характеристики</b>	<b>Одиниця вимірювання</b>	<b>16K20</b>	<b>DOOSAN PUMA 2600</b>
Частота обертання	об/хв	2500	4000
Максимальний діаметр обробки	мм	320	480
Потужність	кВт	11	25
Довжина обробки	мм	1000	725
Місткість магазину інструменту	шт	4	12
Габаритні розміри верстата	мм	3700×3000×2100	3870×1860×1900
Вага верстата	кг	4000	5500

Таким чином, можемо зробити висновок що обробляючий центр DOOSAN PUMA 2600 перевищує за характеристиками токарно гвинторізний верстат що до удосконалення технологічного процесу використовувався на токарній операції. Тому призначимо верстат DOOSAN PUMA 2600 та токарну напівчистову та токарну чистову операції. Використання системи ЧПК дозволяє збільшити продуктивність та точність обробки.

На механічній операції 035 Фрезерна з ЧПК доцільно замінити 6P82Г на верстат HAAS VF1. HAAS який задовольняє цілком умовам заданого виробництва, і дозволить виконати необхідну механічну обробку. Порівняємо його з фрезерним верстатом 6P82Г, що застосовується для обробки у базовому тех процесі для обробки деталі:

Таблиця 2.4 – Порівняльна характеристика 6P82Г та HAAS VF1

<b>Характеристика</b>	<b>Одиниці вимірювання</b>	<b>6P82Г</b>	<b>HAAS VF1</b>
Частота обертання	об/хв	2500	8100
Кількість інструментів	шт.	12	21
Хід X/Y/Z	мм	600/400/1500	508/406/508
Розмір столу	мм	400×1600	660x356
Швидкість робочої подачі	м/хв	6	16.5
Прискорений хід	м/хв	7	25.4
Потужність	кВт	8	22.4

Габаритні розміри	мм	3680×4170×3150	2570x2510x2570
Навантаження на стіл	кг	400	1361
Вага верстата	кг	6580	3539

Доцільно обрати HAAS VF1, оскільки він має більшу потужність, менші габарити, та більшу частоту обертання шпинделя. Крім того даний верстат оснащений більш новою системою ЧПК. Зовнішній вигляд верстатів представлений на рисунку 2.5

(a)



(b)



Рисунок 2.5 – Верстат Doosan PUMA 2600 (a) та HAAS VF1 (b)

2.7 Обґрунтування та вибір верстатних пристроїв, різального та вимірювального інструментів

З розвитком технологій та автоматизацією процедур вибору різального інструменту з'явилася можливість проводити автоматизований або напівавтоматизований, у діалоговому режимі, вибір різального інструмента від виробника. Компанія Sandvik Coromant запропонувала найбільш вдалий електронний каталог для вибору різального інструмент, що дозволяє врахувати усі аспекти вибору різального інструменту. Тож для автоматизованого вибору різального інструменту скористаємося програми продуктом Sandvik Coromant “ToolGuide”.

Виконаємо автоматизований вибір різального інструменту на операцію 020 Токарна з ЧПК.

Першим кроком при виборі різального інструменту є визначення типу оброблюваного матеріалу. Згідно кресленика матеріалом заготовки є сталь 40X13 у англійській версії програми це відповідає і сталі 40Ch13 (рис.2.6.). Обираємо верстат, з каталогу програми Sandvik Coromant Tool Guide, що відповідає потужності призначеного верстату та максимальній частоті обертання шпинделя, та призначаємо припуск на механічну обробку для токарної напівчистої операції 020 з ЧПК. Після запуску пошуку за сформованим запитом програмою Tool Guide було виведено результат з переліком запропонованих варіантів (рис.2.6).

The screenshot displays the Sandvik Coromant Tool Guide interface. The main content is divided into four panels: 'CYLINDRICAL SURFACE', 'TURNING EXTERNAL ONLY LONGITUDINAL / INDEXABLE', 'CUTTING DATA', and 'RESULTS'.

- CYLINDRICAL SURFACE:** Shows a 3D model of a cylindrical part with a 'P' material designation. Below it, a 'Lethe U3 - Medium (8-12" chuck)' tool holder is selected. Machining parameters include: Machined diameter start (95 mm), Machined diameter end (93 mm), Machined length (90 mm), and Roughness value longitudinal (6.3 µm).
- TURNING EXTERNAL ONLY LONGITUDINAL / INDEXABLE:** Displays a list of tool options. The selected tool is 'T-Max P' with part number 'DSBN 2020K 12' and insert 'SNMG 12 04 16 PM 4335'. The tool has a rectangular shank (metric: 20 x 20) and a 71.5 Footed design. The machining time is 03:17:10U.
- CUTTING DATA:** Shows cutting parameters for 'STRPS' (1) finishing. Cutting speed is 186 m/min, feed per revolution is 0.068 mm, and depth of cut is 1 mm. Carbon dioxide emission per component is 25.1 g, and work per component is 0.0627 kWh.
- RESULTS:** A list of 10 recommended tool options, each with a 3D model, material designation, part number, and performance metrics like '100%' and '00:17:10U'.

Рисунок 2.6 – Результат визначення варіанту різального інструменту для операції 020 Токарна напівчистова з ЧПК (для зовнішнього повздовжнього точіння)

У результаті автоматизованого підбору програмі Tool Guide було визначено, що найбільш вдалим варіантом різальна пластина SNMG 12 04 16-PM 4335, основні характеристики якої наведені у таблиці 2.5 а розгорнуті характеристики у Додатку Г

Таблиця 2.5 – Геометричні параметри змінних не переточуваних пластин (напівчистова обробка)

Маркування пластини	Головний кут в плані ( $\phi^\circ$ )	Кут при вершині ( $\epsilon^\circ$ )	Допоміжний кут в плані ( $\phi'^\circ$ )	Задній кут ( $\alpha^\circ$ )	Радіус при вершині ( $r$ , мм)
SNMG 12 04 16-PM 4335	45	90	45	0	1,6

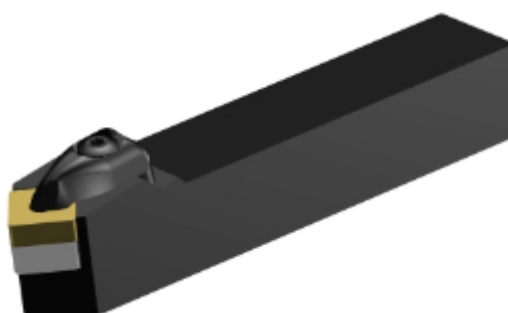


Рисунок 2.7 – Маркування корпусу різця для напівчистої обробки DSDNN 2020K 12

З маркування корпусу різця випливає що це різець для зовнішньої токарної обробки, яким може однаково використовуватися, як правий, так і лівий різець, завдяки центруванню посадкового місця пластини по вісі державки та використання квадратних пластин (Рис.2.8). Різець оснащений жорсткою системою прихвату, що фіксує різальну пластинку з гори і кріпиться гвинтом до корпусу державки, з посадковим місцем для квадратної різальної пластинки, поперечний переріз державки 20x20 мм, довжина 125 мм.

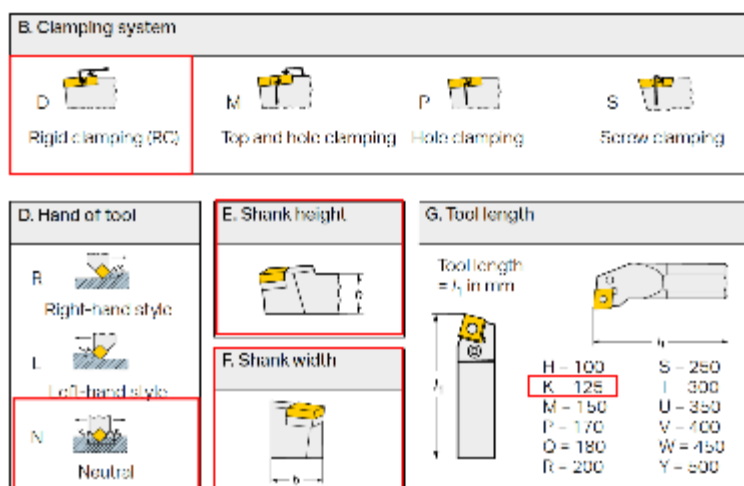


Рисунок 2.8.- Схема декодування маркування різця

Визначимо конструкцію та різальну пластинку для розточування циліндричного отвору деталі гільза, виконавши той самий алгоритм дій (Додаток Г)

Таблиця 2.6 – Геометричні параметри змінних не переточуваних пластин для розточування (напівчистова обробка)

Маркування пластини	Головний кут в плані ( $\phi^\circ$ )	Кут при вершині ( $\epsilon^\circ$ )	Допоміжний кут в плані ( $\phi^\circ$ )	Задній кут ( $\alpha^\circ$ )	Радіус при вершині ( $r$ , мм)
SCMT 12 04 08-MR 2035	45	90	45	7	0,8



Рисунок 2.9 - Маркування корпусу різця для напівчистої обробки A32T-SSKCR 12

Маркування корпус різця вказує на те що це права сталева державка з внутрішнім каналом для підводу ЗОР, діаметром 32 мм, та довжиною 300 мм. Кріплення різальної пластини здійснюється гвинтом через центральний отвір пластини квадратної форми. Підведемо підсумок визначеного різального інструменту виконавши зведення отримані дані у таблицю 2.7

Таблиця 2.7 – Різальний, вимірювальний та допоміжний інструмент на операції 020 Токарна з ЧПК

Номер переходу	Адаптер	Пластинка	Державка
1. Підрізати торець Ø95/Ø83 як чисто	Не потрібен	SCMT 12 04 08-MR 2035	A32T-SSKCR 12
2. Розточити отвір Ø83 на прохід витримавши розмір Ø85H14;			
3. Підрізати торець Ø95/Ø83 витримавши розмір 90 мм;	Не потрібен	SNMG 12 04 16-PM 4335	DSDNN 2020K 12
4. Точити Ø95 на прохід витримавши розмір Ø93,5 h14;			
Вимірювальний та допоміжний інструмент	Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-80; Штангенциркуль ШЦ-II-300-0,1 ГОСТ 166-80 Трьохкулачковий самоцентруючийся патрон 7100-0011 ГОСТ 2675-80.		

Виконаємо автоматизований вибір різального інструменту на операцію 030 Токарна з ЧПК.

У результаті автоматизованого підбору програмі Tool Guide було визначено, що найбільш вдалим варіантом різальна пластинка DCMT 07 02 04-MM 1125 для токарної обробки зовнішньої циліндричної поверхні, основні характеристики якої наведені у таблиці 2.8 а розгорнуті характеристики у Додатку Г

Таблиця 2.8 – Геометричні параметри змінних не переточуваних пластин (чистова обробка)

Маркування пластини	Головний кут в плані ( $\varphi^\circ$ )	Кут при вершині ( $\varepsilon^\circ$ )	Допоміжний кут в плані ( $\varphi'^\circ$ )	Задній кут ( $\alpha^\circ$ )	Радіус при вершині ( $r$ , мм)
DCMT 07 02 04-MM 1125	93	55	32	7	0,4

Визначимо різальну пластину для обробки внутрішньої циліндричної при розточуванні (табл.2.9).

Таблиця 2.9 – Геометричні параметри змінних не переточуваних пластин (чистова обробка) розточування

Маркування пластини	Головний кут в плані ( $\varphi^\circ$ )	Кут при вершині ( $\varepsilon^\circ$ )	Допоміжний кут в плані ( $\varphi'^\circ$ )	Задній кут ( $\alpha^\circ$ )	Радіус при вершині ( $r$ , мм)
TCMT 11 03 04-MM 1125	91	60	29	7	0,4



Запишемо узагальнюючу таблицю необхідного різального інструменту для чистової стадії оброблення на операції 030 Токарна з ЧПК (табл.2.10)

Таблиця 2.10 – Різальний, вимірювальний та допоміжний інструмент на операції 030 Токарна з ЧПК

Номер переходу	Адаптер	Пластинка	Державка
1. Підрізати торець Ø93,5/Ø85 витримавши розмір 89h8 та шорсткість Ra 0,32мм	Не потрібен	DCMT 07 02 04-MM 1125	SDJCR 2020K 07
2. Точити Ø93,5 на прохід витримавши розмір Ø92,5 h8			
3. Підрізати торець Ø92,5/Ø85 витримавши розмір 88u6 та шорсткість Ra 0,32;	Не потрібен	A25T-STFCR 11-RB1	TCMT 11 03 04-MM 1125
4. Розточити Ø85H14 на прохід витримавши розмір Ø86E8 та шорсткість Ra 0,32			
5. Точити Ø92,5h8 на прохід витримавши Ø92 p6;			
6. Точити фаску 3x15°.			
Вимірювальний та допоміжний інструмент	Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-80; Мікрометр МР-100 Трьохкулачковий самоцентруючийся патрон 7100-0011 ГОСТ 2675-80.		

## 2.8 Визначення режимів різання та технічне нормування операцій

Оскільки програма Sandvik Tool Guide є автоматизованим програмним продуктом оптимізованим під вибір раціональних режимів різання для різального інструменту виробництва компанії Сандвік. Тож програму були запропоновані режими різання для обробки поверхонь на операціях 020 Токарна з ЧПК та 030 Токарна з ЧПК (рис.2.10).

The screenshot shows the Sandvik Coromant software interface. At the top, there is a search bar and navigation tabs: Overview, Solution board, Alternatives, and Recent tools. The main content area displays cutting parameters for a turning operation. The parameters are organized into a table with a legend indicating the operation is 'Finishing'.

Parameter	Value
VC (m/min) CUTTING SPEED	166
FN (mm) FEED PER REVOLUTION	0,566
NOPAP (NOPAP) NUMBER OF PASSES IN AP DIRECTION	1
AP (mm) DEPTH OF CUT	1
DMS (mm) MACHINED DIAMETER START	95
DME (mm) MACHINED DIAMETER END	93
RPMX (1/min) ROTATIONAL SPEED MAXIMUM	569
PPCX (kW) MAXIMUM CUTTING POWER	4,94
MMCX (Nm) MAXIMUM CUTTING TORQUE	83

The legend indicates the operation is 'Finishing'.

Рисунок 2.10 – Режими різання для зовнішнього циліндричного точіння на операції 020 Токарна з ЧПК.

Узагальнимо отримані результати автоматизованого визначення режимів різання, розрахунку припуску, часу та потужності різання за усіма переходами операції 020 Токарна з ЧПК (табл.2.11).

Таблиця 2.11 – Режими різання на операції 020 Токарна з ЧПК

Номер переходу	t, мм	Ra, мкм	n, об/хв	V, м/хв	i	f, мм/об	L, мм	T <sub>o</sub> , хв	T <sub>мд</sub> , хв	N, кВт
1. Підрізати торець Ø95/Ø83 як чисто	1	6,3	246	195	1	0,566	7,5	0,083	0,01	5,92
2. Розточити отвір Ø83на прохід витримавши розмір Ø85H14;	1	6,3	362	97	1	0,311	90	0,8	0,03	2,01
3.Підрізати торець Ø95/Ø83 витримавши розмір 90 мм;	1	6,3	246	195	1	0,566	7,5	0,083	0,01	5,92
4. Точити Ø95 на прохід витримавши розмір Ø93,5 h14;	1	6,3	569	166	1	0,566	90	0,28	0,009	4,94
Разом								1,24	0,12	

Систематизуємо результат автоматизованого визначення режимів різання, розрахунку припуску, часу та потужності різання за усіма переходами операції 030 Токарна з ЧПК (табл.2.12).

Таблиця 2.12 – Режими різання на операції 030 Токарна з ЧПК

Номер переходу	t, мм	Ra, мкк	n, об/хв	V, м/хв	i	f, мм/об	L мм	To хв	Tмд хв	N, кВт
1. Підрізати торець Ø93,5/Ø85 витримавши розмір 89h8 та шорсткість Ra 0,32мм	0,5	0,32	884	255	1	0,0708	2	0,02	0,005	0,71
2. Точити Ø93,5 на прохід витримавши розмір Ø92,5 h8	0,5	0,32	884	255	1	0,0708	86	1,26	0,02	0,71
3. Підрізати торець Ø92,5/Ø85 витримавши розмір 88u6 та шорсткість Ra 0,32;	0,5	0,32	884	255	1	0,0708	2	0,02	0,005	0,71
4.Розточити Ø85H14 на прохід витримавши розмір Ø86E8 та шорсткість Ra 0,32	0,5	0,32	458	124	1	0,0708	23	2,46	0,1	0,43
5.Точити Ø92,5h8 на прохід витримавши Ø92 p6;	0,5	0,32	884	255	1	0,0708	86	1,26	0,02	0,71
6. Точити фаску 3x15°.	0,5	0,32	337	250	1	0.338	1,5	0,02	0,005	0,84
<b>Разом</b>								<b>5,02</b>	<b>0,36</b>	

Виконаємо технічне нормування операцій 020 Токарна з ЧПК та 030 Токарна з ЧПК.

Розрахунки виконуємо використовуючи ЕОМ та отримані дані в програмі «ToolGuide».

Оформимо дані для технічного нормування операцій механічної обробки в узагальнюючу таблицю для зручності виконання розрахунку (Табл.2.13).

Використовуючи дані спочатку необхідно визначити норму штучного часу:

$T_{шт}$  – норма штучного часу – це час на виконання об'єму праці, що дорівнює одиниці нормування.

$$T_{шт} = (T_{ца} + T_d \cdot K) \cdot \left( 1 + \frac{(\alpha_{тех} + \alpha_{орг} + \alpha_{отл})}{100} \right), \quad (2.4)$$

Таблиця 2.13 – Вхідні дані для нормування операцій

Вхідні дані	020 Токарна з ЧПК	030 Токарна з ЧПК
Верстат	Токарний верстат з ЧПК Doosan Puma 2600	
Оснащення	Трьохкулачковий самоцентруючийся патрон 7100-0011 ГОСТ 2675-80	
Різальний інструмент	різець прохідний, різець розточний	різець прохідний, різець розточний,
Вимірювальний інструмент	Штангенциркулі ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-80;	Штангенцикуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-80; Мікрометр МР-100
Основний час $T_o$ , хв	1,24 хв	5,02 хв
Машинно-допоміжний час $T_{мд}$ , хв	0,12 хв	0,36 хв

де  $T_{ца}$  – це час циклу автоматичної роботи верстату по заданій програмі.

$K$  – поправочний коефіцієнт на час в залежності від партії оброблюваних деталей у серійному виробництві.

$T_{ца}$  розраховуємо за формулою:

$$T_{ца} = \Sigma T_o \cdot \Sigma T_{мд}, \quad (2.5)$$

$(\alpha_{тех} + \alpha_{орг} + \alpha_{отл})$  - норма часу на організаційно-технічне обслуговування, відпочинок та особисті потреби (визначається за нормативами та у формулу підставляється у відсотках). Цей час складає 8% від оперативного часу  $T_{оп}$ .

$T_{оп}$  – це час, що витрачається на виконання однієї технологічної операції.

$T_d$  – норма допоміжного часу – це час на дії, які дають можливість виконувати основну роботу

$$T_d = T_{вст} + T_{оп} + T_{вим}, \quad (2.6)$$

де  $T_{вст}$  – норма допоміжного часу на установку та зняття заготовки.

$$T_{вст} = 0,1 \text{ хв};$$

$T_{оп}$  – Допоміжний час, пов'язаний з операцією, що містить у собі час на вмикання та вимикання верстата, перевірку повернення інструменту в задану точку після обробки.

$$T_{оп} = 0,18 \text{ хв};$$

$T_{вим}$  – норма допоміжного часу на виконання контрольних вимірювань.

$$T_{вим} = 0,2 \text{ хв. Для операції 020 та } 0,52 \text{ хв для операції 035};$$

Визначаю норму штучно-калькуляційного часу  $T_{штк}$  за формулою:

$$T_{штк} = T_{шт} + \frac{T_{пз}}{n} \quad (2.7)$$

де  $n$  – кількість деталей в партії;

$T_{пз}$  – підготовчо-завершальний час – це час необхідний на підготовку робітників та засобів виробництва до виконання певної технологічної операції та приведення їх у первинний стан після її закінчення.

Підготовчо-заключний час на партію деталей для токарної обробки  $T_{пз} = 7 \text{ хв.}$

Виконуємо розрахунок та заносимо отримані дані у таблицю 2.14.

Таблиця 2.14 – Норми часу на токарні операції 020 та 030

	<b>020 Токарна з ЧПК</b>	<b>030 Токарна з ЧПК</b>
$T_o$	1,24	5,02
$T_{мд}$	0,12	0,36
$T_d$	0,48	0,8
$T_{шт}$	1,42	2,90
$T_{пз}$	7	7
$T_{штк}$	1,48	2,93

## 2.9 Висновок

1. На основі літературного огляду наукових публікацій можна зробити висновок що удосконалення технологічного процесу шляхом заміни застарілого обладнання на більш сучасне без одночасного автоматизованого вибору різального інструменту не є доцільним. Оскільки можливості сучасного металообробного обладнання можуть бути розкриті лише при використанні сучасного різального інструменту.

2. На основі аналізу варіантів технологічного процесу було визначено, що структура технологічного процесу у частині механічних операцій може бути скорочена до токарної чорнової, токарної (напівчистової), токарної чистої та фрезерної операції.

3. Було визначено, що найбільш економним варіантом заготовки є використання трубного прокату.

4. На основі розрахунків похибки базування, було визначено що запропонована структура технологічних операцій та схем базування та закріплення задовольняє вимогам точності до оброблюваних розмірів.

5. На основі автоматизованого вибору різального інструменту для операцій 020 Токарна з ЧПК та 030 Токарна з ЧПК було визначено продуктивний різальний інструмент та режими різання, що дозволило виконати нормування цих механічних операцій.

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ СПРЯМОВАНЕ НА УДОСКОНАЛЕННЯ ІСНУЮЧОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

#### 3.1 Методологія дослідження та планування експерименту

У розділі 2 поточної кваліфікаційної роботи було визначено геометричні параметри, конструкцію різального інструменту та режими різання. Предметом наукового пошуку у розділі 3 стане визначення раціональних режимів різання для обробки зовнішньої циліндричної поверхні Ø92 рб. Метою віртуального експерименту є перевірити запропоновані програмою Tool Guide режими різання на предмет забезпечення шорсткості обробленої поверхні та стійкості різального інструменту. Окрім наведених техніко економічних характеристик будуть вимірюватись температура різання та тангенційна складова сили різання.

Для виконання віртуального експерименту скористаємося методикою повнофакторного експерименту. У якості основи для складання плану експерименту скористаємося планом  $2^2$ . Таким чином для варіювання у рамках планування експерименту необхідно буде визначити рівні двох факторів, швидкості різання та подачі. За основу для визначення верхнього та нижнього рівнів факторів візьмемо значення швидкості різання та подачі визначені у програмі Tool Guide.

Методика повнофакторного експерименту передбачає варіювання усіх можливих варіантів рівнів факторів. Під фактором розуміємо технологічні параметри, що змінюються у ході експерименту. Такими факторами є швидкість різання, та подача. Відповідно рівнями факторів є значення які приймає фактор у тому чи іншому досліді. Виділяють декілька рівнів факторів. Зокрема, нульовим рівнем фактору визначено розрахункові значення швидкості різання та подачі, розраховані у інтерфейсі програми Sandvik Tool Service. Нижнім рівнем фактору є значення технологічного параметру на 10% менше ніж значення нульового рівня фактору. Верхнім рівнем фактору є значення технологічного параметру на 10% більше ніж значення нульового рівня фактору. Заповнимо таблицю матрицю планування експерименту, варіюючи рівні факторів швидкості різання та подачі (Табл. 3.1).

Таблиця 3.1 - Вихідні дані для планування експерименту

Назва фактору	Нульовий рівень фактору	Нижній рівень фактору	Верхній рівень фактору
Швидкість різання, (м/хв)	0	-1	+1
Подача, (мм/об)	0	-1	+1
Глибина різання, (мм)	const	const	const

Використаємо стандартну матрицю планування для повнофакторного експерименту  $2^2$  (табл. 3.2)

Таблиця 3.2 – Кодування факторів повнофакторного експерименту

№ дослідю	Швидкість різання, (м/хв)	Подача, (мм/об)	Глибина різання, (мм)**
1	+1	+1	Const
2	+1	-1	const
3	-1	+1	const
4	-1	-1	const
5	0	0	const

\*\* - значення глибини різання визначається зі звіту програми Sandvik Tool Guide.

Виконаємо обчислення верхніх та нижніх рівнів для обох факторів швидкості різання та подачі.

- визначимо нижній рівень швидкості різання згідно формули 3.1, та округливши до цілого:

$$VC_1 = VC_0 - 10\%, \quad (3.1)$$

де  $VC_0$  - значення швидкості різання визначене у програмі Tool Guide

Визначимо верхнього рівень швидкості різання згідно формули 3.1, та округливши до цілого:

$$VC_2 = VC_0 + 10\%, \quad (3.2)$$

Визначимо значення верхнього на нижнього рівнів факторам подачі керуючись аналогічним підходом.

$$VF_1 = VF_0 - 10\%, \quad (3.3)$$

де  $VF_0$  - значення подачі визначене у програмі Tool Guide

Визначимо верхнього рівень швидкості різання згідно формули 3.1, та округливши до цілого:

$$VF_2 = VF_0 + 10\%, \quad (3.4)$$



Виконаємо обчислення за формулами 3.1-3.4 та запишемо отримані значення у таблицю 3.3

Таблиця 3.3 – Декодування рівнів факторів для операції 030 Токарна з ЧПК

№ досліду	Швидкість різання, (м/хв)	Подача, (мм/об)	Глибина різання, (мм) **
1	281	0,078	const
2	281	0,064	const
3	230	0,078	const
4	230	0,064	const
5	255	0,0708	const

Для аналізу значущості чинників експериментального дослідження та їх впливу на відгуки застосовуємо дисперсійний аналіз (ANOVA) як інструмент програми Minitab19.

Дисперсійний аналіз є статистичний методом дослідження відмінності групових середніх значень у вибірці. Дисперсійний аналіз допомагає при порівнянні середніх значень трьох або більше груп, для виявлення статистично значущих відмінностей. Це дає дослідникам важливий інструмент для вивчення дисперсії даних і отримання глибоких висновків щодо порівнюваних груп.

Виконаємо підготовку матриці планування експерименту у форматі зручному для введення у програму для проведення віртуального експерименту Start. Для цього переведемо значення швидкості різання у частоту обертання шпинделя (табл.3.4).

Таблиця 3.4 – Таблиця варіювання режиму оброблення через частоту обертання шпинделя

№ досліду	Частота обертання шпинделя, (об/хв)	Подача, (мм/об)	Глибина різання, (мм) **
1	970	0,078	const
2	970	0,064	const
3	794	0,078	const
4	794	0,064	const
5	882	0,0708	const

Формалізуємо умови проведення віртуального експерименту (таюл.3.5)

Таблиця 3.5 – Умови проведення віртуального експерименту

Параметр	Значення
<b>Постійні параметри проведення експерименту</b>	
Матеріал деталі	Сталь 40X13
Діаметр обробки	92мм
Довжина обробки	86 мм
Шорсткість поверхні	Ra 0,32
Тип операції	Чистова токарна операція
Маркування пластини	DCMT 07 02 04-ММ 1125
Геометрія різальної пластини	Головний кут в плані ( $\varphi^\circ$ ) – 93 Кут при вершині ( $\varepsilon^\circ$ ) – 55 Задній кут ( $\alpha^\circ$ ) – 7 Радіус при вершині ( $r$ , мм) – 0,4
Матеріал пластини	Твердий сплав
<b>Змінні параметри віртуального експерименту (фактори)</b>	
Швидкість різання, м/хв	Від 230 до 281
Подача, мм/об	Від 0,064 до 0,078

Виконаємо остаточне упорядкування параметрів проведення віртуального експерименту заповнивши їх у таблицю 3.6.

Таблиця 3.6 – Узагальнена таблиця налаштування умов віртуального експерименту

Маркування пластини/ номер дослідів	Головний кут в плані ( $\varphi^\circ$ )	Кут при вершині ( $\varepsilon^\circ$ )	Допоміжний кут в плані ( $\varphi^\circ$ )	Задній кут ( $\alpha^\circ$ )	Радіус при вершині ( $r$ , мм)	Частота обертання, (об/хв)	Подача, (мм/об)	Глибина різання, (мм)
DCMT 07 02 04-ММ 1125								
1	93	55	32	7	0,4	970	0,078	0,5
2	93	55	32	7	0,4	970	0,064	0,5
3	93	55	32	7	0,4	794	0,078	0,5
4	93	55	32	7	0,4	794	0,064	0,5
5	93	55	32	7	0,4	882	0,0708	0,5

### 3.2 Експериментальне дослідження

Виконання віртуального експерименту починається із визначення граничних умов моделювання процесу різання, а саме вибору оброблюваного матеріалу та інструментального матеріалу різальної пластини. Оскільки у переліку наявних оброблюваних матеріалів відсутня сталь 40Х13, оберемо найближчий відповідник – сталь 20Х13. У якості інструментального матеріалу використаємо двокарбідний твердий сплав Т30К4 (рис.3.1).

Виконаємо налаштування та введення параметрів проведення віртуального експерименту згідно таблиці 3.6 (рис 3.2). Виконаємо подібні налаштування для усіх п'яти дослідів.

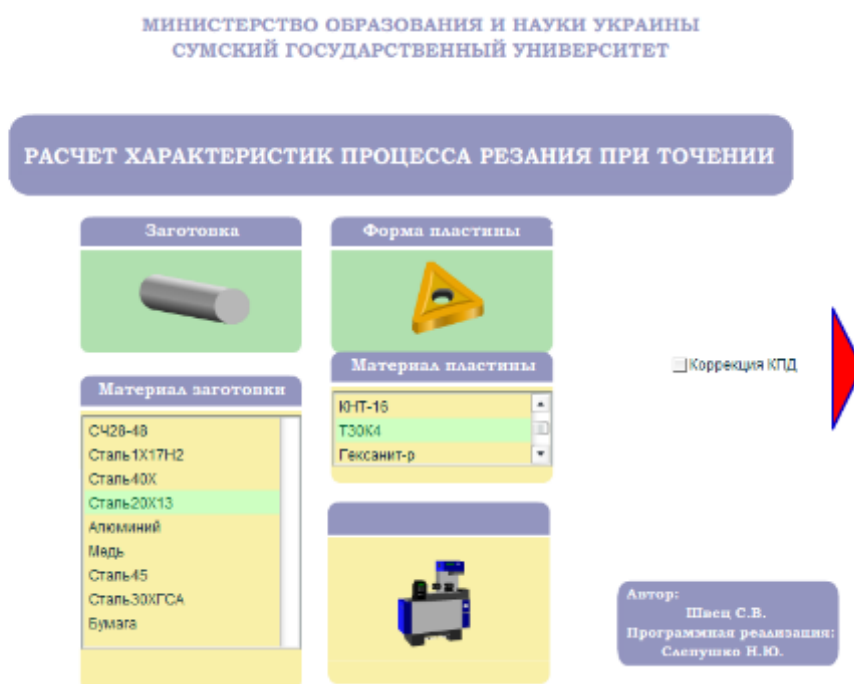


Рисунок 3.1 – Стартове вікно програми «Старт»

Заносимо необхідні дані у відповідні комірки програми «Старт». Та проводимо розрахунок для експерименту 1. Отримані дані по кожному експерименту заносимо у таблицю

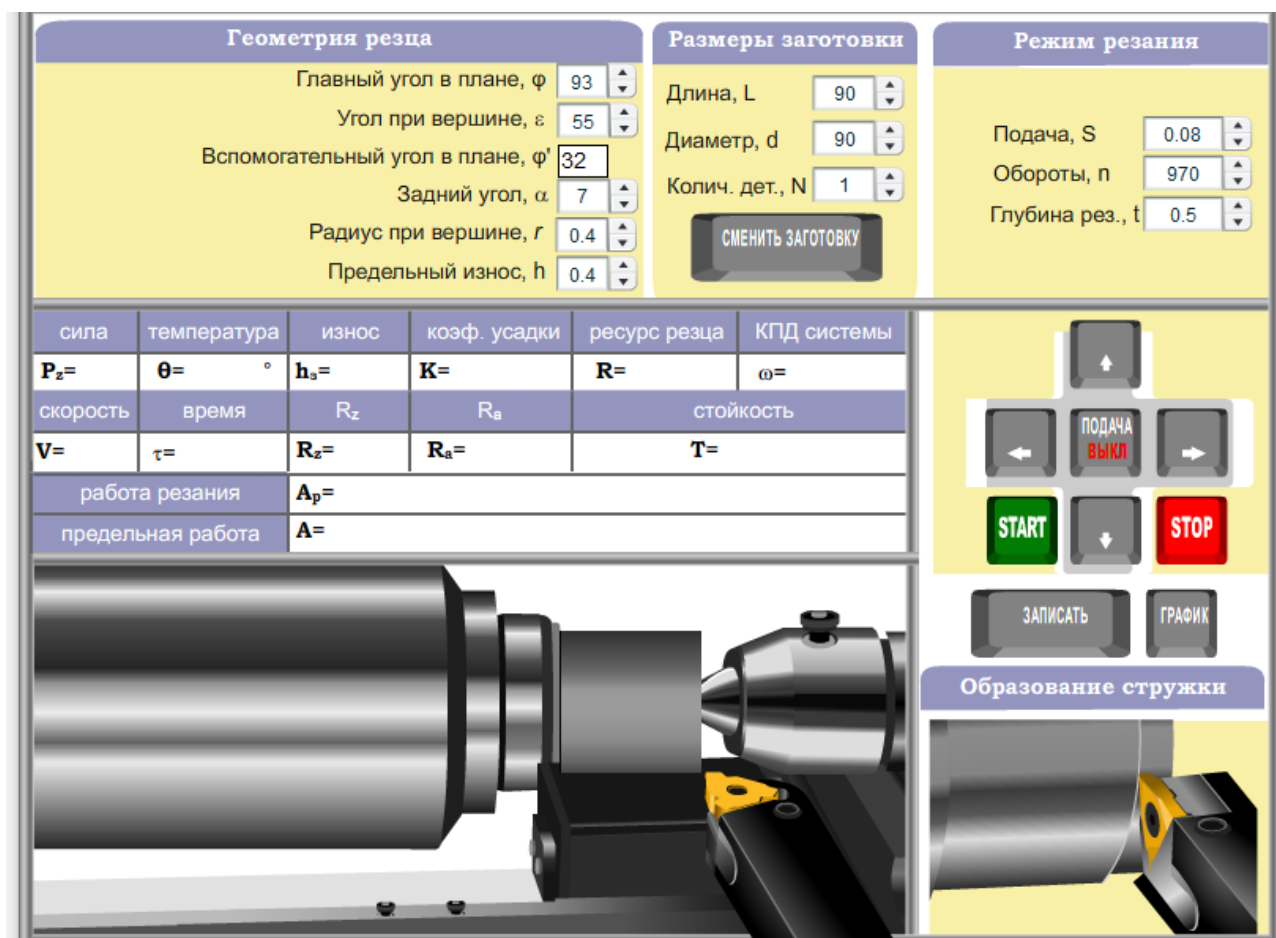


Рисунок 3.2 – Діалогове вікно налаштування програми Start для виконання віртуального експерименту у емуляторі процесу точіння

Таблиця 3.3 – Результати експерименту

№ досліду	Швидкість різання, (м/хв)	Подача, (мм/об)	Температура різання, (°C)	Шорсткість поверхні, Ra (мкм)	Стійкість інструменту, (хв)	Тангенційна складова сили різання, (Н)
1	281	0,0780	784	0,66	61,1	360
2	281	0,0640	765	0,51	69,2	320
3	230	0,0780	785	0,79	74,7	360
4	230	0,0640	766	0,60	84,6	320
5	255	0,0708	882	0,50	75,6	330

Для візуалізації залежності використаємо метод дисперсійного аналізу (ANOVA). Це статистичний метод що використовується для аналізу варіацій між середніми значеннями груп. Графіки для досліджених факторів зображено на рисунках 3.1-3.7.

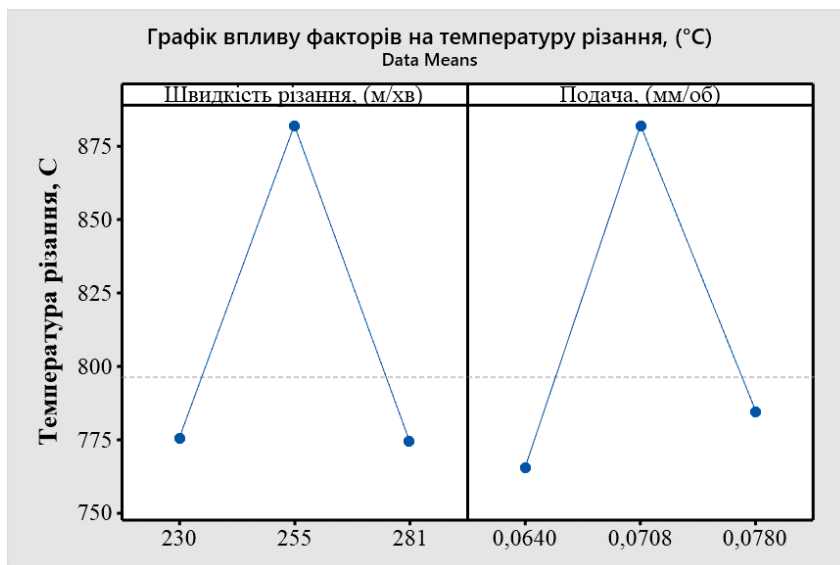


Рисунок 3.3 – Вплив режимів різання на температуру різання

З аналізу результатів експериментального дослідження та вимірювання температури різання встановлено, що зі зростанням швидкості різання збільшується і температура різання в діапазоні від 775 °C до 875 °C. Разом з тим помічено, що збільшенням подачі температура різання також зростає, що пов'язано зі збільшення товщини зрізаного шару матеріалу заготовки і як наслідок до зростання роботи яку необхідно виконати для пластичної деформації для відділення матеріалу заготовки. Збільшення роботи призводить до збільшення об'єму механічної енергії, що в подальшому трансформується у теплову енергію у зоні різання.

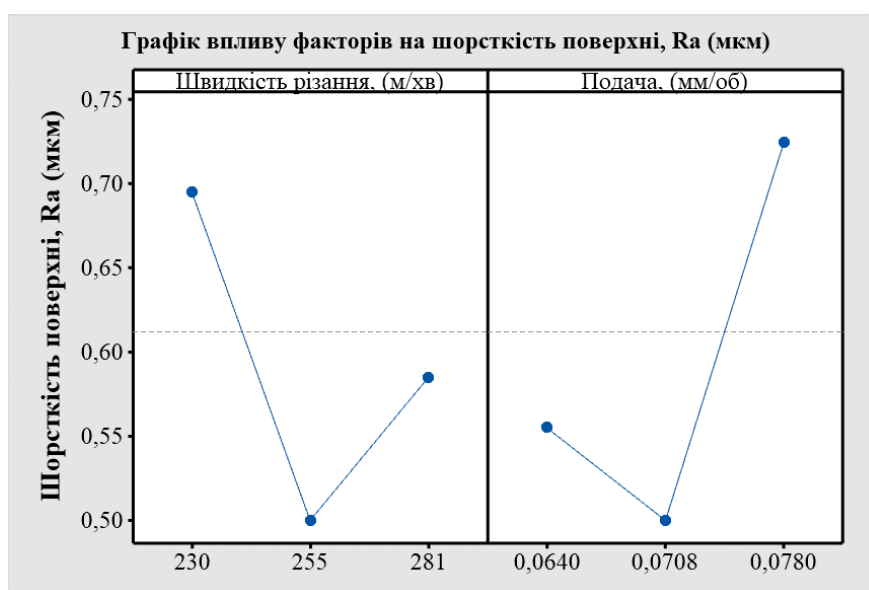


Рисунок 3.4 – Вплив режимів різання на температуру різання

Подальший аналіз отриманих результатів віртуального експерименту полягав у опрацюванні результатів вимірювання шорсткості поверхні. Контроль шорсткості здійснювався по параметру  $R_a$ , оскільки саме за цим параметром шорсткості регламентоване вимірювання мікрорельєфу обробленої поверхні згідно вимог креслення. За результатами вимірювання визначено, що шорсткість поверхні змінюється в діапазоні від  $R_a$  0,50 до  $R_a$  0,72 мкм, що задовольняє вимоги до чистової стадії обробки. З огляду на те що шорсткість поверхні не є визначальним параметром на чорновій стадії обробки, більш детальний аналіз цього параметра буде проведено для чистової стадії обробки.

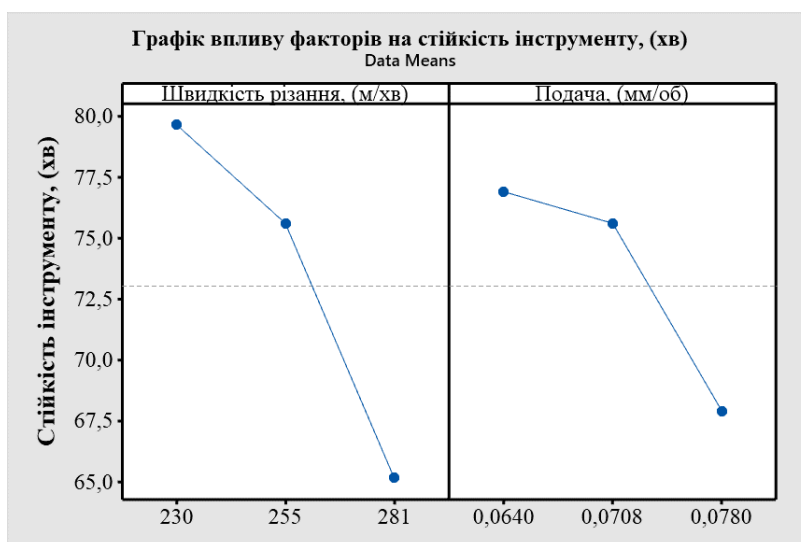


Рисунок 3.5 – Вплив режимів різання на стійкість різального інструменту

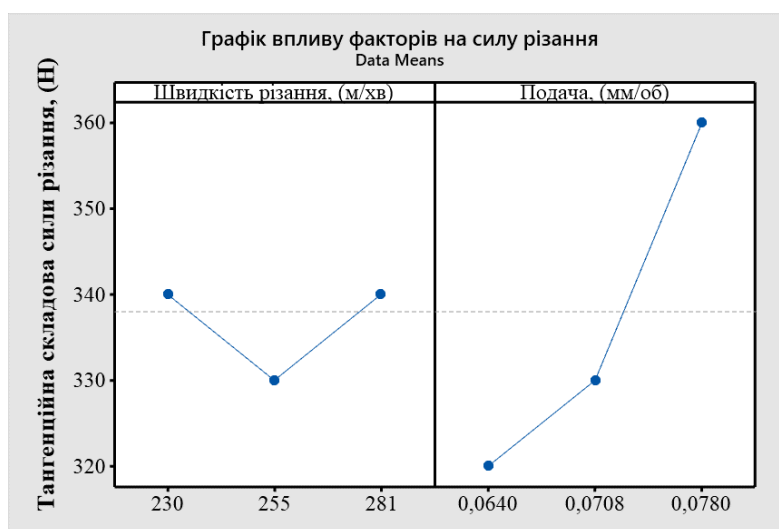


Рисунок 3.6 – Вплив режимів різання на тангенційну складову сили різання

З аналізу графіку тангенційної сили різання випливає що дана характеристика процесу різання змінюється від 320 до 360 Н. Найбільш суттєво на значення головної складової сили різання впливає зміна подачі. Зі зростанням подачі зростає і значення сили різання. Подібний ефект пов'язаний зі збільшенням товщини зрізуваного шару і як наслідок призводить до зростання роботи пластичної деформації необхідної для відділення стружки.

### 3.3 Обґрунтування вибору різального інструменту та режимів на основі результатів експерименту

Виходячи з результатів автоматизованого вибору з використанням «ToolGuide» найбільш прийнятними різальними пластинами є два варіанти. Для підбору оптимальних режимів різання на операції та інструменту. Виходячи з результатів віртуального експерименту вдалося обґрунтувати раціональні режими різання для чистового токарного оброблення зовнішньої циліндричної поверхні на операції 030 Токарна з ЧПК.

Програма автоматично корегує необхідні режими різання на заданій операції при заданих умовах. Скореговані режими різання та стійкість різального інструменту зазначено на рисунку 3.7

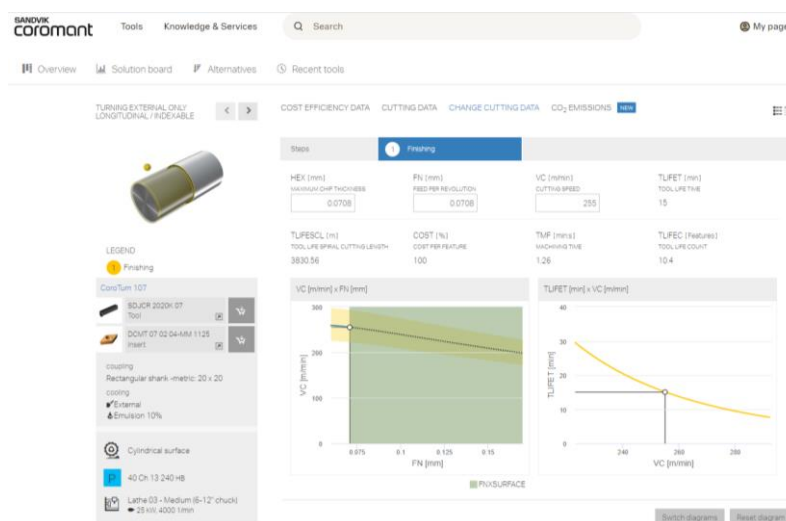


Рисунок 3.7– Результати автоматизованого розрахунку стійкості для пластини DCMT 07 02 04-MM 1125

Результати автоматизованого розрахунку у програмі Tool Guide засвідчують істотну різницю з результатами віртуального експерименту. Так за підсумками віртуального експерименту стійкість інструменту коливалася між 65 та 80 хвилинами.



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було виконано наступний обсяг робіт:

1. Було виконано аналіз службового призначення деталі, визначене призначення машини, вузла та деталі. Було проведено аналіз кресленика деталі у частині відповідності державним стандартам по оформленню конструкторської документації. Було визначено тип виробництва, та спосіб отримання заготовки. Проаналізовано існуючий технологічний процес виготовлення деталі, визначено його недоліки.

2. Проведено аналіз літературних джерел присвячений токарній обробці сталі, на високопродуктивному металооброблювальному обладнанні та сформульовано задачі наукового дослідження кваліфікаційної роботи.

3. Виконано удосконалення структури технологічного процесу виготовлення деталі гільза шляхом концентрації механічних операцій, що дозволило скоротити технологічний процес на дві операції у порівнянні за базовим технологічним процесом.

4. Реалізовано автоматизований вибір високопродуктивного різального інструменту для усіх переходів операцій 020 Токарна з ЧПК та 030 Токарна з ЧПК, що дозволило обрати доцільний варіант геометрії різальної пластини та різця, а тако визначити діапазони раціональних режимів різання.

5. Виконано планування експерименту та реалізовано віртуальний експеримент за методикою повнофакторного експерименту  $2^2$ , що дозволило провести п'ять дослідів.

6. У результаті виконання віртуального експерименту та обробки експериментальних даних за допомогою дисперсійного аналізу, було визначено, що для токарної обробки зовнішньої циліндричної поверхні  $\varnothing 92$  р6 раціонально призначити швидкість різання 255 м/хв та подачу 0,0708 мм/об при глибині різання 0,5 мм, що дозволяє забезпечити шорсткість обробки Ra 0,32 мкм.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Bekes, J.; Janac, A. Precision technology and three tendencies (in original: Presné technológie a tri tendencie). In Proceedings of the International Congress of Precision Machining, Praha, Czechoslovakia, 3–6 September 2003.

2. Bekes, J. Engineering technology of metal machining. In Original: Inžinierska Technológia Obrábania Kovov; ALFA: Bratislava, Czechoslovakia, 1981.

3. Checchi, A.; Costa, G.D.; Merrild, C.H.; Bissacco, G.; Hansen, H.N. Offline tool trajectory compensation for cutting forces induced errors in a portable machine tool. In Proceedings of the 17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations (CIRP CMMO), AMRC, Sheffield, UK, 13–14 June 2019; pp. 527–531.

4. Foremny, E.; Schenck, C.; Kuhfuss, B. Integrated ultrasonic driven balancer for ultra precision high speed machine tools. In Proceedings of the 3rd International Conference on System-Integrated Intelligence—New Challenges for Product and Production Engineering (SysInt), Paderborn Univ, Heinz Nixdorf Inst, Paderborn, Germany, 13–15 June 2016; pp. 316–323.

5. Shiou, F.J.; Ding, Z.L.; Lin, S.P. Reduction in the VolumetricWear of a Ball Polishing Tool Using Ultrasonic-Vibration-Assisted Polishing Process. *Lubricants* 2022, 10, 339.

6. Nekrasov, S.; Peterka, J.; Zhyhylii, D.; Dovichopolov, A.; Kolesnyk, V. Mathematical Estimation of Roughness Rz of Threaded Surface Obtained by Machining Method. *Mm Sci. J.* 2022, 2022, 5699–5703.

7. Sonia, P.; Jain, J.K.; Saxena, K.K. Influence of ultrasonic vibration assistance in manufacturing processes: A Review. *Mater. Manuf. Process.* 2021, 36, 1451–1475.

8. Zhao, C.Y.; Wang, X.B.; Zhao, B.; Jiao, F. Microstructure of High-Performance Aluminum Alloy Surface Processed by the Single- Excitation Same-Frequency Longitudinal-Torsional Coupled Ultrasonic Vibration Milling. *Materials* 2018, 11, 1975.

9. Zhang, Y.M.; Zhao, B.; Wang, Y.Q.; Zhao, B.B. The stability analysis of separated feed ultrasonic milling. *J. Vibroeng.* 2017, 19, 1062–1073.

10. Zou, Y.H.; Guo, S.J.; Li, H.Q.; Deng, X.F. Investigation on cutting performance in ultrasonic assisted helical milling of Ti6Al4V alloy by various parameters and cooling strategies. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2023, 126, 5123–5138.
11. Yi, S.C.; Qiao, G.C.; Zheng, W.; Zhou, M. Effect of crack propagation on surface formation mechanism and surface morphology evaluation of longitudinal-torsional composite ultrasonic mill grinding of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2023, 125, 5101–5117.
12. Jaskolski, P.; Nadolny, K.; Kukielka, K.; Kaplonek, W.; Pimenov, D.Y.; Sharma, S. Dimensional Analysis of Workpieces Machined Using Prototype Machine Tool Integrating 3D Scanning, Milling and Shaped Grinding. *Materials* 2020, 13, 5663.
13. Werner, A. Method for Enhanced Accuracy in Machining Free-Form Surfaces On Cnc Milling Machines. *Acta Mech. Autom.* 2022, 16, 103–110.
14. Martin, R.A.J.; Stephen, J.D.G.; Vinoth, A.; Muthu, E. Error analysis and point data processing of reconstructed surface by reverse engineering. In Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME)/1st International Conference on Recent Advances in Composite Materials (ICRACM), Chennai, India, 24–29 February 2020.
15. Kucera, D.; Linkeova, I.; Stejskal, M. The influence of CAD model continuity on accuracy and productivity of CNC machining. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2023, 124, 1115–1128.
16. Dong, J.S.; He, J.M.; Liu, S.; Wan, N.; Chang, Z.Y. A Multi-Scale Tool Orientation Generation Method for Freeform Surface Machining with Bull-Nose Tool. *Micromachines* 2023, 14, 1199. *Machines* 2023, 11, 946
17. Tang, Z.; Jiang, X.Y.; Zi, W.L.; Shen, X.; Zhang, D. Automatic Data Collecting and Application of the Touch Probing System on the CNC Machine Tool. *Math. Probl. Eng.* 2021, 2021, 19.
18. Nekrasov, S.; Zhyhylii, D.; Dovhopolov, A.; Karatas, M.A. Research on the manufacture and strength of the innovative joint of FRP machine parts. *J. Manuf. Process.* 2021, 72, 338–349.

19. Elmelegy, A.; Zahwi, S. Comparative study of error determination of machine tools. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2023, 124, 4575–4602.
20. Ward, R.; Sencer, B.; Jones, B.; Ozturk, E. Accurate prediction of machining feedrate and cycle times considering interpolator dynamics. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2021, 116, 417–438.
21. Holub, M.; Jankovych, R.; Vetiska, J.; Sramek, J.; Blecha, P.; Smolik, J.; Heinrich, P. Experimental Study of the Volumetric Error Effect on the Resulting Working Accuracy-Roundness. *Appl. Sci.* 2020, 10, 6233.
22. Lu, H.; Cheng, Q.; Zhang, X.B.; Liu, Q.; Qiao, Y.; Zhang, Y.Q. A Novel Geometric Error Compensation Method for Gantry-Moving CNC Machine Regarding Dominant Errors. *Processes* 2020, 8, 906.
23. Kolesnyk, V.; Peterka, J.; Kuruc, M.; Simna, V.; Moravcikova, J.; Vopat, T.; Lisovenko, D. Experimental Study of Drilling Temperature, Geometrical Errors and Thermal Expansion of Drill on Hole Accuracy When Drilling CFRP/Ti Alloy Stacks. *Materials* 2020, 13, 3232.
24. Soori, M. Deformation error compensation in 5-Axis milling operations of turbine blades. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2023, 45, 16.
25. Zhao, C.L.; Li, M.; Yang, J.B.; Ma, C.; Ma, Z.R. Research on the Measurement of Thermal Deformation of Tools on High-speed Machining Centers Based on Image Processing Technology. *Manuf. Technol.* 2022, 22, 484–493.
26. Dai, Y.; Li, Y.; Li, Z.L.; Wen, W.J.; Zhan, S.Q. Temperature measurement point optimization and experimental research for bi-rotary milling head of five-axis CNC machine tool. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2022, 121, 309–322.
27. Nguyen, D.K.; Huang, H.C.; Feng, T.C. Prediction of Thermal Deformation and Real-Time Error Compensation of a CNC Milling Machine in Cutting Processes. *Machines* 2023, 11, 248.
28. Mares, M.; Horejs, O.; Havlik, L. Thermal error compensation of a 5-axis machine tool using indigenous temperature sensors and CNC integrated Python code validated with a machined test piece. *Precis. Eng.-J. Int. Soc. Precis. Eng. Nanotechnol.* 2020, 66, 21–30.

29. Korpysa, J.; Kuczmaszewski, J.; Zagorski, I. Dimensional Accuracy and Surface Quality of AZ91D Magnesium Alloy Components after Precision Milling. *Materials* 2021, 14, 6446.
30. Rock, S. Predicting regenerative chatter in milling with hardware-in-the-loop simulation using a dextral-based cutting model. *Prod. Eng.-Res. Dev.* 2021, 15, 605–617.
31. Dvorak, J.; Cornelius, A.; Corson, G.; Zamoski, R.; Jacobs, L.; Penney, J.; Schmitz, T. A machining digital twin for hybrid manufacturing. *Manuf. Lett.* 2022, 33, 786–793.
32. Bhattacharyya, A.; Schmitz, T.L.; Payne, S.W.T.; Choudhury, P.R.; Schueller, J.K. Introducing engineering undergraduates to CNC machine tool error compensation. *Adv. Ind. Manuf. Eng.* 2022, 5, 11.
33. Jiang, J.L.; Li, B.R.; Lin, F.Y.; Zhang, H.; Ye, P.Q. Prediction and compensation strategy of contour error in multi-axis motion system. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2022, 119, 163–175.
34. Yeh, S.S.; Jiang, W.J. Development of Pitch Cycle-Based Iterative Learning Contour Control for Thread Milling Operations in CNC Machine Tools. *Appl. Sci.* 2023, 13, 6447.
35. Neshta, A.; Kryvoruchko, D.; Hatala, M.; Ivanov, V.; Botko, F.; Radchenko, S.; Mital, D. Technological Assurance of High-Efficiency Machining of Internal Rope Threads on Computer Numerical Control Milling Machines. *J. Manuf. Sci. Eng.-Trans. Asme* 2018, 140, 8.
36. Feng, C.H.; Guo, H.H.; Zhang, J.Y.; Huang, Y.G.; Huang, S. A systematic method of optimization of machining parameters considering energy consumption, machining time, and surface roughness with experimental analysis. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2022, 119, 7383–7401.
37. Hojati, F.; Azarhoushang, B.; Daneshi, A.; Khiabani, R.H. Prediction of Machining Condition Using Time Series Imaging and Deep Learning in Slot Milling of Titanium Alloy. *J. Manuf. Mater. Process.* 2022, 6, 145.

38. Hu, N.; Liu, Z.G.; Jiang, S.X.; Li, Q.Z.; Zhong, S.Q.; Chen, B.Q. Remaining Useful Life Prediction of Milling Tool Based on Pyramid CNN. Shock. Vib. 2023, 2023, 14.

39. Zhu, Z.Y.; Liu, R.L.; Zeng, Y.F. Tool wear condition monitoring based on multi-sensor integration and deep residual convolution network. Eng. Res. Express 2023, 5, 12.

40. Паливода Ю. Є. Заготовки у машинобудівному виробництві : навчально-методичний посібник / Паливода Ю.Є., Дячун А.Є. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2023. – 148 с.

41. Добрянський, С. С. Технологічні основи машинобудування. [Електронний ресурс]: підручник для студ. спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / С. С. Добрянський, Ю. М. Малафєєв; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 379 с.

42. Бойко, Ю. І. Технологія машинобудування. Курсове проектування: навч. посіб. / Ю. І. Бойко, О. А. Литвиненко. – Київ: НУХТ, 2018. – 195 с.