

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»  
Механіко-машинобудівний факультет  
Кафедра технологій машинобудування та матеріалознавства

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
**кваліфікаційної роботи ступеню магістра**

студента Головко Віталія Олександровича  
академічної групи 131М-22Н-1 ММФ  
спеціальності 131 Прикладна механіка  
за освітньо-науковою програмою «Наскрізний інжиніринг  
машинобудівного виробництва»

на тему: «Дослідження режимних параметрів токарної обробки деталі  
«Вал-шестерня» в різних САМ системах»

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від  
\_\_\_\_\_ за № \_\_\_\_\_

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
Кваліфікаційної роботи	Козечко В.А.			
розділів:				
Аналітичний	Козечко В.А.			
Технологічний	Козечко В.А.			
Спеціальний	Козечко В.А.			
Науково- дослідницький	Козечко В.А.			
Рецензент	Кривда В.В.			
Нормоконтролер	Дербаба В.А.			

Встановлено, що матеріали даної кваліфікаційної роботи містять чутливу інформацію щодо реальних об'єктів критичної інфраструктури України, національної безпеки і оборони України, зокрема відомості про їх місце розташування, службове призначення, конструкторську і технологічну документацію, описи конструкторських матеріалів та їх властивості, іншу додаткову літературу та посилання. У зв'язку з чим такі матеріали не підлягають відкритому оприлюдненню та мають зберігатися відповідно до встановленого режиму закладом освіти.

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**

завідувач кафедри

технологій машинобудування та матеріалознавства

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

В.А. Дербаб

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 року

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу

ступеню магістра

студенту Головко Віталія Олександровича

академічної групи 131М-22Н-1 ММФ

спеціальності 131 Прикладна механіка

за освітньо-науковою програмою «Наскрізний інжиніринг машинобудівного виробництва»

на тему: «Дослідження режимних параметрів токарної обробки деталі «Вал-шестерня» в різних САМ системах»

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від \_\_\_\_\_ за № \_\_\_\_\_

Розділ	Зміст	Термін виконання
Аналітичний	Аналіз і характеристики матеріалу, умови експлуатації та оцінка технологічності деталі «Вал»	06.02.2024-28.02.2024
Технологічний	Проектування та опрацювання детальної технології механічної обробки. Розробка комплекту документації	01.03.2024-31.03.2024
Спеціальний	Використовувані обладнання базування та контролю розмірів деталі на верстаті з ЧПК	01.04.2024-30.04.2024
Науково-дослідницький	Дослідження і розробка методики оптимізованої технології обробки деталі та режимних параметрів на верстаті з ЧПК	01.05.2024-20.05.2024

Завдання видано \_\_\_\_\_

Козечко В.А.

Дата видачі 15 січня 2024 р.

Дата подання до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_

Прийнято до виконання \_\_\_\_\_

В.О. Головко

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: \_\_\_ с, \_\_\_ рис, \_\_\_ табл., \_\_\_ додаток, \_\_\_ джерела.

Тема: «Дослідження режимних параметрів токарної обробки деталі «Вал-шестерня» в різних САМ системах».

Технологія, деталь, операція, формоутворення, обладнання з ЧПК, САД, САМ.

Поєднання токарно-фрезерних робіт на верстатах з ЧПК набуло значного поширення в сучасному машинобудуванні. Тому визначення оптимальної технології та траєкторій руху керованих агрегатів має актуальне значення при металообробці. Також актуальною є проблема застосування оптимізованих режимних параметрів при механічній обробці деталі, в спеціалізованих САМ-системах, при складанні технології виготовлення виробу.

Об'єкт дослідження у кваліфікаційній роботі – процеси формоутворення поверхонь у деталі машинобудівного призначення.

Предмет дослідження – стратегії програмного формоутворення поверхонь на обладнанні з ЧПК.

Метою кваліфікаційної роботи є порівняння оптимальних рухів формоутворення при обробці деталі на обладнанні з програмним керуванням при різних траєкторіях інструменту.

Методика досліджень – комп'ютерне моделювання операцій формоутворення на основі САМ-програми.

Результат роботи – експериментальні дані щодо режимних параметрів обробки поверхонь за різними стратегіями формоутворення. Визначена оптимальна стратегія формоутворення за умови врахування закладених при моделюванні початкових даних.

Наукова новизна кваліфікаційної роботи – визначення оптимальних режимних параметрів при точінні деталі вал на верстаті з ЧПК.

Практична цінність – рекомендації щодо застосування альтернативних технологічних методів виготовлення деталей на основі САМ-програм з урахуванням оптимізованих режимних параметрів при токарній обробці виробу на верстаті з ЧПК.

Робота пов'язана з науковим напрямом кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства та виконана відповідно договору про співпрацю та договором про нерозголошення конфіденційної інформації та комерційної таємниці з ТОВ «ДТМ-ІНЖИНІРИНГ».

## ВСТУП

В даний час зберігається тенденція, коли в ціні виробу значна частина становить вартість матеріалу та енергії. Однак, зниження частки механічної обробки, дозволяє відчутно знизити технологічну собівартість виробів, якщо використовувати заготовки з високим ступенем готовності та обладнання з широкими технологічними можливостями.

Значний ефект можливий від використання сучасного універсального інструменту і інструментальних матеріалів, що забезпечують високу швидкість різання і стійкість, що скорочує машинний час на обробку і час простою верстата в налагодженні.

При проектуванні технологічних процесів механічної обробки в сучасних умовах на перше місце виступають питання оптимізації багатьох, часто суперечливих факторів. Обсяг виробництва виробів повинен строго відповідати потребам ринку. Робота «на склад» руйнівна, тому структура технологічного процесу в цілому і кожної операції окремо, а також організація виробництва, повинні забезпечувати оптимальну продуктивність високу гнучкість виробництва.

Виходячи з цього, при проектуванні нових цехів необхідно забезпечити оптимальне співвідношення наявних універсальних верстатів напівавтоматів і верстатів з ЧПУ, що оснащуються переналагоджуваною оснащенням. Економічно обгрунтоване завантаження устаткування повинна забезпечуватися відповідною організацією виробничого процесу в цеху, заснованої на прогнозуванні та оперативному управлінні з використанням обчислювальної техніки, що дозволяє скоротити час на технологічну підготовку і простої верстатів у налагодженні.

# 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Характеристика об'єкта виробництва

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

## Таблиця 1.1 Хімічні властивості сталі 38ХА

---

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

розмірів деталі вимога технології механічної і термічної обробки.		
Відповідність показників базових поверхонь деталі (розміри, точність, шорсткість) вимогам установці обробки і контролю.	+	-
Відповідність оформлення робочого креслення деталі вимогам КД	+	-

Вимоги до робочих поверхонь деталі не є завищеними і відповідають їхньому службовому призначенням. Застосований матеріал забезпечує виконання вимог до механічних властивостей поверхонь і деталі в цілому і має гарні технологічними характеристиками як при обробці тиском, так і різанням.

В цілому, технологічність конструкції деталі Вал після якісного аналізу можна оцінити як гарну за основними показниками.

Крім якісних показників є ще й кількісні. Необхідно визначити показники технологічності конструкції валу.

Дані конструктивного аналізу деталі по поверхнях представлені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4. Конструктивний аналіз деталі

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Визначимо коефіцієнт уніфікації конструктивних елементів:

$$K_{yc} = \frac{Q_y}{Q_3} \quad (1.1)$$

де  $Q_y$  – кількість уніфікованих елементів;

$Q_3$  – загальна кількість поверхонь.

$$K_{yc} = \frac{19}{22} = 0,86$$

Так як  $K_{yc} > 0,6$ , можна зробити висновок, що деталь технологічна.

Визначимо коефіцієнт використання матеріалу:

$$K_{\text{и.м.}} = \frac{M_{\text{д}}}{M_{\text{з}}} \quad (1.2)$$

$$K_{\text{и.м.}} = \frac{0,306}{0,780} = 0,41$$

Для вихідної заготовки цього типу такий показник свідчить про задовільний використанні матеріалу.

Аналізуючи вимоги робочого креслення, робимо висновок, що матеріал деталі дозволяє забезпечити необхідні механічні властивості, шорсткість необроблювальних поверхонь та конструктивні особливості деталі.

Для контролю або вимірювання розмірів оброблюваних поверхонь і їх взаємного розташування не потрібні спеціальні інструменти або пристосування.

Таким чином, технологічність конструкції деталі «Вал» після якісного і кількісного аналізу можна оцінити як гарну за всіма показниками.

## 2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 2.1. Визначення типу виробництва і форми його організації

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

холоднотягнутий прокат, лиття в землю і під тиском, точне лиття, поковки, штампування. Необхідна точність досягається як методом автоматичного отримання розмірами, так і методом пробних ходів і промірів з частковим застосуванням розмітки.

Середня кваліфікація робітників - 3-5 розряд. Поряд з робітниками високої кваліфікації, які працюють на складних верстатах і наладчиків,

використовуються робочі оператори, що працюють на настроєних верстатах.

Виробнича програма випуску деталей встановлюється в залежності від річної потреби виробів і організаційно-технічних умов виробництва та збирання. За завданням приймається серійний тип виробництва. Вважаючи, що річна потреба у виробах з 50000 штук.

Розмір партії деталей, одночасно що запускаються у виробництво, визначаємо за формулою:

$$N_c = \frac{Na}{\Phi} \quad \text{шт;} \quad (2.1)$$

де  $N$  – річна програма випуску деталей, шт;

$\Phi$  - дійсний річний фонд часу роботи в годинах;

$a$  – періодичність запуску деталей у виробництво або число днів, на яке необхідно забезпечити роботу складального цеху,  $a=3,6,12,24$  дня.

Визначимо розмір партії для деталі вал:

$$N_c = \frac{25000 \cdot 6}{254} = 590,55 \approx 591 \quad \text{шт.}$$

Для деталі корпус:

$$N_c = \frac{25000 \cdot 6}{254} = 590,55 \approx 591 \quad \text{шт.}$$

Такт випуску деталей у виробництво визначається за формулою:

$$T_v = \frac{60F_g m}{N}, \text{ мин} \quad (2.2)$$

де  $F_g$  – річний дійсний фонд роботи верстата, год; при роботі в одну зміну  
 $F_d \cdot m = 2030$  ч;

$m$  – число змін роботи верстата на добу;

$N$  – річна програма випуску деталей, шт.

Визначимо такт випуску для деталі вал:

$$T_v = \frac{60F_g m}{N} = \frac{60 \cdot 2030}{25000} = 4,87 \quad \text{мин}$$

Для деталі корпус:

$$T_v = \frac{60F_g m}{N} = \frac{60 \cdot 2030}{25000} = 4,87 \quad \text{хв}$$

Визначимо середнє основне технологічне час для декількох операцій обробки деталі вал:

Таблиця 2.1 Відомість виконання основних операцій обробки деталі вал:

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

где  $T_{o.cр.}$  – Середній основний технологічний час;

$K$  – коефіцієнт безперервності роботи верстатів.

Середнє основне технологічне час визначимо за спеціальними формулами для кожної операції:

Підрізання торців:

$$T_{o.cр.} = 0,037 * 10^{-3} * (d_1^2 - d_2^2), \text{ хв} \quad (2.4)$$

$$T_{o.cр.} = 0,037 * 10^{-3} * (28^2 - 26^2) = 0,03 \text{ хв}$$

Точіння:

$$T_{o.cр.} = 0,17 * 10^{-3} * d * l, \text{ хв} \quad (2.5)$$

$$T_{o.cр.} = 0,17 * 10^{-3} * 12 * 31 = 0,063 \text{ хв}$$

$$T_{o.cр.} = 0,17 * 10^{-3} * 20 * 20 = 0,068 \text{ хв}$$

$$T_{o.c.p.} = 0,17 * 10^{-3} * 19 * 33 = 0,11 \text{ хв}$$

$$T_{o.c.p.} = 0,17 * 10^{-3} * 20 * 17 = 0,058 \text{ хв}$$

$$T_{o.c.p.} = 0,17 * 10^{-3} * 26 * 2,5 = 0,011 \text{ хв}$$

$$T_{o.c.p.} = 0,17 * 10^{-3} * 20 * 23,5 = 0,08 \text{ хв}$$

$$T_{o.c.p.} = 0,17 * 10^{-3} * 19,5 * 21 = 0,07 \text{ хв}$$

Загальний час на токарні операції:  $T_{o.c.p.} = 0,46 \text{ хв}$

Фрезування:

$$T_{o.c.p.} = 6 * 10^{-3} * l * n, \text{ хв} \quad (2.6)$$

$$T_{o.c.p.} = 6 * 10^{-3} * 20,5 * 2,5 = 0,31 \text{ хв}$$

Визначимо середнє поштучна час за операціями:

Підрізання торців:

$$T_{шт.ср} = \frac{0,03}{0,5} = 0,06 \text{ хв}$$

Точіння:

$$T_{шт.ср} = \frac{0,46}{0,5} = 0,92 \text{ хв}$$

Фрезування

$$T_{шт.ср} = \frac{0,31}{0,65} = 0,48 \text{ хв}$$

Середнє штучне час за операціями:  $T_{шт.ср} = 0,49$

Визначимо коефіцієнт серійності:

$$K_c = \frac{T_B}{T_{шт.ср}} \quad (2.7)$$

$$K_c = \frac{4,87}{0,49} = 9,94$$

коефіцієнт серійності  $K_c = 9,94$  відповідає серійному виробництву.

## 2.2. Вибір і обґрунтування способу отримання заготовок

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

повинна зручно встановлюватися на верстаті, базові поверхні повинні мати достатню довжину для забезпечення стійкого положення деталі при обробці, деталь повинна піддаватися найменшим деформаціям під дією сил різання, затиску і власної ваги, і т.д.

Відповідно до правил вибору баз, для обробки деталі вал на операціях в якості бази приймаємо зовнішню поверхню і торець заготовки.

## 2.4. Розробка маршруту обробки деталей

При розробці маршруту виготовлення деталі орієнтуємося на вигляд застосовуваної заготовки та її точність. Кількість технологічних операцій, їх

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

## 2.5. Визначення припусків на обробку та розмірів заготовки валу

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Для виконання токарної операції 015 і 020 деталі вал вибираємо універсальний токарно-гвинторізний верстат моделі 1А64.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

потужність електродвигуна приводу головного руху, кВт	17
Маса верстата, кг	11700

Для виконання зубодовбальної операції (030) деталі вибираємо довбальний верстат з механічним приводом 7А412.

Верстат моделі 7А412 призначені для зовнішнього та внутрішнього довбання плоских і фасонних поверхонь, вирізів і канавок, а також для довбання з піднутрінням до 10 град для інструментальних і ремонтних служб.

Технічні характеристики верстата наведені в таблиці:

Таблиця 2.6. Технічні характеристики верстата 7А412

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

поперечних	0,1-1,0
кругових, град	0,07-0,67
Найбільше зусилля різання, кг	600
Потужність електродвигуна приводу головного руху в кВт	0,8-1,5
Габаритні розміри:	
довжина	1950
ширина	980
висота	1825
Вага в кг	1100

Для виконання шліфувальних операцій вибираємо

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

найменший	8
Найбільша довжина шліфування, мм:	
зовнішнього	1250
внутрішнього	100
Найбільше поздовжнє переміщення столу, мм:	1290
Швидкість гідравлічного переміщення стола з безступінчастим регулюванням, мм / хв:	
найбільша	6000
найменша	100

Найбільший кут повороту верхнього столу, град	
За годинниковою стрілкою	-2
Проти годинникової стрілки	7
Діаметр шліфувального круга	
найбільший	350
найменший	260
Число оборотів шпинделя шліфувальної бабки в хв.	1880/2110
Електродвигун приводу шліфувального круга:	
Число обертів в хв.	1450
Потужність, кВт	4
Габарити верстата	1000X1000X1650

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Величина зміщення повідця перпендикулярно до штриху, мм	30
Сила притиску повідця до заготівлі, кгс	1,5-29,5
Сумарна встановлена потужність, кВт	3,55
Габаритні розміри, мм	2800x1200x1290
Маса, кг	1250

Для програмно-комбінованих операцій вибираємо верстат моделі DS Solution

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

«фланець», що складається з окремих елементів і прут з максимальним діаметром 63 мм і 100 мм. Можлива обробка зовнішньої і внутрішньої

поверхонь циліндричних, конічних і сферичних форм деталей. А також свердління, зенкування і нарізування різьблення.

Технічні характеристики верстата наведені в таблиці:

Таблиця 2.9. Технічні характеристики верстата

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

операції 015.

- 2) Устаткування - токарний верстат моделі 1А64.
- 3) Застосовуємо різець з пластинами з твердого сплаву Т5К10 з розміром державки різця  $25 \times 20$  мм.
- 4) Точити поверхню  $\varnothing 12$ . Припуск  $h = 16$  мм, довжина 10 мм.
- 5) Режимі різання визначимо аналітичним методом.

7) Чернове точіння.  $h = 10$  мм. Припуск знімаємо за один прохід:  $t = 10$  мм

8) Чистове точіння.  $h = 6$  мм. Припуск знімаємо за один прохід:  $t = 6$  мм. Визначимо режими різання при чорновій обробці поверхні.

$$S_o = S_{o_T} * K_{S_{\Pi}} * K_{S_{И}} * K_{S_{Ж}} * K_{S_{М}} \quad (2.8)$$

де  $S_{o_T} = 0,4$  мм/об – подача обрана залежно від глибини різання.

$K_{S_{\Pi}} = 0,9$  - коефіцієнт в залежності стану поверхні (з коркою);

$K_{S_{И}} = 0,65$  - коефіцієнт в залежності від матеріалу інструменту (Т5К10);

$K_{S_{Ж}} = 0,62$  - в залежності від найбільшого діаметра оброблюваної поверхні;

$K_{S_{М}} = 1,07$  коефіцієнт в залежності від оброблюваного матеріалу (Сталь 38ХА).

$$S_o = 0,4 * 0,9 * 0,65 * 0,62 * 1,07 = 0,16 \text{ мм/об}$$

За паспортними даними верстата приймаємо подачу рівну  $S_o = 0,16$  мм/об

$$V = V_T * K_{v_{И}} * K_{v_{\Phi}} * K_{v_{\Pi}} * K_{v_{O}}, \text{ м/хв} \quad (2.9)$$

де  $v_T = 250$  м/хв - швидкість різання при точінні стали 38ХА;

Поправочні коефіцієнти на швидкість різання при точінні легованої сталі:

$K_{v_{И}} = 1,0$  в залежності від матеріалу інструмента (Т5К10);

$K_{v_{\Phi}} = 0,9$  в залежності від головного угла в плані;

$K_{v_{\Pi}} = 0,85$  в залежності від стану поверхні (с коркою);

$K_{v_{O}} = 1,0$  в залежності від умов обробки (с СОЖ).

$$V = 250 * 1 * 0,9 * 0,85 * 1 = 191,25 \text{ м/хв}$$

За встановленої швидкості різання визначаємо частоту обертання шпинделя верстата.

$$\begin{aligned} \text{Частота обертів } n &= \frac{1000 * V}{\pi * D} \frac{\text{об}}{\text{хв}} \quad (2.10) \\ n &= \frac{1000 * 191,25}{3,14 * 12} = 5075,6 \text{ об/хв} \end{aligned}$$

Розрахункове значення  $n$  порівнюється з паспортними даними верстата. Для подальших розрахунків приймається найближче менше значення з ряду частот обертання шпинделя  $n = 5100$  (об/хв).

Основний технологічний час.

$$T_0 = \frac{L}{S * n}, \text{ хв} \quad (2.11)$$

$$T_0 = \frac{10}{0,16 * 537,7} = 0,12$$

Сила різання.

$$P_z = 10 * C_p * t^x * S^y * V^n * K_p, \text{ Н} \quad (2.12)$$

де  $K_p$  – узагальнений поправочний коефіцієнт на умови різання.

$$K_p = K_{Mp} * K_{\varphi p} * K_{\gamma p} * K_{\lambda p} * K_{rp} \quad (2.13)$$

$$K_p = 0,75 * 0,94 * 1 * 1 * 0,93 = 0,66$$

$$P_z = 10 * 300 * 10 * 0,16^{0,75} * 191,25^{-0,15} * 0,66 = 2227,5 \text{ Н}$$

Потужність різання.

$$N_e = \frac{P_z * V}{1020 * 60}, \text{ кВт} \quad (2.14)$$

$$N_e = \frac{2227,5 * 191,25}{1020 * 60} = 6,96 \text{ кВт}$$

1. Визначимо режими різання при чистової обробки поверхні.

Визнач подачу:

$$S_0 = 0,4 * 0,9 * 0,65 * 0,62 * 1,07 = 0,16 \text{ мм/об}$$

За паспортними даними верстата приймаємо подачу рівну  $S_0=0,16$

$$V = 250 * 1 * 0,9 * 0,85 * 1 = 191,25 \text{ м/хв}$$

За встановленої швидкості різання визначаємо частоту обертання шпинделя верстата.

$$\text{Частота обертів.} \quad n = \frac{1000 * V}{\pi * D} \frac{\text{об}}{\text{хв}} \quad (2.10)$$

$$n = \frac{1000 * 191,25}{3,14 * 12} = 5075,6 \text{ об/хв}$$

Розрахункове значення  $n$  порівнюється з паспортними даними верстата. Для подальших розрахунків приймається найближче менше значення з ряду частот обертання шпинделя  $n = 5100$  (об / хв).

Основне технологічне час.

$$T_0 = \frac{L}{S * n}, \text{ хв} \quad (2.11)$$

$$T_0 = \frac{10}{0,16 * 5100} = 0,012$$

Сила різання.

$$P_z = 10 * C_p * t^x * S^y * V^n * K_p, \text{ Н} \quad (2.12)$$

де  $K_p$  – узагальнений поправочний коефіцієнт на умови різання.

$$K_p = K_{Mp} * K_{\varphi p} * K_{\gamma p} * K_{\lambda p} * K_{rp} \quad (2.13)$$

$$K_p = 0,75 * 0,94 * 1 * 1 * 0,93 = 0,66$$

$$P_z = 10 * 300 * 10 * 0,16^{0,75} * 191,25^{-0,15} * 0,66 = 2227,5 \text{ Н}$$

Потужність різання.

$$N_e = \frac{P_z * V}{1020 * 60}, \text{ кВт} \quad (2.14)$$

$$N_e = \frac{2227,5 * 191,25}{1020 * 60} = 6,96 \text{ кВт}$$

Точити канавку  $\varnothing 9,8$ . Припуск  $h = 2,2$  мм, довжина 2 мм.

Режими різання визначимо аналітичним методом.

Визначаємо глибину різання за один прохід

$$t = \frac{D-d}{2}, \text{ мм} \quad (2.15)$$

де  $D$  – діаметр заготовки;

$d$  – діаметр деталі.

$$t = \frac{12 - 9,8}{2} = 1,1 \text{ мм}$$

Призначаємо подачу  $S=0,4$  мм/об

Визначаємо швидкість різання

$$V = v_{\text{табл.}} * K_1 * K_2 * K_3 \quad (2.16)$$

де  $v_{\text{табл.}}$  – табличне значення швидкості різання;

$$v_{\text{табл.}} = 170 \text{ м/с}$$

$$K_1 = 0,8$$

$$K_2 = 1,55$$

$$K_3 = 1$$

Підставивши значення в формулу, отримаємо

$$V = 170 * 0,8 * 1,55 * 1 = 210,8 \text{ м/с}$$

Визначаємо частоту обертання шпинделя за формулою 2.10

$$n = \frac{1000 * 210,8}{3,14 * 9,8} = 6850 \text{ об/хв}$$

Коригуємо частоту обертання шпинделя за паспортними даними верстата  $n=6850$  об/хв

Визначаємо потужність, затрачену на різання

$$N_{\text{рез}} = \frac{P_z * V_d}{1020 * 60}$$

Визначаємо силу різання  $P_z$

$$P_z = P_{z.\text{табл}} * K_1 * K_2 \quad (2.17)$$

где  $P_{z.\text{табл}}$  – табличное значение силы резания;

$$P_{z.\text{табл}} = 135 \text{ Н}$$

$$K_1 = 0,8 \quad K_2 = 1$$

Підставивши значення в формулу (2.17), отримаємо:

$$P_z = 135 * 0,8 * 1 = 108 \text{ Н}$$

Тоді потужність буде:

$$N_{\text{рез}} = \frac{108 * 210,8}{1020 * 60} = 0,372$$

Щоб потужність приводу верстата 1А64 була достатня для здійснення токарної операції, необхідно щоб виконалось умова нерівності:

$$N_{\text{рез}} \leq N_{\text{шп.ті}} \quad (2.18)$$

Потужність, що витрачається на обертання шпинделя верстата дорівнює

$$N_{\text{шп}} = N_{\text{дв}} * \eta, \text{ кВт} \quad (2.19)$$

У верстата 1А64

$$N_{\text{дв}} = 17 \text{ кВт}$$

$$\eta = 0,8$$

Підставивши значення в формулу (2.19), отримаємо

$$N_{\text{шп}} = 17 * 0,8 = 13,6 \text{ кВт}$$

Перевіряємо нерівність (2.18)

$$13,6 < 17$$

Нерівність виконано. Отже, потужність приводу верстата 1А64 достатня для здійснення даної токарної операції. Обробка можлива.

Основне технологічне час визначається за формулою  $T_0 = \frac{L}{s * n}$ , хв

$$T_0 = \frac{2}{0,4 * 6850} = 0,01, \text{ хв}$$

Решта результатів розрахунків режимів різання, сил різання потужності і основного технологічного часу по кожній операції зведемо в таблицю 2.10.

Таблиця 2.10. Режими різання обробки заготовки валу

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

	Точити Ø20, l=17	Чернова	5	0,4	323	5331	180	1,26	7,5
		Чистова	3	0,4	323	5332	180	0,33	7,6
	Нарізати різьбу	Чернова	2,2	0,3	191,2	4460	210	12,3	5,6
	Сняти фаски	Чистова	0,5	0,25	191,2	4460	190	7,2	5,2
020	Точити Ø19,5, l=21	Чернова	5,5	0,3	180	5260	220	1,2	6,1
		Чистова	3	0,33	166	5100	220	0,8	8,9
	Точити канавку Ø15, b=4	Чернова	10,5	0,2	210	5600	230	2,1	9,1
		Чистова	2,5	0,2	190	5420	210	0,7	9,1
	Точити Ø20, l=26	Чернова	4	0,4	180	5530	191,2	1,8	8,7

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

## 2.8. Вибір різального інструменту за системою ISO 9001

Ріжучий інструмент, необхідний для обробки заготовки вал зведемо в

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

		зернистість 40-10
045	Шліфувальна	Шліфувальний круг на керамічній зв'язці D=3-25 мм, Н = 1-40 мм, зернистість 40-10
050	Полірувальна	Шліфувальний круг на керамічній зв'язці D=3-25 мм, Н = 1-40 мм, зернистість 40-10

## **2.9 Автоматизований процес виготовлення деталі "Вал" на токарно-фрезерному верстаті з ЧПУ**

В даному розділі представлений автоматизований процес токарно-фрезерна обробка деталі "Вал" (рис.4.1) з ілюстрованими переходами і описом операцій. Як програма для реалізації обробки деталі була обрана Feature Cam

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

систем для механічної обробки із застосуванням 4-х координатного верстата, а також підвищення ефективності та продуктивності при створенні керуючих програм для верстатів з ЧПУ в умовах серійного виробництва.

Основні переваги пакету Feature Cam 2019:

- Гнучкі стратегії чорнової і чистової обробки;
- Висока швидкість розрахунку керуючих програм;
- Автоматизована оптимізація подач для скорочення часу обробки;

- Інтегровані засоби візуалізації обробки;
- Перевірка і виключення врізів;
  - Імпорт твердотільних, поверхневих і Фасетное моделей, а також каркасної геометрії в різних форматах: AutoCAD, STL, STEP, IGES, Parasolid;
  - Автоматичне розпізнавання типових елементів (отвори, кишені, кишені і т.д.) і їх обробка;
  - Закриття отворів і пазів для виключення їх обробки;
  - Гнучкий механізм кордонів для обмеження зони обробки;
  - Генерація карт налагодження для керуючих програм;
  - Контроль зіткнень з урахуванням патрона, інструменту, органів верстата і оправлення.

## 2.10 Створення моделі і симуляція обробки деталі

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

виготовлення деталі.

## 2.11 Вибір стратегії обробки і устаткування

В основі вибору стратегії обробки варто розрахунок мінімального основного технологічного часу, тому що економічний ефект буде багато в чому визначатися саме часом обробці. Для даної заготовки виберемо верстат, який є в базі програми, тому що це демонстраційна версія. У пакеті Feature CAM 2019 існує утиліта для створення моделі верстата, завдяки якій можна створити модель будь-якого токарно-фрезерного верстата в умовах реального виробництва. Також в програмний комплекс входить утиліта для написання і редагування постпроцесорів.

Прогнозування продуктивності обробки (включаючи розрахунок часу обробки) для

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

Рис. 4.3 Імпорт моделі вала в програму Feature CAM 2014

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

## 2.12 Генерування керуючої програми для верстата з ЧПУ

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

```
N290 X-120.996 Y-81.702 Z438.699 B0 C=DC(0) F30.  
N300 X-132.449 Y-79.1 Z434.977 B0 C=DC(0) F300.  
N310 X-131.778 Y-79.396 Z435.196 B0 C=DC(0)  
. . .  
N68300 X-119.758 Y53.008 Z-46.722 B18. C=DC(-180.)  
N68310 X-125.938 Y53.008 Z-27.701 B18. C=DC(-180.) F3000  
N68320 TROFF  
N68330 M5  
N68340 M30
```

Висновок: дані технічні можливості програм і обладнання на сьогоднішній день дозволяють виключити на 90% можливість появи небажано шлюбу ще на стадії проектування і створення КП для верстатів, що в свою чергу, позитивно відбивається на економічній ефективності.

Також варто додати, що застосування таких обробних центрів дозволяє скоротити значний верстатний парк, тобто відбувається комбінування можливостей різних моделей в одному верстаті.

### 3. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1. Проектування верстатного пристосування

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

пред'являється ряд вимог.

Для забезпечення високої точності обробки заготовок пристосування повинні бути виконані з високою точністю. Похибки базування і закріплення повинні бути зведені до мінімуму. Конструкція пристосування не повинна бути найбільш податливим ланкою системи верстат-пристосування-інструмент - деталь, щоб використовувати повну потужність верстата на чорнових операціях і забезпечувати високу точність на чистових операціях. Пристосування має забезпечувати чітку інструментальну доступність, тобто можливість підходу інструменту до якомога більшої кількості поверхонь

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

14787-69, для створення направляючої технологічної бази.

### 3.2. Розрахунок точності верстатного пристосування

Проектована верстатне пристосування при розточування патрубку має забезпечувати необхідний рівень точності, що відповідає виконанню умови:

$$\varepsilon \leq [\varepsilon] \quad (3.1)$$

де  $\varepsilon$  - дійсна величина похибки;

$[\varepsilon]$  - допустима величина похибки.

Допустима величина похибки залежить від прийнятої схеми базування, величина допуску на розмір і похибок механічної обробки.

$$[\varepsilon] = IT - K_y \cdot W \quad (3.2)$$

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

$$\varepsilon_3 = [K_{Rz} + K_{HB} \cdot C] \cdot \left( \frac{Q}{F} \right)^{0.8} \quad (9.8)$$

де  $K_{Rz}$  - коефіцієнт, що враховує шорсткість поверхні;

$K_{HB}$  - коефіцієнт що враховує твердість поверхні;

$C$  - коефіцієнт, що характеризує умови контакту;

$Q$  - сила діє на опору, Н;

$F$  - площа контакту опори з заготівлею, см<sup>2</sup>.

$$\varepsilon_3 = [(-0.005 \cdot 20) + 1.06] \cdot \left( \frac{21531,29}{9.8} \right)^{0.8} = 452 \text{ мкм мкм.}$$

$$\text{Похибка положення: } \varepsilon_{\Pi} = \sqrt{\varepsilon_y^2 + \varepsilon_c^2 + \varepsilon_{\Pi}^2} \quad (3.4)$$

де - похибка через неточності виготовлення і складання деталей СП;

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

### 3.3. Розрахуємо сили закріплення

Пристосування проектується для операції механічної обробки деталі корпус. Для розрахунку сил закріплення в найбільш загальному випадку необхідно знати умови проектованої обробки - величину, напрям і місце докладання зусиль, що зрушують заготовку, а також схему її установки і закріплення.

Сила закріплення повинна бути достатньою для попередження зсуву встановленої в пристосуванні заготовки. В процесі фрезерування поверхні на заготовку діє сила різання  $P_z$  яка зміщує заготовку. Визначимо силу закріплення  $Q$  за формулою:

$$Q = \frac{0.64 \cdot K \cdot M}{\pi \cdot d^2 \cdot l \cdot f} \quad (3.6)$$

де,  $K$  - коефіцієнт запасу міцності;

$$K = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \quad (3.7)$$

де  $K_0$  - коефіцієнт, що враховує раптові фактори;

$K_1$  - враховує нерівності поверхонь;

$K_2$  - збільшення сил різання від затуплення ріжучого інструменту;

$K_3$  - збільшення сили різання при переривчастому фрезеруванні;

$K_4$  - враховує тип пристрою;

$K_5$  - зручне положення рукоятки;

$K_6$  - наявність моментів прагнуть повернути заготовку.

$$K = 1.5 \cdot 1.2 \cdot 1.7 \cdot 1.2 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.5 = 5.51$$

$f_1$ - коефіцієнт тертя між поверхнею заготовки та важеля;

$f_2$ - коефіцієнт тертя між поверхнею заготовки та опорами.

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

### 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

Управління має бути перманентним, враховуючи зміни умов різання та виконуватися автоматично. Для задоволення таким вимогам найбільше підходять САУ, які керують подачею, швидкістю різання, а іноді і глибиною різання [4, 7, 10].

#### 3.1 Створення структури оптимального управління

Основні труднощі реалізації оптимального управління за допомогою замкненої системи автоматизованого управління (САУ) обумовлені принциповою неможливістю створення вимірювального приладу продуктивності або собівартості, щоб застосовувати його як датчик зворотного зв'язку. Тому оптимально керувати процесом різання можна тільки

на основі оцінки допоміжних параметрів, пов'язаних з необхідним критерієм оптимальності відповідної апріорної математичної моделі.

У сучасних САМ-системах технологічної підготовки виробництва найбільш раціональним є оптимальне керування, яке реалізовано програмними засобами. Взагалі, для оцінки обурень та отримання інформації

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

швидкості різання). Розраховані таким чином величини надходять на модуль програмного управління, який виробляє команди відповідних приводів верстата.

Таким чином, основною такою САУ оптимізації процесу різання є його оптимізаційна математична модель, яка пов'язує критерій оптимізації з керуючими впливами-подачі та швидкістю різання. В результаті вирішення задачі оптимізації знаходять керуючий вплив, який забезпечує максимум

продуктивності або мінімум собівартості при безумовному виконанні вимог обмежень щодо якості обробки. Крім традиційних критеріїв оптимізації (продуктивність та собівартість) залежно від результатів техніко-економічного аналізу застосовують критерій максимальної інтенсивності зняття припуску. Іноді з виробництва ставиться таке завдання-досягнення максимальної продуктивності чи мінімальної собівартості при заданих значеннях стійкості інструмента.

Розробка математичної моделі процесу різання є найважливішим етапом створення алгоритму оптимізації. При традиційному, класичному підході математична модель будується у вигляді системи рівнянь та нерівностей, які виражають зв'язки між керуючими впливами, обмеженнями та прийнятими критеріями оптимальності на основі класичних залежностей теорії різання [12, 13].

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

$$nS^{y_v} = \frac{318C_v k_v}{DT^m H^{x_v}}$$

3.1

де,  $v$  – швидкість різання, м/хв;  $\pi$  – постійна величина 3,14;  $n$  – частота обертання, об/хв;  $H$  – глибина різання, мм;  $T$  – період стійкості інструменту, хв;  $S$  – подача мм/об,  $m$ ,  $v$ ,  $x$ ,  $y$  – виправні коефіцієнти на матеріал, сил різання, режимів обробки.

Оскільки всі залежності, що становлять математичну модель, є емпіричними, слід не забувати про розмірність фізичних величин, що входять до них. Зазвичай ці розмірності не відповідають СІ-розмірностям.

У математичній моделі (3.1) необхідно враховувати відомі з практики обробки в'язанням в залежності від стійкості різця не тільки від матеріалу заготовки та інструменту, а й геометричних параметрів різальної частини різця

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

$C_p, k_p, x_p, y_p$  – коефіцієнти та показники емпіричної залежності сили різання від режиму та умов обробки.

Подача, що допускається необхідною шорсткістю обробки, може бути визначена за детермінованою складовою профілю шорсткості обробленої поверхні, яка, у свою чергу, визначається за геометричними залежностями формування мікронерівностей поверхневого шару деталі для кожного з чотирьох можливих профілю [12, 13, 15].

### 3.2 Блок-схема алгоритма досліджень

Для вирішення такого завдання доцільно використати чисельний метод, який побудований за ітеративним принципом наближення із заданим кроком до вирішення відповідно до алгоритму, блок-схема якого представлена на малюнку 3.2.

Такі випадки визначаються співвідношеннями між геометричними параметрами вершини різця у плані (головний  $\varphi$ , допоміжний  $\varphi_1$  кути в плані і радіус  $r$  округлення вершини різця в плані) і подачею  $S$  навпаки заготовки.

При  $\varphi < \arcsin(S/2r)$  і  $\varphi_1 < \arcsin(S/2r)$  виступ профілю формується перетином головного і допоміжного різальних лез інструменту, при  $\varphi > \arcsin(S/2r)$  і  $\varphi_1 < \arcsin(S/2r)$  виступ профілю формується перетином допоміжного різального леза і радіусною частиною вершини інструменту, при  $\varphi < \arcsin(S/2r)$  і  $\varphi_1 > \arcsin(S/2r)$  виступ профілю формується перетином головного різального леза і радіусної частини вершини інструменту, а при  $\varphi < \arcsin(S/2r)$  і  $\varphi_1 < \arcsin(S/2r)$  виступ профілю формується перетином винятково радіусних частин вершин інструменту. Таким чином, в умову визначення допустимої (по шорсткості) подачі входить сама подача, що унеможливорює отримання відповідної аналітичної залежності [4].

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

вибирається з умов міцності жорсткості ТОС. Наприклад, подача за максимальною силою, яку забезпечує привід подачі верстата, може бути розрахована за наступною залежністю:

$$[S_p]_{\text{доп}} = \left( \frac{2P_n}{C_p h^{x_p} k_p} \right)^{\frac{1}{Y_p}}$$

Подача, що допускається, вибирається як найменша з подач, які розраховані за міцністю інструменту  $[S_l]_{\text{доп}}$  або тяговою силою механізму подачі верстата  $[S_p]_{\text{доп}}$ :

$$S \leq \min\{ [S_p]_{\text{доп}}, [S_l]_{\text{доп}} \}. \quad (3.3)$$

Конструктивні обмеження які визначаються за можливостями металорізального верстата:

діапазон поздовжніх подач:

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max}, \quad (3.4)$$

діапазон частот обертання шпинделя:

$$n_{min} \leq n \leq n_{max}. \quad (3.5)$$

Як оцінну функцію за критерієм максимальної продуктивності приймають

$$f = nS \rightarrow \max, \quad (3.6)$$

оскільки при цьому основний час обробки  $t_0 = L/n \rightarrow \min$  (де  $L$  – довжина обробки).

Отримана математична модель (3.1) – (3.6) складає ядро прикладної програми "Оптимізація точіння" [4], яку ми будемо використовувати для оптимізація режимів різання при точінні.

### 3.3 Оптимізація режимів різання при точінні

Для виконання роботи використовується прикладна програма [4], інтерфейс представлений на малюнку 3.2. Інструкції та пояснення для роботи з програмою містяться в самій програмі та з'являються на екрані монітора при натисканні кнопки "Help".

Після активації програми, введення даних відповідно до варіанта та натискання кнопки "Застосувати дані" у графічному вікні інтерфейсу з'являються всі розраховані обмеження, що утворюють область  $D$  допустимих значень частоти обертання шпинделя та подачі, яка відповідає представленим на інтерфейсі вихідним даним верстата і процесу різання. На малюнку 3.2 ця область утворена перетином наступних обмежень: 1 – мінімальна подача, 3 – мінімальна частота обертання шпинделя, 5 – мінімальна подача по шорсткості поверхні, 7 – обмеження за стійкістю інструменту, 8 – обмеження за потужністю верстата. Лінія 9 відображає функцію оптимізації за максимальною продуктивністю і задовольняє залежності (3.6).

Лінія 9 з'являється у графічному вікні інтерфейсу та пересувається в ньому за перехрестям мишки. Для визначення оптимальних координат області допустимих значень необхідно перевести мишку так, щоб лінія максимальної продуктивності була дотичною до найбільш віддаленої від початку координат

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.



Рисунок 3.2 Інтерфейс прикладної програми оптимізації режимів різання

Після натискання лівої клавіші мишки, при утриманні її перехрестя у вершині області допустимих значень, на інтерфейсі з'являються оптимальні величини режиму різання. Визначається такі складові режиму різання та його головні характеристики: частота обертання шпинделя (952 об/хв), подача на оборот (0,42 мм/об), швидкість різання (149,5 м/хв), поздовжня подача (400 мм/хв), потужність різання (7,54 кВт), що становить сили  $P_z$  різання (3023,7 Н).

Звертаємо увагу на те, що відповідно до прийнятого критерію оптимальності - максимальна продуктивність - його величину зручно оцінювати безпосередньо за величиною поздовжньої подачі.

В якості прикладу виконання роботи нижче представлено перебіг досліджень для вихідних даних, які вказані у вікнах головного інтерфейсу програми на малюнку 3.2.

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

Тут прийняті ті самі позначення, що і на малюнку 3.2: лінія 1 і 2 - обмеження по мінімальній і максимальній подачі, лінія 3 і 4 - обмеження по мінімальній і максимальній частоті обертання шпинделя, лінія 5 - обмеження подачі по заданій шорсткості, лінія 6 - обмеження подачі за допустимою силою механізму подачі приводу верстата, лінія 7 - обмеження за стійкістю інструменту, лінія 8 - обмеження потужності верстата. Лінія 9 відображає оцінну функцію оптимізації максимальної продуктивності. Видно, що зі зміною глибини різання вершина А області допустимих значень, яка відповідає оптимальному (за продуктивністю) режиму різання, утворюється перетином різних обмежень. Так при глибині різання 1 мм ця вершина утворена

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Рис. 3.4 Експериментальні залежності оптимального режиму різання від глибини різання

Аналіз отриманих експериментальних результатів (рис. 3.4) свідчить, що закон оптимального управління має дві зони:

1) оптимальна обробка до глибини різання 3 мм відбувається з постійною подачею на заготовлю, проте частота обертання зменшується майже за лінійною залежністю;

2) оптимальна обробка з глибиною, яка перевищує 3 мм, виконується з постійною частотою обертання заготовки, проте поздовжня подача знижується також майже за лінійною залежністю.

При проведенні експериментів можна помітити, що оптимальна точка фазової площини  $n$ - $S$  утворюється в основному трьома обмеженнями: стійкістю, потужністю і шорсткістю. До глибини різання 3 мм основним обмеженням, яке накладається на подачу, є обмеження необхідної шорсткості обробленої поверхні. При збільшенні глибини різання набуває чинності четверте обмеження-за силою подачі верстата.

Подібні числові значення розрахунків режимів різання були отримані і

Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.

Точіння зовнішнє (чистове)	0.85	0.162	267
Розточування (чорнове)	2.25	0.281	188
Розточування (чистове)	0.25	0.143	241

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

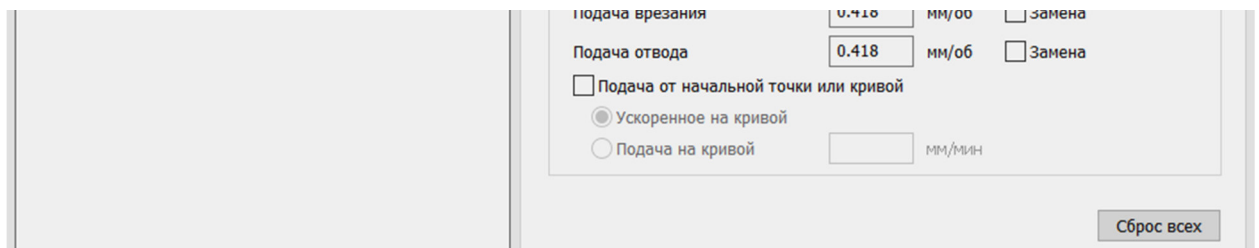


Рисунок 3.5 – Інтерфейс програми FeatureCAM з оптимізованими режимами

Оптимізовані режими різання також відображаються у карті технологічних налаштувань «ДОДАТОК Б» та керуючій програмі (NC-файл) для верстата з ЧПК «ДОДАТОК В».

## ВИСНОВКИ

1. Проаналізовані конструктивні особливості деталі, матеріалу та надана загальна характеристика об'єкта дослідження, виконаний якісний аналіз технологічності конструкції деталі.

2. Якісно виконана тривимірна модель у CAD-системі Autodesk PowerShape за технічними вимогами кресленика і технічного завдання. Модель використовувалась як цифровий еталон у подальшому складанні технології автоматизованої обробки.

3. Складена оптимальна технологія механічної обробки деталі. Застосований прогресивний ріжучий інструмент стандарту ISO, оснащення для сучасного багатоцільового верстата з ЧПК. Програмна реалізація і комп'ютерний експеримент з розрахунку автоматизованої технології механічної обробки реалізований у програмі Autodesk FeatureCAM.

4. Одержані чисельні результати досліджень для науково-обґрунтованого підходу у розв'язанні технічної задачі токарної обробки деталей з чавуну на багатовісних обробних центрах, що містять сукупність скорегованих методик та алгоритмів для прогнозування їхньої оброблюваності із забезпеченням надійності різального інструменту з твердих сплавів. Отримані результати порівнювалися з відомими роботами, пов'язаними з дослідженнями процесів механічного оброблення різних марок сталей, сплавів та чавунів, оцінкою надійності ріжучих інструментів, точності та шорсткості обробленої поверхні, результатами вимірювань силових параметрів різання. Максимальна відносна похибка розрахунків не перевищувала 5-8%.

5. Обґрунтований і встановлений повний системний зв'язок параметрів оброблення з властивостями оброблюваного матеріалу, геометрією інструменту, інструментального матеріалу і конструкторсько-технологічних чинників деталі на розрахунок оптимізованої технології токарної обробки.

6. Виконана методика значно спрощує громісткі аналітичні розрахунки за класичними методами з купою виправних коефіцієнтів та враховує сучасну

геометрію інструментів показники і режимів різання стосовно конкретної деталі та більш того, може бути адаптована до інших типів деталей типу тіл обертів різних галузей виробництва.

7. Надані практичні рекомендації щодо оптимального використання CAD-CAM систем, коригування результатів технології та режимних параметрів для отримання оптимальних результатів на стадії підготовки виробництва.

8. Виконане дослідження дозволяє моделювати абсолютно всі токарні роботи за рахунок застосування комп'ютерних програм в умовах дефіциту виробництва натурних експериментів та дистанційного навчання; індивіалізувати процес навчання та підвищити ефективність самостійної роботи учня або студента; надає змогу проводити дослідження в таких областях змінення параметрів, які неможливо або небезпечно реалізувати на реальному коштовному обладнанні.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 8833:2019. Національний стандарт України виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом. [http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=82147](http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=82147) .
2. ДСТУ 8981:2020 Виливки з металів та сплавів. Допуски розмірів, маси та припуски на механічне оброблення. ДСТУ (Державний Стандарт України).
3. Технічне креслення. Розробка робочих креслеників деталей за креслеником загального виду [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О.Г.Гетьман, Н.В. Білицька, Г.В. Баскова. – Електронні текстові дані (1файл: 10,474Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 150 с.
4. Петраков Ю.В. Лабораторно-комп'ютерний практикум з теорії різання // Рекомендовано МОН України як навчальний посібник для вищих навчальних закладів (Лист МОН України №1.4/18-Г-212), Київ, Політехніка, 2006, 190с.
5. Гейчук, В. М. Функціональне проектування верстатів, роботів та машин в Autodesk Inventor. Частина I [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю «Галузеве машинобудування» / В. М. Гейчук ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 13,39 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 394 с.
6. Технології формоутворення сучасних складнопрофільних деталей [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізацій «Технології виготовлення літальних апаратів», «Технології машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Петраков, С. В. Сохань, В. К. Фролов, В. М. Кореньков. – Електронні текстові дані (1 файл: 15,26 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 380 с.
7. David A. Stephenson, John S. Agapiou Metal Cutting Theory and Practice. Third Edition 2016 by Taylor & Francis Group, LLC 932p.
8. Найкращі рішення для обробки. Лінійка необертальних інструментів. Токарна обробка. Обробка канавок. Різьбонарізання. Відрізання. Метрична версія каталогу 2019. 08/2020 3395080. Member IMC Group ISCAR / [www.iscar.com.ua](http://www.iscar.com.ua) .
9. Найкращі рішення для обробки. Фрезерування. Свердління. Інструментальна оснастка. Метрична версія каталогу 2020-2021. 10/2020 3395081. Member IMC Group ISCAR / [www.iscar.ua](http://www.iscar.ua)
10. Петраков Ю.В., Мацківський О.С. Моделювання фрезерування кінцевими фрезами. Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування №1 (73). 2015.
11. Петраков Ю.В. Розвиток САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПК: Монографія. – Київ, Січкар, 2011. – 220 с.

12. Дубовой В.М. Моделювання та оптимізація системи: підручник / Дубовой В.М., Кветний Р.Н., Михальов О.І., Усова А.В. – Вінниця: ПП «ГД Едельвейс», 2017. – 804с.

13. Васильченко Я.В. Математичне моделювання процесів різання та різальних інструментів. Практикум. ДДМА, Краматорськ, 2019. – 249с

14. Zhuravel, O . Yu , Derbaba, V.A., Protsiv, V.V., & Patsera, S.T. (2019). Interrelation between Shearing Angles of External and Internal Friction During Chip Formation. Solid State Phenomena. Materials Properties and Technologies of Processing, (291), 193-203. - 2019. doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.193

15. Kravchenko, Yu., & Derbaba, V. (2020). Empirical definition of the shearing angle and chip-edge contact length when cutting. Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 63, 123-133. <http://znp.nmu.org.ua/index.php/en/archives/33-63en/358-63en11>.

16. Щербина Є.Ю. Критерії стійкості ріжучого інструменту для висошвидкісної обробки / Є.Ю. Щербина, В.А. Дербабя, В.А. Козечко // Збірник наукових праць НГУ. – Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2022 – № 67 – С.77-95 <https://doi.org/10.33271/crpnmu/67.077> .