

Кафедра Механіко-машинобудівний факультет  
Технологій машинобудування та матеріалознавства  
(повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
кваліфікаційної роботи ступеню магістра

студента Захарова Владислава Володимировича  
(ПІБ)

академічної групи 131М-22зн-1  
(шифр)

спеціальності 131 Прикладна механіка  
(код і назва спеціальності)

за освітньо-професійною програмою Наскрізний інжиніринг машинобудівного виробництва  
(офіційна назва)

на тему Дослідження та вибір раціональних режимів різання технологічного процесу виготовлення деталі «Черв'як»  
(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної				

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.

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

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри

Технологій машинобудування та матеріалознавства  
(повна назва)

В.А. Дербаба

(прізвище, ініціали)

(підпис)

« \_\_\_\_\_ »

\_\_\_\_\_ 2024 року

**ЗАВДАННЯ**  
на кваліфікаційну роботу  
ступеню магістр  
(бакалавр, спеціаліст, магістр)

студенту

Захарову В.В.

(прізвище та ініціали)

академічної групи

131М-23ЗН-1

(шифр)

спеціальності

131 Прикладна механіка

за освітньо-професійною програмою

Наскрізний інжиніринг машинобудівного виробництва

(офіційна назва)

на тему Дослідження та вибір раціональних режимів різання технологічного процесу виготовлення деталі «Черв'як»

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від

30.04.2024 № 383-с

Розділ	Зміст	Термін виконання
Аналітичний	Аналіз технологічності конструкції деталі	29.01.24-11.02.24
Технологічний	Проект технології обробки деталі	12.02.24-03.03.24
Спеціальний	Розробка верстатного пристрою	04.03.24-17.03.24
Науково-дослідницький	Оптимізація режимів різання при фрезеруванні	18.03.24-28.04.24

Завдання видано

(підпис керівника)

С.Т. Пацера

(прізвище, ініціали)

Дата видачі

29.01.2024

Дата подання до екзаменаційної комісії

29.04.2024

Прийнято до виконання

(підпис студента)

В.В. Захаров

(прізвище, ініціали)

## Реферат

Пояснювальна записка: 64 с., 7 рис., 14 табл., додатки на 8 с., 13 джерел.

Тема роботи: Дослідження та вибір раціональних режимів різання технологічного процесу виготовлення деталі «Черв'як».

Впровадження нового високопродуктивного обладнання з ЧПК передбачає застосування сучасного підходу до проектування технологічних процесів механічної обробки. У зв'язку з цим задачам оптимізації параметрів режимів різання приділяється велика увага. Тому визначення оптимальних режимів різання при механічній обробці деталі «Черв'як» має актуальне наукове та практичне значення.

Мета роботи – підвищення ефективності процесу фрезерування за рахунок визначення оптимальних режимів різання.

Для досягнення поставленої мети в роботі були встановлені та вирішені наступні завдання:

- 1) аналіз джерел інформації з питань моделювання та оптимізації параметрів режимів різання;
- 2) створення математичної моделі режиму фрезерування поверхні;
- 3) визначення оптимальних параметрів режимів різання.

Об'єкт дослідження – процес фрезерування шпонкового пазу деталі «Черв'як».

Предмет дослідження – параметри режимів різання при фрезеруванні шпонкового пазу деталі «Черв'як».

Методика досліджень – методи проведення досліджень базувалися на основах оптимізації процесів різання, теорії різання та різального інструменту.

Результат роботи – створення математичної моделі для визначення оптимальних режимів різання (частоти обертів шпинделя та подачі на зуб) при фрезеруванні шпонкового пазу деталі «Черв'як». Проведено розрахунки

оптимальних режимів різання для діаметра фрези 6 мм за розробленою методикою та в спеціальному прикладному додатку, виконано порівняльний аналіз.

Наукова новизна – встановлено, що для фрезерування паза довжиною 32 мм на глибину 3,5 мм фрезою Ø6 мм оптимальні значення подачі та частоти обертів шпинделя дорівнюють  $S_z = 0,03$  мм/зуб та  $n = 2059,05$  об/хв. при цьому значення сили різання буде мінімальним  $P_z = 117,07$  Н.

Практична цінність роботи полягає в розробці методики визначення оптимальних параметрів режимів різання при фрезеруванні шпонкового пазу деталі «Черв'як», що дозволить знизити величину сили різання і, отже, енергію, яку споживає верстат.

В аналітичному розділі на підставі проведеного аналізу конструкції деталі на технологічність, хімічного складу і механічних властивостей матеріалу зроблено висновок, що деталь «Черв'як» – технологічна.

В технологічному розділі виконано розробку маршруту виготовлення деталі «Черв'як», розраховані припуски на механічну обробку та режими різання, проведено нормування часу на операції обробки даної деталі.

В спеціальному розділі спроектовано верстатний пристрій для фрезерування шпонкового пазу 6N9. Проведено розрахунок пристосування, виконано кресленик та специфікацію.

В науково-дослідницькому розділі розглянуто оптимізацію режимів різання при фрезеруванні шпонкового пазу. Створено математичну модель, визначено оптимальні значення подачі та числа обертів шпинделя. Виконано порівняльний аналіз математичної моделі з прикладною програмою для визначення режимів різання.

Ключові слова: механічна обробка, шпонковий паз, моделювання, оптимізація, математична модель, режими різання, фрезерування.

## ЗМІСТ

Вступ	6
1 Аналітичний розділ	7
1.1 Характеристика об'єкту виробництва	7
1.2 Аналіз технологічності конструкції деталі	8
1.3 Висновки	10
2 Технологічний розділ	11
2.1 Встановлення виробничої програми випуску деталей	11
2.2 Вибір і обґрунтування методу отримання заготовки	11
2.3 Вибір методів обробки поверхонь	12
2.4 Вибір технологічних баз і розробка маршруту обробки деталі	13
2.5 Розрахунок припусків на механічну обробку	15
2.6 Маршрут обробки деталі, режими різання, норми часу	17
2.7 Висновки	30
3 Спеціальний розділ	31
3.1 Конструкція пристосування	31
3.2 Розрахунок пристосування	31
3.3 Висновки	35
4 Науково-дослідницький розділ	36
4.1 Постановка задачі дослідження	36
4.2 Оптимізація режимів різання при фрезеруванні	38
4.3 Висновки	52
5 Загальні висновки	53
5 Перелік посилань	54
ДОДАТКИ	56

## Вступ

Машинобудівна промисловість постачає продукцію усім галузям народного господарства і є одним із основних його ланок. Технічний прогрес і зростання національної економіки в значній мірі залежать від розвитку машинобудування. Масове виробництво машин стало можливим завдяки розвитку високопродуктивних методів виробництва, а подальше вдосконалення машин було досягнуто через розробку нових технологій, що підвищують якість обробки. Залежно від призначення та умов експлуатації машин, їх конструктивних особливостей і технічних вимог до них застосовують різні технологічні методи виробництва. Вони відрізняються навіть для однієї й тієї ж машини в залежності від визначеної виробничої програми, тобто кількісного фактора. Таким чином, у світлі вимог сучасного виробництва тема кваліфікаційної роботи залишається актуальною.

У кваліфікаційній роботі розглянуто дослідження та вибір раціональних режимів різання при механічній обробці деталі «Черв'як».

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 «ВаріУС».

## 1 Аналітичний розділ

### 1.1 Характеристика об'єкту виробництва

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

галь

л.  
ний

ічне

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

л.  
та  
пи,

механічні властивості, в таблиці 1.3 – закордонні аналоги [1, 2].

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

## 1.2 Аналіз технологічності конструкції деталі

Деталь «Черв'як» – представляє тіло обертання, проста за конфігурацією. Деталь досить міцна і жорстка. Поверхні доступні для обробки. Найвищий квалітет точності – 6, шорсткість поверхні  $Ra = 0,63$  мкм на профілі витка. Вільні розміри виконуються за 14 квалітетом. Якісна оцінка технологічності конструкції характеризується такими показниками: добре (допустимо), погано (неприпустимо) [3, 4].

Показники технологічності конструкції деталі зведені в таблицю 1.3.

Таблиця 1.3 – Показники технологічності конструкції деталі «Черв'як»

Показники	Оцінка технологічності	
	Добре (припустимо)	Погано (неприпустимо)
1. Наявність у деталі стандартних і уніфікованих елементів	+	-
2. Можливість виготовлення деталі зі стандартних або уніфікованих матеріалів	+	-

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

та контролю		
6. Відповідність оформлення робочого креслення деталі вимогам ЄСКД	+	-

Висновок – деталь «Черв'як» – технологічна.

### 1.3 Висновки

На підставі проведеного аналізу конструкції деталі на технологічність, хімічного складу і механічних властивостей матеріалу можна зробити висновок, що деталь «Черв'як» – технологічна.

## 2 Технологічний розділ

### 2.1 Встановлення виробничої програми випуску деталей

Розмір партії визначимо за формулою:

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

### 2.2 Вибір і обґрунтування методу отримання заготовки

Метод отримання заготівлі для деталей визначається призначенням і конструкцією деталі, матеріалом, технічними вимогами і серійністю випуску, а також економічністю виготовлення. Вибрати заготівлю, означає встановити спосіб її отримання, намітити припуски на обробку кожної поверхні, розрахувати розміри і вказати допуски на неточність виготовлення.

Вибір заготовки визначимо на базі зіставлення варіантів: перший варіант – отримання заготовки методом прокату, а інший варіант – штампуванням.

Для кожного варіанта визначаємо масу заготовки за наближеною формулою:

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

$KVM_{штамповка} < KVM_{штамповка} < KVM_{штамповка} < KVM_{штамповка} < KVM_{штамповка}$

$$KVM_{штамповка} > KVM_{прокат}$$

За коефіцієнтом використання матеріалу заготовка, виготовлена штампуванням, буде кращим варіантом ніж з прокату.

### 2.3 Вибір методів обробки поверхонь

Розробимо маршрут обробки поверхонь деталі «Черв'як» відповідно до вимог, зазначених на кресленні, таких як точність, шорсткість та інші [3-5]. Отриманий результат занесемо в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Маршрут обробки поверхонь деталі

Поверхня	Квалітет	Шорсткість Ra,мкм	Маршрут обробки поверхні
250±0,575	6	12,5	1. Однократне фрезерування

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

250±0,575	14	12,5	1. Однократне фрезерування
-----------	----	------	----------------------------

#### 2.4 Вибір технологічних баз і розробка маршруту обробки деталі

Розроблений технологічний маршрут обробки деталі «Черв'як» з вибором обладнання та технологічних баз наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Технологічний маршрут обробки деталі

	Назва	Спосіб	Точність
<p>Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.</p>			
	ПААЗ 31-13	$\varnothing 25_{-0,033}$ , $\varnothing 28_{-0,210}$ , фаски, канавку В = 3	отвори
<p>Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.</p>			
	Стіл ВІК	розмірів	

## 2.5 Розрахунок припусків на механічну обробку

Для розрахунку припусків на обробку приймаємо розрахунковий метод

8051 61

1 050

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

припуск на кожен поверхню деталі, отримуючи таким чином розмір заготовки. Розрахунок починаємо з останнього переходу обробки.

Результати вибору і розрахунку зводимо в таблицю 2.4.



Таблиця 2.4 – Результати вибору та розрахунків міжопераційних припусків

Елементарна поверхня деталі та технологічний маршрут її обробки	Допуск, мм	Припуск, мм	Операційні розміри з допусками, мм
---	------------	-------------	------------------------------------

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

Технологічний маршрут | 0,025 | 0,15 | 0,10 |

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

Визначення режимів різання та норм часу за відповідними алгоритмами [6, 7].

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

Потужність шпинделя	2,5/1,5 кВт
Маса, т	3,5

Пристосування:

1) Призматичні тиски

Різальний інструмент:

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

3) Центрувати отвори  $\varnothing 4$  на глибину 9.

4) Зняти деталь.

Операція 015. Токарна з ЧПК

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

Максимальна потужність, кВт	14,9
Автоматично змінних інструментів, шт.	12

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

1) Різець контурний SDNCN 1616H-11 з пластиною DCM111T302-SM

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

до

~20-0,210 •

6) Точити чисто до  $\varnothing 25,16_{-0,033}$  на довжині 20 мм.

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

мм.

та

Зміст операції:

- 1) Встановити та закріпити деталь.
- 2) Точити начорно до  $\varnothing 28_{-0,210}$  на довжині 65 з підрізуванням торця до  $\varnothing 48_{-0,025}$ , точити фаску  $2,5 \times 45^{\circ}$ .
- 3) Точити фаску  $1,5 \times 45^{\circ}$ , точити чисто до  $\varnothing 25,15_{-0,033}$  на довжині 20 мм.

4) Точити канавку В = 3 до Ø24.

5) Зняти деталь.

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

Відстань від стола до торця шпинделя, мм	152-546
--	---------

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

Вимірювальний інструмент:

1) Центри

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

1) Центри

Різальний інструмент:

1) Фреза Ø63 ETS D63 M1 1.75 W25 C

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

Обладнання:

Установка СВЧ, індуктор.

Зміст операції:

1) Калити витки СВЧ на глибину  $h = 1,0 \div 1,5$  HRC 50÷52.

Операція 040. Шліфувальна

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

Момент приводу осі С, Нм	154
Супорт вісь Z	
Підшипники	500

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

Пристосування:

- 1) Центри
- 2) Патрон повідковий

Зміст операції:

- 1) Встановити та закріпити деталь.
- 2) Шліфувати витки черв'яка.
- 3) Зняти деталь.

Операція 045. Крутлошліфування

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

Технологічний хід, вісь X, мм	160
Подача стола, безступінчато, м/хв	0,1-4
Частота обертання шліфув. шпинделя, об/хв	1670
Частота обертання внутр. шліфув. шпинделя, об/хв	15000
Потужність двигуна зовнішнього шліф., кВт	4
Розмір шліфув. диска, мм	400×50×203
Габарити, мм	2900×2240×1750
Вага верстата, кг	2700

Пристосування:

1) Центри

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

ЯМ

ЦЯ.

Операція 050. Мийна

Обладнання: мийна машина.

Зміст операції: промити деталь.

Операція 055. Контрольна

Обладнання: стіл ВТК.

Зміст операції: контроль розмірів.

Вибір режимів різання

Операція 010. Фрезерно-центрувальна.

Перехід 2 – фрезерувати торці в розмір 250 мм.

1) Глибина фрезерування дорівнює припуску на торець

$t = z_{\max} = 2,5 \text{ мм.}$

2) Подача  $S_z = 0,12$  мм/зуб.

3) Швидкість різання:

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

$K_{ив}$  - коефіцієнт, що враховує матеріал інструменту,  $K_{ив} = 1$ .

4) Частота обертання фрези:

$$n = (1000 \cdot V) / (\pi \cdot D) = (1000 \cdot 40) / (3,14 \cdot 40) = 318 \text{ об/хв.}$$

Приймаємо  $n = 315$  об/хв., тоді  $V = 39,5$  м/хв.

5) Визначаємо силу різання:

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

де  $L$  – довжина оброблюємої поверхні,  $L = 30$  мм;

$l_1 + l_2 = 8,5$  мм – довжина врізання.

Режими різання, визначені табличним методом приведені в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Режими різання

Операція	$a_p$	$a_e$	$v_c$	$v_f$	$T$
----------	-------	-------	-------	-------	-----

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

020 Токарна з ЧПК					
2	1,0	0,5	1250	118	0,1
3	1,42	0,25	1250	100	0,065
4	3,0	0,1	1600	126	0,0036
025 Шпонково-фрезерна					
2	3,5	0,06	1000	18,8	5,0
030 Фрезерна					
2, 3	8,8	12,56	160	50	27
040 Шліфувальна					
2, 3	0,2	12,56	2340	35	24
045 Круглошліфувальна					
2	0,5	0,075	2350	35	6,6
3	0,03	0,005	2350	35	6,0

## Нормування операцій

Нормування технологічного процесу здійснюємо по кожній верстатній операції методом технічного розрахунку за нормативами.

Технічна норма часу незалежно від типу верстата і методу обробки:

$$T_{шк} = T_{шт} + T_{пз}/n,$$

де  $T_{шк}$  - норма штучно-калькуляційного часу, хв.

$T_{шт}$  - норма штучного часу, хв.

$T_{пз}$  - норма підготовчо-заключного часу на партію деталей

$n$  - розмір партії деталей, шт.

Для серійного виробництва розраховується тільки  $T_{шт}$ , оскільки розмір

партії деталей виходить великим і відношення  $\frac{T_{пз}}{n} \rightarrow 0$ .

Норма штучного часу:

$$T_{шт} = T_{о\Sigma} + T_{в} + T_{об} + T_{нп} ,$$

де  $T_{шт}$  - штучний час на обробку деталі, хв;

$T_{о\Sigma}$  - сумарний основний час за всіма переходами, хв.;

$T_{в}$  - допоміжний час на установку і зняття деталі, допоміжний час, пов'язаний з виконанням переходів, час на контрольні вимірювання і час холостих ходів, хв.

$T_{об}$  - час на організаційне і технічне обслуговування, хв.

$T_{нп}$  - час на нормовані перерви, хв.

Допоміжний час

$$T_{в} = T_{ву} + T_{во} + T_{вк} + T_{вхх}.$$

Результати виконаних розрахунків норм часу приведено в таблиці 2.11.

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

## 2.7 Висновки

В даному розділі було виконано розробку маршруту виготовлення деталі «Черв'як», розраховані припуски на механічну обробку та режими різання, проведено нормування часу на операції обробки даної деталі.

### 3 Спеціальний розділ

#### 3.1 Конструкція пристосування

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

знизу дві стандартні шпонки, для створення напрямної технологічної бази.

#### 3.2 Розрахунок пристосування

Точність верстатного пристосування при фрезеруванні шпонкових

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

де  $\Delta T$  – допуск на глибину паза шпонки;

$k_y$  – коефіцієнт посилення точності обробки;

$w$  – середньо-економічна точність фрезерування паза шпонки.

Дійсна похибка пристосування

$\Delta_{\text{д}} = \Delta_{\text{н}} + \Delta_{\text{п}} + \Delta_{\text{с}} + \Delta_{\text{т}} + \Delta_{\text{в}} + \Delta_{\text{д}} + \Delta_{\text{д}}$

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

$L$  - довжина утворюючий, по якій відбувається контакт, см;

$Rz$  - параметр шорсткості поверхні, мкм.

Похибка положення заготовки

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

Визначення зусилля затиску.

При фрезеруванні шпонкового паза основна складова сил різання  $P_z$  спрямована паралельно осі деталі та подвійній напрямній базі.

Зусилля затиску

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

т.

$n = 1000$  об/хв - частота обертання фрези;

$K_{mp} = 1,04$  - коефіцієнт, що враховує механічні властивості матеріалу заготовлі;

$x = 0,86$ ;  $y = 0,72$ ;  $u = 1,0$ ;  $q = 0,86$ ;  $w = 0$  - показники ступеня у формулі для розрахунку сил різання.

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

Технічна характеристика пневмоциліндра:

Діаметр поршня – 60 мм,

Діаметр штока – 30 мм,

Хід поршня – 10 мм.

### 3.3 Висновки

В даному розділі спроектовано верстатний пристрій для фрезерування шпонкового паза 6N9. Проведено розрахунок пристосування, виконано кресленик та специфікацію.

## 4 Науково-дослідницький розділ

### 4.1 Постановка задачі дослідження

Оптимальним режимом різання є таке поєднання глибини, подачі та швидкості різання, при якому механічна обробка заготовки здійснюється найбільш економічно з дотриманням вимог до точності, шорсткості та якості оброблених поверхонь. Розрахунок оптимальних режимів різання представляє собою складну техніко-економічну багатофакторну варіаційну задачу, розв'язання якої ефективніше здійснюється з використанням ЕОМ та математичних методів програмування.

Переваги пошуку оптимальних режимів різання на металообробних станках:

мів  
і і  
ть  
та  
их  
ця  
ти  
сті

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

- Мінімізація впливу на довкілля: ефективні режими різання можуть сприяти зменшенню споживання енергії та інших ресурсів, що допомагає знизити негативний вплив на навколишнє середовище.

Недоліки пошуку оптимальних режимів різання:

- Складність налаштувань: процес пошуку оптимальних режимів може бути складним і вимагати великої кількості часу та експертної кваліфікації;

- Необхідність постійного моніторингу: для підтримки оптимальних режимів необхідно постійно моніторити стан інструментів та обладнання, що може вимагати додаткових зусиль та ресурсів;

- Витрати на обладнання та програмне забезпечення: впровадження систем оптимізації може вимагати інвестицій у спеціальне обладнання та програмне забезпечення;

- Обмеження в застосуванні: деякі види матеріалів чи виробів можуть не піддаватися ефективному пошуку оптимальних режимів різання, що обмежує область їх застосування;

- Ризик помилок: неправильно налаштовані оптимальні режими можуть призвести до дефектів виробів або прискореного зносу інструментів.

Алгоритм визначення оптимальних режимів різання технологічної операції фрезерування шпонкового пазу наступний:

- вихідні дані;

- створення математичної моделі у вигляді системи технічних обмежень, виражених лінійними нерівностями разом із лінійним рівнянням цільової функції;

- вирішення задачі оптимізації на ЕОМ за допомогою симплекс-методу лінійного програмування. У якості критерію оптимальності прийнято мінімальну собівартість обробки.

У задачі оптимізації режимних параметрів, наприклад, при токарній обробці регулюючими факторами є чистота обертання шпинделя  $n$  (визначає швидкість різання) і подача супорта  $S$ . Математичну модель складають функціональні зв'язки цих параметрів із низкою обмежень, обумовлених можливостями технологічної системи [9, 10, 11]. Завдання оптимізації полягає у відшуканні в області допустимих режимів такої точки  $(n, S)$ , в якій обраний критерій оптимальності (наприклад, машинний час обробки) має екстремальне значення.

Вибір технічних обмежень буде залежати від виду обробки і визначиться конкретними умовами технологічного, конструктивного та виробничого характеру. Розглянемо задачу двопараметричної оптимізації режимів різання (числа обертів шпинделю та подачі).

В роботі [11] розглянуто методи вирішення задач з оптимізації режимів різання, наведено принципи побудови математичних моделей та вибір відповідних технічних обмежень. Авторами досліджень [12] показано використання спеціальних додатків для знаходження оптимальних режимів різання.

В даній роботі будемо використовувати спеціальний прикладний додаток, потім розробимо свою математичну модель з технічними обмеженнями, визначимо оптимальні режими за двома способами та порівняємо отримані результати.

#### 4.2 Оптимізація режимів різання при фрезеруванні

Вихідні дані.

**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.

1-й спосіб: використання спеціального прикладного додатку.

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

Ширина фрезерування – 6 мм;  
Радіус леза при вершині – 0,2 мм;  
Кути в плані – 60° та 30°.

Після введення в програму даних отримаємо результати, які приведені на рисунках 4.3 – 4.5. Криві технічних обмежень позначені 1, 2 – максимальна та мінімальна частота обертання шпинделя, 3,4 – максимальна та мінімальна подача верстата, 5 – допустима шорсткість поверхні, 6 – стійкість інструменту, 7 – потужність верстата, 8 – максимально допустима сила подачі.

---

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

---

Рис. 4.3 – Інтерфейс програми для визначення оптимальних режимів різання;  $A_1$  – характерна точка; технічні обмеження: 1, 2 – максимальна та мінімальна частота обертання шпинделя, 3,4 – максимальна та мінімальна подача верстата, 5 – допустима шорсткість поверхні, 6 – стійкість інструменту, 7 – потужність верстата, 8 – максимально допустима сила подачі

---

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

Рис. 4.4 – Інтерфейс програми для визначення оптимальних режимів різання;  $A_2$  – характерна точка; технічні обмеження: 1, 2 – максимальна та мінімальна частота обертання шпинделя, 3,4 – максимальна та мінімальна подача верстата, 5 – допустима шорсткість поверхні, 6 – стійкість інструменту, 7 – потужність верстата, 8 – максимально допустима сила подачі

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

Рис. 4.5 – Інтерфейс програми для визначення оптимальних режимів різання;  $A_3$  – характерна точка; технічні обмеження: 1, 2 – максимальна та мінімальна частота обертання шпинделя, 3,4 – максимальна та мінімальна подача верстата, 5 – допустима шорсткість поверхні, 6 – стійкість інструменту, 7 – потужність верстата, 8 – максимально допустима сила подачі

На рисунках 4.3 – 4.5 область оптимальних режимів різання знаходиться між кривими 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8. У відповідності з рішенням задачі оптимізації задовольняти всім обмеженням буде точка  $A_2$ , як найбільш віддалена від начала координат (рис. 4.4).

Оптимальні значення елементів режиму різання:

- частота обертів  $n = 1714$  об/хв;
- подача на зуб  $S_z = 0,246$  мм/зуб;
- сила різання  $P_z = 2302,2$  Н.

Крім того, на двох інших графіках (рис. 4.3, 4.5) я виділив ще характерні точки  $A_1$  та  $A_3$ , щоб зробити більш глибокий аналіз.

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

Вибір технічних обмежень.

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

$z = 3$  – кількість зубів фрези;

$K_{mp} = 1,0$ .

2) Обмеження за стійкістю інструмента

1000 0 01 0 0 0

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

де  $E = 2,1 \cdot 10^5$  – модуль пружності матеріалу державки, Н/мм<sup>2</sup>;

$I$  – момент інерції перерізу державки;

$f$  – допустима величина відтиску фрези;

$L_{вф}$  – виліт фрези;

$K_{mp}$ ,  $K$  – коефіцієнти.

4) Обмеження за точністю обробки

$$n^{-w} \cdot S_z^y \leq \frac{T_H \cdot D^q}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^x \cdot B^n \cdot z \cdot K_{mp} \cdot \omega \cdot K'} \quad (4.4)$$

де  $\omega$  – піддатливість технологічної системи;

$T_H$  – величина допуску розміру, який оброблюється.

5) Обмеження за шорсткістю обробленої поверхні

$$S_z \leq 2,82 \cdot r^{0,5} \cdot R_z^{0,5}, \quad (4.5)$$

де  $r$  – радіус заокруглення різальної кромки;

$R_z$  – розрахункова величина нерівностей.

6) Обмеження за мінімальними обертами шпинделя

$$n \geq n_{min}, \quad (4.6)$$

$$n \geq 10.$$

7) Обмеження за максимальними обертами шпинделя

$$n \leq n_{max}, \quad (4.7)$$

$$n \leq 3000.$$

8) Обмеження за мінімальною подачею

$$n \cdot S_z \geq \frac{S_{XB \min}}{z}, \quad (4.8)$$

$$n \cdot S_z \geq \frac{10}{z}$$

9) Обмеження за максимальною подачею

$$n \cdot S_z \leq \frac{S_{XB \max}}{z}, \quad (4.9)$$

$$n \cdot S_z \leq \frac{1250}{z}.$$

Цільова функція.

Вибрані технічні обмеження разом із цільовою функцією дозволяють побудувати математичну модель процесу обробки. Як цільову функцію прийнято собівартість операції  $F$ , яка виражається через режими обробки у вигляді

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

Подача множиться на 100, щоб уникнути отримання негативних значень логарифмів. Введемо позначення:  $y = \ln(n)$ ,  $x = \ln(100 \cdot S_z)$ .

Для математичних обчислень та побудови графіків використовуємо пакет MathCad та додаток Geogebra [13].

В загальному вигляді система обмежень для фрезерної обробки буде мати вигляд (4.11).

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

Після проведення математичних перетворень у виразі (4.11) отримаємо математичну модель для визначення оптимальних режимів різання при фрезеруванні шпонкового пазу (4.12) [13].

Зазначена математична модель не є вичерпною та може бути доповнена в міру виявлення додаткових даних про фізичних, кінематичних та

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

Визначення оптимальних режимів обробки за моделлю (4.12) виконаємо графічним способом. У цьому випадку кожне технічне обмеження представляється граничною прямою, яка визначає фігуру, де можливе існування рішень системи нерівностей. Граничні прямі, перетинаючись, утворюють багатокутник рішень, всередині якого координати будь-якої точки задовольняють усім без винятку обмежень.

Тому завдання пошуку оптимальних значень  $x$  і  $y$  зводиться до теорії лінійного програмування де показано, що екстремальне значення цільової функції при опуклому багатокутнику рішень забезпечується для  $x$  і  $y$ , відповідних точці, що лежить на однієї з граничних прямих, або точки їх перетину. Після цього необхідно послідовно обчислити координати усіх можливих точок перетину граничних прямих та визначити для них

**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.

Рис. 4.6 – Графічне рішення задачі (діаметр фрези 6 мм) з технічними обмеженнями: 1 – за потужністю приводу головного руху верстата, 2 – за стійкістю інструмента, 3 – за жорсткістю інструмента, 4 – за точністю обробки, 5 – за шорсткістю обробленої поверхні, 6 – за мінімальними обертами шпинделя, 7 – за максимальними обертами шпинделя, 8 – за мінімальною подачею, 9 – за максимальною подачею

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.

При цьому при рішенні за 1-м способом параметри режимів різання, що практично збігаються з 2-м способом, знаходяться в області шуканих рішень і складають  $S_z = 0,026$  мм/зуб,  $n = 2057$  об/хв. (рис. 4.7).

Таким чином, для фрезерування паза довжиною 32 мм на глибину 3,5 мм фрезою  $\varnothing 6$  мм визначено оптимальні значення подачі та частоти обертів шпинделя, які становлять  $S_z = 0,03$  мм/зуб,  $n = 2059,05$  об/хв.

Проведено порівняння визначення оптимальних режимів різання за допомогою прикладної програми та розробленої математичної моделі та встановлено відмінність в отриманих значеннях: 1-й спосіб –  $S_z = 0,246$  мм/зуб,  $n = 1714$  об/хв., 2-й спосіб –  $S_z = 0,03$  мм/зуб,  $n = 2059,05$  об/хв.

Оптимальні режими різання, визначені за створеною математичною моделлю, дозволять знизити величину сили різання і, отже, енергію, що споживається верстатом.

Створена математична модель може бути використана щодо оптимальних режимів різання при фрезеруванні шпонкових пазів на верстатах з ЧПК.

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

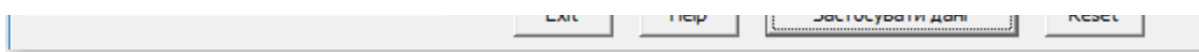


Рис. 4.7 – Інтерфейс програми для визначення оптимальних режимів різання;  $A_4$  – точка, яка співпадає з рішенням за розробленою математичною моделлю; технічні обмеження: 1, 2 – максимальна та мінімальна частота обертання шпинделя, 3,4 – максимальна та мінімальна подача верстата, 5 – допустима шорсткість поверхні, 6 – стійкість інструменту, 7 – потужність верстата, 8 – максимально допустима сила подачі

### 4.3 Висновки

В даному розділі було розглянуто оптимізацію режимів різання при фрезеруванні шпонкового пазу. Створено математичну модель, визначено оптимальні значення подачі та числа обертів шпинделя. Виконано порівняльний аналіз математичної моделі з прикладною програмою для визначення режимів різання.

## 5 Загальні висновки

В аналітичному розділі на підставі проведеного аналізу конструкції деталі на технологічність, хімічного складу і механічних властивостей матеріалу зроблено висновок, що деталь «Черв'як» – технологічна.

В технологічному розділі виконано розробку маршруту виготовлення деталі «Черв'як», розраховані припуски на механічну обробку та режими різання, проведено нормування часу на операції обробки даної деталі.

В спеціальному розділі спроектовано верстатний пристрій для фрезерування шпонкового паза 6N9. Проведено розрахунок пристосування, виконано кресленик та специфікацію.

В науково-дослідницькому розділі було розглянуто оптимізацію режимів різання при фрезеруванні шпонкового пазу. Створено математичну модель, визначено оптимальні значення подачі та числа обертів шпинделя. Виконано порівняльний аналіз математичної моделі з прикладною програмою для визначення режимів різання.

**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.

Кравченко, В.Г. Олейниченко. – Дніпропетровськ: НГАУ, 2002. – 15 с.

6. Ю. Паливода. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки: навчально-методичний посібник / Ю. Паливода, А. Дячун, Р. Лещук. – Тернопіль, Тернопільський національний технічний університет ім. І.Пулюя, 2019. – 240с.

7. Дідик Р.П. Розрахункові операції режимів механічної обробки матеріалів: точіння, свердління, зенкерування, розгортання: навч. посіб. / Р.П. Дідик, В.В. Зіль, С.Т. Пацера. – Д.: «Національний гірничий університет», 2013. – 196 с.

8. Приходько В.П., Литвин О.В. Проектування оснащення верстатів, роботів і машин: Навч. посіб. / Приходько В.П., О.В.Литвин. – [Електронний ресурс] / - К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. – 212 с.

9. Оптимізація режимів різання на важких верстатах. Клименко Г.П., Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В., Щербакова А.Ю. / Вісник НТУ «ХПІ», 2022. №2 (6). С. 43-48.

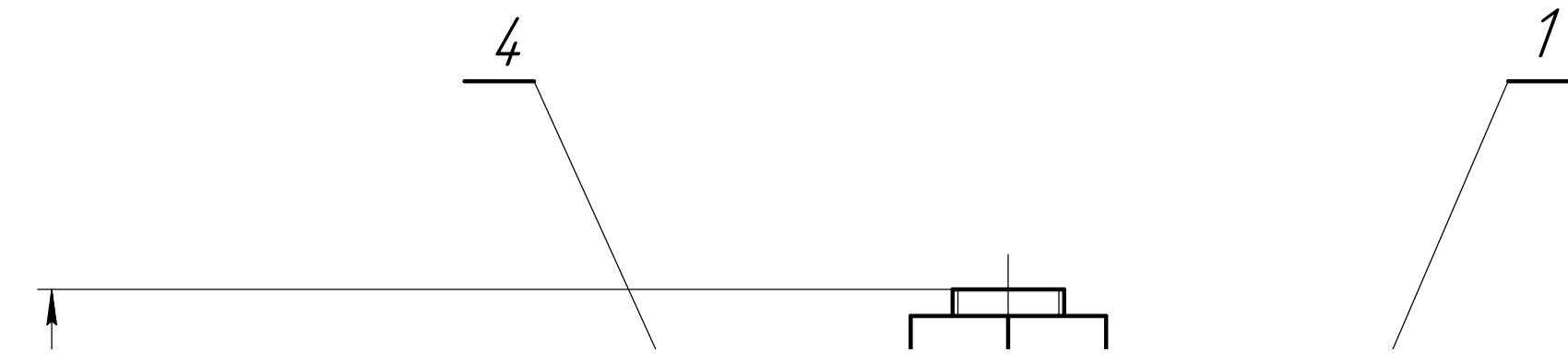
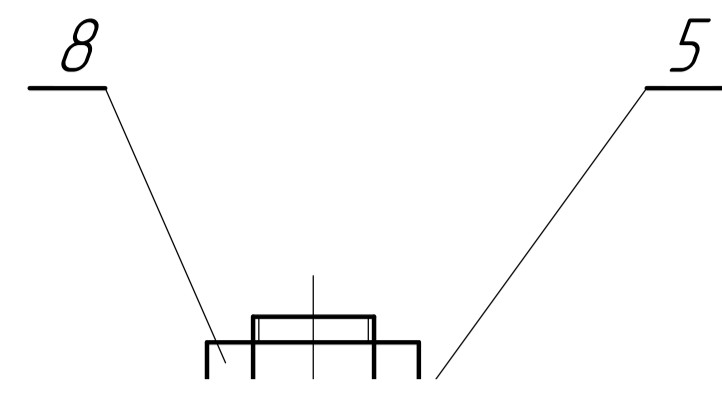
10. Математичне моделювання та оптимізація процесів металообробки : монографія / Ф.В. Новіков. – Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. – 384 с.
11. Кроль О.С. Методи та процедури оптимізації режимів різання: монографія. - Луганськ: вид-во ВНУ ім. В. Даля, 2013. – 260 с
12. Богданов О.О. Використання пакетів прикладних програм при визначенні оптимальних режимів різання / О.О. Богданов, В.У. Григоренко // Національний гірничий університет. Збірник наукових праць. – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2023. – № 72. – С. 194-201.
13. Щербина Є.Ю. Визначення режимів різання при фрезеруванні шпонкового пазу / Щербина Є.Ю., Захаров В.В. // «Наукова весна» 2024: матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 27–29 березня 2024 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2024. – С . 30-31.

## ДОДАТКИ





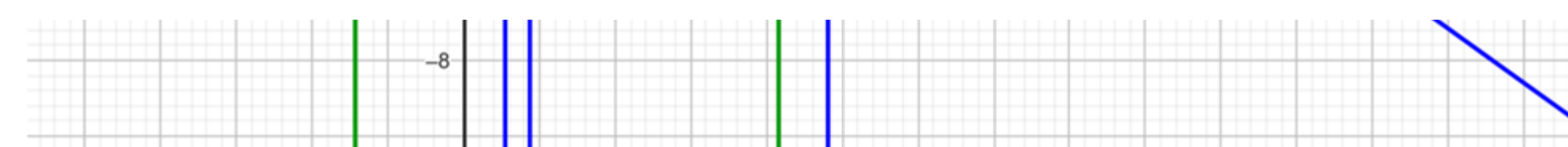
Конференційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 18.06.2024р.



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.

Математична модель



Графічне рішення задачі (діаметр фрези 6 мм) з технічними обмеженнями: 1 – за потужністю приводу головного руху верстата, 2 – за стійкістю інструмента, 3 – за жорсткістю інструмента, 4 – за точністю обробки, 5 – за шорсткістю обробленої поверхні, 6 – за мінімальними обертами шпинделя, 7 – за максимальними обертами шпинделя, 8 – за мінімальною подачею, 9 – за максимальною подачею