

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет транспорту та механічної інженерії
Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ
ОСВІТИ «МАГІСТР»

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ДЛЯ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ

спеціальність 131 Прикладна механіка
освітня програма Прикладна механіка

Виконав: здобувач вищої освіти
Групи ІМм-21
Саєнко Микола Віталійович

(підпис)

Керівник:
К.т.н., доцент
Гальчук Тетяна Никифорівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 20__ р.
К.т.н., доцент
Гарант освітньої програми:
Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Луцьк – 2024 року

Луцький національний технічний університет

Факультет: транспорту та механічної інженерії

Кафедра: прикладної механіки та мехатроніки

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

Освітня програма: Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(Редько Р.Г.)

“ _____ ” _____ 2024р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Саєнко Миколі Віталійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи Оптимізація режимів різання для токарної обробки деталей.

Керівник роботи Гальчук Тетяна Никифорівна, к.т.н., доцент.

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ 30 ” грудня 2023 р. № 452/01-02

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 01.12.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: креслення деталі вал шліцьовий, програма випуску 20000 шт/рік, нормативні дані, стандартні методики для експериментальних досліджень.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):
Анотація. Вступ. Розділ 1. Огляд оптимізації режимів токарної обробки. Розділ 2. Технологічні особливості токарної обробки деталей типу тіл обертання. Розділ 3. Оптимізаційне дослідження режимів токарної обробки. Розділ 4. Дослідження параметрів процесу різання з обліком обмежень для токарної обробки. Розділ 5. Оцінка очікуваної економічної ефективності дослідження. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

Креслення деталі – 1 лист (ф.А2), КІН – 1 лист (ф.А1), складальне креслення верстатного пристрою - 1 лист (ф.А1)

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання

04.01.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розділ 1. Огляд оптимізації режимів токарної обробки</i>	<i>18.05.2024р.</i>	
2.	<i>Розділ 2. Технологічні особливості токарної обробки деталей типу тіл обертання</i>	<i>22.09.2024р.</i>	
3.	<i>Розділ 3. Оптимізаційне дослідження режимів токарної обробки</i>	<i>12.10.2024р.</i>	
4.	<i>Розділ 4. Дослідження параметрів процесу різання з обліком обмежень для токарної обробки.</i>	<i>26.10.2024р.</i>	
5.	<i>Розділ 5. Оцінка очікуваної економічної ефективності дослідження</i>	<i>02.11.2024р.</i>	
6.	<i>Висновки</i>	<i>09.11.2024р.</i>	
7.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	<i>16.11.2024р.</i>	
8.	<i>Формування додатків</i>	<i>23.11.2024р.</i>	
9.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	<i>30.11.2024р.</i>	
10.	<i>Нормоконтроль</i>	<i>05.12.2024р.</i>	
11.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	<i>07.12.2024р.</i>	
12.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи до захисту</i>	<i>12.12.2024р.</i>	

Здобувач вищої освіти

Сасенко М.В.

Керівник кваліфікаційної роботи

Гальчук Т.Н.

АНОТАЦІЯ

Саєнко М.В. Оптимізація режимів різання для токарної обробки деталей.
Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра освітньої програми «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2024.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків (згідно структури кваліфікаційної роботи, затвердженої кафедрою).

У роботі проведено дослідження з вирішення проблеми підвищення ефективності обробки шляхом оптимізації вибору геометричних параметрів різального інструменту та режимів різання токарної обробки деталі типу «вал». Для цього зроблено інформаційно-аналітичне дослідження існуючих методів оптимізації технологічних параметрів для токарної обробки; технологічні розрахунки і оптимізація технологічного маршруту деталі «вал шліцьовий» як деталі-представника; запропоновано вирішення оптимізаційної задачі визначення раціональних режимів різання для точіння з дослідженням параметрів процесу різання за обліком обмежень для токарної обробки; дано техніко-економічне обґрунтування технологічних і конструкторських рішень.

Ключові слова: оптимізація, точіння, модель, параметри, технологія, режими.

ABSTRACT

Sayenko M.V. Optimization of cutting modes for turning parts. Manuscript.

Qualifying thesis of the "Applied Mechanics" educational program, specialty 131 Applied Mechanics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2024.

The master's qualification work consists of an introduction, five sections, conclusions, a list of used sources, appendices (according to the structure of the qualification work approved by the department).

In the work, a study was carried out to solve the problem of increasing the processing efficiency by optimizing the selection of the geometric parameters of the cutting tool and the cutting modes of the turning processing of the "shaft" type part. For this, an information-analytical study of existing methods of optimizing technological parameters for turning processing was carried out; technological calculations and optimization of the technological route of the splined shaft part as a representative part; a solution to the optimization problem of determining rational cutting modes for turning with the study of the parameters of the cutting process taking into account the limitations for turning processing is proposed; technical and economic justification of technological and design solutions is given.

Keywords: optimization, turning, model, parameters, technology, modes.

Зміст

	стр.
ВСТУП.....	7
1. Розділ 1. Огляд оптимізації режимів токарної обробки	9
1.1. Задачі оптимізації.....	9
1.2. Критерії оптимізації для механічної обробки різанням матеріалів..	10
1.3. Аналіз дослідження вибору оптимальних режимів різання для токарної обробки	11
1.4. Економічні і технічні передумови оптимізаційного дослідження процесів різання.....	13
1.5. Висновки до 1-го розділу.....	14
2. Розділ 2. Технологічні особливості токарної обробки деталей типу тіл обертання	15
2.1. Конструкторсько-технологічна класифікація деталей типу тіл обертання	15
2.2. Конструкторсько-технологічний аналіз деталі та вибір заготовки..	18
2.3. Обґрунтування раціонального технологічного маршруту та визначення типу виробництва.....	20
2.4. Визначення припусків, режимів різання та технічної норми часу...	21
2.5. Конструювання оснащення для виготовлення деталі.....	27
2.6. Висновки до 2-го розділу.....	33
3. Розділ 3. Оптимізаційне дослідження режимів токарної обробки..	35
3.1. Система різання та її оптимізація.....	35
3.2. Математичне моделювання задач параметричної оптимізації.....	36
3.3. Оптимізація процесу різання для технологічних обмежень.....	38
3.4. Науково-практичні закономірності процесу різання матеріалів.....	40
3.5. Висновки до 3-го розділу.....	43
4. Дослідження параметрів процесу різання з обліком обмежень для токарної обробки.....	44
4.1. Обладнання для експериментального дослідження.....	44

4.2.	Методика планування багатофакторного експерименту.....	45
4.3.	Вплив геометрії ріжучого інструменту на силу різання під час токарної обробки валу із сталі 45.....	47
4.4.	Вплив режимів різання на силу різання для токарної обробки валу із сталі 45	48
4.5.	Оптимізація режимів різання під час обробки деталі.....	49
4.6.	Висновки до 4-го розділу.....	52
5.	Розділ 5. Оцінка очікуваної економічної ефективності дослідження	54
5.1.	Розрахунок кошторису капітальних витрат на модернізацію існуючого технологічного процесу	54
5.2.	Розрахунок виробничої собівартості виготовлення одиниці продукції.....	58
5.3.	Розрахунок ціни реалізації виробу	60
5.4.	Розрахунок величини чистого прибутку	61
5.5.	Оцінювання економічної ефективності інноваційних рішень.....	62
5.6.	Висновки до 5-го розділу.....	64
	Висновки.....	65
	Список використаних джерел.....	67
	Додатки.....	71

ВСТУП

Актуальність теми. Однією із головних задач, які розв'язують під час проектування технологічних процесів виготовлення деталей у машинобудуванні, є досягнення якомога меншої собівартості механічної обробки за умови забезпечення якісних показників оброблених деталей – форми поверхні і поверхневого шару. За цих умов зменшення собівартості досягається раціональним вибором режимів різання.

Тому оптимізаційні дослідження режимів різання, які забезпечують вимоги до якості обробленої поверхні для виконання заданих умов обробки є актуальним завданням.

Мета і задачі дослідження. Метою магістерської кваліфікаційної роботи є вирішення проблеми підвищення ефективності обробки шляхом оптимізації вибору геометричних параметрів різального інструменту та режимів різання токарної обробки деталі типу «вал».

Для цього необхідно вирішити такі задачі:

- провести інформаційно-аналітичне дослідження існуючих методів оптимізації технологічних параметрів для токарної обробки;
- провести технологічні розрахунки і оптимізувати технологічний маршрут деталі «вал шліцьовий» як деталі-представника;
- запропонувати вирішення оптимізаційної задачі визначення раціональних режимів різання для точіння;
- дослідити параметри процесу різання з обліком обмежень для токарної обробки;
- запропонувати техніко-економічне обґрунтування технологічних і конструкторських рішень.

Об'єкт дослідження – процеси токарної обробки на верстатах і їх вплив на техніко-економічні показники.

Предмет дослідження – регульовані параметри режимів обробки на токарних верстатах.

Методологія і методика досліджень. Під час виконання роботи використовувались сучасні методи, прилади та обладнання. Результати досліджень опрацьовані методами математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі аналізу вже відомих підходів запропоновано модернізовану структуру оптимізаційних досліджень для проектування технологічних процесів.

Практичне значення одержаних результатів. Здійснено використання цільової функції процесу, сформульована загальна математична модель, виведені часткові моделі для розв'язування задач аналітично і графічно одночасно.

Апробація результатів магістерської роботи. Робота доповідалась та отримала позитивний відгук на розширеному засіданні науково семінару кафедри прикладної механіки та мехатроніки; IV студентській науково-технічній конференції «Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії» м. Луцьк, 15 листопада, 2024 року.

Достовірність теоретичних положень магістерської кваліфікаційної роботи підтверджується повною відповідністю поставленим задачам.

Публікації. Результати магістерської роботи опубліковані у праці – Саєнко М. Дослідження параметрів процесу різання з обліком обмежень для токарної обробки: тези IV студентської науково-технічної конференції «Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії». Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 9-11.

URL: https://drive.google.com/file/d/1_deYwBn4JXO5u9_hga3n3B39M/view?usp=drive_link..

РОЗДІЛ 1

Огляд оптимізації режимів токарної обробки

1.1. Задачі оптимізації

Під час вибору оптимального рішення в технічних задачах використовуються оптимізаційні задачі [1]. Для цього використовують різні методи оптимізації, які ґрунтуються на використанні методів математичного програмування. На технічні системи [2] також накладаються обмеження, щодо залежності між змінними керування та граничні умови, в яких може функціонувати технічна система чи об'єкт. Сукупність значень змінних, які задовольняють вимогам обмежень і граничних умов, разом складають інтегральну область можливих допустимих рішень. У цій області знаходиться оптимальні параметри для задачі.

Оптимальне рішення знайти важко через велику кількість факторів, які діють на конкретну технічну систему чи об'єкт. Тому із можливих рішень знаходять оптимальне використовуючи поняття функції мети або ж цільової функції.

Мета оптимізації є одна або декілька якісних характеристик. Формалізовано цільова функція виражають через критерії оптимізації. За критерій оптимізації приймають вибір певного рішення із декількох з області допустимих рішень.

Кожний технічний об'єкт чи процес характеризується структурою і параметрами [1]. Тому розрізняють структурну і параметричну оптимізацію. Коли розглядається оптимізація режимів різання то мають на увазі параметричну оптимізацію. Також може розглядатися оптимізація інших технологічних параметрів, а саме: допуски на міжопераційні розміри, припуски тощо.

В загальному функцію мети для параметричної оптимізації формулюється так [3]:

$$E(x_1, x_2, \dots, x_n) \Rightarrow (\max, \min),$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – це керовані параметри, які підлягають оптимізації,
 n – кількість параметрів.

Якщо цільова функція має досягати максимального значення, то вирішується задача максимізації, а якщо – мінімального значення, то задача мінімізації цільової функції. Також враховується система обмежень, яка формує область допустимих рішень.

Таким чином постановка задачі параметричної оптимізації в загальному вигляді формулюється як задача знаходження параметрів, які задовольняють обмеженням і при досягаються максимальні чи мінімальні значення цільової функції в залежності від характеру постановки задачі.

1.2. Критерії оптимізації для механічної обробки різанням матеріалів

Задача, яку вирішують під час проектування технологічних процесів виготовлення деталей у машинобудуванні, полягає у досягненні найменшої собівартості механічної обробки [4] за умови забезпечення якісних показників оброблених деталей. Зниження собівартості досягається і за рахунок раціонального вибору режимів різання.

Оптимізаційні дослідження режимів різання, які забезпечують вимоги якості обробленої поверхні для виконання заданих умов обробки є актуальним завданням.

Повна вартість виготовлення деталі безпосередньо пов'язана із її собівартістю. Собівартість включає витрати на обладнання і його ремонт, оплату праці робітників, вартість енергоносіїв, матеріалів та інструментів. Таким чином, собівартість це узагальнений критерій оптимізації, що виражає сумарні витрати на виробництво деталі, є найдоцільнішим критерієм для оптимізаційного дослідження. А елементи режимів різання це параметри, що можна змінювати найбільш просто і ефективно, і при цьому впливати істотно на критерій собівартості.

В той же час часто застосовують також інші критерії оптимізації. А саме такі: максимальна продуктивність, мінімальна собівартість, мінімальні витрати на інструменти, які в комплексі дозволяють розглянути задачу багатокритеріальної оптимізації. Однак, більшість дослідників все таки зупиняються на розгляді критерію максимальної продуктивності обробки [5].

1.3. Аналіз дослідження вибору оптимальних режимів різання для токарної обробки

Останнім часом широко використовуються різні інтерпретації оптимізації режимів різання, а особливо для токарних операцій. Серед параметрів, якими оперують найчастіше обирають 2 параметри: частоту обертання шпинделя і подачу. Ці фактори повинні забезпечувати відповідність до системи обмежень, і дозволяти досягнення екстремального значення функції мети у вигляді добутку вказаних параметрів. При цьому цільову функцію виражають так: $(n \cdot S \Rightarrow \max)$.

Як обмеження використовують [6]:

- граничні значення подач і частот обертання шпинделя,
- стійкість різальної частини інструменту,
- шорсткість оброблювальної поверхні (для чистовій обробці),
- складові зусиль різання.

Для отримання математичної моделі процесу обробки всі виведені нерівності об'єднують у єдину систему. Таким чином, отримують область допустимих рішень, а також у сукупності із поведінкою цільової функції – загальну математичну модель. Подібні рішення представляють графічно (рис. 1.1).

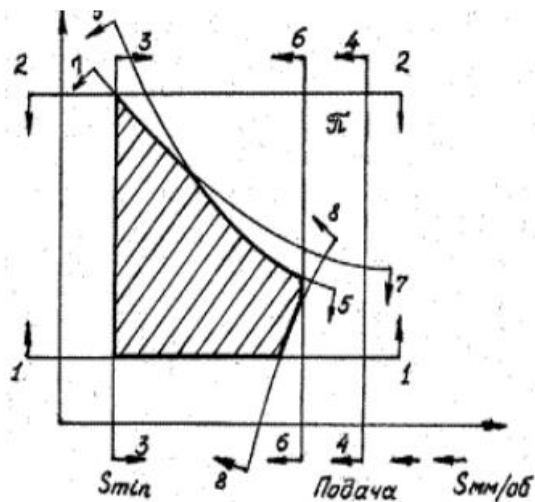


Рис. 1.1- Типова побудова області рішень допустимих обмеженнями

Поряд з цим часто використовують модель у лінійній постановці, після логарифмування із застосуванням десяткових або натуральних логарифмів [7]. На рис. 1.2 показано побудову допустимої області у лінійній постановці (для позначення лінійних параметрів як x_1 та x_2).

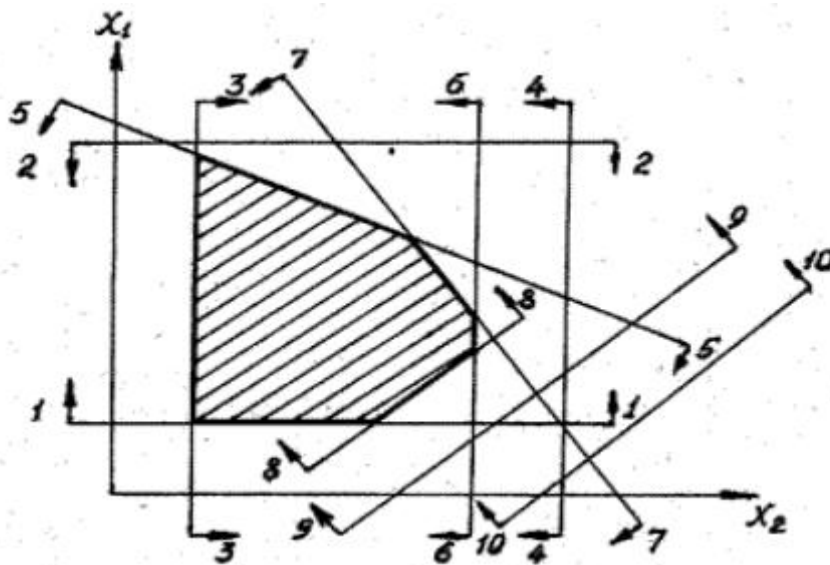


Рис. 1.2 - Типова лінеаризація області рішень, які допускаються обмеженнями

Такий метод лінійного програмування дає можливість оптимізувати швидкість різання і подачу досягаючи під час обробки максимальної продуктивності, що є зручним для випадку, коли цільова функція і функції обмежень представляються у нелінійній постановці. Також є зручним використовувати графічний пошук оптимального рішення [8].

Однак для нелінійної постановки часто виявляється неможливим застосувати метод лінійного програмування. Тоді використовують метод геометричного програмування [9]. За допомогою цього методу вирішують задачу оптимізації в нелінійній постановці, так як і представляються функції, що виражають обмеження і собівартість обробки, зокрема для точіння. Але в цьому разі є обов'язкова вимога – функція мети як і функції обмежень мають бути представлені у вигляді «позитивних поліномів», а значить виражені степеневими залежностями [1].

1.4. Економічні і технічні передумови оптимізаційного дослідження процесів різання

Економічні і технічні передумови є основою для оптимізації для різання металів [10]. У таких зв'язках щодо розглядуваної системи відображені закономірності теорії різання металів і її практичного застосування. Для оптимізації процесу різання необхідним є знаходження загальної функціональної залежності технічних і економічних характеристик від режимів обробки. Залежності повинні бути найбільш характерними для конкретного способу обробки.

Методика пошуку підходів до оптимізації є різноманітною і базується на послідовному підборі та оцінці різних методів [11]. В цьому випадку використовують різні варіанти задач пошуку необхідної обробки для вибору оптимального методу.

Варіанти зводяться до трьох методів:

- 1) за одним параметром із множини його значень, що є вирішення задачі оптимізації на екстремум;
- 2) за оптимальною комбінацією значень декількох параметрів для заданого критерію оціночної функції або функції мети;
- 3) на основі аналізу множини умов.

Найбільш доцільним для використання є другий варіант.

Таким чином, процедура пошуку під час оптимізації режимів різання охоплює ряд етапів:

1) встановлення границь технологічної системи різання для оптимізації (формування технічних обмежень системи);

2) визначення функції мети - кількісного критерію оптимізаційного дослідження з метою знаходження найкращого;

3) математичне моделювання системи різання оптимізаційної задачі, з врахуванням усіх незалежних параметрів у поєднанні із виразами для цільової функції і функціональними залежностями для нерівностей, що описують накладені на систему обмеження.

В даній постановці будемо розглядати застосування оптимізацію процесу різання для випадку токарної обробки.

Можливість і необхідність оптимізації для токарної обробки має широке застосування. Це пояснюється тим, що токарна обробка найбільш використовується в машинобудуванні. Для токарних верстатів характерний високий ступінь автоматизації, зокрема верстатів з ЧПК і верстатів з адаптивним керуванням. Таке дороге обладнання приносить вагомий ефект лише за його інтенсивного використання. Використання числового програмного керування скорочує невиробничі витрати, допоміжний час, а також підготовчий і заключний час. У відсотках для верстатів з ЧПК основний час складає вдвічі більшу долю порівняно із верстатами із ручним керуванням [12]. Також, результати отримані для оптимізації точіння можна застосувати і для наступних методів обробки.

1.5. Висновки до 1-го розділу

На основі аналізу інформаційного пошуку встановлено, що для проектування технологічних процесів механічної обробки в першу чергу надається значення забезпеченню високої економічності процесу обробки. Такими важливішими характеристиками пошуку оптимального технологічного

процесу є штучний технологічний час або штучна продуктивність, що визначаються і прийнятими режимами обробки.

Методику вирішення поставленої проблеми можна запропонувати в певній послідовності. Раціональним є те, що оптимізаційну задачу можна поділити на маршрутну, операційну та внутрішню операційну складові. Зокрема, стосовно для точіння (наприклад валів) наближено можна говорити про такі етапи раціонального пошуку оптимального складового елемента технологічного процесу обробки: розподіл припусків; оптимізація силового режиму точіння; досягнення високої якості поверхні для чистового оброблення; забезпечення високого рівня працездатності технологічної системою.

В цьому плані і вирішуватиметься головне завдання даної роботи.

РОЗДІЛ 2

Технологічні особливості токарної обробки деталей типу тіл обертання

2.1. Конструкторсько-технологічна класифікація деталей типу тіл обертання

Деталі типу тіл обертання є складовою частиною майже усіх машин та механізмів. Усе різноманіття тіл обертання можна розподілити на деталі за призначенням: загальномашинобудівного (вали, осі, втулки, барабани тощо), спеціалізованого (шпинделі, ходові гвинти, кулачкові вали) та спеціального (шнеки, колісні пари тощо).

Технологічний процес механічної обробки деталі залежить від класифікаційної групи (типу), до якої вона належить згідно конструкторсько-технологічного класифікатора. Основними класифікаційними ознаками для деталей загальномашинобудівного призначення є: геометрична форма; розташування конструктивних елементів деталі та функціональне призначення. Геометрична форма та вимоги до точності та шорсткості поверхонь деталі визначають технологію її обробки, а отже режими різання. Важливим показником при вирішенні технологічних задач є співвідношення довжини та діаметру деталі. Тіла обертання становлять майже 67% всіх деталей, що виготовляються у загальному машинобудуванні (рис. 1.1), та складається з трьох типових груп (рис. А.1 - рис. А.5) [11].

У машинобудуванні найбільш поширені ступінчасті вали діаметром 30...80 мм і довжиною 150...1000 мм, які складають понад 85% від загальної кількості типорозмірів валів [12]. Найбільш трудомісткими у виготовленні є ступінчасті вали, які мають шийки під підшипники та зубчасті колеса, шпонкові канавки, шліцьові та різьбові поверхні. Вали виготовляються із вуглецевих і легованих конструкційних сталей (35, 40, 45, 40Г, 50Г, 40Х, 50Х та ін.) і, як правило, піддаються термічній обробці. На рис. А.6. наведено запропоновану [13] класифікація валів, які обробляються на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах.

В основу технологічної класифікації деталей покладено такі ознаки: розмірна характеристика; матеріал деталі; вид та спосіб отримання заготовки; квалітет точності та параметр шорсткості поверхонь; технічні умови; характеристика термічної обробки та хіміко-термічних покриттів; об'єм і маса деталі.

Деталі типу тіл обертання обробляються на різних типах токарних верстатів. Структура токарної обробки тіл обертання багато в чому залежить від точності розмірів, форми, взаємного розташування та шорсткості поверхонь. Токарна обробка є найбільш трудомісткою операцією обробки тіл обертання. При виготовленні ступінчастих валів трудомісткість токарної обробки складає в середньому 64% від загальної трудомісткості обробки деталі.

Токарна обробка тіл обертання виконується на токарно-гвинторізних та токарно-револьверних верстатах, токарних верстатах із ЧПК, токарних багатоцільових верстатах та багатошпиндельних і багаторізцевих токарних напівавтоматах. Залежно від концентрації технологічних переходів (послідовна, паралельна та послідовно-паралельна) застосовуються одно- або багаторізцеві налагодження з використання стандартних або спеціальних різальних та допоміжних інструментів.

2.2. Конструкторсько-технологічний аналіз деталі та вибір заготовки

Вал - деталь, що служить для передачі обертального руху від карданного шарніра до приводів механізмів. Деталь є довгим шліцьовим валом, що має декілька поверхонь (рис. А.7). Службове призначення валу – передача обертального моменту від шарніра, що встановлюється на шийку $\varnothing 25$, до шліцьової втулки. Основними конструкторськими базами, що визначають положення валу в механізмі, є шийка 5. Найбільш важливою і складною у виготовленні є поверхня шліців – зовнішній і внутрішній діаметр та бічні сторони. Шийка $\varnothing 30$ служить для посадки підшипника кочення, а $\varnothing 25$ – для посадки карданного шарніра. Від зсуву в осьовому напрямі підшипник

оберігається стопорним кільцем, що встановлюється в канавку шириною 1,4 мм, а шарнір – штифтом, що встановлюється в отвір $\varnothing 6,3$ мм. Для передачі крутного моменту від шарніра до валу в паз 8×20 мм на вал встановлюється шпонка. Канавка шириною 1,5 мм служить для виходу шліфувального круга і запобігає фаску або галтель при переході від шийки під підшипником до торця шліцьової ділянки валу.

Основними поверхнями валу є шийки 3, 5 і поверхня зовнішнього діаметру шліців 10. Торці 1, 15, 16, 17, фаски 14, 18, канавки 4, 6, отвори 2, 12, 13, поверхні внутрішнього діаметру 9 і бічних сторін шліців 11, а також поверхні 7, 8 паза шпонки є додатковими поверхнями. Виконавчими поверхнями є бічні поверхні шліців і паза шпонки. Основні бази - шийка 5 під внутрішнє кільце підшипника кочення і торець 1. Допоміжні бази - шийка 3, канавка 4, отвір 2 під штифт і внутрішній діаметр шліців 9. Центрові отвори в торцях - штучні технологічні бази. Вимірювальна база - торець валу 1. Інші поверхні валу є вільними.

Оскільки вал є довгим (відношення його довжини до діаметру більше 10), в процесі роботи може виникати його вигин.

Матеріалом деталі - Ст 45 ДСТУ 7809:2015, властивості якої наведені в таблицях А.1 - А.3 [14]. Призначення і технологічні властивості Ст45 відповідають вигляду, умовам роботи і методам обробки деталі.

За якісною оцінкою, технологічність конструкції валу можна оцінити як досить високу. Оскільки на це вказують елементи, що підвищують технологічність конструкції:

1. Форма валу допускає механічну обробку всіх його поверхонь з високим коефіцієнтом використання матеріалу для заготовки з сортового прокату.

3. Конструкція валу складається з уніфікованих елементів, за винятком центрального отвору $\varnothing 10 \times 60^\circ$. Відсутні складні контурні поверхні.

4. Центрові отвори є технологічною базою на всіх операціях механічної обробки.

5. Всі лінійні розміри проставлені від однієї вимірювальної бази – торця 1 валу і є доступні для безпосереднього виміру.

6. Величини допусків та параметри шорсткості відповідають конструктивному призначенню поверхонь.

Розрахунок на технологічність проводили за допомогою мови програмування Deiphi (рис. А.8). З кількісного аналізу технологічності конструкції деталі робимо висновок, що конструкція деталі є в основному технологічна.

В якості заготовки валу використовується прокат круглого профілю. Не дивлячись на простоту і дешевизну заготовки з прокату, вона показує високий коефіцієнт використання матеріалу, рівний 0,65.

За джерелом [15] визначаємо собівартість заготовок з прокату, що становить 63,6 грн. Ескіз та 3D модель заготовки валу наведено на рис. А.9.

2.3. Обґрунтування раціонального технологічного маршруту та визначення типу виробництва

Розробляємо загальний план обробки деталі і формулюємо зміст операцій технологічного процесу. При складанні маршруту обробки дотримуємося наступних правил:

- кожна подальша операція повинна зменшувати похибку і покращувати якість поверхні;
- в першу чергу слід обробляти ті поверхні, які служитимуть технологічною базою для подальших операцій;
- потім обробляють ті поверхні, з яких знімається найбільший шар металу, що дозволить виявити можливі внутрішні дефекти заготовки;
- обробка останніх поверхонь ведеться в послідовності, зворотній їх мірі точності: чим точніше має бути поверхня, тим пізніше вона обробляється;
- закінчується обробка тією поверхнею, яка є найбільш точною;
- не рекомендується поєднання чорнової і чистової обробки немірним інструментом на одному і тому ж верстаті;

– якщо деталь піддається термічній обробці по ходу технологічного процесу, то механічна обробка розчленовується на дві частини: до термообробки і після неї;
 – технічний контроль призначають після тих етапів обробки, де ймовірно підвищена кількість браку, перед складними дорогими операціями, після закінченого циклу, а також в кінці обробки деталі.

При складанні технологічного маршруту об'єднуємо в одну операцію переходи, на яких використовуються однакові схеми базування для однакових методів обробки. Для перевірки правильності вибору складу і кількості переходів обробки розраховуємо фактичний коефіцієнт уточнення для кожного з переходів. Результати розрахунків заносимо в таблицю А.4.

Відповідно до вищевикладених принципів розробляємо маршрут обробки деталі (табл. А.5).

Тип виробництва на даному етапі проектування визначимо за [15] табличним методом. Виходячи з маси деталі (до 8 кг) і річної програми випуску ($N = 20000$ шт/рік) – виробництво середньосерійне. Обираємо групову форму організації виробництва з таким показниками:

- добовий випуск деталей: $N_d = \frac{N}{254}$,

де N – річна програма випуску виробів;

254 – кількість робочих днів у році.

$$N_d = \frac{N}{254} = \frac{20000}{254} \approx 80 \text{ шт.}$$

- жобова продуктивність: $Q_d = \frac{F_d}{T_{шт-к.с.} \times \eta}$,

де $F_d = 952$ хв – добовий фонд роботи обладнання у дві зміни;

$T_{шт-к.с.} = 2,91$ хв. - середня працемісткість основних операцій.

$$Q_d = \frac{F_d}{T_{шт-к.с.} \cdot \eta} = \frac{952}{2,91 \cdot 0,8} = 401$$

- Розмір партії деталей, які одночасно запускаються у виробництво: $n = \frac{N \times a}{254}$,

де $a = 6$ днів - періодичність запуску деталей у виробництво.

$$n = \frac{N \times a}{254} = \frac{20000 \times 6}{254} = 472 \text{шт}$$

2.4. Визначення припусків, режимів різання та технічної норми часу

Припуски на оброблювальні поверхні назначаємо за таблицями [15], а результат заносимо в таблицю А.6. Для прикладу припуски на обробку розраховуємо для поверхні деталі $\varnothing 30_{+0,002}^{+0,017}$ (поверхня 5 валу рис. А.7). Для цього використовуємо методу запропоновану у джерелі [15].

Припуски на токарну обробку і шліфування поверхні $\varnothing 30_{+0,002}^{+0,017}$ в центрах:

$$2Z_{min} = 2(R_{Z_{i-1}} + h_{i-1} + \rho_{i-1}),$$

де $R_{Z_{i-1}}$ – параметр шорсткості поверхні на попередній стадії обробки (параметр шорсткості поверхні заготовки), мкм;

h_{i-1} – глибина дефектного шару поверхні на попередній стадії обробки (глибина дефектного шару поверхні заготовки), мкм;

ρ_{i-1} – сумарне просторове відхилення поверхні на попередній стадії обробки (просторове відхилення поверхні заготовки), мкм.

Сумарне просторове відхилення поверхні при обробці в центрах стержневих заготовок з сортового прокату: $\rho = \sqrt{\rho_{кор}^2 + \rho_{ц}^2}$,

де $\rho_{кор}$ просторове відхилення поверхні, викликане викривленням заготовки, мкм;

$\rho_{ц}$ – просторове відхилення поверхні, викликане погрішністю центрування, мкм.

Просторове відхилення поверхні викликане викривленням заготовки:

$$\rho_{кор} = \Delta_k \cdot l,$$

де Δ_k – питома кривизна, мкм/мм; для заготовки з гарячекатаного прокату діаметром 25...50 мм після попередньої термообробки рівна 1,3 мкм на 1 мм довжини;

l – відстань від точки базування до оброблюваної поверхні; $l=454/2=227$ мм.

Тоді просторове відхилення поверхні заготовки валу $\rho_{кор}=1,3 \cdot 227=295$ мкм.

Похибка центрування для закріпленні заготовок в самоцентруючому затискному призматичному пристосуванні $\rho_{ц} = 250$ мкм.

Сумарне просторове відхилення для встановленн заготовки валу в центрі

$$\rho = \sqrt{295^2 + 250^2} = 387 \text{ мкм.}$$

Для подальших стадій обробки залишкове просторове відхилення поверхні:

$$\rho_i = \rho_{i-1} \cdot K_y,$$

де K_y – коефіцієнт уточнення форми, який залежить від вигляду і стадії обробки.

для чорнового точіння $\rho = 387 \cdot 0,06 = 23$ мкм,

для напівчистового точіння $\rho = 23 \cdot 0,05 = 1$ мкм.

для подальших переходів $\rho = 0$.

Розрахунок припусків проведено у вигляді таблиці 2.2.

Мінімальні значення припуску:

для чорнового точіння $2Z_{min} = 2(150 + 150 + 378) = 1374$ мкм,

для напівчистового точіння $2Z_{min} = 2(50 + 50 + 23) = 246$ мкм,

для попереднього шліфування $2Z_{min} = 2(30 + 30 + 1) = 122$ мкм,

для кінцевого шліфування $2Z_{min} = 2(10 + 20 + 0) = 60$ мкм.

Розрахункові розміри: $d_p^i = d_p^{i+1} + 2Z_{min}^{i+1}$;

для попереднього шліфування $d_p = 30,002 + 0,060 = 30,062$ мм,

для напівчистового точіння $d_p = 30,062 + 0,122 = 30,184$ мм,

для чорнового точіння $d_p = 30,184 + 0,246 = 30,430$ мм,

для заготовки $d_p = 30,430 + 1,374 = 31,804$ мм.

Граничні мінімальні розміри і граничні максимальні розміри $d_{max}^i = d_{min}^i + \delta_i$;

для заготовки $d_{min} \approx 31,8$ мм; $d_{max} = 31,8 + 1,3 = 33,1$ мм;

для чорнового точіння $d_{min} \approx 30,43$ мм; $d_{max} = 30,43 + 0,33 = 30,76$ мм;

для напівчистового точіння $d_{min} \approx 30,18$ мм; $d_{max} = 30,18 + 0,084 \approx 30,26$ мм;

для попереднього шліфування $d_{min} = 30,062$ мм; $d_{max} = 30,062 + 0,033 = 30,095$ мм;

для остаточного шліфування $d_{min} = 30,002$ мм; $d_{max} = 30,002 + 0,015 = 30,017$ мм.

Граничні припуски:

$$2Z_{min}^{np.i} = d_{min}^i - d_{min}^{i-1};$$

$$2Z_{max}^{np.i} = d_{max}^i - d_{max}^{i-1};$$

для чорнового точіння

$$2Z_{min}^{np.i} = 38,1 - 30,43 = 1,37 \text{ мм};$$

$$2Z_{max}^{np.i} = 33,1 - 30,76 = 2,34 \text{ мм};$$

для напівчистового точіння

$$2Z_{min}^{np.i} = 30,43 - 30,18 = 0,25 \text{ мм};$$

$$2Z_{max}^{np.i} = 30,76 - 30,26 = 0,50 \text{ мм};$$

для попереднього шліфування

$$2Z_{min}^{np.i} = 30,18 - 30,062 = 0,118 \text{ мм};$$

$$2Z_{max}^{np.i} = 30,26 - 30,095 = 0,165 \text{ мм};$$

для остаточного шліфування

$$2Z_{min}^{np.i} = 30,062 - 30,002 = 0,060 \text{ мм};$$

$$2Z_{max}^{np.i} = 30,095 - 30,017 = 0,078 \text{ мм}.$$

Таблиця 2.1 – Розрахунок припусків обробки поверхні $\varnothing 30_{+0,002}^{+0,017}$ валу

Переходи обробки	Кількість поверхонь, мкм			Розрах прип. $2Z_{min}$, мкм	Розрах.р озмір d_p , мм	Допуск, мкм	Граничний розмір, мм		Граничний припуск, мм	
	R_z	h	ρ				d_{min}	d_{max}	$2Z_{min}$	$2Z_{max}$
Заготовка	150	150	387		31,804	1300	31,8	33,1		
Чорнове точіння	50	50	23	1374	30,430	330	30,43	30,76	1,37	2,34
Напівчистове точіння	30	30	1	246	30,184	84	30,18	30,26	0,25	0,50
Поперед шліфування	10	20	0	122	30,062	33	30,06 2	30,09 5	0,118	0,165
Кінцеве шліфування	5	15	0	60	30,002	15	30,00 2	30,01 7	0,060	0,078
Разом									1,798	2,683

На підставі значень таблиці 2.1 будуємо схему розташування припусків і полів допусків проміжних (міжопераційних) поверхонь $\varnothing 30_{+0,002}^{+0,017}$ валу (рис. А.9).

Для переходів обробки призначаємо режими різання за нормативами [16].
Результати режимів різання заносимо в таблиці А.7- А.10.

Норма часу в серійному виробництві визначається у вигляді штучно-калькуляційного часу:

$$T_{ШК} = T_O + T_{Вс} + T_{Обсл} + T_{Отд} + \frac{T_{ПЗ}}{n},$$

де T_O – основний час;

$T_{Вс}$ – допоміжний час (час на установку і зняття деталі, управління верстатом, вимір деталі);

$T_{Обсл}$ – час на обслуговування робочого місця;

$T_{Отд}$ – час на відпочинок і особисті потреби;

$T_{ПЗ}$ – підготовчо-завершальний час на партію деталей;

n – розмір партії деталей.

Під час нормування технологічного процесу визначається основний час за формулою:

$$T_O = \sum_{i=1}^n \frac{l_i + l_{1,i} + l_{2,i}}{s_{M,i}},$$

де l – довжина робочого ходу, мм;

l_1 – довжина врізування, мм;

l_2 – довжина перебігання, мм;

s_M – хвилинна подача, мм/хв;

Хвилинна подача кожної з операцій може бути в загальному вигляді визначено:

$$s_M = s \cdot n,$$

де s – подача на зворот інструменту або деталі, мм/об;

n – частота обертання деталі (інструменту), хв⁻¹.

Подача на зуб фрези

$$s = z \cdot s_Z,$$

де z – число зубів фрези;

s_z – подача на зуб фрези, мм.

Допоміжний час складається з витрат часу на окремі прийоми:

$$T_{Bc} = T_{yC} + T_{3O} + T_{yn} + T_{Ib},$$

де T_{yC} – час на установку і зняття деталі, хв;

T_{3O} – час на закріплення і відкріплення деталі, хв;

T_{yn} – час на прийоми управління верстатом, хв;

T_{Ib} – час на вимір деталі, хв.

Основний і допоміжний час складають оперативний час: $T_{On} = T_O + T_{Bc}$

Час на обслуговування робочого місця складається з організаційного часу T_{Org}

і часу на технічне обслуговування T_{Tex} : $T_{Обсл} = T_{Tex} + T_{Org}$;

Час на організаційне і технічне обслуговування, відпочинок і особисті потреби складає 8% від оперативного.

Для прикладу розглянемо розрахунок для операції 030 токарна з ЧПК.

Операція складається з декількох переходів.

Перехід 1(1) – чорнове точіння $\varnothing 39,59_{-0,39}$

$l = 393$ мм; $s = 0,36$ мм/об; $n = 600$ хв⁻¹.

Довжину врізування: $l_1 = 1,3$ мм.

Довжину перебігання призначаємо $l_2 = 0,8$ мм.

Хвилинна подача: $s_M = 0,36 \cdot 600 = 216$ мм/хв.

Основний час переходу $T_o = \frac{393 + 1,3 + 0,8}{216} = 1,83$ хв.

Перехід 1(2) – чистове точіння $\varnothing 38_{-0,47}^{-0,39}$

$l = 393$ мм; $s = 0,28$ мм/об; $n = 810$ хв⁻¹.

Довжину врізування і перебігання: $l_1 = 1,3$ мм; $l_2 = 0,8$ мм.

$s_M = 0,28 \cdot 810 = 227$ мм/хв.

$T_o = \frac{393 + 1,3 + 0,8}{227} = 1,74$ хв.

Всього для операції 020: $T_o = 1,83 + 1,74 = 3,57$ хв.

Перехід 3(1) – чорнове точіння $\varnothing 30,77_{-0,33}$.

$$l = 61 \text{ мм}; s = 0,31 \text{ мм/об}; n = 699 \text{ хв}^{-1}; l_1 = 1,3 \text{ мм}; l_2 = 0.$$

$$s_M = 0,31 \cdot 699 = 217 \text{ мм/хв.}$$

$$\text{Основний час переходу } T_o = \frac{61 + 1,3 + 0}{217} = 0,29 \text{ хв.}$$

Перехід 3(2) – чорнове точіння $\varnothing 25,63_{-0,33}$

$$l = 39 \text{ мм}; s = 0,36 \text{ мм/об}; n = 872 \text{ хв}^{-1}; l_1 = 1,3 \text{ мм}; l_2 = 0.$$

$$s_M = 0,36 \cdot 872 = 314 \text{ мм/хв.}$$

$$\text{Основний час переходу } T_o = \frac{39 + 1,3 + 0}{314} = 0,13 \text{ хв.}$$

Перехід 4(1) – напівчистове точіння $\varnothing 30,26_{-0,084}$

$$l = 61 \text{ мм}; s = 0,22 \text{ мм/об}; n = 1093 \text{ хв}^{-1}; l_1 = 1,3 \text{ мм}; l_2 = 0.$$

$$s_M = 0,22 \cdot 1093 = 240 \text{ мм/хв.}$$

$$T_o = \frac{61 + 1,3 + 0}{240} = 0,26 \text{ хв.}$$

Перехід 4(2) – напівчистове точіння $\varnothing 25,43_{-0,13}$

$$l = 39 \text{ мм}; s = 0,25 \text{ мм/об}; n = 1201 \text{ хв}^{-1}; l_1 = 1,3 \text{ мм}; l_2 = 0.$$

$$s_M = 0,25 \cdot 1201 = 300 \text{ мм/хв.}$$

$$T_o = \frac{39 + 1,3 + 0}{300} = 0,13 \text{ хв.}$$

Перехід 5(1) – прорізання канавки $1,4 \times \varnothing 28,5_{-0,5}$.

$$l = (30,26 - 28,5)/2 = 0,88 \text{ мм}; s = 0,09 \text{ мм/об}; n = 381 \text{ хв}^{-1}; l_1 = 0,5 \text{ мм}; l_2 = 0.$$

$$s_M = 0,09 \cdot 381 = 34,3 \text{ мм/хв.}$$

$$T_o = \frac{0,88 + 0,5 + 0}{34,3} = 0,04 \text{ хв.}$$

Перехід 5(1) – прорізання канавки $1,5 \times \varnothing 28,5_{-0,5}$

$$l = (38 - 28,5)/2 = 4,75 \text{ мм}; s_M = 34,3 \text{ мм/хв}; l_1 = 0,5 \text{ мм}; l_2 = 0.$$

$$T_o = \frac{4,75 + 0,5 + 0}{34,3} = 0,15 \text{ хв.}$$

Всього для операції 030:

$$T_o = 1,83 + 1,74 + 0,29 + 0,13 + 0,26 + 0,13 + 0,04 + 0,15 = 4,57 \text{ хв.}$$

Результати розрахунків наведено у таблиці А.11.

2.5. Конструювання оснащення для виготовлення деталі

В роботі пропонується для обробки валу використання спеціально спроектованого пристрою для фрезерування шпонкового пазу і свердління отвору. Проводимо розрахунок параметрів приводу.

Для цього визначаємо сил затиску [17]: $W \geq kfp$,

де k – коефіцієнт запасу;

f – коефіцієнт тертя в місцях контакту деталі і приспособлення;

P – сила різання.

Коефіцієнт k розраховується стосовно конкретних умов обробки за формулою [17]:

$$k = k_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6,$$

де k_0 – гарантований коефіцієнт запасу; для всіх випадків $k_0 = 1,5$;

k_1 – коефіцієнт, що враховує стан поверхні заготовки; для чистої заготовки $k_1 = 1,0$;

k_2 – коефіцієнт, що враховує збільшення сил різання від прогресуючого затуплення інструменту; $k_2 = 1,3$;

k_3 – коефіцієнт, що враховує збільшення сил різання при переривчастому різанні; оскільки різання здійснюється безперервно, $k_3 = 1,0$;

k_4 – коефіцієнт, що враховує постійність сил затиску, що розвиваються силовим приводом приспособлення; при використанні пневмоциліндра подвійної дії $k_4 = 1,0$;

k_5 – коефіцієнт, що враховує ергономіку ручних затискних елементів; оскільки для затиску використовується механізований привід затискного елемента, приймаємо $k_5 = 1,0$;

k_6 – коефіцієнт, що враховує наявність крутних моментів, які обертають заготовку; при встановленні її базовою поверхнею на установочний елемент з обмеженою поверхнею контакту $k_6 = 1,0$.

Отримаємо: $k = 1,5 \cdot 1,0 \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 1,95$.

Мінімальний коефіцієнт запасу має дорівнювати 2,5 [17]. Оскільки в результаті розрахунку коефіцієнт запасу виявився меншим цієї величини, то остаточно приймаємо $k = 2,5$.

Схема закріплення заготовки наведена на рис. 2.7.

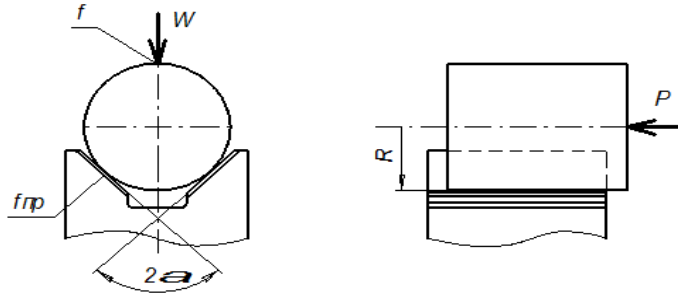


Рисунок 2.7 – Схема закріплення заготовки

$$W = \frac{k}{f + f_{np}} P_{yz}$$

Для прийнятої схеми розрахункова сила затиску [17]:

де k – коефіцієнт запасу;

P_{yz} – складові сили різання, Н;

f – коефіцієнт тертя на робочих поверхнях затиску; $f = 0,25$;

f_{np} – приведений коефіцієнт тертя на установочному елементі; $f_{np} = 0,25 \cdot \sin 45^\circ = 0,177$.

$$W = \frac{2,5}{0,25 + 0,177} 302 = 1768 \text{ Н.}$$

Затиск заготовки здійснюється прихватом з приводом від пневмоциліндра. Прихват спільно з віссю, на якій він обертається, є важільним механізмом. Схема затиску таким механізмом приведена на рис. 2.8.

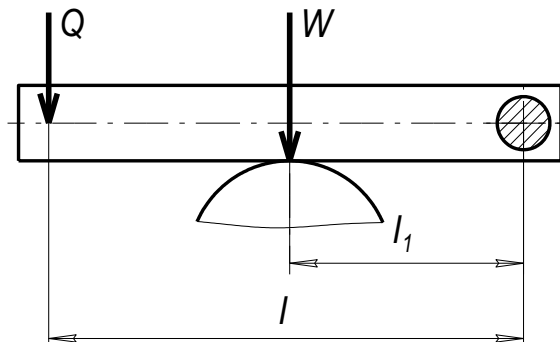


Рисунок 2.8 – Схема затиску заготовки

Необхідне зусилля на штоку пневмоциліндра Q для здобуття розрахункової сили затиску W для прийнятої схеми затиску: $W = Q \frac{l}{l_1} \eta$,

де l, l_1 – плечі механізму важеля, мм; $l = 155$ мм, $l_1 = 50$ мм;

η – ККД механізму важеля; приймаємо $\eta = 0,85$.

$$Q = \frac{W \cdot l_1}{l \cdot \eta}; \quad Q = \frac{1768 \cdot 50}{155 \cdot 0,85} = 671 \text{ Н.}$$

Приймаємо стандартний діаметр поршня $D = 63$ мм, штоки $d = 20$ мм і різьби М16 на штоку пневмоциліндра, що забезпечує тягуче зусилля не менше 980Н для тиску повітря в магістралі 0,4 МПа, товщина стінки 2,5 мм, діаметр (М16) і кількість шпильок – 4 шт.

Дане пристосування розрахуємо на точність. Для розрахунку пристосіблення на точність скористаємося формулою [17]:

$$\varepsilon_{np} \leq T - K_T \sqrt{(k_{T2} \cdot \varepsilon_{\delta})^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_u^2 + \varepsilon_{ni}^2 + (k_{T2} \cdot \omega)^2},$$

де T – допуск виконуваного розміру, мкм; за кресленням деталі $T = 200$ мкм;

ε_{δ} – похибка базування, мкм;

ε_3 – похибка закріплення, мкм; при установці заздалегідь обробленої заготовки $\varnothing 30$ на опорні пластини призм $\varepsilon_3 = 50$ мкм;

ε_y – похибка установки пристрою на верстаті, мкм; у напрямі оброблюваного розміру (глибина паза) для вибраної схеми установки (рис. 2.9) $\varepsilon = 0$;

ε_u – похибка положення деталі із-за зносу установочних елементів пристрою, мкм;

ε_{ni} – похибка від перекося інструменту із-за неточності виготовлення направляючих елементів пристрою, мкм; $\varepsilon_{ni} = 0$;

K_T – коефіцієнт, що враховує відхилення розсіювання значень складових величин від закону нормального розподілу; $K_T = 1,13$;

k_{T1} – коефіцієнт, що враховує зменшення граничного значення похибки базування для роботи на налагоджених верстатах; $k_{T1} = 0,83$;

k_{T2} – коефіцієнт, що враховує долю похибки, викликану чинниками, не залежними від пристосування; $k_{T2} = 0,8$;

ω – точність обробки; за кресленням деталі $\omega = 60$ мкм.

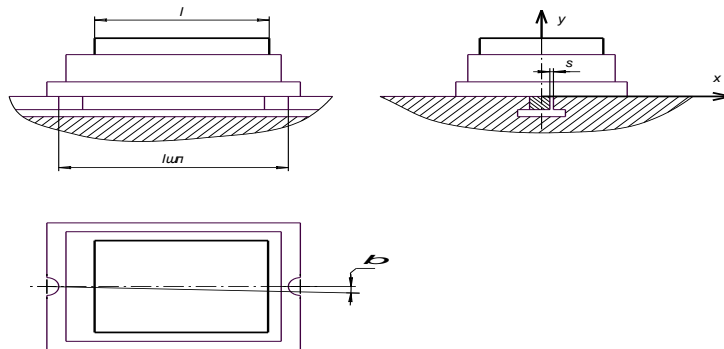


Рис. 2.9 – Схема установки пристосування на верстаті

Похибка базування для прийнятої схеми базування (рис. 2.10):

$$\varepsilon_{\sigma} = \frac{T_D}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right),$$

де T_D – допуск поверхні, що базується; $T_D = 84$ мкм;

α – кут призми;

$$\varepsilon_{\sigma} = \frac{84}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sin 45^{\circ}} - 1 \right) = 17 \text{ мкм.}$$

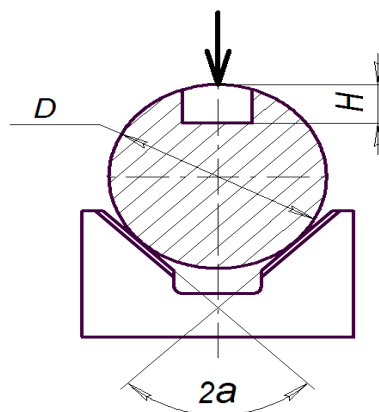


Рисунок 2.10- – Схема базування заготовки

Знос настановних поверхонь призми може визначатися за статистичною формулою [18]:

$$U = U_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4,$$

де U_0 – середній знос установочних елементів; $U_0 = 65$ мкм;

k_1 – коефіцієнт, що враховує матеріал деталі; $k_1 = 0,97$;

k_2 – коефіцієнт, що враховує тип устаткування; $k_2 = 1,0$;

k_3 – коефіцієнт, що враховує вигляд і умови обробки; $k_3 = 0,94$;

k_4 – коефіцієнт, що враховує число установок; $k_4 = 0,9$.

$$U = 65 \cdot 0,97 \cdot 1,0 \cdot 0,94 \cdot 0,9 = 53 \text{ мкм.}$$

Для вибраної схеми базування (рис. 2.10) похибка, викликана зносом установочних елементів: $\varepsilon_u = \frac{U}{\sin \alpha}$,

де U – розрахований знос установочних елементів, мкм;

α – кут призми;

$$\varepsilon_u = \frac{53}{\sin 45^\circ} = 75 \text{ мкм.}$$

Точність пристрою:

$$\varepsilon_{np} \leq 200 - 1,13 \sqrt{(0,83 \cdot 17)^2 + 50^2 + 0 + 75^2 + 0 + (0,8 \cdot 36)^2} = 108 \text{ мкм.}$$

Пристрій призначений для базування і закріплення заготовки валу для виконання операції фрезерування паза шпонки і свердління отвору.

Базовим елементом пристрою є плита 1, на якій встановлені всі інші елементи. Плита встановлюється на стіл фрезерного верстата. Базування здійснюється шпонками 41, а кріплення - за допомогою двох болтів. Болти проходять через вушка плити і затискаються гайками.

Паралельно осі паза столу встановлені призми 2 і 3, на яких закріплена оброблювана заготовка. В осьовому напрямі заготовка встановлюється торцем за упором 19, що закріплений за допомогою двох гвинтів. Затиск заготовки виконується прихватом 8. Прихват встановлений на осі 18, запресованою в кочета 15.

Поворот прихвата і затиск заготовки відбувається під дією пневмоциліндра 5. У штоці 7 пневмоциліндра є проріз, в який входить вилка прихвата. Під дією переміщення штока і запресованого в ньому штифта 42 вниз лівий (на кресленні) кінець прихвата опускається, обертаючись на осі. Середина прихвата під час його повороту опускається вниз до контакту із заготовкою і притискує її

до установочних поверхонь призми. В разі руху штока пневмоциліндра вгору, прихват повертається у початкове положення і звільняє заготовку.

Напрямок руху штока змінюється під час подачі по патрубках 25 стислого повітря або у верхню або нижню порожнину пневмоциліндра від розподільника 4. Напрямок потоку стислого повітря змінюється якщо поворотити рукоятку 21. Стисле повітря поступає в розподільник від цехової магістралі по відповідному патрубку, який кріпиться гайкою до прохідника. Відпрацьоване повітря з неробочої порожнини пневмоциліндра скидається через розподільник в атмосферу.

Затиск заготовки здійснюється якщо повітря подається у верхню порожнину пневмоциліндра, в цьому разі зусилля на штоку менше, ніж під час подачі повітря в нижню порожнину.

Перед свердлінням отвору заготовку необхідно орієнтувати відносно паза шпонки – обернути на 90°. Орієнтація виконується за бічною поверхнею шліців, за допомогою опори 16 з сферичною головкою. Для запобігання відведенню свердла по циліндричній поверхні шийки заготовки і виключення необхідності попереднього центрування передбачена кондукторна втулка 9, запресована в планку 10. Перед свердлінням планка вручну обертається на осі 18 в положення, показане на кресленні. При цьому вухо планки входить в проріз замка 11. Під час руху прихвата вниз в разі затиску заготовки він натискає на горизонтальне плече кутового важеля 13. Вертикальне плече важеля має проріз, в який входить штифт 37, запресований в ригель 12. Вільно обертаючись на осі 36 під дією прихвата, важіль переміщає ригель вліво (відповідно до креслення), і він входить в отвір вуха кондукторної планки 10. При відкріпленні заготовки важіль під дією пружини 14 повертає ригель у вихідне положення, що дозволяє вільно відкидати і накидати планку. Під час обробки паза шпонки планка відкидається, відкриваючи доступ фрезі шпонки до шийки заготовки.

Приспосіблення має досить значну масу, тому його транспортування доцільно здійснювати за допомогою цехового кран-балки. Для кріплення гаків

підйомно-транспортного устаткування в плиту вкручені рим-болти 22. Для запобігання перекосу і падіння пристрою під час транспортування, вісь, що сполучає отвори під рим-болти, проходить через центр тяжіння пристрою.

Пристрій цілком придатний для базування і закріплення широкої номенклатури заготовок, що мають циліндричні шийки. Для кожної заготовки необхідно виготовити упор для установки за торцем і (за необхідності) призми для базування по шийці необхідного діаметру і довжини. Фактично максимальний діаметр закріплюваної шийки визначається відстанню від осі заготовки до стінки пневмоциліндра. Шток пневмоциліндра має хід не менше 12 мм, що цілком достатньо для установки заготовки в пристрої під прихватом, переміщення ригеля в направляючому отворі замку і надійної фіксації кондукторної планки.

2.6. Висновки до 2-го розділу

В даному розділі дано конструкторсько-технологічну класифікацію деталей типу тіл обертання. Відповідно для якої вали складають понад 85% від загальної кількості типорозмірів валів у машинобудуванні. Як типовий представник такої групи об'єкту виробництва вибрано вал шліцьовий. Розглянуто його службове призначення, технічні умови на виготовлення. Визначено тип виробництва, що відповідає серійному, з характерною для нього груповою формою організації роботи. Кількість деталей в партії, що запускається на обробку одночасно, попередньо становить – $n = 236$ шт.

Розглянуто спосіб виготовлення заготовки - прокат круглого профілю. Провівши розрахунки встановлено собівартість отримання заготовки, що складає 65 грн. Виконано вибір методів, послідовності та числа переходів для обробки поверхонь. Побудовано модернізований маршрут механічної обробки із використанням верстатів з ЧПК, що скорочує працездатність виконання робіт. Для модернізованого технологічного процесу визначено припуски на обробку поверхонь, значення технологічних розмірів, розміри початкової заготовки та допуски цих розмірів. Визначені режими різання і технічна норма часу

операції для умов серійного виробництва з груповою формою організації виробництва.

Розроблено складальне пристосування для операції 060 фрезерної з ЧПК (для фрезерування паза шпонки $8_{-0,051}^{-0,015} \times 4^{+0,2}$ і свердління отвору $\varnothing 6,3^{+0,3}$) технологічного процесу механічної обробки деталі валу шліцевого. Проведено конструювання для виготовлення деталі пристосування: вибрано оптимальну схему базування деталі; розроблена конструкція пристосування; розраховані параметри приводу. На основі розрахунків вибрано як привід пневмоциліндр з параметрами: $D=63\text{мм}$; $d=20\text{мм}$; $Q=671\text{Н}$. Встановлено, що пристрій забезпечує необхідну точність обробки, оскільки сумарні похибки пристрою значно менші допуску на розмір оброблювальних поверхонь.

Отже, можна зробити висновок про те, що дана розробка є перспективною для впровадження у відповідне виробництво як з технічної, так і з економічної точки зору, що є хорошим показником для подальшого розвитку виробництва подібних деталей.

РОЗДІЛ 3

Оптимізаційне дослідження режимів токарної обробки

3.1. Система різання та її оптимізація

Будь-яка система може формуватися як сукупність певних елементів і зв'язків між ними. Елементи є взаємопов'язаними і утворюють певну цілісність [10] без обмежень характеру елементів і типу системи. Система підпорядкована певним правилам і утворюється із скінченої множини елементів.

Структуру системи формується сукупністю елементів, які входять до її складу. Для системи різання металу елементами можуть бути: лезо інструменту, заготовка і стружка. Ці елементи пов'язані взаємним впливом і зв'язками.

Кожна система створюється для вирішення конкретної мети. Для системи різання мету встановлюють виходячи із визначення процесу різання: «Різання – це утворення нових поверхонь шляхом відділення шару металу з утворенням стружки» [12]. Також мета формується як зняття максимального шару металу, розглядаючи процес різання як спрямоване руйнування матеріалу для утворення нової поверхні. Таким чином необхідним є забезпечення мети економічного і технічного характеру, що і створює передумови оптимізації системи різання.

Економічною вимогою є досягнення мінімальних витрат у поєднанні із максимальною продуктивністю під час обробки поверхні заготовки. Одночасно потрібно забезпечити оптимальну якість оброблюваної деталі (точність розмірів, форми і розміщення поверхні; якість поверхні та її поверхневого шару та інші). Остаточними цілями системи різання є: знімання максимального шару матеріалу; максимальна стійкість інструменту; мінімальна складність елементів системи; мінімальне споживання електроенергії [11].

Система різання існує для певного положення її елементів та певних траєкторій і параметрів їх руху. Елементи через виконання механічної роботи і

передачі теплової енергії взаємодіють між собою, а також зазнають впливу зовнішніх взаємодій металорізального комплексу - елементом технологічної операції [11].

Оптимізація умов функціонування системи різання - одна з найбільш розповсюджених проектних задач яку можна розглядати як задачі структурної оптимізації і параметричної оптимізації. Найбільш розповсюдженим є параметричний підхід.

Параметрична оптимізація - пошук набору параметрів системи однієї структури, який забезпечує оптимальний розв'язок даної задачі серед інших допустимих розв'язків для системи, що розглядається.

Застосовуючи процедури параметричної оптимізації порівнюють технічні системи різної структури на основі проведення аналізу щодо оптимальних варіантів для різних структур [1].

3.2. Математичне моделювання задач параметричної оптимізації

У більшості математичних моделей оптимізація виступає як розв'язок екстремальної задачі. В цьому разі обмеження, які накладаються на систему мають характер нерівностей чи рівностей [1-3]. В оптимізаційних моделях визначені основні принципи розв'язків, що полягають у визначені області параметрів за допомогою певного математичного методу. Проводиться пошук комбінації параметрів, які відповідають найкращому значенню цільового критерію. Тоді критерій оптимізації формулюється як цільова функція, для якої необхідно знаходити екстремальне значення [6]. Зазначимо, що вказана область значень утворюється крайніми граничними умовами, які мають обмеження. Таким чином, всередині визначеної за допомогою обмежень області знаходяться допустимі значення, які можуть виявитись екстремальними (найкращими).

В загальному вигляді математичну постановку задачі параметричної оптимізації формулюється так [1-3]:

• Незалежні внутрішні параметри, які виражають всі характеристики технічної системи:

$$\bar{X}(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

де \bar{X} – вектор незалежних параметрів;

n - їх кількість.

Ці ж параметри також визначають значення цільової функції (функції мети E) та рівняння, що описують обмеження (в загальному – F_1, F_2, \dots, F_n).

Рівняння функції мети і функцій обмежень залежать від параметрів нелінійно.

Формальна постановка задачі оптимізації полягає в знаходженні такого набору параметрів $\bar{X}_{\text{оп}}$, для яких цільова функція $E(\bar{X}_{\text{оп}})$ екстремуму (мінімуму чи максимуму) [1]. Геометрично проілюстровано постановку задачі оптимізації для двопараметричної задачі на рис. 3.1.

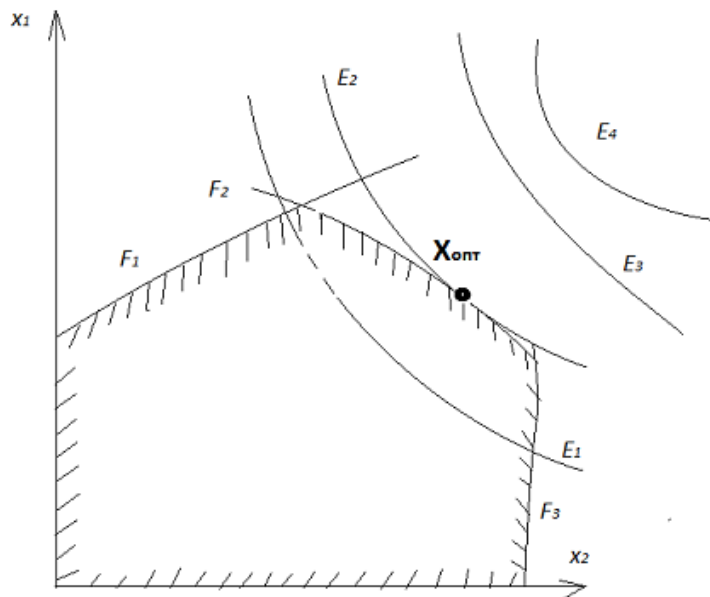


Рис. 3.1 - Геометрична інтерпретація вирішення задачі оптимізації

На рис. 3.1 показано, що нерівності обмежень, які накладені на систему через ряд факторів, утворюють певну область D допустимих рішень. Різні значення цільової функції E показано лініями постійного рівня цієї функції. В кожній точці однієї такої лінії функція мети приймає однакоє постійне значення

$$E_k(x_1, x_2) = \text{const},$$

де k – кількість значень постійного рівня цільової функції.

В зазначеному на рис. 3.1 варіанті лінія постійного рівня цільової функції приймає такі значення, що

$$E_1 > E_2 > E_3 \dots$$

Таким чином, можна побачити на наведеному рисунку, що шуканий мінімум цільової функції знаходиться у точці з координатами

$$\bar{X}_{\text{опт}}(x_1^{\text{опт}}, x_2^{\text{опт}})$$

Визначений таким чином мінімум є умовним, як і наведена оптимізація оскільки пошук проведено із врахуванням обмежень, що накладені на систему.

Найважливішим фактором моделювання оптимізаційної задачі є вибір функції мети. Це може бути один або сукупність критеріїв, які визначають якість технічної системи. Як правило, позначають його як вектор вихідних характеристик:

$$\bar{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_s).$$

Початковими характеристиками при цьому є і техніко-економічні показники технічної системи такі, як: продуктивність, точність, металоємкість.

3.3. Оптимізація процесу різання для технологічних обмежень

Отримані оптимальні параметри процесу різання повинні бути перевірені на можливість їх реалізації у конкретних умовах виробництва, тобто на їх приналежність області допустимих значень параметрів. Ця область формується комплексом технологічних обмежень, що накладаються на процес різання технічними вимогами до якості поверхні деталі, жорсткістю системи ВПД, технічними можливостями обладнання і т.п. Наприклад, для обточування накладаються обмеження за потужністю верстата; по допустимій висоті шорсткості; по максимальній силі подачі; за максимальним

(мінімальним) числу обертів верстата; за максимальною (мінімальною) подачею тощо.

Кожне із цих обмежень є функцією параметрів оптимізації, і всі разом вони утворюють область допустимих значень умов різання [7]. Оптимальні умови різання визначаються, виходячи з можливих комбінацій між параметрами X_0 , що відповідають екстремуму критерію оптимізації і областю допустимих значень D . Нехай \bar{X}_0 визначає найкращі умови оброблення і належить множині D . Тоді \bar{X}_0 буде рішенням задачі:

$$\begin{aligned} & \text{extr} W(\bar{X}); \\ & \bar{X} \in D; D = \{\bar{X} : f_i(\bar{X}) \leq b_i; i = \overline{1, n}\}, \\ & \bar{X} = \begin{pmatrix} V \\ S \\ t \\ \alpha \\ \gamma \end{pmatrix}; V > 0; S > 0; t > 0; \alpha > 0; \end{aligned}$$

де $W(\bar{X})$ — критерій якості режиму різання (частина критерію оптимальності технологічного процесу, що залежить від умов різання);

\bar{X} — параметри умов різання: n – мірний вектор з координатами; V — швидкість різання, S — подача, t — глибина різання; α – задній кут; γ – передній кут і т.п.,

D — множина допустимих умов різання, що визначається обмеженнями, накладеними на елементи процесу різання у вигляді таких нерівностей:

$$f_i(\bar{X}) \leq b_i,$$

де $f(\bar{X})$ — деяка функція умов різання; b_i – відомі константи.

Як цільові функції $W(\bar{X})$ у математичній моделі зазвичай використовують економічні або технологічні критерії.

У випадку, коли \bar{X}_0 не належить множині допустимих режимів D , розв'язання розглянутої задачі засноване на наступних міркуваннях. З того факту, що тільки на \bar{X}_0 досягаються екстремальні значення критерію оптимізації, виходить, що умови оброблення (з погляду комбінації цих

параметрів) поза \bar{X}_0 змінюються монотонно. Таким чином, якщо X_0 визначає найкращі умови оброблення, то по мірі віддалення від \bar{X}_0 ці умови монотонно погіршуються. Очевидно, що у цьому випадку оптимальний режим досягається у найбільш близькій до \bar{X}_0 точці границі множини D . Якщо ж \bar{X}_0 описує найгірші умови оброблення, то у міру видалення від \bar{X}_0 ці умови монотонно поліпшуються. У цьому випадку оптимальний режим досягається у найбільш віддаленій від \bar{X}_0 точці границі множини D . З огляду на це, можна використати для оцінки якості режиму різання відстань від \bar{X}_0 до границі множини допустимих режимів різання D , вирішуючи задачі лінійного програмування [7].

3.4. Науково-практичні закономірності процесу різання матеріалів

Більшість принципів схем обробки різанням ґрунтуються на суміщенні двох елементарних рухів – обертового і прямолінійного. Під час обробки на токарних верстатах режими різання характеризуються наступними величинами:

- швидкістю різання

$$V = \pi \cdot D \cdot n / 1000 \text{ (м/хв)},$$

де D - діаметр оброблюваної заготовки, або діаметр інструменту, мм
 n – частота обертання інструменту, або заготовки хв^{-1} .

- подачею (s), мм/об
- глибиною різання $t = \frac{D - d}{2}$, (мм)

де D – діаметр заготовки, мм;

d - діаметр деталі, мм;

- товщина зрізуваного шару $a = r \sin \varphi$, (мм)

де φ – головний кут різання в плані;

- основним часом (t_0) на протязі якого здійснюється процес різання

$$t_0 = \frac{l}{ns} i, \text{ (хв)}$$

де l – довжина поверхні, яка обробляється різанням;

i - число робочих проходів; $i = \delta / t$, де δ – припуск на обробку.

Елементи різання і геометрія зрізувального шару металу представлені на рис. Б.1.

Для забезпечення дослідження фізичних закономірностей різних видів оброблення різанням силу оброблення розкладають на три складові в координатному просторі осей OZ , OY та OX . Головна вісь OZ співпадає з напрямом вектору швидкості головного руху різання. Відповідно проєкцію сили оброблення на вісь OZ називають головною складовою P_z сили різання, а якщо головний рух різання обертальний, то її ще називають дотичною складовою сили оброблення. Вісь OX співпадає з віссю головного руху різання заготовки або інструменту і називається осью складовою P_x сили різання. Остання, ортогональна координата OY направлена по радіусу заготовки, що оброблюється або радіусу різального інструменту і називається радіальною складовою P_y сили різання. Представлення сили різання її складовими забезпечує визначення характеристик процесу різання, а саме: потужності різання, точності оброблення, навантаження різального інструменту та його деформації, навантаження на елементи кінематичного ланцюга механізму подач, кількості теплоти, що виділяється в процесі різання тощо. Відповідно, знання силових характеристик процесу обробки дозволяє розраховувати та прогнозувати пружні деформації технологічної системи, теплові деформації інструменту, заготовки чи частин верстатного обладнання, умови оброблення і робити оцінку автоколивань, що виникають у пружній технологічній системі. Оскільки головна складова сили різання P_z може бути визначена найбільш достовірно та найбільш просто виміряна навіть без застосування спеціальної динамометричної апаратури за потужністю різання, вважається за доцільне прийняти саме цю складову за основу розрахунку сили різання та її складових при токарному обробленні. В такому разі вплив таких факторів, як матеріал заготовки, інструменту та складових режиму різання урахується у формулі для розрахунку складової P_z , а складові P_y і P_x визначаються за їх первинним змістом, тобто як геометричні складові розкладу вектора сили різання за осями

координат (рис. Б.2). Таким чином, складова P_z сили різання визначається емпіричною залежністю, яка дещо відрізняється від традиційної:

$$P_z = C_{P_z} h^{x_{P_z}} S^{y_{P_z}} V^{n_{P_z}} k,$$

де C_{P_z} – коефіцієнт, що залежить тільки від матеріалу заготовки;

k - поправочний коефіцієнт, що залежить тільки від матеріалу інструменту;

x_{P_z} , y_{P_z} , n_{P_z} – показники ступеня;

h , S , V – складові режиму різання.

На величину сили різання впливають кути заточування різця, особливо передній кут α , та головний кут в плані ϕ . Із збільшенням переднього кута сила різання зменшується і процес відділення стружки протікає легше. Однак це не означає, що передній кут можна робити як завгодно великим. Зі зменшенням головного кута в плані ϕ сили P_z і P_y зростають, причому особливо сильно зростає радіальна сила i , навпаки, зі збільшенням головного кута в плані сили P_z і P_y збільшуються. Пояснюється це тим, що в першому випадку зіткнення ріжучої кромки різця зі стружкою відбувається на більшій довжині, а в другому випадку - на меншій. Збільшення радіальної сили внаслідок зменшення головного кута в плані призводить до прогину оброблюваної деталі і появи вібрацій, особливо коли обробляють довгі і тонкі деталі. Вібрації ведуть до викришування ріжучих кромки різця, до погіршення якості обробленої поверхні. Тому для обробки довгих і тонких деталей в центрах кут в плані збільшують з 45° до 70° , а іноді і до 90° .

Сила різання залежить також від режимів різання. Раніше вважалося, що швидкість різання практично не впливає на його силу. Пояснюється це проведенням робіт в порівняно вузькому діапазоні швидкостей, а також недостатньою чутливістю використовуваних при цьому динамометрів. В даний час відомо, як змінюється сила різання в широкому діапазоні швидкостей. З'ясуємо цю залежність на прикладі дослідів для умов вільного різання Ст 45 (рис. Б.3).

Складний характер кривих $P_z = f(V)$ пояснюється появою наросту на передній поверхні леза інструменту. Мінімальні значення сили різання на

кривих $P_z = f(V)$ відповідають максимально можливого наросту. Для малої швидкості різання, коли наріст не утворюється, сила різання велика. У діапазоні швидкостей, де є максимальне наростоутворення, сила різання і вкорочення стружки зменшуються, оскільки із збільшенням розмірів наросту зростає дійсний передній кут інструменту. У міру подальшого підвищення швидкості різання висота наросту, а отже, і дійсний передній кут зменшуються. Одночасно з цим зростають коефіцієнт укорочення стружки і сили різання.

3.5. Висновки до 3-го розділу

В розділі на основі аналізу вже відомих підходів запропоновано структуру оптимізаційних досліджень для проектування технологічних процесів. При цьому задіяне використання цільової функції процесу, сформульована загальна математична модель, і з неї виведені часткові моделі, які дають змогу розв'язувати задачу аналітично і графічно одночасно.

Пошук оптимального рішення запропоновано здійснювати за критичними точками, що виключає повний перебір варіантів і графічну побудову всієї допустимої області. Проведений аналіз сутності процесу різання матеріалів дозволив встановити наступне:

- незважаючи на велику кількість експериментальних та теоретичних робіт по дослідженню процесів різання матеріалів неможливо визначити оптимальні режими обробки. На силові, деформаційні, теплові процеси під час різання впливає значна кількість факторів (матеріал ріжучого інструменту, його геометрія, зовнішні умови процесу різання);

- нормативні методи призначення режимів різання не дозволяють проводити обробку в енергоощадному режимі.

- для визначення енергоощадних параметрів процесу різання необхідно мати дані впливу геометричних параметрів інструменту на силові характеристики.

Тому важливим є використання перевірки обробляючої системи під час проведення експерименту.

РОЗДІЛ 4

Дослідження параметрів процесу різання з обліком обмежень для токарної обробки

4.1. Обладнання для експериментального дослідження

Під час вибору матеріалу для проведення експерименту, проводився аналіз найбільш використовуваних та поширених марок сталей. Для дослідження було обрано сталь 45 ДСТУ 7809:2015 (рис. В.1).

В якості обладнання верстат токарно-гвинторізний 1А616, який призначений для виконання різних токарних і гвинторізних робіт в центрах або патроні (рис. В.2).

Вимірювальний інструмент - кутомір прилад для вимірювання контактним методом кутів між будь-якими двома площинами. В наших дослідженнях використовувався кутомір з ноніусом типу 3-5 (рис. В.3).

Трьохкомпонентний токарний динамометр на основі тензометричних датчиків - призначений для заміру та фіксації сил що діють на токарний різець під час роботи за трьома координатами (рис. В.4).

Пристрій універсальний для заточки токарних різців. Призначений для заточки токарних різців витримуючи передній кут в плані, та задній кут (рис. В.5).

Різець токарний прохідний відігнутий. Матеріал ріжучої частини твердий сплав Т15К6 ДСТУ 18877:2008. Призначений для чорнового та чистового точіння різних видів сталей, обробки торцевих поверхонь та підрізки торців (рис. В.6).

Профілограф-профілометр модель 201 є високочутливим вимірювальним приладом для визначення шорсткості і хвилястості поверхні виробів із сталі, чавуну, кольорових металів і сплавів (рис. В.7).

Оптико-програмний комплекс Micro-optik. Комплекс Micro-optik у своєму складі має мікроскоп eScore, за допомогою якого можна безпосередньо вводити

структурні характеристики зразків через програмне забезпечення Smart-eye у персональний комп'ютер (рис. В.8).

4.2. Методика планування багатofакторного експерименту

Активний експеримент у дослідженні технологічних процесів характеризується одночасною зміною (варіюванням) всіх факторів з метою знаходження їх найкращого поєднання. При цьому показники об'єкта дослідження називають параметрами оптимізації. Ними можуть бути показники якості виробу (точність обробки, об'ємні властивості виробу), продуктивність обладнання, економічні показники процесу. Залежність цих параметрів оптимізації від технологічних факторів $x_1, x_2 \dots x_n$ утворює функцію відгуку, що є моделлю технологічного процесу [20]: $Y_j = Y_j(x_1, x_2, \dots, x_n)$,

де $j = 1, 2, 3, \dots$

Геометричний вираз функції відгуку утворює поверхню відгуку, побудовану в факторному просторі, тобто просторі, по осях якого відкладені технологічні фактори.

Планування експерименту — це проведення окремих дослідів за деякою, наперед складеною схемою. Кожна незалежна змінна приймає кілька значень. Ці значення називають рівнями варіювання. Необхідне число дослідів визначається числом можливих комбінацій їх рівнів варіювання [21].

Для математичного планування експерименту є два рівні. Звідси число дослідів: $N = 2^n$,

де n — кількість досліджуваних технологічних факторів.

Побудова математичної моделі технологічного процесу або операції ускладнена тим, що механізм процесу невідомий, аналітичний вираз функції відгуку теж невідомий. Тому модель процесу представляється у вигляді полінома. Ступінь наближення його характеризується кількістю обраних членів, яка визначається методом підбору [22]. Спочатку перевіряємо відповідність лінійної моделі. Якщо умова адекватності не витримується, перевіряємо придатність для опису процесу неповною, а потім і повною

квадратичними моделями і т.д., поки не буде виконана умова адекватності вибраної поліноміальної моделі експериментальним значенням. Поліном в загальному вигляді для n факторів записується має вигляд:

$$y = b_c + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i \neq j}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \dots ,$$

Коефіцієнти полінома b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} та т.п. обчислюються за експериментальними даними.

Для зручності їх обчислення всіма факторами варіюють, як ми вже згадували, на двох рівнях, а значення рівнів змінних кодують за допомогою виразів:

$$X_i = \frac{x_i - x_0}{\Delta x_i}; \quad i=1,2,3, \dots, n ,$$

де x_i — кодоване значення рівня;

Δx_i — інтервал варіювання фактора;

x_0 — нульовий рівень фактора, центр інтервалу фактора x_i .

Оскільки фактор x_i змінюється тільки на двох рівнях, приймаючи найбільше і найменше значення, то ці значення називають верхнім рівнем і нижнім рівнем. Значення верхнього рівня в кодованих змінних становить + 1, а нижнього -1.

Матриця повного факторного експерименту (ПФЕ) для двох факторів (табл. 4.1) містить всі можливі поєднання рівнів обох факторів X_1 і X_2 .

Таблиця 4.1 - Матриця повного факторного експерименту для двох факторів

№ п/п	Фактори		Функції відгуку	
	X_1	X_2	Y_1	Y_2
1	-1	-1	Y_{11}	Y_{21}
2	-1	+1	Y_{12}	Y_{22}
3	+1	-1	Y_{13}	Y_{23}
4	+1	+1	Y_{14}	Y_{24}

4.3. Вплив геометрії ріжучого інструменту на силу різання під час токарної обробки валу із сталі 45

Розглянемо модель залежності зміни параметрів заточки ріжучого інструменту на силу різання на прикладі токарної обробки. В якості змінного параметра обрано кут в плані α — X_1 , другий змінний параметр — кут в плані ϕ — X_2 . Модель процесу побудуємо для середніх значеннях факторів:

$$X_{01} = 20^\circ, \quad X_{02} = 50^\circ.$$

1. Параметр оптимізації - сила різання, кгс/см².
2. Змінні фактори: X_1 — кут в плані α ; X_2 — кут в плані ϕ .

На фактори X_1 і X_2 накладені обмеження $X_1 = 15 \dots 25^\circ$, $X_2 = 45 \dots 55^\circ$.

Наведемо дані у вигляді таблиці 4.2.

Таблиця 4.2- Характеристика змінних параметрів

Характеристика	X_1°	X_2°
Основний рівень	20	50
Інтервал варіювання	5	5
Верхній рівень	25	55
Нижній рівень	15	45

3. Складаємо матрицю планування з результатами вимірювання сили різання для трьох паралельних дослідів Y_1, Y_2, Y_3 . Дані по кожному з дослідів наведено в таблиці 4.3 і рис. В.9.

Таблиця 4.3 – Матриця планування експерименту

№ дослідів	Рівні		Натуральні значення факторів		Паралельні дослідів			Середнє \bar{Y}	Дисперсія S
	X_1	X_2	X_1	X_2	Y_1	Y_2	Y_3		
1	+1	-1	15	45	139	142	140	140,3	6,67
2	+1	-1	25	45	143	142	138	141	14
3	-1	+1	15	55	149	148	144	147	14
4	+1	+1	25	55	150	152	151	151	2

4. Режими різання для всіх дослідів сталі: $s = 0,13$ мм/об, $n = 450$ об/хв, $t = 1$ мм.

Перед тим як будувати математичну модель, необхідно перевірити відтворюваність дослідів, тобто переконатися, що одне і те ж поєднання рівнів

факторів забезпечує отримання близьких результатів. Для цього кожне поєднання чинників проводять кілька разів. Ми провели три паралельні досліді, отримавши значення Y_1 , Y_2 і Y_3 . Для кожної серії паралельних дослідів обчислюють середнє арифметичне, дисперсію кожної серії паралельних дослідів.

Досліди є відтворюваними, а оцінки дисперсії однорідними, оскільки критерій Кохрана становить 0,907 і менше його допустимого значення $G_{\text{табл}}=0,95$ [21].

Модель вибираємо у вигляді простого лінійного полінома:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2;$$

Коефіцієнти полінома для побудови математичної моделі процесу: $b_0 = 144,8$; $b_1 = 1,175$; $b_2 = 4,175$.

Таким чином, математичною моделлю процесу, що досліджується, є рівняння: $Y = 144,8 + 1,175X_1 + 4,175X_2$.

Перевірка значущості коефіцієнтів визначалася за допомогою критерію Стьюдента [21].

Величина помилки визначення коефіцієнтів рівняння регресії: $S_b = 0,143$.

Перевірка за критерієм Фішера адекватності теоретичної моделі експериментальним даним показала, що отримана модель процесу задовольняє умові адекватності і може бути застосована для опису процесу:

$$Y = 144,8 + 1,175X_1 + 4,175X_2$$

В натуральних показниках:

$$F = 144,8 + 1,175\alpha + 4,175\varphi.$$

4.4. Вплив режимів різання на силу різання для токарної обробки валу із сталі 45

Розглянемо модель залежності зміни режимів різання на силу різання на прикладі токарної обробки. В якості змінного параметра обрано поздовжню подачу інструменту X_1 , другий змінний параметр – частота обертання шпинделя

X_2 . Модель процесу побудуємо при середніх значеннях факторів.

$$X_{01} = 0,12 \text{ мм/об}, \quad X_{02} = 450 \text{ об/хв.}$$

1. Параметр оптимізації - сила різання кгс/см².

2. Змінні фактори: X_1 — поздовжня подача інструменту s ; X_2 — частота обертання шпинделя n .

На фактори X_1 і X_2 накладені такі обмеження

$$X_1 = 0,09..0,33 \text{ мм/об}, \quad X_2 = 100...1000 \text{ об/хв.}$$

Наведемо дані у вигляді таблиці 4.4.

Таблиця 4.4- Характеристика змінних параметрів

Характеристика	X_1 , мм/об	X_2 , об/хв
Основний рівень	0,12	450
Інтервал варіювання	0,24	900
Верхній рівень	0,33	1000
Нижній рівень	0,09	100

3. Матриця планування і результати вимірювання сили різання для трьох паралельних дослідів Y_1, Y_2, Y_3 (дані по кожному з дослідів) заносимо в таблицю 4.5 і рис. В.10.

Таблиця 4.5 – Матриця планування експерименту для Ст 45

№ дослідів	Рівні		Натуральні значення факторів		Паралельні дослідів			Серед-не	Дис-персія
	X_1	X_2	X_1	X_2	Y_1	Y_2	Y_3	\bar{Y}	S
1	-1	-1	0,09	100	145	147	147	146,3	2,64
2	+1	-1	0,33	100	139	135	138	137,3	8,64
3	-1	+1	0,09	1000	135	135	136	135,3	0,67
4	+1	+1	0,33	1000	150	146	153	149,6	24,64

4. Параметри різального інструменту: $\alpha=15^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\varphi_1=45^\circ$, $t=1\text{мм}$.

4.5. Оптимізація режимів різання під час обробки деталі

Одним з найбільш поширених методів оптимізації в даний час є метод лінійного програмування, що дозволяє здійснювати одночасну оптимізацію швидкості різання і подачі з врахуванням обмежень, що діють під час різання, за критерієм максимальної продуктивності. Для лінійної цільової функції і

лінійних обмежень вистачає добре розробленого і широко використовуваного графічного методу пошуку оптимальних режимів різання [23,24]. Не дивлячись на простоту і наочність, цей метод не дозволяє теоретично аналізувати отримувані результати залежно від умов обробки. Тому однією із цілей роботи – встановити взаємозв'язок оптимальних режимів різання з умовами механічної обробки і показниками мінімальних енергозатрат для токарної обробки.

Цільовою функцією є продуктивність обробки, максимум якої досягається за мінімуму основного часу, або максимумі $n \cdot s \rightarrow \max$ (n, s - частота обертання і подача).

Під час токарної обробки найбільш розповсюджені наступні обмеження:

- по можливостях ріжучого інструмента, які обумовлені швидкістю різання, що відповідає його стійкості T ;
- по потужності різання, яка обумовлена потужністю електродвигуна приводу головного руху верстата $N_{ст}$;
- по міцності державки різця;
- по міцності пластини різця;
- по гранично припустимій шорсткості обробленої поверхні Ra ;
- по жорсткості деталі;
- по гранично припустимій температурі різання Θ ;
- по припустимих діапазонах частоти обертання і подачі, обумовленим кінематичною структурою приводу головного руху і приводу подач.

В результаті лінеаризації цільової функції і обмежень шляхом логарифмування визначена математична модель процесу різання для токарної обробки Ст 45, виражена системою лінійних нерівностей графічно представлених на рисунку В.3.

$$\begin{cases}
 X1 + y_V X2 \leq b_1, \\
 (n_P + 1)X1 + y_P X2 \leq b_2, \\
 n_P X1 + y_P X2 \leq b_3, \\
 k_3 X1 + k_2 X2 \leq b_2 \\
 n_t X1 + y_t X2 \leq b_5, \\
 X1 \geq b_6, \quad X1 \leq b_7, \\
 X2 \geq b_8, \quad X2 \leq b_9, \\
 (X1 + X2) \rightarrow \max;
 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \ln(1000 C_V K_V / \pi D T^m t^{x_v}); \\
 b_2 &= \ln(6 \cdot 10^3 (n_P + 2) N_{cm} \eta / C_P K_P (\pi D)^{(n_P + 1)} t^{x_P}); \\
 b_3 &= \ln\left(\frac{1000^{n_P} 0,05 D^4 K_3 E_d f_d}{1.1 \cdot 10 C_P K_P (\pi D)^{n_P} t^{x_P} L^3 \mu}\right); \\
 b_4 &= \ln(R_a (\pi D / 1000)^{k_3} / k_o K_R); \\
 b_5 &= \ln(1000^{z_t} \Theta / C_\Theta K_\Theta (\pi D)^{z_t}); \\
 b_6 &= \ln n_{min}; \quad b_7 = \ln n_{max}; \quad b_8 = \ln S_{min}; \quad b_9 = \ln S_{max},
 \end{aligned}$$

де t – глибина різання;

C_V, K_V – постійний коефіцієнт та коефіцієнт, що враховує умови обробки;

x_v, y_v, m – показники, що характеризують ступінь впливу глибини, подачі і стійкості на швидкість різання;

C_P, K_P – постійний коефіцієнт та коефіцієнт, що враховує умови обробки;

x_p, y_p, n_p – показники, що характеризують ступінь впливу глибини, подачі і швидкості на силу різання;

η – коефіцієнт корисної дії передач верстата;

k_0, K_R – постійний коефіцієнт та коефіцієнт, що враховує умови обробки;

k_1, k_3 – показники, що характеризують ступінь впливу подачі і швидкості різання на шорсткість обробленої поверхні;

E_d – модуль пружності матеріалу деталі;

f_d – допустима стріла прогину деталі;

L – довжина деталі;

K_3, μ – коефіцієнти, що залежать від способу закріплення деталі;

C_Θ, K_Θ – постійний коефіцієнт та коефіцієнт, що враховує умови обробки;

x_t, y_t, z_t – показники, що характеризують ступінь впливу глибини, подачі та швидкості на температуру різання.

Розрахунки та побудова моделі проводились у математичному пакеті MatchCAD, що дозволяє з мінімальними витратами часу визначати оптимальні режими різання для умов: вал зі сталі 45 діаметром $D = 30$ мм, довжиною $L = 400$ мм різцями з механічним закріпленням твердосплавних

пластин Т15К6 (геометричні параметри: головний кут в плані $\varphi = 45^0$, передній кут $\gamma = 0^0$, радіус при вершині $r = 1$ мм); стійкість $T = 60$ хв., глибина різання $t = 1$ мм; припустима шорсткість обробленої поверхні $R_a = 3,2$ мкм.

Крапка С в багатокутнику ABCD, який являє собою область можливих рішень для чистової обробки і в якій цільова функція приймає максимальне значення (лінія 10), є крапкою перетину обмежень за шорсткістю обробленої поверхні (4) та температурою різання (5). Координати крапки С (X_{10} , X_{20}) є шуканими оптимальними значеннями параметрів. Для заданих умов чистової обробки визначені оптимальні режими: частота обертання $n_0 = 320$ об/хв, швидкість різання $V_0 = 100$ м/хв, подача $S_0 = 0,4$ мм/об. В тому разі, якщо температурне обмеження (5) не враховується, оптимальні режими різання визначаються координатами крапки С1(X_{10_1} , X_{20_1}), яка є крапкою перетину обмежень за шорсткістю обробленої поверхні (4) та можливостями різального інструменту (1). Оптимальні режими: частота обертання $n_0 = 687$ об/хв, швидкість різання $V_0 = 215$ м/хв, подача $S_0 = 0,46$ мм/об. Значення цих параметрів перевищує ті, що визначені з урахуванням температурного обмеження (за швидкістю в 2,1 рази, подачею – в 1,2 рази).

Результати розрахунку, отримані з допомогою наведеної математичної моделі, підтверджуються раніше проведеними для аналогічних умов експериментальними дослідженнями [25]. Розбіжності результатів становлять 3...5 %, що є підтвердженням адекватності розробленої математичної моделі.

4.6. Висновки до 4-го розділу

Представлено обладнання для проведення експериментального дослідження впливу геометричних параметрів різця та режимів обробки на силу різання під час токарної обробки заготовки із сталі 45.

Вибрано методику планування повного факторного експерименту для двох факторів. Методика розрахунку параметрів механічної обробки дозволяє прогнозувати необхідну геометрію різучого інструменту та режими різання, а

також експлуатаційні властивості деталей типу "тіла обертання" під час обробки з оптимальними параметрами процесу різання.

Розглянуто модель залежності зміни параметрів заточки ріжучого інструменту (кути α та φ) і зміни режимів різання (S і n) на силу різання на прикладі токарної обробки. Встановлено, що оптимальними є : $\alpha=15^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $t=1\text{мм}$, $S=0,33\text{мм/об}$, $n=1000\text{хв}^{-1}$.

Визначені аналітичні залежності для розрахунку оптимальних за критерієм максимальної продуктивності швидкості різання та подачі для будь-яких умов токарної обробки.

Встановлено, що при чистовій обробці сталі 45 різцями оптимальні режими різання визначаються головним чином обмеженнями температури і шорсткості оброблюваної поверхні. Якщо температурне обмеження не враховувати, оптимальні режими різання визначаються обмеженнями за шорсткістю обробленої поверхні та можливостями різального інструменту і майже у 1,5... 2 рази є вищими.

Застосування розробленого математичного апарату дозволило підвищити ефективність обробки сталей, а також майже у 2 рази зменшити витрати часу та матеріалів для призначення оптимальних режимів різання.

РОЗДІЛ 5

Оцінка очікуваної економічної ефективності дослідження

5.1. Розрахунок кошторису капітальних витрат на модернізацію існуючого технологічного процесу

Капітальні вкладення на розробку нового технологічного процесу K , в загальному випадку, складаються з відповідних витрат і розраховують за такою формулою, грн. [26]:

$$K = Z_o + Z_{\text{дод}} + Z_n + B_{\text{обл}} + B_{\text{пр}} + B_{\text{на}} + B_{\text{пу}} + B_{\text{оз}}$$

де Z_o – основна заробітна плата розробників, грн.;

$Z_{\text{дод}}$ – додаткова заробітна плата розробників, грн.;

Z_n – нарахування на заробітну плату розробників, грн.;

$B_{\text{обл}}$ – початкова вартість технологічного обладнання, грн.;

$B_{\text{осн}}$ – початкова вартість інструменту, оснащення великої вартості, вимірювальних та регулювальних приладів, грн.;

$B_{\text{оз}}$ – вартість оборотних засобів, грн.

До фонду основної заробітної плати розробників належать виплати, які плануються і включаються у фактичну собівартість проведення досліджень:

- заробітна плата, нарахована за виконану роботу (відпрацьований час) за відрядними розцінками, тарифними ставками, посадовими окладами;

- надбавки та доплати до тарифних ставок та посадових окладів у розмірах, передбачених законодавством тощо.

Витрати на основну заробітну плату розробників, грн

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}$$

де k – кількість посад розробників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного розробника, грн.;

t_i – число днів роботи конкретного розробника, грн.;

T_p – середнє число днів роботи в місяці, $T_p=22$ дні.

Витрати на основну заробітну плату розробників наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Витрати на заробітну плату розробників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
Керівник проекту	8000	363,5	14	5090
Інженер-технолог (ІІр)	6000	272,7	10	2727
Начальник цеху	8000	363,5	14	5090
Технік (Ір)	3500	159	6	954
Всього				13861

До фонду додаткової заробітної плати належать виплати, які плануються і включаються у фактичну собівартість проведення досліджень або розробки:

- премії за сприяння винахідництву та раціоналізації, за створення, освоєння та впровадження нової техніки, за введення в дію в термін і достроково виробничих потужностей тощо;
- одноразові заохочення (за виконання особливо важливих виробничих завдань);
- премії керівникам, спеціалістам та іншим службовцям за виробничі результати.

Додаткову заробітну плату розраховуємо, як 10...12 % від основної заробітної плати робітників, грн:

$$Z_d = H_{\text{дод}} \cdot Z_o, \quad Z_d = 13861 \cdot 0,1 = 1386,1 \text{ грн.}$$

де $H_{\text{дод}}$ - норма нарахування додаткової заробітної плати.

Нарахування на заробітну плату розробників Z_n розраховується як 36,76...49,7 % від суми основної та додаткової заробітної плати розробників,

$$\text{грн: } Z_n = (Z_o + Z_d) \cdot H_T, \quad Z_n = (13861 + 1386,1) \cdot 0,4 = 6098,8 \text{ грн}$$

де H_T - норма нарахування на заробітну плату розробників.

Вартість обладнання визначається за прейскурантом гуртових цін на металорізальні верстати або за даними базового підприємства за відпускними і договірними цінами. До балансової вартості обладнання окрім прейскурантної вартості верстатів входять витрати на їх транспортування і монтаж на ділянці, ці витрати приймаються в розмірі 10...12% від вартості обладнання.

Балансову вартість нового обладнання, грн:
$$B_{обл} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{np.i} \cdot K_i,$$

де C_i - ціна придбання одиниці обладнання даного виду, марки, грн.;

$C_{np.i}$ - прийнята кількість одиниць обладнання відповідного найменування, які встановлені на ділянці, шт.;

$K_i = 0,1$ - коефіцієнт, на доставку, монтаж, налагодження обладнання;

k - кількість найменувань обладнання встановленого на ділянці.

Таблиця 5.2 - Зведені витрати на обладнання

Модель	Кількість	Потужність, кВт	Ціна, грн.	Затрати на перевезення, грн	Сума всіх затрат, грн
MP-71M	1	8,8	35942	3594	39536
16Б16Т1Ф1	1	7,1	60167	6017	66184
3М151	1	5,9	34722	3472	38194
BC-51П	1	11,9	29266	2927	32193
6P13Ф3	1	8,4	80393	8039	88432
Стіл ОТК	1	0,5	640	64	704
	6	42,6			265243

Ціна продажу старих універсальних верстатів наведена в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Ціна реалізації старих універсальних верстатів

Модель	Кількість	Ціна, грн.	Затрати на перевезення, грн	Сума всіх затрат, грн
16K20	2	22284	2228	49024
6725У	1	37557	3756	41313
3М151	1	34722	3472	37194
6P80Г	4	11543	1154	50788
1Н611П	1	29437	2944	32381
ZFW250X25	1	19395	1940	21335
676	1	14412	1441	15853
НС-12А	1	4871	487	5358
Стіл ОТК	1	640	64	704
	13			221569

Вартість спеціальних пристосувань: $B_{сп.пр.} = 265243 \cdot 0,25 = 66310$ грн.

Величина передвиробничих витрат $B_{не}$ становить 10...15% сумарної вартості основного технологічного обладнання та транспортних засобів, які використовуються на виробництві: $B_{не} = 0,1 \cdot 265243 = 26524$ грн

Величину оборотних засобів (сировина, основні й допоміжні матеріали, паливо й пальне, куплені напівфабрикати, тара й тарні матеріали, запасні частини для поточного ремонту основних фондів, незавершене виробництво, напівфабрикати власного виробництва, готова продукція, відвантажені товари тощо) можна прийняти в межах 150...200% загальної вартості матеріалів на виготовлення річної виробничої програми за всією номенклатурою виробів, грн:

$$B_{оз} = (1,5 \dots 2) \cdot \sum_{j=1}^n N_j \cdot H_j \cdot Ц_j$$

де N_j – обсяг випуску деталей j -го найменування за відповідний період часу, шт;

H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

$Ц_j$ – вартість матеріалу j -го найменування, грн /кг;

n – кількість видів матеріалів.

$$B_{оз} = 1,5 \cdot 20000 \cdot 3,2 \cdot 81 \cdot 1 = 7776000 \text{ грн}$$

Тоді, капітальні вкладення на розробку нового технологічного процесу:

$$K = 13861 + 1386,1 + 6098,8 + 265243 + 66310 + 26524 + 7776000 = 8155422,9 \text{ грн}$$

З врахуванням надходжень від продажі старого обладнання K становлять:

$$K = 8155422,9 - 221569 = 7933853,9 \text{ грн}$$

5.2. Розрахунок виробничої собівартості виготовлення одиниці продукції

Розрахунок виробничої собівартості одиниці продукції передбачає визначення таких статей витрат:

1. Вартість основного матеріалу: $Z_3 = m_3 \cdot a$,

де m_3 – маса заготовки, кг;

a – вартість 1 кг матеріалу.

$$Z_3 = 3,2 \cdot 8,1 = 259,2 \text{ грн.}$$

Вартість матеріалу на річну програму випуску: $Z_{м.п} = Z_3 \cdot N$,

де N – річна програма випуску виробів.

$$Z_{\text{м.п}} = 259,2 \cdot 20000 = 5184000 \text{ грн}$$

2. Витрати на сировину та матеріали: $Z_{\text{с.м}} = Z_{\text{м.п}} + Z_{\text{д.м}} + Z_{\text{з.т}}$,

де $Z_{\text{с.м}}$ - затрати на сировину і матеріали;

$Z_{\text{м.п}}$ – затрати матеріалу на програму;

$Z_{\text{д.м}}$ – затрати на допоміжні матеріали;

$Z_{\text{з.т}}$ – затрати заготівельно-транспортні.

$$Z_{\text{д.м}} = 265243 \cdot 0,006 = 1592 \text{ грн};$$

$$Z_{\text{з.т}} = 5184000 \cdot 0,05 = 259200 \text{ грн};$$

$$Z_{\text{с.м}} = 5184000 + 1592 + 259200 = 5443359 \text{ грн}$$

3. Зворотні відходи – вартість стружки, брухту: $V_{\text{з.в}} = m_{\text{від}} \cdot V \cdot N$,

де $V_{\text{з.в}}$ – вартість зворотних відходів, грн;

V – ціна 1кг відходів, грн;

$m_{\text{від}}$ - маса відходів, кг.

Маса відходів: $m_{\text{від}} = m_{\text{від}} - m_{\text{д}}$,

де $m_{\text{від}}$ – маса заготовки, кг;

$m_{\text{д}}$ – маса деталі, кг.

$$m_{\text{від}} = 4,9 - 3,2 = 1,7 \text{ кг}$$

$$V_{\text{з.в}} = 1,7 \cdot 39,6 \cdot 20000 = 1346400 \text{ грн.}$$

З врахування зворотних відходів $Z_{\text{с.м}} = 5443359 - 1346400 = 4096959$ грн.

4. Витрати силової енергії: $E_{\text{сил}} = \frac{P_{\text{вст}} \cdot \Phi_{\text{д}} \cdot K_{\text{з}} \cdot K_{\text{о}}}{K_{\text{м}} \cdot \text{ККД}}$,

де $P_{\text{вст}}$ – встановлена споживча потужність верстатів, кВт;

$\Phi_{\text{д}} = 4029$ год – дійсний річний фонд роботи обладнання.

$K_{\text{з}}$ – коефіцієнт завантаження обладнання;

$K_{\text{м}} = 0,96$ – коефіцієнт, який враховує витрати в електромережі;

$K_{\text{о}} = 0,8$ – коефіцієнт одночасної роботи електроспоживачів.

$$E_{\text{сил}} = \frac{42,6 \cdot 4029 \cdot 0,4 \cdot 0,8}{0,9 \cdot 0,96} = 6357 \text{ кВт.}$$

Вартість силової електроенергії: $Z_{\text{ел}} = E_{\text{сил}} \cdot a$,

де $a = 0,78$ грн – вартість 1кВт електроенергії силової, грн.

$$E_{\text{ел}} = 6357 \cdot 0,78 = 4958 \text{ грн.}$$

5. Витрати на основну заробітну плату робітників

Розраховуються на основі норм часу, які необхідні для виконання технологічних операцій по відновленню одного виробу: $Zp = \frac{T_{\text{шт}} \cdot N_p}{60 \cdot \Phi_{\text{д}} \cdot T \cdot K_{\text{в}} \cdot K_{\text{м}}}$,

де $T_{\text{шт}}$ – працемісткість обробки деталі, хв.;

N_p – річний випуск продукції, шт.;

$\Phi_{\text{д}} = 1820$ год – дійсний річний фонд часу робітника;

$T = 1$ – число робочих змін;

$K_{\text{в}} = 1,1$ – коефіцієнт виконання норми;

$K_{\text{м}} = 1$ – коефіцієнт багатостатного обслуговування.

Розрахунки вносимо до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4- Зведені витрати на заробітну плату

Професія	Кількість робітників	У тому числі			
		Середній розряд	Середній тарифний коефіцієнт	Працемісткість, год	Тарифний фонд з/п
токар	2	4	16,4	2853	46789
фрезерувальник	2	3	16,4	1290	21156
шліфувальник	2	4	16,4	2614	42867
зуборізальник	2	4	16,4	3580	58712
контролер	1		16,4	964	15810
	9			11301	185336

6. Додаткова заробітна плата робітників

Розраховується як 10...1 2% від основної заробітної плати робітників:

$$Zd = 185336 \cdot 0,1 = 18534 \text{ грн}$$

7. Нарахування на заробітну плату робітників

Нарахування на заробітну плату складала 42% від суми основної та додаткової заробітної плати.

$$Zn = (185336 + 18534) \cdot 0,42 = 85625 \text{ грн}$$

8. Загальновиробничі статті витрати

Загальновиробничі витрати (в відсотках до основної заробітної плати основних робітників) для механічного устаткування складають 250 ... 280%.

Прийmemo 250 %. Тоді: $V_{\text{заг}} = 185336 \cdot 2,5 = 463340 \text{ грн}$

Виробнича собівартість виготовлення продукції представлена у табл. 5.5.

Таблиця 5.5 - Собівартість виготовлення виробу, грн.

Стаття витрат	Позначення	Сума, грн.
1. Витрати на матеріали на одиницю продукції, грн.	<i>Зсм</i>	4096959
2. Витрати на силову електроенергію, грн.	<i>Еел</i>	4958
3. Витрати на основну заробітну плату робітників, грн.	<i>Зо</i>	185336
4. Витрати на додаткову заробітну плату робітників, грн.	<i>Зд</i>	18534
5. Витрати на нарахування на заробітну плату робітників, грн.	<i>Зн</i>	85625
6. Загальновиробничі витрати, грн.	<i>Взаг</i>	463340
Всього на програму	<i>Спр</i>	4854752
Одного виробу	<i>S</i>	242

5.3. Розрахунок ціни реалізації виробу

Нижня межа ціни $C_{нмр}$ захищає інтереси виробника продукції і передбачає, що ціна повинна покрити витрати виробника, які пов'язані з виробництвом та реалізацією продукції, і має забезпечити рівень рентабельності не нижче того, що має підприємство при виробництві вже освоєної продукції.

Ціна реалізації виробу

$$C_p = S \cdot \left(1 + \frac{p}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{w}{100}\right), \text{ грн}$$

де S - повна собівартість виробу;

p - норматив рентабельності, узгоджений із замовником або установлений державою, %, $p = 20 \dots 50\%$;

w - ставка податку на додану вартість, % ($w = 20\%$).

$$C_p = 242 \cdot \left(1 + \frac{30}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{20}{100}\right) = 377,5 \text{ грн}$$

Необхідність врахування податку на додану вартість виникає у зв'язку з тим, що коли буде встановлюватись верхня межа ціни, а потім договірна ціна, то ціна базового виробу зазвичай містить цей податок.

У нашому випадку в результаті розробки нового технологічного процесу значення основних технічних показників продукції, яка буде випускатись залишаються в межах показника існуючого виробу, то верхня межа реалізації $C_{впр}$ залишиться в межах ціни базового виробу, а саме 420грн.

Договірна ціна $C_{дог}$ може бути встановлена за домовленістю між виробником і споживачем в інтервалі між нижньою та верхньою лімітними цінами згідно виразу:

$$C_{нмр} < C_{дог} < C_{впр}$$

Приймаємо договірну ціну 400 грн.

5.4. Розрахунок величини чистого прибутку

Величина чистого прибутку, який ми можемо отримати за рік

$$\Pi = \left[C_{дог} - \frac{(C_{дог} - Z_{см}) \cdot f}{100} - S_{в} - \frac{q \cdot S_{в}}{100} \right] \cdot \left[1 - \frac{h}{100} \right] \cdot N,$$

де $C_{дог}$ - договірна ціна реалізації виробу, грн.;

$Z_{см}$ - вартість матеріальних ресурсів, які були придбані виробником для виготовлення одиниці виробу, грн.;

$S_{в}$ - виробнича собівартість виробу, грн.;

f - зустрічна ставка податку на додану вартість, $f=16,67\%$;

h - ставка податку на прибуток, %, $h=17\%$;

q - норматив, який визначає величину адміністративних витрат, витрат на збут та інші операційні витрати, %; $q=5 \dots 10\%$;

N -число виробів, які планується реалізувати за рік, шт.

$$\Pi = \left[420 - \frac{(400 - 396,7) \cdot 16,67}{100} - 242 - \frac{5 \cdot 242}{100} \right] \cdot \left[1 - \frac{17}{100} \right] \cdot 20000 = 3869190 \text{ грн.}$$

5.5. Оцінювання економічної ефективності інноваційних рішень

Якщо проект або розробка передбачає одноразові капітальні (інвестиційні) вкладення, то чистий дисконтний дохід (NPV), грн

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{\Pi_t}{(1+d)^t} - K,$$

де Π_t - прибуток отриманий від реалізації відповідної кількості нової продукції у t -му році функціонування проекту, грн.; ($\Pi_t = 3869190$ грн.);

K - величина капітальних вкладень у розробку інноваційного рішення (проект), грн.; ($K = 7933853,9$ грн.);

d - норма дисконту, величина якої залежить від рівня ризику, рівня банківської ставки по вкладам, рівня інфляції; ($d = 0,2$);

n - термін протягом якого продукція реалізовуватиметься на ринку (термін функціонування проекту), років; ($n = 7$ років);

t - відповідний рік функціонування проекту, в якому очікується прибуток, грн.

$$NPV = \frac{3869190}{(1+0,2)^7} + \frac{3869190}{(1+0,2)^6} + \frac{3869190}{(1+0,2)^5} + \frac{3869190}{(1+0,2)^4} + \frac{3869190}{(1+0,2)^3} + \frac{3869190}{(1+0,2)^2} + \frac{3869190}{(1+0,2)^1} - 7933853,9 = 6058705,76 \text{ грн}$$

Величина чистого дисконтного доходу у $6058705,76$ грн свідчить про доцільність модернізації.

Зміст показника внутрішньої норми доходності (IRR) полягає в тому, що інвесторів необхідно зрівняти отримане значення IRR із ціною джерела фінансових ресурсів певного інвестиційного проекту.

Мінімальне можливе значення внутрішньої норми доходності проекту IRR_{\min}

$$IRR_{\min} = \sqrt[n]{\frac{\sum_{t=1}^n (\Pi_t + A_t)}{K}} - 1,$$

де A_t - амортизаційні відрахування у t -му році функціонування проекту на обладнання, яке безпосередньо було використано для розробки інноваційного рішення, грн.;

$$A = \frac{Цо}{Тв},$$

де C_0 – балансова вартість обладнання, $C_0 = 265243$ грн.;

T_e – строк використання обладнання, $T_e = 7$ років.

K - величина капітальних вкладень у розробку інноваційного рішення (проект), грн.;

n - термін протягом якого продукція реалізовуватиметься на ринку (термін функціонування проекту), років;

t - відповідний рік функціонування проекту, в якому очікується прибуток, грн.

Рекомендується відбирати такі інноваційні проекти, внутрішня норма доходності яких не нижча 15...20%.

Проведемо розрахунок внутрішньої норми доходності.

$$A = \frac{265243}{7} = 37892 \text{ грн}$$

$$IRR \min = \sqrt[7]{\frac{(3869190 + 37892) \cdot 7}{7933853,9}} - 1 = 0,19$$

Внутрішня норма доходності складає 0,19, або 19%, що є достатнім для зацікавленості інвестора.

Індекс прибутковості інвестицій використовується для відображення величини чистих грошових доходів, отриманих у розрахунку на 1 грн. грошових видатків за проектом в цілому за весь період його реалізації. Він визначається як відношення суми елементів грошового потоку від операційної та інвестиційної діяльності до сукупного грошового потоку від інвестиційної діяльності.

Без врахування фактору часу індекс прибутковості капітальних вкладень (інвестицій)

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i + K_i)}{\sum_{i=1}^n K_i}; \quad PI = \frac{3869190 + 7933853,9}{7933853,9} = 1,5$$

Так, як PI більше 1, то проект є ефективним і його можна рекомендувати до реалізації.

Термін окупності капітальних вкладень

$$T_{ок} = \frac{K}{П + А},$$

де K - величина капітальних вкладень для розробки нової технології грн.,

A - амортизаційні відрахування, грн

$П$ - прибуток, отриманий виробником за 1 рік продажу продукції, виробленої з застосуванням нового технологічного процесу, грн.

$$T_{ок} = \frac{7933853,9}{3869190 + 37892} = 2,03 \text{ роки}$$

Термін окупності модернізованого технологічного процесу складає 2,03 роки, що менше нормативного терміну окупності – 5...6 років, отже модернізований технологічний процес виготовлення деталі вал є доцільним.

5.6. Висновки до 5-го розділу

В результаті проведених розрахунків було здійснено економічне обґрунтування доцільності модернізації технологічного процесу деталі вал шліцьовий. Використання модернізованого технологічного процесу на підприємстві дозволить отримати позитивний економічний ефект завдяки зменшенню трудомісткості обробки, скороченню кількості працюючих та обладнання, зменшенню енерговитрат, зменшенню виробничих площ, підвищенню продуктивності, зменшенню нижньої ціни реалізації виробу.

Впровадження модернізованого технологічного процесу потребує від інвестора 7933853 грн. капітальних вкладень. Чистий прибуток складе 3869190 грн. Під час оцінки ефективності інноваційного проекту отримані такі важливі показники, як: чистий дисконтний дохід (інтегральний ефект) 6058705,76 грн.; внутрішня норма дохідності (прибутковості) 19%; індекс прибутковості 1,5; термін окупності 2,03 роки. Отримані показники свідчать про високий рівень дохідності для інвестора і підтверджують доцільність впровадження технологічного процесу виготовлення деталі типу «вал шліцьовий» з організацією обробки на виробництві.

ВИСНОВКИ

На основі аналізу завдання на роботу визначені - об'єкт і предмет дослідження.

Проведений інформаційний і аналітичний огляд джерел, що торкаються визначених у кваліфікаційній роботі питань.

Встановлено, що проектування технологічних процесів механічної обробки повинно забезпечити високу економічність процесу обробки. Вирішується це через оптимізацію характеристики технологічного процесу – трудомісткість, що визначається режимами обробки.

Для розгляду в узагальненому плані нами були проаналізовані задачі для різних досліджень оптимізаційного характеру стосовно теми роботи. Зокрема в роботі розроблено технологічний процес типової деталі-представника, яким обрано вал - шліцьовий. Під час проектування проводився пошук оптимізаційного характеру, як виду заготовки, так і маршрутно-операційної технології, силового режиму точіння.

Запропоновано ряд конструкторсько-технологічних рішень, що є перспективними для впровадження у відповідне виробництво з технічної точки зору і є хорошим показником для подальшого розвитку виробництва подібних деталей.

Вибрано методику планування ПФЕ для механічної обробки, що дозволяє прогнозувати необхідну геометрію ріжучого інструменту та режими різання деталей типу "вал".

Розглянуто модель залежності зміни параметрів заточки ріжучого інструменту (кути α та φ) і зміни режимів різання (S і n) на силу різання. Для прикладу токарної обробки валу із Ст 45 встановлено їх оптимальні значення: $\alpha=15^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $t=1\text{мм}$, $S=0,33\text{мм/об}$, $n=1000\text{хв}^{-1}$.

Показано, що найкраще використовувати в якості оцінки, зокрема для точіння, функцію мети продуктивності різання, яка базується на використанні як найбільшої кількості чисел обертів шпинделя і поздовжньої подачі.

Побудована математична модель, яка передбачає оптимізацію режимів обробки під час точіння. Для цього були задіяні аналітичний підхід до розв'язку і його графічна інтерпретація у лінеаризованій постановці. Запропоновані математичні розрахунки дають змогу підвищити ефективність обробки на оптимальних режимах різання сталей з одночасним зменшенням працездатності та витрати матеріалу.

Викладений підхід можна вважати ще одним обґрунтованим кроком у напрямку практичного застосування ефективних методів пошуку оптимальних схем проектування технологічних процесів.

Кваліфікаційна робота супроводжується техніко-економічним обґрунтуванням, що вказує про високий рівень дохідності для інвестора і підтверджує доцільність впровадження технологічного процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кузнецов Ю. М. Теорія технічних систем в аспектах досліджень та технічної творчості : підруч. для здобувачів освіт. рівнів бакалавра, магістра та д-ра філософії за спец. 131 "Прикладна механіка". Луцьк : Вежа-Друк, 2023. 284 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/57114>
2. Герасимчук О.П. Теорія технічних систем: Навчальний посібник для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання. Луцьк: ЛНТУ, 2023. 112 с. URL: <https://lib.lntu.edu.ua>
3. Ладієва Л.Р. Методи оптимізації та пошуку оптимальних рішень: Електронне мережне навчальне видання. Навчальний посібник. 2020. 73 с. URL: <https://ela.kpi.ua>
4. Геворкян Е.С. Інтегровані технології обробки матеріалів: підручник. Харків: УкрДУЗТ, 2016. 238 с.
5. Жалдак М.І., Триус Ю.В. Основи теорії і методів оптимізації: Навчальний посібник. Черкаси: БрамаУкраїна, 2005. 608 с.
6. Ладієва Л.Р. Оптимізація технологічних процесів: Навчальний посібник. К: ІВЦ «видавництво «Політехніка»», 2004. 192с.
7. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів: підручник [для вищ. навч. закладів]. Львів: Новий світ-2000, 2011. 422 с. URL: <http://xn--e1ajqk.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/12/Mazur-M.-P.-Osnova-teori-rizannya-meterialiv.pdf>
8. Грицай, І. Є. Різання металів: Теорія різання: Навчальний посібник. Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2005. 132 с.
9. Гончаренко Б.М., Осадчий С.І., Віхрова Л.Г., Каліч В.М., Дідик О.К. Автоматизація виробничих процесів. Кіровоград: Видавець - Лисенко В.Ф., 2016. 352с.
10. Сахно Є. Ю., Терещук О. І., Чуприна В. М., Коваленко С. В. Основи системотехніки: навчальний посібник. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2022. 280 с.

11. Анельчик Д.Є. Система різання: фізичні основи і оптимізація. Одеса-Тернопіль: вид-во ТДТУ, 2000. 145с.
12. Карпусь В. Є., Котляр О. В., Іванов В. О. Оптимізація механічної обробки тіл обертання : монографія. Харків : НТМТ, 2012. 296 с.
13. Карпусь В. Є. Технологічні основи машинобудування : навч. посібник. Харків : Акад. ВВ МВС України, 2007. 294 с.
14. Сталь 45: характеристики, властивості, продукція. URL: <https://steelgroup.com.ua/chornyj-metal> (дата звернення: 10.09.2024).
15. Рудь В.Д., Божко Т.Є., Гальчук Т.Н. Методологія підготовки випускної роботи за спеціальністю 131- Прикладна механіка: навчальний посібник. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2017. 487с.
16. Булига Ю. В., Веселовська Н. Р., Міськов В. П. Теорія різання. Розрахунок режимів різання : практикум. Вінниця : ВНТУ, 2019. 67 с.
17. Боровик А.І. Технологічна оснастка механоскладального виробництва: підручник. К.: Кондор, 2008. 726 с.
18. Гевко Б.М., Дичковський М.Г., Матвійчук А.В. Технологічна оснастка. Контрольні пристрої: навч. посіб. К.: Кондор, 2009. 220 с.
19. Сікора Я. Б., Щехорський А.Й., Якимчук Б.Л. Методи оптимізації та дослідження операцій навчальний посібник . Житомир: Вид-во ЖДУ ім. Івана Франка, 2019. 148 с.
20. Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В. Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб. – К. : НАУ, 2017. 392 с.
21. Кошовий, М.Д. Оптимізація планування експерименту при дослідженні технологічних процесів, приладів і систем: навч. посіб. Х.: Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2010. 161 с.
22. Гришук Ю. С. Г85 Основи наукових досліджень: навч. посібник. Харків: НТУ «ХПІ», 2008. 232с.
23. Мироненко Є. В. Загальні принципи розробки моделей для вибору оптимальних режимів різання при чистовому точінні сталей на основі

використання енергетичного критерію. *Сучасні технології в машинобудуванні*. 2008. Вип. 2. С. 48–57.

24. Юрченко Ю. Д. Оптимізація режимів різання при чистовому точінні аустенітних сталей різцями з внутрішнім тепловідведенням. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2016. №3. С. 168-173.
25. Савюк І. В., Рудь В. Д. Вдосконалення вимірювання сил різання при точінні. *Наукові нотатки*. 2013. Випуск 40. С. 228-232.
26. Кавецький В.В., Козловський В.О. Економічне обґрунтування інноваційних рішень в машинобудуванні. Методика і особливості виконання курсової роботи: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2013. 100 с.

ДОДАТКИ