

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інженерії транспорту та архітектури  
Кафедра технології машинобудування

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**на здобуття ступеня вищої освіти магістра**

Удосконалення технології виготовлення деталі «Ступиця маніпулятора МБ 240.  
800. 026»  
Назва теми

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Галузь знань 13 механічна інженерія  
Шифр і назва галузі знань

Спеціальність 131 прикладна механіка  
Шифр і назва спеціальності  
Назва

Освітня програма «технології машинобудування»  
Назва

Шифр ДРМ.ФІТА.ПМ.25.11.ПЗ

Виконав студент 2 курсу група  
ПМТм-24-1 Шифр

  
Підпис

Богдан  
КІНДЗЕРСЬКИЙ  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник канд. техн. наук, ст.викладач  
Науковий ступінь, звання

  
Підпис

Сава КОСТЮК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер канд. техн. наук,  
доцент

  
Підпис

Сергій БИСЬ  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:  
Завідувач кафедри  
технології машинобудування  
Назва

  
Підпис

Віталій ТКАЧУК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Дата «29» 12 2024

Хмельницький 20 25

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії транспорту та архітектури

Кафедра технології машинобудування

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Галузь знань 13 механічна інженерія

Шифр і назва

Спеціальність 131 прикладна механіка

Шифр і назва

Освітня програма «технології машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТМ

Віталій ТКАЧУК

2 . 09 . 2024

**ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Кіндзерському Богдану Сергійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема дипломної роботи Удосконалення технології виготовлення деталі «Ступиця маніпулятора МБ 240. 800. 026»

керівник роботи Костюк Сава Андрійович, к.т.н.,

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

Затверджено наказом ректора університету від 26 серпня 2025 р. № 60

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 10 грудня 2024

3 Вихідні дані до проєкту (роботи) кресленик деталі та технічні вимоги до її виготовлення, обсяг випуску 1 тис.

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

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

5 Перелік графічного матеріалу: кресленик деталі із 3D моделлю (1 лист А1); графотехнологія (1 лист А1); кресленик карти наладки (1 лист А1); кресленик верстатного пристрою (1 лист А1); кресленик контрольного пристрою (1 лист А1)

6 Консультанти розділів дипломної роботи (за наявності)

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

7 Дата 3.09.2025 видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Загальний розділ	01.10.2025	
2 Технологічний розділ	01.11.2025	
3 Конструкторський розділ	20.11.2025	
4 Дослідницький розділ	10.12.2025	
5 Охорона праці	15.12.2025	

Студент

  
Підпис

Богдан КІНДЗЕРСЬКИЙ  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник проекту (роботи)

  
Підпис

Сава КОСТЮК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Завідувачу кафедри  
Віталію ТКАЧУКУ

здобувача вищої освіти (студента  
ПІБ, факультет, «курс», «група»)  
Кіндровська Б.С, ФІІА, 2-курс ПМТч-24-1

### ЗАЯВА

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

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

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

28.12.25

дата

  
підпис

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ КАФЕДРИ технології машинобудування

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи "Примочки технології вироблення деталей, Ступінь магістр"  
 Автор Кіноурський Б. С. МБ 240.800.078  
 Освітня програма технології машинобудування  
 Рівень вищої освіти Магістр  
 Спеціальність Примочки механіки  
 Науковий керівник: Костюк С.А.

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

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

Підтвердження:

.....  
 .....  
 .....

Дата

Завідувач кафедри

[Підпис]  
Підпис

Школик В.П.  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Гарант освітньої програми

[Підпис]  
Підпис

Школик В.П.  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи

[Підпис]  
Підпис

Костюк С.А.  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

## РЕЦЕНЗІЯ

на дипломний проект студента Кіндзерською Б. С.  
Тема проекту: Удосконалення технології виготовлення деталі  
Ступиця маніпулятора МБ 240.800.026.

Тема дипломного проекту та його зміст повністю відповідають обраній спеціальності. Робота містить усі необхідні розділи, розрахунки та креслення відповідно до виданого завдання.

У дипломному проекті розглянуто питання удосконалення технології виготовлення деталі типу «ступиця», яка працює в умовах циклічного навантаження та є відповідальним елементом ходової частини маніпулятора. Структура роботи є логічною та відповідає вимогам методичних вказівок.

У загальному та дослідницькому розділах проаналізовано функціональне призначення й умови експлуатації деталі, визначено можливі причини відмов, виконано аналіз напружено-деформованого стану з використанням методу скінченних елементів у середовищі SolidWorks Simulation. Отримані результати підтверджують працездатність удосконаленої конструкції та обґрунтованість прийнятих технічних рішень.

У технологічному та конструкторському розділах проведено аналіз технологічності деталі, обґрунтовано вибір заготовки, розроблено раціональний технологічний маршрут механічної обробки, виконано необхідні розрахунки та спроектовано спеціальне технологічне і контрольньо-вимірвальне оснащення.

Розділ з охорони праці виконано відповідно до чинних нормативних вимог. Графічна частина та розрахунково-пояснювальна записка оформлені згідно з вимогами ЄСКД, ЄСТД та ДСТУ на високому технічному рівні.

Вагомих недоліків у дипломному проекті не виявлено. Робота свідчить про належний рівень теоретичної підготовки та практичних інженерних навичок студента.

Рецензент: Посажський С.Ф.

«29» «12» 2025 р.

## АНОТАЦІЯ

Тема проекту: «Удосконалення технології виготовлення деталі «Ступиця маніпулятора МБ 240. 800. 026»

Автор Богдан КІНДЗЕРСЬКИЙ. Керівник проекту: Сава КОСТЮК

Об'єм пояснювальної записки. 82 стор. Графічна частина. 7 листів А1.

У загальному розділі виконано оцінку технологічності деталі та обґрунтовано вибір типу виробництва.

У технологічному розділі здійснено розрахунок собівартості заготовки, визначено припуски на обробку, установлені режими різання та складені нормативи часу для основних технологічних операцій.

У конструкторському розділі розроблено та обґрунтовано конструкції оснащення для обробки отвору і фрезерування паза, контрольно-вимірювального пристрою, а також елементів різального інструменту.

У розділі з охорони праці подано вимоги та рекомендації щодо безпечної роботи на виробничій ділянці.

У додатках наведено повний технологічний процес виготовлення деталі «Ступиця», специфікації та керуючу програму для верстата з ЧПК.

Автор проекту: Богдан КІНДЗЕРСЬКИЙ.

2025 р.

/Підпис/

Дата

<i>№ п/п</i> <i>Формат</i>	<i>Позначення</i>	<i>Найменування</i>	<i>Кількість</i>	<i>Примітка</i>
1		Документація загальна		

2					
3					
4	A4	ДР.Т.ФІТА.22.00.00 ПЗ	Розрахунково-пояснювальна записка		
5	A2	ДР.Т.ФІТА.22.02.02.00.00	Креслення заготовки	1	
6	A2	ДР.Т.ФІТА.21.02.01.00.00	Креслення деталі	1	
7	A1	ДР.Т.ФІТА.21.02.03.00.00	Графотехнологія	1	
8	A1	ДР.Т.ФІТА.21.02.04.00.00	Карта наладки	1	
9	A1	ДР.Т.ФІТА.21.03.05.00.00СК	Режими різання	1	
9	A1	ДР.Т.ФІТА.21.03.01.00.00СК	Пристрій для фрезерування	1	
10	A1	ДР.Т.ФІТА.21.03.02.00.00СК	Пристрій для свердлування	1	
11	A1	ДР.Т.ФІТА.21.03.03.00.00СК	Пристрій контрольно-вимірювальний	1	
12	A2	ДР.Т.ФІТА.21.03.04.00.00СК	Інструмент	1	
13	A1	ДР.Т.ФІТА.21.04.01.00.00	Дослідницький лист	1	
14	A1	ДР.Т.ФІТА.21.05.01.00.00	План ділянки	1	
15	A4		Завдання на ДП	1	
16	A4		Анотація	1	

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	1
ВСТУП.....	5
1 ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ .....	7
1.1 Аналіз функціонального призначення деталі та умов її експлуатації .....	7

1.3. Аналіз відмов об'єкту досліджень та методи підвищення ресурсу.....	12
2 МЕТОДИКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЕТАЛІ «СТУПИЦЯ» З УРАХУВАННЯМ ЦИКЛІЧНО НАВАНТАЖЕНОГО СТАНУ .....	16
2.1. Загальні положення та мета дослідження .....	16
2.2 Математичний апарат оцінювання втомної міцності ступиці в умовах циклічного навантаження .....	17
2.3 Методика дослідження циклічно навантаженого стану ступиці.....	19
2.4 Аналіз впливу конструктивних та технологічних параметрів на ресурс деталі.....	20
2.5 Моделювання напружено-деформованого стану деталі в середовищі SolidWorks Simulation .....	21
3 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ .....	24
3.1 Аналіз технологічності деталі .....	24
3.2 Визначення типу виробництва та аналіз типового технологічного процесу .....	30
3.3 Вибір та обґрунтування методу отримання заготовки.....	33
3.4 Вибір варіанту технологічного маршруту механічного оброблення .....	38
3.5 Вибір обладнання та технологічного оснащення .....	39
3.5.1 Вибір пристосувань.....	41
3.6 Розрахунок припусків та технологічних розмірів .....	43
РОЗРАХУНОК МІНІМАЛЬНИХ ПРИПУСКІВ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ РОЗМІРІВ .....	44
3.7 Перевірка забезпечення точності конструкторських розмірів .....	49
3.8 Розроблення операції 030 технологічного процесу, що виконується на верстаті з ЧПК моделі Haas VF-3 .....	51
3.9 Аналітичний розрахунок режимів різання на основі онлайн-калькуляторів та рекомендацій виробників інструменту .....	56
4 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ .....	58
4.1 Проектування спеціального технологічного оснащення .....	58
4.2 Проектування контрольно-вимірювального інструменту.....	64
5 ОХОРОНА ПРАЦІ .....	67
5.1 Заходи з охорони навколишнього середовища.....	67

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ ..... 74

## ВСТУП

У сучасних умовах розвитку машинобудування особливої актуальності набувають завдання, спрямовані на підвищення технологічності конструкцій, оптимізацію виробничих процесів і забезпечення стабільної якості деталей, що виготовляються в умовах серійного та масового виробництва. Підвищення продуктивності обладнання, зниження собівартості продукції, скорочення трудомісткості та забезпечення високого рівня надійності вузлів і механізмів є ключовими стратегічними орієнтирами для більшості промислових підприємств. У зв'язку з цим значну увагу приділяють дослідженню та вдосконаленню технологічних процесів виготовлення деталей, які працюють в умовах значних механічних навантажень, підвищених вимог до точності та зносостійкості. Саме до таких деталей належить ступиця опорного катка маніпулятора МБ 240.800.026, що є відповідальним елементом транспортного вузла та суттєво впливає на загальну ефективність та безпечність роботи обладнання. Актуальність удосконалення технології виготовлення ступиці зумовлюється комплексом виробничих та експлуатаційних факторів. Підвищення вимог до надійності та довговічності машин і механізмів обумовлює потребу в оптимізації вибору матеріалів, удосконаленні режимів обробки, застосуванні нових технічних рішень у сфері механічної, термічної та хіміко-термічної обробки. Значну роль відіграє також точність геометричних параметрів, які визначають якість взаємодії ступиці з підшипниками, штифтами та іншими елементами опорного катка. Недотримання встановлених норм у процесі виготовлення може призвести до порушення плавності обертання, підвищення навантаження на підшипникові вузли, передчасного зношування елементів механізму та зниження експлуатаційної безпеки.

Розвиток сучасних виробничих технологій створює широкі можливості для підвищення ефективності технологічних процесів обробки ступиць, зокрема завдяки впровадженню високоточних верстатів з числовим програмним керуванням, сучасних інструментальних матеріалів, систем управління якістю та автоматизації процесів контролю. Оптимізація технології

виготовлення дозволяє забезпечити стабільну якість продукції, зменшити кількість браку, знизити навантаження на виробничий персонал та збільшити ресурс роботи деталі. У зв'язку з цим дослідження, спрямовані на аналіз існуючої технології виготовлення ступиці та визначення шляхів її вдосконалення, є актуальними і мають важливе практичне значення для підприємств машинобудівної галузі.

Об'єктом дослідження є деталь типу «ступиця», що використовується в механізмах маніпуляторів та інших машин, які працюють у режимах циклічного навантаження.

Предметом дослідження є конструктивно-технологічні параметри процесу виготовлення деталі «ступиц».

Важливо також враховувати, що ступиця працює в умовах змінних навантажень, впливу мастильних матеріалів, абразивних частинок, а також періодичних ударних впливів, що виникають у процесі експлуатації транспортної тележки маніпулятора. Тому технологічні рішення, що застосовуються під час її виготовлення, повинні забезпечувати не лише точність геометрії, але й високу стійкість до зношування та корозійних процесів. Вибір оптимальних параметрів різання, режимів термічної обробки та методів контролю є визначальними для забезпечення необхідного рівня міцності та довговічності деталі. Особливу увагу слід приділяти етапам фінішної обробки, оскільки саме вони формують якість поверхні, що безпосередньо впливає на експлуатаційні характеристики ступиці.

Таким чином, у межах дипломної роботи розглядається питання комплексного аналізу конструкції, призначення та умов роботи ступиці, оцінки технологічності її виготовлення, виявлення вузьких місць у існуючому виробничому процесі, а також обґрунтування та розроблення заходів щодо удосконалення технології. Практичне значення дослідження полягає в можливості впровадження запропонованих рішень у реальний виробничий процес, що сприятиме підвищенню якості та надійності деталі, скороченню витрат на її виготовлення та покращенню загальної ефективності роботи машинобудівного підприємства.

## 1 ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Аналіз функціонального призначення деталі та умов її експлуатації

Ступиця є одним із ключових елементів вузла опорного катка транспортної системи маніпулятора «Врок 120» і виконує роль базового та силового елемента, через який передаються навантаження від катка на несучі частини механізму (рис.1.1). Основне її функціональне призначення полягає у забезпеченні точного встановлення, фіксації та надійної роботи опорного катка, що є необхідною умовою для стабільного переміщення вантажів та виконання технологічних операцій. Ступиця встановлюється на підшипникові опори, які монтуються на осі та забезпечують плавне обертання катка з мінімальними втратами на тертя. Спеціально виконані посадкові отвори у ступиці дозволяють встановлювати штифти, що базують опорний каток і забезпечують його правильне орієнтування відносно осі обертання. Додаткове підтискання катка до торця ступиці усуває можливість осьових зміщень, люфтів і перекосів, що позитивно впливає на довговічність вузла та точність роботи маніпулятора.



Рис 1.1 Модель ступиці типової конструкції

Конструкція ступиці передбачає наявність відповідальних поверхонь, точність яких суттєво впливає на загальні експлуатаційні характеристики. Посадкові ділянки для підшипників повинні мати високий ступінь точності, оскільки будь-яке відхилення може спричинити появу додаткових локальних напружень, перегрів, порушення плавності обертання або передчасне руйнування підшипників. Отвори для штифтів також мають бути виконані з дотриманням жорстких геометричних та розмірних параметрів, оскільки навіть незначне збільшення зазору може сприяти розбиттю отворів та втраті точності базування катка. Таким чином, ступиця повинна характеризуватися достатньою жорсткістю та міцністю, а також володіти необхідними триботехнічними властивостями, що забезпечують стійкість до зносу в умовах інтенсивних навантажень.

Експлуатаційні умови ступиці значною мірою залежать від режиму роботи транспортної платформи маніпулятора. У більшості випадків обладнання функціонує у виробничих приміщеннях, де підтримується контрольований мікроклімат, тому вплив температури та вологості не є визначальним. Проте ступиця постійно контактує з технічними рідинами, зокрема охолоджувально-мастильними сумішами, індустріальними маслами та гідравлічними рідинами, які можуть потрапляти на її поверхні під час роботи. Крім того, у зоні експлуатації часто присутня металева стружка, абразивні частинки та пил, які можуть діяти як мікроабразив, прискорюючи зношування поверхневих шарів деталі. У таких умовах можливе виникнення корозійних процесів, утворення раковин і локальних дефектів, що негативно впливає на точність і довговічність деталі.

Ступиця піддається впливу комплексу навантажень, які мають як статичний, так і динамічний характер. Під час руху транспортної платформи на деталь діють радіальні та осьові сили, що зумовлені масою вантажу, а також штовхаючими та ударними впливами, що виникають при зупинках, розгоні або маневрах. У деяких режимах експлуатації можливі тривалі

статичні навантаження, пов'язані з простоюванням обладнання під вантажем, що спричиняє утворення зосереджених напружень у певних зонах та накопичення втомних пошкоджень. Ударні навантаження, які виникають при проходженні нерівностей робочої поверхні або при раптовій змінні напрямку руху, можуть суттєво збільшувати ризик мікротріщин та втомного руйнування матеріалу, особливо у зонах різьбових елементів і концентраторів напружень.

Важливе значення у роботі ступиці відіграє її взаємодія з підшипниковими опорами. Посадкові поверхні для підшипників функціонують у режимі перемінних навантажень, що супроводжується високими контактними напруженнями. Нестача мастильних матеріалів, забруднення або порушення умов монтажу можуть спричинити місцеві перевантаження, підвищення температури і передчасне втомне викришування металу. Внаслідок цього можливе зростання люфтів, порушення плавності обертання катка та загальне зниження ефективності роботи вузла. Аналогічної уваги потребують і посадкові отвори під штифти, які беруть участь у передачі частини зовнішніх навантажень і повинні забезпечувати стабільне базування елементів катка. Розбиття отворів, збільшення зазорів або порушення жорсткості з'єднання призводять до швидкого погіршення роботи всієї системи.

На підставі наведеного аналізу можна стверджувати, що ступиця виконує своє функціональне призначення повною мірою за умови дотримання технології її виготовлення, правильного монтажу та регулярного технічного обслуговування. Умови експлуатації ступиці є типовими для деталей транспортних механізмів, які працюють під дією змінних та ударних навантажень і піддаються впливу технічних рідин та абразивних частинок. Для забезпечення підвищеної надійності та довговічності рекомендується застосування матеріалів з високою міцністю і зносостійкістю, використання термічної або хіміко-термічної обробки робочих поверхонь, забезпечення

чистоти експлуатаційної зони та належного мастила підшипникових вузлів. Важливо також контролювати точність виготовлення геометрично відповідальних поверхонь та забезпечувати якісне складання вузла, оскільки навіть незначні відхилення можуть призвести до суттєвих експлуатаційних проблем.

Таким чином, ступиця за своїми конструктивними характеристиками та експлуатаційними властивостями відповідає вимогам, що висувуються до деталей даного класу, і забезпечує необхідну надійність роботи транспортної платформи маніпулятора в умовах промислової експлуатації.

## 1.2 Технічна характеристика маніпулятора Brok 120

Маніпулятор «Brok 120» характеризується широкою сферою застосування завдяки наявній платформі для встановлення змінних робочих інструментів (рис. 1.2).

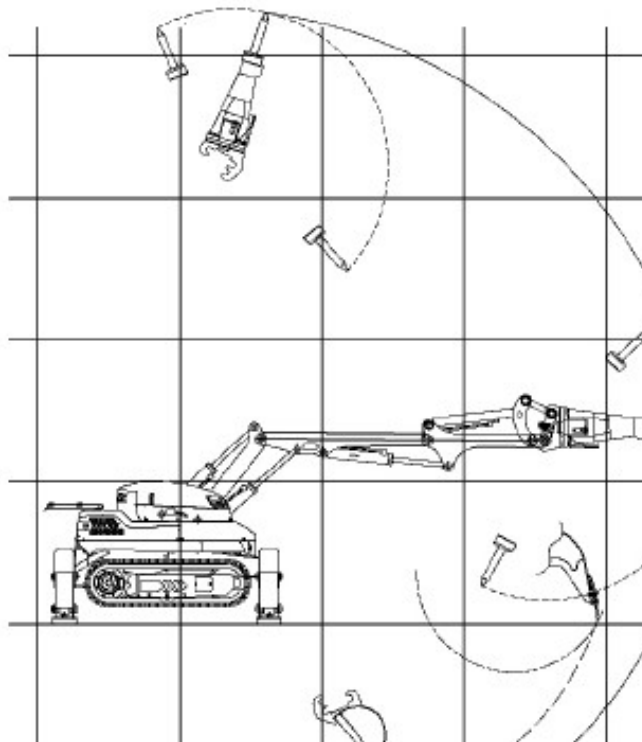


Рис. 2.1 Схема рухів виконавчих органів маніпулятора

До їх складу входять відбійні молотки різних конструкцій, дробильні установки для руйнування бетонних конструкцій, ножиці для різання металу, ковші та захвати різних типів, бурові та свердлильні установки, рубанок і циркулярна пила. Наявність такого різноманітного інструментального оснащення вказує на експлуатацію машини в умовах підвищених навантажень, що обумовило використання гусеничного приводу та поворотної системи стріли. Зокрема, даний маніпулятор є ефективним для застосування на виробництві, де необхідне перевантаження заготовок в обмежених просторових умовах. Компактні габарити корпусу та наявність поворотної башти забезпечують перевагу під час виконання таких операцій, а стабільність положення машини досягається завдяки чотирьом опорним лапам з гідравлічним приводом. Основні технічні характеристики маніпулятора зведені в таблиця 1.1.

Таблиця 1.1 Основні технічні характеристики маніпулятора

<b>Параметр</b>	<b>Значення</b>
Швидкість повороту	10 с / 360°
Швидкість руху	до 2,5 км/год
Максимальний кут підйому	30°
Тип електромотору	АВВ
Потужність	19,5 кВт
Рекомендований струм запобіжника	32 А
Контролююча система	SmartRemote, портативна
Тип сигналу	цифровий
Передача даних	радіо / кабель
Дальність роботи радіо	до 300 м
Вага	990 кг
Рекомендована вага інструменту	до 160 кг
Об'єм гідравлічної системи	40 л
Максимальний тиск	18 МПа
Максимальна витрата насоса	54 л/хв
Висота в складеному вигляді	1147 мм
Довжина в складеному вигляді	1847 мм
Хід гідроциліндрів	350 мм
Діаметр поршня	63 мм
Діаметр штоку	32 мм
Мінімальна міжосьова відстань	550 мм
Максимальна міжосьова відстань	900 мм

Керування маніпулятором здійснюється як за допомогою кабельного з'єднання, так і по радіоканалу з дальністю дії до 600 м, що дозволяє оператору перебувати поза зоною виконання робіт, що підвищує рівень безпеки. Водночас керування залишається повністю ручним, оскільки відсутній зворотний зв'язок, що унеможливорює організацію повторюваних операцій або реалізацію повністю автоматизованого керування за заданою програмою.

### 1.3. Аналіз відмов об'єкту досліджень та методи підвищення ресурсу

Об'єктом дослідження є ступиця котка маніпулятора як відповідальний елемент ходової частини транспортного засобу, що забезпечує передавання крутного моменту, сприйняття радіальних та осьових навантажень, а також надійну фіксацію колеса відносно підвіски або осі.

Функціональне призначення ступиці:

- забезпечує обертання колеса відносно нерухомих елементів підвіски;
- передає крутний момент від приводу до колеса (для ведучих осей);
- сприймає та розподіляє експлуатаційні навантаження (вага транспортного засобу, динамічні та ударні навантаження);
- забезпечує точне центрування колеса.

Надійність ступиці безпосередньо впливає на безпеку руху та працездатність маніпулятора в цілому.

Поломка ступиці є небезпечним видом відмови, що може мати раптовий характер і призводити до:

- втрати керованості;
- заклинювання або відриву колеса;
- аварійних ситуацій.

Найпоширенішими видами пошкоджень ступиці є:

- втомні тріщини в зоні фланця або посадки підшипника;
- злам ступиці внаслідок перевищення допустимих напружень;
- знос або руйнування посадочних поверхонь;
- деформація внаслідок ударних навантажень.

До основних причин виникнення поломки ступиці (рис. 1.3) належать:

- перевантаження транспортного засобу;
- ударні навантаження (наїзд на перешкоди, ями);
- порушення технології виготовлення (дефекти лиття,

термообробки);

- недостатня міцність матеріалу або його втомне руйнування;
- знос підшипників, що призводить до перекосів і нерівномірного розподілу навантажень;
- помилки монтажу (неправильний момент затягування, перекіс).

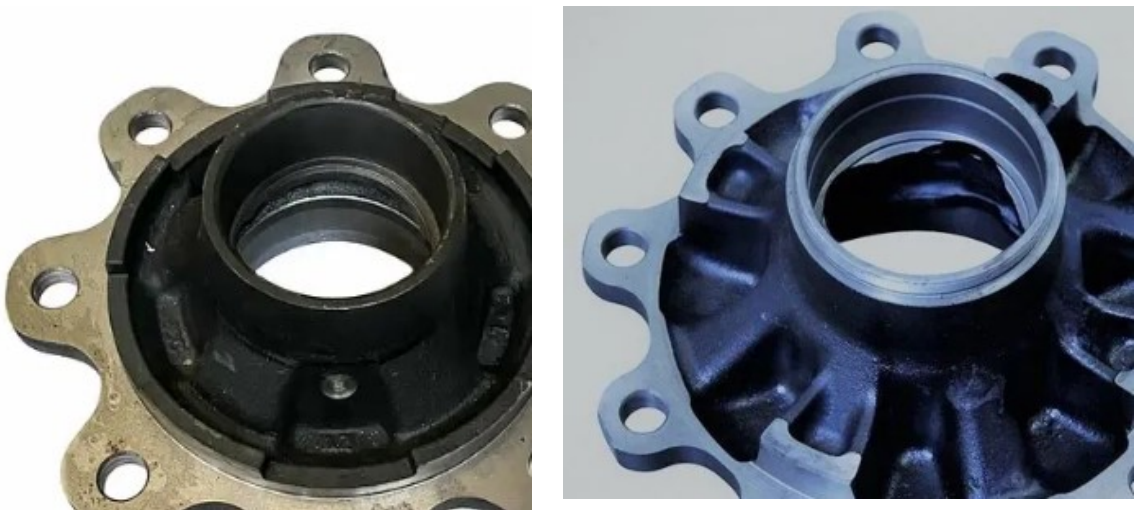


Рис. 1.3. Конструктивні варіанти виконань деталі ступеця

Аналіз прикладів поломки ступиці маніпулятора при дефектуванні показав, що у процесі тривалої експлуатації маніпулятора під дією циклічних змінних навантажень у зоні фланця ступиці виникають втомні тріщини. Їх розвиток призводить до часткового або повного зламу ступиці. Такий вид

поломки характерний для маніпуляторів, що працюють з вантажами, близькими до граничних, або з частими пуско-гальмівними режимами.

Також було встановлено, що внаслідок зносу або недостатньої жорсткості матеріалу ступиці відбувається овальність посадкового отвору під підшипник. Це спричиняє перекіс обертових елементів, нерівномірний розподіл навантаження та подальше руйнування ступиці. Подібна поломка часто виникає при несвоєчасному обслуговуванні підшипникового вузла.

При перевищенні допустимої вантажопідйомності або неправильному положенні стріли виникають значні згинальні та крутильні моменти. У результаті цього в ступиці маніпулятора формуються критичні напруження, що призводять до миттєвого зламу деталі, переважно в зоні переходів перерізів.

Теоретичні дослідження можливих поломок вказують на наявність внутрішніх пор, шлакових включень або зварних дефектів, які є осередками концентрації напружень. Під час експлуатації маніпулятора ці дефекти сприяють зародженню тріщин, які з часом призводять до руйнування ступиці навіть за номінальних навантажень.

Значний вплив на ресурс виробу чинить корозійно-механічне руйнування ступиці. Експлуатація маніпулятора у вологому або агресивному середовищі без належного антикорозійного захисту призводить до корозійного зносу поверхні ступиці. Корозійні ураження зменшують ефективний переріз деталі та прискорюють процес втомного руйнування.

Неодноразово фіксувались поломки у вигляді злизування різьби в кріпильних отворах. Неправильний момент затягування болтів або багаторазове розбирання призводять до зриву різьби або руйнування різьбових отворів у чавуній ступиці. Це знижує жорсткість кріплення та може спричинити повну відмову вузла.

Поломка ступиці є результатом комплексного впливу конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. Дослідження причин і механізмів руйнування ступиці є важливим для:

- підвищення надійності конструкції;
- оптимізації матеріалу та технології виготовлення;
- розробки заходів щодо запобігання передчасним відмовам.

Отримані результати аналізу можуть бути використані для вдосконалення конструкції ступиці, підвищення її ресурсу та забезпечення безпеки експлуатації транспортних засобів.

Встановлено, що поломки ступиці маніпулятора здебільшого мають втомний або перевантажувальний характер і є наслідком поєднання конструктивних недоліків, технологічних дефектів та порушень умов експлуатації. Аналіз наведених прикладів дозволяє обґрунтувати необхідність підвищення міцності ступиці, оптимізації матеріалу та вдосконалення режимів технічного обслуговування.

## 2 МЕТОДИКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЕТАЛІ «СТУПИЦЯ» З УРАХУВАННЯМ ЦИКЛІЧНО НАВАНТАЖЕНОГО СТАНУ

### 2.1. Загальні положення та мета дослідження

Ступиця є відповідальною деталлю механізмів та машин, що працюють в умовах дії змінних, циклічних і комбінованих навантажень. Її надійність істотно впливає на ресурс, безпеку та працездатність усього вузла. У зв'язку з цим дослідження конструктивно-технологічних параметрів ступиці з урахуванням циклічно навантаженого стану є актуальним науково-технічним завданням.

Метою даного дослідження є розроблення та обґрунтування методики аналізу впливу конструктивних і технологічних параметрів ступиці на її напружено-деформований стан та втомну міцність.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

- визначення характеру та спектра експлуатаційних навантажень;
- аналіз конструктивних елементів ступиці як концентраторів напружень;
- дослідження впливу технологічних факторів виготовлення на втомну довговічність.

Предметом дослідження є конструктивно-технологічні параметри ступиці, зокрема:

- геометричні параметри (товщина фланця, радіуси галтелей, посадкові діаметри);
- матеріал та його механічні властивості;
- стан поверхневого шару;
- технологічні дефекти та напруження.

Встановлено, що навантаження мають нерівномірний характер і змінюються в часі, що зумовлює розвиток втомних процесів.

## 2.2 Математичний апарат оцінювання втомної міцності ступиці в умовах циклічного навантаження

Оцінювання втомної довговічності деталі «ступиця», що працює в умовах складного циклічно навантаженого стану, ґрунтується на поєднанні експериментальних залежностей “напруження – кількість циклів” (S–N) та критеріїв урахування середніх напружень і багатовісного напруженого стану.

Для попередньої оцінки ресурсу ступиці використовується крива втоми (S–N діаграма), класична залежність типу Wöhler (S–N):

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (2.1)$$

де:

$\sigma_a$  амплітудне значення напруження;  $\sigma'_f$  коефіцієнт втомної міцності матеріалу;  $N_f$  кількість циклів до руйнування;  $b$  показник нахилу кривої втоми.

Для інженерних оцінок у високочисельній області циклів застосовується спрощена форма:

$$\sigma_a^m N_f = C \quad (2.2)$$

де  $m$  і  $C$  експериментально визначені константи матеріалу.

З урахуванням концентрації напружень фактичне амплітудне напруження визначається як:

$$\sigma_{a,eq} = K_t \sigma_a \quad (2.3)$$

де  $K_t$  коефіцієнт концентрації напружень.

Для врахування впливу середнього напруження на втомну міцність ступиці застосовується лінійний критерій Goodman:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_t} \leq 1 \quad (2.4)$$

де:

$\sigma_a$  амплітудне напруження;  $\sigma_m$  середнє напруження циклу;  $\sigma_{-1}$  границя витривалості при симетричному циклі;  $\sigma_b$  тимчасовий опір матеріалу.

Критерій Goodman є доцільним для попередньої оцінки ресурсу ступиці, особливо в умовах квазістатичних навантажень.

Для більш точної оцінки втомної довговічності, особливо з урахуванням залишкових напружень поверхневого шару, використовується критерій Morrow:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} \leq 1 \quad (2.5)$$

де  $\sigma'_f$  істинна границя міцності матеріалу.

Застосування критерію Morrow є обґрунтованим для ступиць, виготовлених із застосуванням механічної обробки, термообробки або поверхневого зміцнення, оскільки він коректно враховує вплив залишкових напружень.

Оскільки ступиця працює в умовах складного просторового напруженого стану (одночасна дія згину, кручення та контактних напружень), у роботі застосовано критерій Dang Van, який базується на мікрорівневому аналізі зсувних напружень.

Умова втомної міцності має вигляд:

$$\tau(t) + a \sigma_H(t) \leq b \quad (2.6)$$

де:

$\tau(t)$  максимальне миттєве зсувне напруження;  $\sigma_H(t)$  гідростатичне напруження;  $a, b$  матеріальні параметри, визначені з експерименту.

Критерій Dang Van дозволяє:

- врахувати багатовісний характер навантаження;
- коректно оцінити зародження втомних тріщин;
- застосувати єдиний критерій для змінних режимів навантаження.

Застосування комплексу критеріїв S–N, Goodman, Morrow та Dang Van забезпечує адекватне моделювання процесів втомного руйнування ступиці в умовах циклічного та багатовісного навантаження. Такий підхід відповідає сучасному рівню наукових досліджень і є методично обґрунтованим для робіт відповідного рівня.

### 2.3 Методика дослідження циклічно навантаженого стану ступиці

Аналіз та дослідження напружено-деформованого стану ступиці проводиться з урахуванням реальних умов експлуатації та циклічного характеру навантаження. Особлива увага приділяється зонам концентрації напружень:

- переходам між перерізами;
- галтелям;
- отворам під кріплення;
- посадковим поверхням підшипників.

Для оцінки напружень використовуються аналітичні методи та чисельне моделювання, що дозволяє визначити максимальні еквівалентні напруження та їх розподіл за об'ємом деталі.

Формування розрахункової моделі циклічно навантаженої ступиці здійснюється з урахуванням реальних граничних умов, характеру навантажень та контактної взаємодії з суміжними елементами. Циклічне навантаження моделюється у вигляді змінних у часі сил і моментів, що діють на ступицю.

Оцінка втомної довговічності виконується з урахуванням:

- асиметрії циклу навантаження;
- середнього та амплітудного значень напружень;
- коефіцієнтів концентрації напружень;
- стану поверхневого шару.

Застосування критеріїв втомної міцності дозволяє прогнозувати ресурс ступиці та визначати граничні умови її працездатності.

#### 2.4 Аналіз впливу конструктивних та технологічних параметрів на ресурс деталі

Конструктивні параметри ступиці істотно впливають на рівень напружень і характер їх розподілу. Зменшення радіусів галтелей, різкі зміни перерізів та наявність технологічних отворів призводять до зростання концентрації напружень і зниження втомної міцності.

Оптимізація геометричних параметрів дозволяє:

- зменшити максимальні напруження;
- підвищити рівномірність їх розподілу;
- збільшити ресурс деталі без зміни матеріалу.

Вплив технологічних факторів й технологія виготовлення ступиці визначає структурний стан матеріалу та наявність залишкових напружень. Спосіб отримання заготовки, механічна обробка та термічна обробка формують мікроструктуру, яка безпосередньо впливає на втомну довговічність.

Негативний вплив мають:

- пори та неметалеві включення;
- поверхневі дефекти після обробки;
- розтягувальні залишкові напруження.

Застосування раціональних технологічних режимів та зміцнювального оброблення поверхні сприяє підвищенню опору втомному руйнуванню.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що працездатність ступиці в умовах циклічного навантаження визначається сукупним впливом конструктивних і технологічних параметрів. Найбільш небезпечними є зони концентрації напружень, у яких відбувається зародження та розвиток втомних тріщин.

## 2.5 Моделювання напружено-деформованого стану деталі в середовищі SolidWorks Simulation

Для дослідження напружено-деформованого стану деталі «ступиця» застосовано метод скінченних елементів, реалізований у програмному середовищі SolidWorks Simulation. Використання даного програмного комплексу дозволяє адекватно відтворити реальні умови навантаження та закріплення деталі, а також отримати кількісну оцінку напружень і деформацій у критичних зонах.

Геометричну модель ступиці створено в середовищі SolidWorks, яка включає всі конструктивно значущі елементи, зокрема фланець, посадкові поверхні під підшипники, отвори під кріплення та перехідні зони. З метою підвищення точності розрахунків спрощення геометрії не застосовувалися, оскільки вони могли б призвести до заниження рівня локальних напружень у зонах концентрації.

Матеріал деталі сталь 40Х задавався відповідно до реальних умов виготовлення. У розрахунковій моделі використано лінійно-пружну ізотропну модель матеріалу з такими основними характеристиками: модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, границя текучості та тимчасовий опір. Значення механічних характеристик приймалися за довідковими даними та уточнювалися за результатами експериментальних досліджень.

Граничні умови моделі відповідали реальним умовам роботи ступиці у складі вузла. Закріплення реалізовано шляхом задання умов жорсткого фіксування у зонах контакту з суміжними деталями. Навантаження прикладалися у вигляді сил і моментів, що імітують експлуатаційні радіальні, осьові та крутильні навантаження.

Для урахування циклічного характеру роботи деталі використовувався квазістатичний підхід, при якому аналізувалися максимальні значення навантажень, що відповідають амплітудним значенням напружень у циклі.

Розбиття моделі на скінченні елементи виконано із застосуванням твердотільних елементів тетраедричного типу (рис. 2.1).

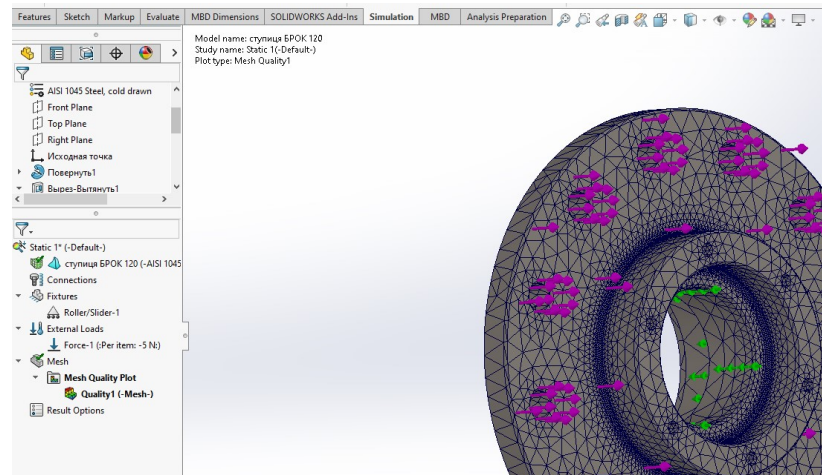


Рис. 2.1 Розбиття моделі на скінченні елементи із застосуванням функції локального згущення

У зонах очікуваної концентрації напружень (галтелі, отвори, перехідні перерізи) виконано локальне згущення сітки. Якість сітки контролювалася за показниками співвідношення сторін елементів та плавності переходу між зонами різної дискретизації.

За результатами моделювання отримано поля еквівалентних напружень, переміщень та деформацій (рис. 2.2).

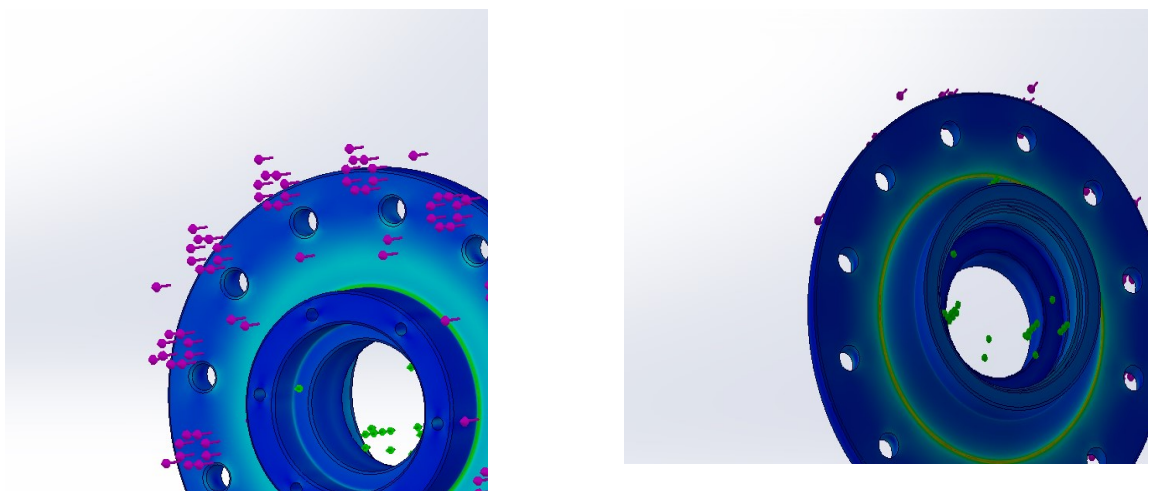


Рис. 2.2 Контурні графіки розподілу еквівалентних напружень за об'ємом

Моделювання розподілу напружень та переміщень при циклічному навантаженні, рис. 2.3.

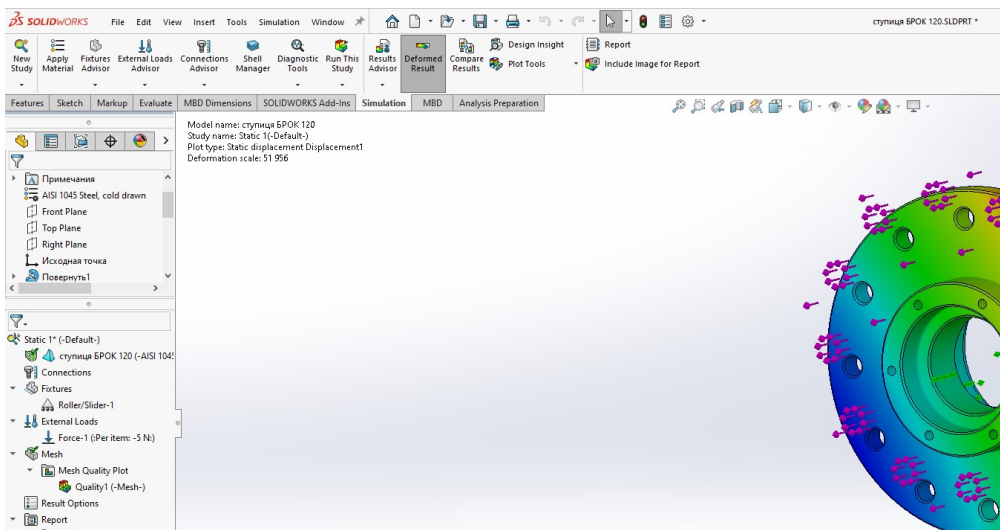


Рис. 2.3 Моделювання розподілу напружень та переміщень при циклічному навантаженні

Оцінка міцності виконувалася за критерієм еквівалентних напружень. Максимальні значення напружень зафіксовано в зонах концентрації, що корелює з теоретичними уявленнями про механізм втомного руйнування ступиці.

Отримані значення напружень використовувалися як вихідні дані для подальшого аналізу втомної довговічності за критеріями Goodman, Morrow та Dang Van.

Достовірність результатів чисельного моделювання підтверджувалася шляхом порівняння з аналітичними розрахунками та літературними даними. Крім того, виконувалася перевірка збіжності розрахунку шляхом послідовного згущення сітки, що дозволило зменшити чисельну похибку.

Застосування програмного комплексу SolidWorks Simulation дозволило отримати детальну картину напружено-деформованого стану ступиці та визначити критичні зони з підвищеним рівнем напружень. Отримані результати стали надійною основою для подальшого аналізу втомної

міцності та оптимізації конструктивно-технологічних параметрів деталі, рис. 2.4.

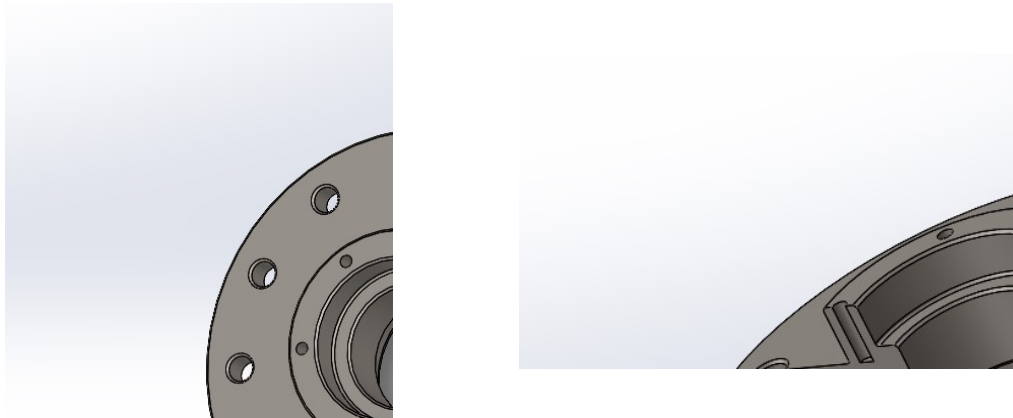


Рис. 2.4 3D модель деталі оптимізованої конструкції

Проведені дослідження напружено деформованого стану деталі ступиця удосконаленої конструкції підтверджують її працездатність в умовах пікових навантажень.

## 3 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Аналіз технологічності деталі

Аналіз технологічних показників деталі є одним з ключових етапів під час формування раціонального технологічного процесу її виготовлення. Основним призначенням цього аналізу є виявлення конструктивних, матеріалознавчих та виробничо-технологічних особливостей ступиці, які впливають на вибір способу отримання заготовки, визначення режимів механічної обробки, типу обладнання, інструментального оснащення та організації технологічних операцій. Оцінювання технологічності виконується

відповідно до загальноприйнятих рекомендацій і дає можливість забезпечити оптимальний баланс між якісними характеристиками деталі та економічною ефективністю її виробництва.

Матеріалом для виготовлення ступиці типової конструкції є сірий ливарний чавун марки СЧ-18, який у сучасній нормативній базі відповідає стандартам ДСТУ EN 1561:2016 та ISO 185:2005, де він класифікується як чавун типу EN-GJL-180. Матеріал характеризується комплексом механічних та фізичних властивостей, що забезпечують необхідний рівень надійності та довговічності в певних умовах експлуатації. До основних параметрів належать межа міцності на розтяг близько 98 МПа, межа текучості при розтягу близько 65 МПа, межа міцності при стиску до 700 МПа та відповідна межа текучості близько 80 МПа. Міцність при крученні становить приблизно 300 МПа, а межа текучості при крученні – близько 70 МПа. Додатково матеріал демонструє міцність при вигині на рівні 300 МПа та межу текучості при вигині 65 МПа. Показники відносного видовження та стискання знаходяться на рівні 1 %, що відповідає характерним властивостям ламелярного графітізованого чавуну.

Попри невеликі пластичні властивості, сірий чавун відзначається чудовими ливарними якостями, високою віброакустичною стійкістю та достатньою оброблюваністю різанням, що робить його оптимальним матеріалом для корпусних, опорних та базових деталей. Властивості чавуну дозволяють ефективно застосовувати литтєві методи одержання заготовки - матеріал добре заповнює форму, має низьку усадку та забезпечує можливість отримання складних зовнішніх і внутрішніх контурів без значних технологічних ризиків. Порівняно з методами пластичного деформування, литво характеризується нижчою собівартістю, кращою адаптованістю до серійного та масового виробництва і не потребує значних капітальних витрат на оснащення.

Конструктивна конфігурація ступиці також відіграє важливу роль у загальній оцінці її технологічності. Геометрія деталі сформована поєднанням циліндричних, торцевих, фасонних та спряжених поверхонь, які виконані відповідно до стандартних машинобудівних принципів. Наявність фасок, канавок, базових та кріпильних отворів зумовлена функціональним призначенням деталі і не створює додаткових труднощів при механічній обробці. Незважаючи на наявність внутрішніх порожнин, кільцевих виступів і посадочних зон, форма ступиці лишається конструктивно раціональною, що дозволяє без ускладнень отримувати заготовку методом литва відповідно до вимог ДСТУ EN 1559-1 і забезпечувати подальшу обробку стандартним обладнанням.

З точки зору механічної обробки, конструкція ступиці дає змогу створити стійку та однозначно визначену систему технологічних баз. Циліндричні, торцеві поверхні та центральні отвори можуть використовуватися як основні та допоміжні бази під час токарної, свердлильної, фрезерної чи розточувальної обробки. Це гарантує високу точність, повторюваність і можливість застосування як універсального обладнання, так і верстатів з ЧПК. Важливим аспектом є необхідність забезпечення точної співвісності посадкового отвору під підшипниковий вузол і отворів під штифти для встановлення опорного катка. Такі вимоги успішно вирішуються за допомогою кондукторів, точної базової системи та прецизійних методів розточування.

Окремим аспектом є аналіз даних експлуатаційних досліджень, які вказують на недостатню міцність деталі та матеріалу, що вимагає додаткових конструкторсько-технологічних удосконалень. Конструкція ступиці дозволяє формувати достатньо рівномірні товщини стінок, що мінімізує ризики виникнення внутрішніх напружень. Заміна заготовки деталі на поковку забезпечить рівномірність структури, що полегшує подальшу механічну

обробку, сприяє зменшенню припусків, скороченню тривалості операцій та зниженню витрат металу.

Загалом конструкція ступиці з технологічного погляду дозволяє використовувати стандартний ріжучий інструмент: токарні різці, свердла, розгортки, фрези, розточувальні головки та інше оснащення відповідно до вимог ISO 3002 та ISO 5611. Значна частина операцій може виконуватися на токарних і фрезерних верстатах загального призначення, а також автоматизованих системах з ЧПК, що дає можливість забезпечити високу повторюваність розмірів, стабільну якість та економічність виробництва.

На підставі проведеного аналізу можна зробити висновок, що ступиця є технологічною деталлю, яка повною мірою відповідає вимогам щодо точності, міцності, оброблюваності та економічної доцільності.

Розміри окремих елементів деталі відповідають нормальному ряду чисел, що є важливою ознакою її технологічності та свідчить про можливість використання стандартного інструменту та устаткування під час механічної обробки. Одним із ключових критеріїв оцінювання конструктивної технологічності є наявність відповідальних поверхонь, точність і якість яких безпосередньо впливають на працездатність виробу. Для їхнього визначення необхідно класифікувати всі поверхні деталі відповідно до їх функціонального призначення. З цією метою виконується ескіз деталі удосконаленої конструкції, після чого кожній поверхні привласнюється індивідуальний номер для подальшого аналізу (рис. 3.1).

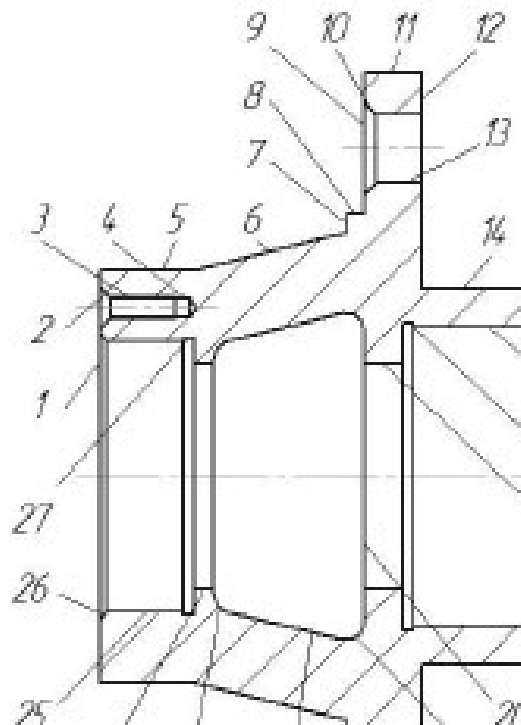


Рис. 3.1– Ескіз деталі ступиця типової конструкції

Класифікація поверхонь за призначенням здійснюється на основі методичних рекомендацій [1]. Згідно з ними, поверхні 17, 18 та 25 належать до основних конструкторських баз, які забезпечують орієнтацію деталі в механізмі та визначають її просторове положення. Поверхні 1, 3 та 27 класифікуються як допоміжні конструкторські бази, що використовуються для встановлення деталі під час технологічних операцій. Виконавчі поверхні 9 і 13 беруть безпосередню участь у передачі навантажень або забезпечують контакт з іншими елементами вузла. Усі інші поверхні відносяться до категорії вільних, оскільки вони не виконують критичних функцій і не потребують підвищеної точності або спеціальних вимог щодо обробки.

Аналіз наведеної класифікації свідчить, що кількість і розташування відповідальних поверхонь повністю відповідають функціональному призначенню деталі. Конструкція ступиці є раціональною, оскільки важливі поверхні зосереджені у зонах, що зазнають навантаження або визначають

взаємодію з іншими компонентами механізму, а другорядні елементи не ускладнюють технологічний процес.

Таким чином, конфігурація деталі відповідає основним вимогам технологічності, забезпечує зручність формування заготовки та подальшої механічної обробки, а також дозволяє організувати ефективно та стабільне виробництво. Аналіз механічної обробки підтверджує, що ступиця може бути виготовлена з використанням стандартного обладнання без необхідності застосування спеціальних або високоточних методів, окрім тих, що передбачені для відповідальних поверхонь.

З проведеного аналізу технологічності деталі можна зробити наступні висновки. Конфігурація ступиці є типовою для механічної обробки, тому для її виготовлення доцільно застосовувати стандартні методи обробки, які широко використовуються у сучасному машинобудуванні. Однак точність розмірів і характеристики поверхонь не дозволяють обмежитися лише отриманням заготовки, тому повна механічна обробка необхідна для всіх функціональних і допоміжних поверхонь деталі.

Базування на технологічних операціях може виконуватися за типовими схемами з використанням як зовнішніх, так і внутрішніх поверхонь деталі. При цьому дотримання принципів єдності та постійності баз не викликає труднощів, що забезпечує стабільність точності і повторюваність розмірів при серійному та масовому виробництві. Такий підхід дозволяє організувати ефективний технологічний процес без необхідності розробки складних або нестандартних схем базування.

Таким чином, механічна обробка деталі повністю відповідає основним вимогам технологічності. Виконаний аналіз підтвердив, що ступиця задовольняє критеріям технологічності та може бути визнана придатною для серійного виготовлення за умови заміни матеріалу (сірий чавун СЧ-18 на сталь 40Х) та конструкції.

Водночас у процесі аналізу були виявлені деякі конструктивні особливості та нюанси обробки, які необхідно враховувати при проектуванні технології виготовлення, зокрема правильний вибір баз, послідовність операцій та контроль критичних поверхонь для забезпечення високої точності та надійності готової деталі.

### 3.2 Визначення типу виробництва та аналіз типового технологічного процесу

Тип виробництва являє собою сукупність організаційних, технічних та економічних характеристик процесу виготовлення продукції, що визначаються обсягом випуску виробів, номенклатурою, ступенем спеціалізації обладнання та робочих місць, а також рівнем механізації й автоматизації виробничих операцій. Встановлення типу виробництва є одним із ключових етапів проектування технологічного процесу, оскільки воно безпосередньо впливає на вибір технологічного обладнання, виду та рівня спеціалізації оснащення, побудову технологічного маршруту, методи технічного контролю, а також організацію праці на виробництві.

Залежно від обсягу випуску та повторюваності виготовлення виробів розрізняють такі основні типи виробництва:

- одиничне виробництво – виготовлення одиничних виробів або дрібних партій з нерегулярним повторенням, що характеризується універсальним обладнанням і високою трудомісткістю;
- серійне виробництво – виготовлення обмеженої кількості однотипних виробів партіями з періодичним повторенням технологічних операцій;
- масове виробництво – безперервне виготовлення великої кількості однакових виробів із високим рівнем спеціалізації обладнання та робочих місць.

Для кількісної оцінки та обґрунтування типу виробництва застосовується коефіцієнт закріплення операцій за одним робочим місцем, який характеризує рівень спеціалізації виробничого процесу. Даний коефіцієнт визначається як відношення загальної кількості технологічних операцій до кількості робочих місць, на яких вони виконуються:

(3.1)

де  $t_b$  – такт випуску деталей;  $T_{cp}$  – середній штучно-калькуляційний час на виконання технологічного процесу.

Отримане значення коефіцієнта  $K_{з.о}$  дозволяє встановити тип виробництва та обґрунтувати доцільність застосування універсального, спеціалізованого або спеціального обладнання, а також визначити характер типового технологічного процесу для виготовлення досліджуваної деталі.

Такт визначається за формулою:

(3.2)

$F_T$  – річний фонд часу роботи обладнання;

$N_T$  – річна програма випуску деталей.

Річний фонд часу для 2-х змінного режиму роботи:  $F_T=4015$  год.

Тоді:  $t_b = F_T / N_T = 4015 \cdot 60 / 200 = 120$  хв.

Середній штучно-калькуляційний час на виконання операцій технологічного процесу розраховується як:

са (3.3)

де  $T_{ш.к.i}$  – штучно-калькуляційний час  $i$ -тої головної операції,  $n$  – кількість операцій.

(3.4)

де  $T_0$  – машинний час в межах  $i$ -ї операції,  $\phi_k$  – коефіцієнт в межах  $i$ -ї операції.

Процес технологічної підготовки виробництва розпочинається з визначення організаційної форми та типу виробництва. На початковому етапі

розроблення технології виготовлення деталей тип виробництва встановлюється з урахуванням запланованого обсягу випуску продукції та маси готової деталі, що відповідає загальноприйнятим методичним рекомендаціям [3].

Таблиця 3.1

Залежність типу виробництва від обсягу випуску та маси деталі

Маса деталі, кг	Тип виробництва				
	Одиничне	Дрібносерійне	Середньoserійне	Крупносерійне	Масове
<1,0	<10	10-2000	1500-100000	75000-200000	200000
1,0-2,5	<10	10-1000	1000-50000	50000-100000	100000
2,5-5,0	<10	10-500	500-35000	35000-75000	75000
5,0-10	<10	10-300	300-25000	25000-50000	50000
>10	<10	10-200	200-10000	10000-25000	25000

З урахуванням річної програми випуску  $N=200$  шт. та маси деталі  $m=30$  кг встановлено, що тип виробництва належить до середньoserійного. Таким чином, для виготовлення деталі «Ступиця» характерне серійне виробництво, що відповідає прийнятим класифікаційним ознакам за обсягом випуску та масою виробу.

Обґрунтованість вибору серійного типу виробництва підтверджується також стабільністю конструкції деталі, відносно сталою номенклатурою продукції, можливістю застосування універсального технологічного обладнання та організацією виробничого процесу за маршрутним методом.

Серійний тип виробництва забезпечує досягнення раціонального співвідношення між витратами на технологічну підготовку виробництва, рівнем продуктивності праці та якістю виготовлюваної продукції, що є особливо важливим для підприємств машинобудівної галузі.

Для умов серійного виробництва приймається перемінно-поточна форма організації робіт, яка характеризується запуском виробів у виробництво окремими партіями з послідовним проходженням технологічних операцій.

Кількість деталей у партії визначається за формулою:

$$N_n = \frac{N \cdot t}{\Phi} \quad (3.5)$$

де  $N$  – річна програма випуску виробів, при  $N = 200$  шт.;  $t$  – період на який необхідно мати запас деталей, (приймаємо  $t = 12$ );  $\Phi$  – число робочих днів, ( $\Phi = 254$ ),

тоді:

$N_n = 200 \cdot 12 / 254 = 9.44$ . приймаємо  $N_n = 10$  шт.

Процес механічного оброблення можна представити у вигляді спрощеної маршрутної карти технологічних операцій, табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Базовий технологічний маршрут механічного оброблення деталі

№	Назва операції	Устаткування	Примітка
1	Заготівельна	Поковка	Нормалізація
2	Чорнове точіння	Токарний верстат	Обробка зовн. Ø торців
3	Свердління + розточування	Токарний	Отвір Ø25 → Ø100
4	Термічна обробка	Піч/індукційна установка	Стабілізація до 27–35 HRC
5	Чистове точіння / розточування	Прецизійний токарний	Посадки H9, js14, фаски
6	Свердлування	Радіально-свердлувальний	Обробка отворів/нарізання різей
7	Шліфування (внутр./зовн.)	Круглошліфувальний	Для Ra 0.8, Ø100 H9
8	Контроль	Відділ ОТК	Вимірювання розмірів, Ra, твердості

### 3.3 Вибір та обґрунтування методу отримання заготовки

Вибір раціонального способу отримання заготовки визначається сукупністю конструктивних, технологічних та економічних чинників. До

основних з них належать матеріал деталі, її функціональне призначення та умови експлуатації, встановлені вимоги до точності розмірів і якості поверхонь, а також обсяги та тип виробництва. Важливу роль відіграють геометрична форма заготовки, її габаритні розміри та можливість реалізації вибраного способу виготовлення з мінімальними припусками на механічну обробку.

Для виготовлення заготовки обрано сталь 40Х, яка широко застосовується для відповідальних машинобудівних деталей, що працюють в умовах значних статичних і циклічних навантажень. Даний матеріал характеризується підвищеною міцністю, зносостійкістю та доброю прокаліюваністю, а також здатністю забезпечувати необхідний комплекс механічних властивостей після термічної обробки. Основні фізико-механічні характеристики сталі 40Х наведено в таблиці 3.1, що підтверджує доцільність її застосування для виготовлення досліджуваної деталі.

Таблиця 3.1

Хімічний склад та мех. властивості сталі 40Х за ДСТУ 7809:2015

вуглець	хром	марганець	нікель	сірка	$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\delta_5$
%	до %	до %	до %	до %	МПа	МПа	%
0,38...0,41	1	0,8	0,25	0,04	270	480	25

Оптимальний спосіб виготовлення заготовки визначається на основі комплексного аналізу конструктивних, технологічних та економічних факторів з обов'язковим урахуванням техніко-економічного обґрунтування собівартості готової деталі. Метод виготовлення вважається оптимальним у тому випадку, коли він забезпечує необхідний рівень технологічності, стабільну якість заготовки та мінімальні витрати на її отримання і подальшу механічну обробку.

Вибір способу отримання заготовки здійснюється шляхом техніко-економічного аналізу витрат, пов'язаних з виготовленням заготовки, з урахуванням витрат матеріалу, трудомісткості, енергоємності та рівня використання матеріалу. Для обґрунтування раціонального варіанту зазвичай виконують порівняльний аналіз кількох альтернативних способів, зокрема: поковка – штучна заготовка з прокату; відливка – штучна заготовка з прокату; відливка – поковка.

У даному випадку застосування штучної заготовки з прокату є недоцільним через значні перепади діаметрів і складну конфігурацію деталі, що призводить до підвищених припусків на механічну обробку та нераціонального використання матеріалу. З урахуванням цього заготовку доцільно отримувати способом кування, який забезпечує формування заготовки, максимально наближеної до остаточної форми деталі, а також сприяє підвищенню механічних властивостей матеріалу за рахунок ущільнення структури.

Оскільки тип виробництва є середньосерійним, це створює передумови для застосування штампованих заготовок, особливо у випадках значних перепадів діаметрів, що перевищують 10–20 мм. Такий підхід дозволяє зменшити обсяг механічної обробки, знизити собівартість виготовлення деталі та підвищити загальну ефективність виробничого процесу.

Матеріал деталі – сталь 40Х. З огляду на середньосерійний тип виробництва, найбільш доцільним способом отримання початкової сталеві заготовки є штампування з формуванням контуру, максимально наближеного до контуру готової деталі. При цьому передбачаються основні геометричні параметри заготовки: діаметри зовнішніх поверхонь  $\varnothing 180$  мм,  $\varnothing 360$  мм і  $\varnothing 150$  мм, а також центральний отвір великого діаметра  $\varnothing 100H7$ .

З метою зменшення припусків на механічну обробку, скорочення часу обробки та зниження втрат металу, що переходить у стружку, доцільніше використовувати штампування з буртом (рис. 3.2).

Застосування заготовки зі штампуванням з буртом забезпечує раціональніший розподіл припусків, підвищує коефіцієнт використання матеріалу та сприяє зниженню собівартості виготовлення деталі.

Розрахунок остаточних фактичних розмірів заготовки виконують після встановлення всіх технологічних розмірів деталі. На попередньому етапі габаритні розміри заготовки були визначені з урахуванням припущення, що точність гарячого штампування відповідає 16-му квалітету, а положення поля допуску приймається за основним відхиленням  $H$  або  $h$  залежно від того, чи належить відповідна поверхня до охоплювальних або охоплюваних.

З урахуванням технологічних властивостей матеріалу деталі (сталь 40X згідно з ДСТУ 7809:2015), її габаритних розмірів, вимог до механічних характеристик, а також обраного типу виробництва (середньосерійне), як вихідну заготовку доцільно прийняти штамповану заготовку з буртом, показану на рисунку 3.2.

Застосування штампованої заготовки даного типу забезпечує необхідну точність формоутворення, зменшує величину припусків на механічну обробку та сприяє підвищенню коефіцієнта використання матеріалу.

Для штампованих заготовок допуски встановлюються залежно від вихідного індексу, який визначається з урахуванням маси заготовки, класу точності штампування, групи сталі, а також ступеня складності конфігурації заготовки. При цьому верхнє та нижнє відхилення розмірів не завжди відповідають стандартному розташуванню поля допуску за системами  $H$  або  $h$ , що необхідно враховувати під час призначення припусків на механічну обробку (таблиця 3.2).

Згідно з масою штампованої заготовки  $m=51$  кг, а також прийнятим класом точності та групою сталі, визначено вихідний індекс штампування, який дорівнює 11. На підставі цього індексу за нормативною документацією призначаються граничні відхилення основних розмірів заготовки, що

забезпечує необхідний запас точності для подальших операцій механічної обробки.

Таблиця 3.2  
Допуски та допустимі відхилення вихідної заготовки за ДСТУ 7505:2015

Номінальний розмір	Позначення	Розрахований розмір	Допуск	Верхнє відхилення	Нижнє відхилення
Довжина (60h14)	A <sub>0.1</sub>	64,5 мм	1,6	+1,1	-0,5
Зовн. діам. бурта (Ø 350h14)	d <sub>0.1</sub>	Ø 358 мм	2,0	+1,3	-0,7
Зовн. діам. (Ø 150h14)	d <sub>0.2</sub>	Ø 155 мм	2,0	+1,3	-0,7
Діам. отвору (Ø 100H9)	D <sub>0.1</sub>	Ø 92,1 мм	1,6	+1,1	-0,5
Глибина отвору	A <sub>0.2</sub>	60,3 мм	1,6	+1,1	-0,5
Товщина	S	28,2 мм	1,4	+0,9	-0,5
Довжина бурта	A <sub>0.3</sub>	17 мм	1,4	+0,9	-0,5

На рисунку 3.3 наведено 3Д модель заготовки та аналіз маси, а остаточний кресленник відображено в додатках.

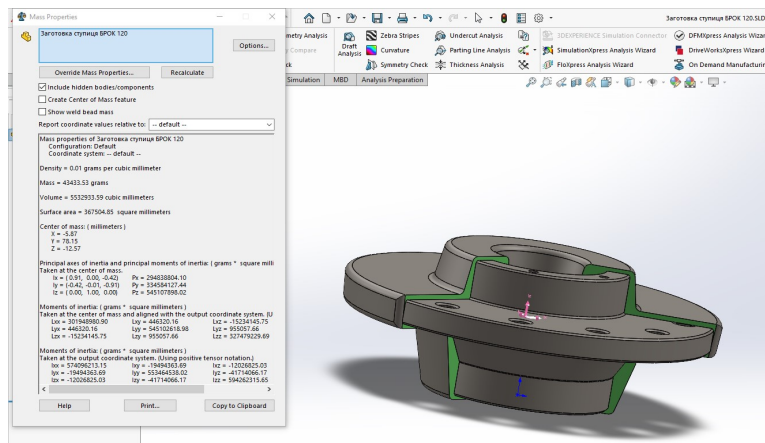


Рис. 3.3—3Д модель заготовки

Заготовку отримують гарячим куванням, відкритим способом з використанням формувальних оправок та прошивних конусів.

Вартість поковки розраховуємо за формулою:

$$M = Q \cdot S \quad (3.6)$$

де  $Q$  – маса заготовки,  $Q = 51$  кг;

$S$  – базова вартість 1 кг матеріалу,  $S = 120$  грн.

$$M = 51 \cdot 120 = 6120 \text{ грн.}$$

Кресленик поковки наведено в додатках.

### 3.4 Вибір варіанту технологічного маршруту механічного оброблення

Як було встановлено на попередніх етапах дослідження, існуючий технологічний процес виготовлення деталі «Ступиця» характеризується рядом недоліків, серед яких надлишкова кількість токарних операцій, збільшена трудомісткість механічної обробки та нераціональне використання можливостей сучасного обладнання з числовим програмним керуванням. Зазначені недоліки можуть бути усунені шляхом оптимізації структури технологічного маршруту та вдосконалення способу отримання заготовки.

З урахуванням вимог до точності, продуктивності та економічної доцільності пропонується новий варіант технологічного процесу виготовлення деталі «Ступиця» [4], який передбачає скорочення кількості операцій і підвищення рівня їх концентрації. Запропонований технологічний маршрут механічного оброблення має такий вигляд:

- 005 Заготівельна – поковка;
- 010 Токарно-карусельна – чорнова та напівчистова обробка базових поверхонь; чистова обробка зовнішніх і внутрішніх поверхонь;
- 015 Термічна зміцнення до твердості HB 240...280
- 020 Токарна ЧПК чистова контурна обробка
- 025 Розточна – обробка отворів під посадки з підвищеними вимогами до співвісності;

- 030 Фрезерна ЧПК Свердлувати отвори;
- 035 Радіально-свердлильна виконати фаски, нарізати різь;
- 040 Слюсарна;
- 045 Контрольна.

Другим важливим питанням під час проєктування маршруту виготовлення є розроблення схем базування. При розробленні схем базування необхідно забезпечити дотримання принципів єдності баз та їх постійності, що дає змогу мінімізувати похибки та зменшити припуски на механічну обробку. Доцільним є використання типових схем базування [2], що спрощує їх практичну реалізацію.

Спроєктований план виготовлення частково відображається в графічній частині (графотехнологія) кваліфікаційної роботи. Крім того, отримані дані використано під час проєктування технологічної документації, яку подано в додатках пояснювальної записки.

### 3.5 Вибір обладнання та технологічного оснащення

Основним критерієм під час вибору обладнання та технологічного оснащення є тип виробництва. Відповідно до даних [7] доцільно дотримуватися таких вимог. Верстатне обладнання повинно забезпечувати можливість обробки широкої номенклатури виробів, мати значний діапазон регулювання швидкостей і подач, забезпечувати швидку переналадку на виготовлення нового виробу, реалізацію необхідної структури операції та, бажано, бути оснащеним системами числового програмного керування (ЧПК).

Різальний інструмент повинен мати необхідну стійкість і оптимальну геометрію, забезпечувати обробку всієї номенклатури деталей, повною мірою реалізовувати потенціал обладнання за швидкістю різання та подачами, а також гарантувати задану точність обробки.

Верстатне оснащення має забезпечувати прийнятні на операціях схеми базування, бути механізованим, мати можливість швидкої переналадки на виготовлення нових деталей, відповідати вимогам щодо швидкодії та розвивати необхідні зусилля закріплення.

Засоби контролю повинні забезпечувати необхідну точність вимірювань, мати можливість проведення контролю в широкому діапазоні значень і, бажано, надавати результати вимірювань в абсолютних величинах.

Обладнання та засоби технологічного оснащення, обрані з використанням джерел [3, 4, 5–7] і наведених вище рекомендацій, подано в таблиці 3.3.

Розроблення маршруту обробки кожної окремої поверхні здійснюється з урахуванням вимог робочого креслення та специфіки вихідної заготовки. Вибір технологічної послідовності починається з визначення першого переходу, при цьому метод обробки залежить від способу виготовлення заготовки та рівня її початкової точності.

Кінцеві методи обробки добираються з урахуванням установлених технічних вимог, зокрема показників точності, шорсткості та функціонального призначення поверхні. На основі обраних початкового і завершального методів формуються проміжні технологічні переходи, які забезпечують поетапне досягнення необхідних геометричних і якісних параметрів.

Таблиця 3.2

Обладнання та технологічне оснащення

Операція	Обладнання	Пристосування	Різальний інструмент	Засоби контролю
005	Заготівельна поковка	Молот гідравлічний		Контроль геометрії, твердості
010	Токарно-карусельний верстат з ЧПК 1512Ф3, Fanuc i0TD	Планшайба	Різець контурний спеціальний CNMG 16 06 12–KR «Sandvik»; різець розточувальний TNMX 16 04 08–WMX «Sandvik»	Штангенциркуль ШЦ-1 400, 0,05; Нутромір НМ-100
015	Термічна (гартування, відпуск до твердості НВ 240...280)			
020	Токарно-гвинторізний верстат 16K20	Патрон трикулачковий Sanou K02-315	Різець токарний контурний TNMG 16 04 04–KF «Sandvik»; різець токарний розточувальний TNMX 16 04 08–WF «Sandvik»; різець канавковий розточувальний N123G2–0300–0002–CM «Sandvik»	Штангенциркуль ШЦ-1 400, 0,05; Нутромір НМ-100
025	Координатно-розточувальна	Патрон трикулачковий Sanou K02-315	Розточна система PINZBOHR	Штангенциркуль ШЦ-1 250, 0,05; Нутромір НМ-100
030	Фрезерний ЧПК моделі Haas VF-3	Пристрій спеціальний кулачковий з пневмоприводом	Свердло спіральне R841–1750–30–A1A Ø 10 мм «Sandvik»; Фреза кінцева чотиризахідна твердосплавна, монолітна Ø8*130*L75; Фреза різьбова M10*1,5-1T Фреза тв. сплав. різьб.(55HRC).	Штангенциркуль ШЦ-1 ГОСТ 166–89; нутромір НМ-100 ГОСТ 10–88 [3]
035	Слюсарна	Стіл слюсарний	Інструмент слюсарний, ручний	
040	Контрольна	Стіл контрольний		Вимірювальний, контрольний інструмент

### 3.5.1 Вибір пристосувань

Для забезпечення точного базування та надійного закріплення заготовки в процесі механічного оброблення застосовуються як універсальні, так і спеціальні пристосування. Їх вибір обумовлений конструктивними особливостями деталі, вимогами до точності оброблення, характером навантажень під час різання, а також типом і серійністю виробництва.

Основним спеціальним пристосуванням є розтискна оправка, яка забезпечує базування заготовки по внутрішній циліндричній поверхні. Використання даного пристосування дозволяє досягти високої співвісності оброблюваних поверхонь, зменшити похибки встановлення та підвищити стабільність розмірів під час фрезерної обробки отворів та нарізання різі. Крім того, така схема базування сприяє рівномірному розподілу затискних зусиль і зниженню деформацій заготовки.

Для виконання токарних операцій застосовуються універсальні токарні патрони (трикулачкові, чотирикулачкові, а також планшайби), які забезпечують швидке та надійне закріплення заготовки за зовнішні поверхні. Трикулачкові патрони використовуються переважно для обробки заготовок правильної геометричної форми, тоді як чотирикулачкові патрони та планшайби доцільні при встановленні деталей складної конфігурації або з підвищеними вимогами до точності базування.

Контроль геометричних параметрів і якості обробки здійснюється за допомогою вимірювального інструменту, шаблонів і калібрів, що дозволяє оперативно перевіряти відповідність оброблюваних поверхонь вимогам креслення безпосередньо в умовах цеху. Це сприяє своєчасному виявленню відхилень, зменшенню кількості браку та підвищенню загальної якості виготовлення деталі.

Застосування зазначених пристосувань у сукупності забезпечує необхідну точність обробки, скорочення допоміжного часу, підвищення продуктивності та надійність технологічного процесу загалом.

### 3.6 Розрахунок припусків та технологічних розмірів

Розрахунок мінімальних значень припусків для поверхонь типу «тіло обертання» виконується з використанням основної розрахункової формули з урахуванням малої ймовірності збігу напрямків похибки заготовки, зумовленої коробленням  $\rho_{i-1}$  та похибки встановлення  $\varepsilon_j$ :

$$\text{Значення мінімальних значень припусків для} \quad (3.7)$$
$$\text{встаються основною формулою (враховує}$$

де:

$2Z_{min,i}$  – мінімальний припуск на діаметр для оброблюваної поверхні, мкм;  $R_{Z,i-1}$  – шорсткість поверхні після попередньої обробки, мкм;

$T_{def,i-1}$  – товщина дефектного шару після попередньої обробки, мкм;

$\rho_{i-1}$  – похибка заготовки викликана коробленням (зміщенням) після попередньої обробки, мкм;

$\varepsilon_i$  – похибка установки та закріплення перед обробкою (під час розглядуваної обробки).

Розрахунок мінімальних значень припусків для тіл обертання можна також виконувати з урахуванням можливого збігу напрямків похибки заготовки, зумовленої коробленням  $\rho_{i-1}$  та похибки встановлення  $\varepsilon_i$ ; що призводить до збільшення сумарної похибки та, відповідно, потребує підвищених значень припусків на обробку.

$$\text{похибка заготовки через коробленн} \quad (3.8)$$

Сумарне значення  $R_Z$  та  $T_{def}$ , що характеризує вхідну якість поверхні заготовок після штампування, приймаємо за довідковими даними [4]. Для кожного послідуєчого технологічного переходу значення визначаються аналогічно.

Розраховані мінімальні припуски та їх складові заносять до табл. 3.3. Після цього виконують розрахунок технологічних розмірів для обробки кожної поверхні, починаючи від її конструктивного розміру. Отримані



Розточування після гартування D <sub>7,1</sub> = Ø100H7	5	15	15	15	2·50=100	47	Ø100H7	100	100.0 47
Оброблення отвору Ø140H7(+0,047)									
Штамповка (H16) D <sub>0,1</sub>	150	200	500	0	-----	2200 1600	132,6H1 6 132,1	132,6	134,8
Розточ. чорнове (H12) D <sub>1,4</sub>	40	60	60	0	2·280=560	350	138,7 H12	138,7	139,0 5
Розточ. напівчистове (H9) D <sub>1,6</sub>	10	30	30	30	2·190=380	87	139,4H9	139,4	139,4 87
Термічна HB 240...280									
Розточування після гартування D <sub>7,1</sub> = Ø100H7	5	15	15	15	2·50=100	47	Ø140H7	100	140.0 47
Обдирка торця Б (h14) A <sub>2,1</sub>	80	100	100	200	750	1400	82 h15	80,28	81,68
Точ. торця Б остаточно (h14) A <sub>2,2</sub>	40	60	40	0	280	740	80 h14	79,26	80
Оброблення торців для витримування довжини буртика 25h14(-0,43)									
Сторона Б Штамповка (торець Б) (h 16) A <sub>0,3</sub>	150	200	200	0	-----	-----	-----	-----	-----
Обдирка торця Б (h14) A <sub>1,1</sub>	80	100	100	200	750	430	25,4 h14	25,98	27,41
Точіння торця Б (h14) A <sub>2,4</sub>	80	100	100	0	280	430	25,7 h14	25,28	25,71
Точ. торця Б остаточно (h14) A <sub>2,5</sub>	40	60	40	0	280	430	25 h14	25,57	25

Розрахунок технологічних розмірів виконується на основі розмірного аналізу технологічного процесу оброблення, складаються відповідні розмірні ланцюги.

Для визначення технологічних розмірів під час обробки відповідальних поверхонь викреслюють розмірні ланцюги (рис. 3.4) та заносять їх до табл. 3.3.

А<sub>1</sub>, ИСПОЛЬ:

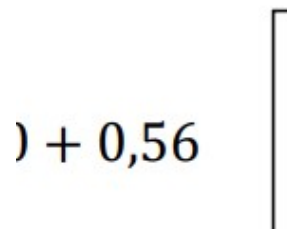


Рис. 3.4 – Розмірний ланцюг при обробленні поверхні Ø180h14

При цьому технологічний розмір А<sub>2</sub> повинен бути рівним конструкторському К, тобто:

$$D_{2,7} = A_2 = K = \text{Ø}130h14(-0,01) \text{ мм.}$$

Знаходимо технологічний розмір А<sub>1</sub>, використовуючи розмірний ланцюг №1:

Знаходимо технологічний розмір D<sub>0,1</sub> = A<sub>0</sub>, використовуючи розмірний ланцюг:

$$d_{0,1 \text{ min}} = A_{0 \text{ min}} = A_{1 \text{ max}} + 2Z_{1 \text{ min}} = D_{2,6 \text{ пр max}} + 2Z_{1 \text{ min}} = 182,2 + 2,7 = 184,9 \text{ мм;}$$

$$d_{0,1 \text{ max}} = A_{0 \text{ max}} = A_{0 \text{ min}} + T_{д0} = d_{0,1 \text{ min}} + T_{д0,1} = 184,9 + 2,5 = 187,4 \text{ мм.}$$

Попередньо приймаємо  $d_{0,1 \text{ пр}} = 187,4h16_{(-2,5)} \text{ мм.}$

Враховуючи відхилення за стандартом на штамповку зменшуємо допуск до 2 мм.

Розрахунок технологічних розмірів при обробленні всіх інших точних поверхонь Ø350h14<sub>(-0,087)</sub> Ø100H7, Ø140H7, лінійні розміри проводимо аналогічно.

Розрахунок технологічних розмірів при обробленні внутрішніх поверхонь  $\text{Ø}100\text{H}7^{(+0,087)}$  та  $\text{Ø}140\text{H}7$  здійснюємо наступним чином: викреслюємо розмірні ланцюги (рис. 3.5 3.6) та записуємо в таблицю 3.3.

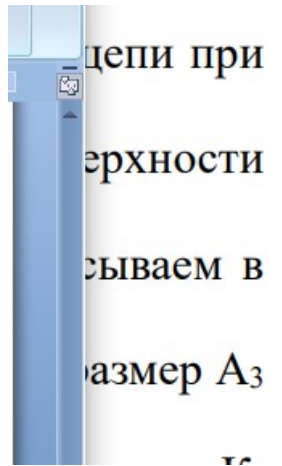


Рис. 3.5 – розм.. ланцюг при обробленні поверхні  $\text{Ø}100\text{H}7$

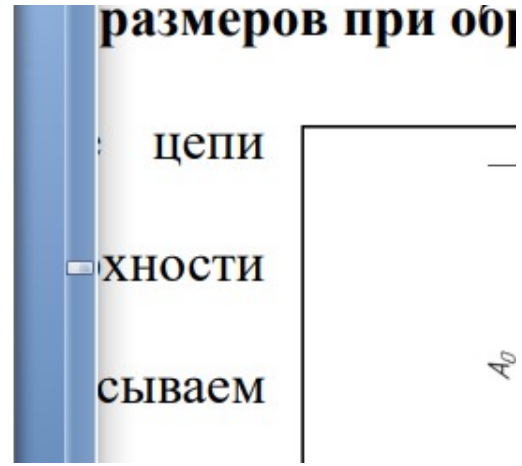


Рис. 3.6 – розм.. ланцюг при обробленні поверхні  $\text{Ø}140\text{H}7$

Технологічний розмір  $A_4$  має бути рівним конструкторському  $K$ :

$$D_{7,1} = A_4 = K = \text{Ø}100\text{H}7^{(+0,047)} \text{ мм.}$$

Визначаємо технологічний розмір  $D_{1,6} = A_3$ , через розмірний ланцюг:

$$D_{1,6 \max} = A_{3 \max} = A_{4 \min} - 2Z_{4 \min} = D_{7,1 \min} - 2Z_{7,1 \min} = 100 - 0,54 = 99,46 \text{ мм}$$

$$D_{1,6 \min} = A_{3 \min} = A_{3 \max} - T_{d3} = D_{1,6 \max} - T_{d6} = 99,46 - 0,047 = 99,373 \text{ мм}$$

Приймаємо технологічний розмір:  $D_{1,6 \text{пр}} = 99,4\text{H}7^{(+0,047)} \text{ мм.}$

Визначаємо технологічний розмір  $D_{1,4} = A_2$ , побудувавши розмірний ланцюг:

$$D_{1,4 \max} = A_{2 \max} = A_{3 \min} - 2Z_{3 \min} = D_{1,6 \min} - 2Z_{1,6 \min} = 99,4 - 0,38 = 99,02 \text{ мм;}$$

$$D_{1,4 \min} = A_{2 \min} = A_{2 \max} - T_{d2} = D_{1,4 \max} - T_{D1,4} = 99,02 - 0,35 = 98,67 \text{ мм;}$$

Приймаємо технологічний розмір:  $D_{1,4 \text{пр}} = 98,7\text{H}12^{(+0,35)} \text{ мм.}$

Визначаємо технологічний розмір  $D_{1,3} = A_1$ , використовуючи розмірний ланцюг:

$$D_{1,3 \max} = A_{1 \max} = A_{2 \min} - 2Z_{2 \min} = D_{1,4 \min} - 2Z_{1,4 \min} = 98,7 - 0,56 = 98,14 \text{ мм;}$$

$$D_{1,3 \min} = A_{1 \min} = A_{1 \max} - T_{d1} = D_{1,3 \max} - T_{D1,3} = 98,14 - 1,4 = 96,74 \text{ мм;}$$

Прийнятий технологічний розмір:  $D_{1,зпр} = 96,7H15^{(+1,4)}$  мм

Знаходимо технологічний розмір  $d_{0,1} = A_0$ , використовуючи розмірний ланцюг:

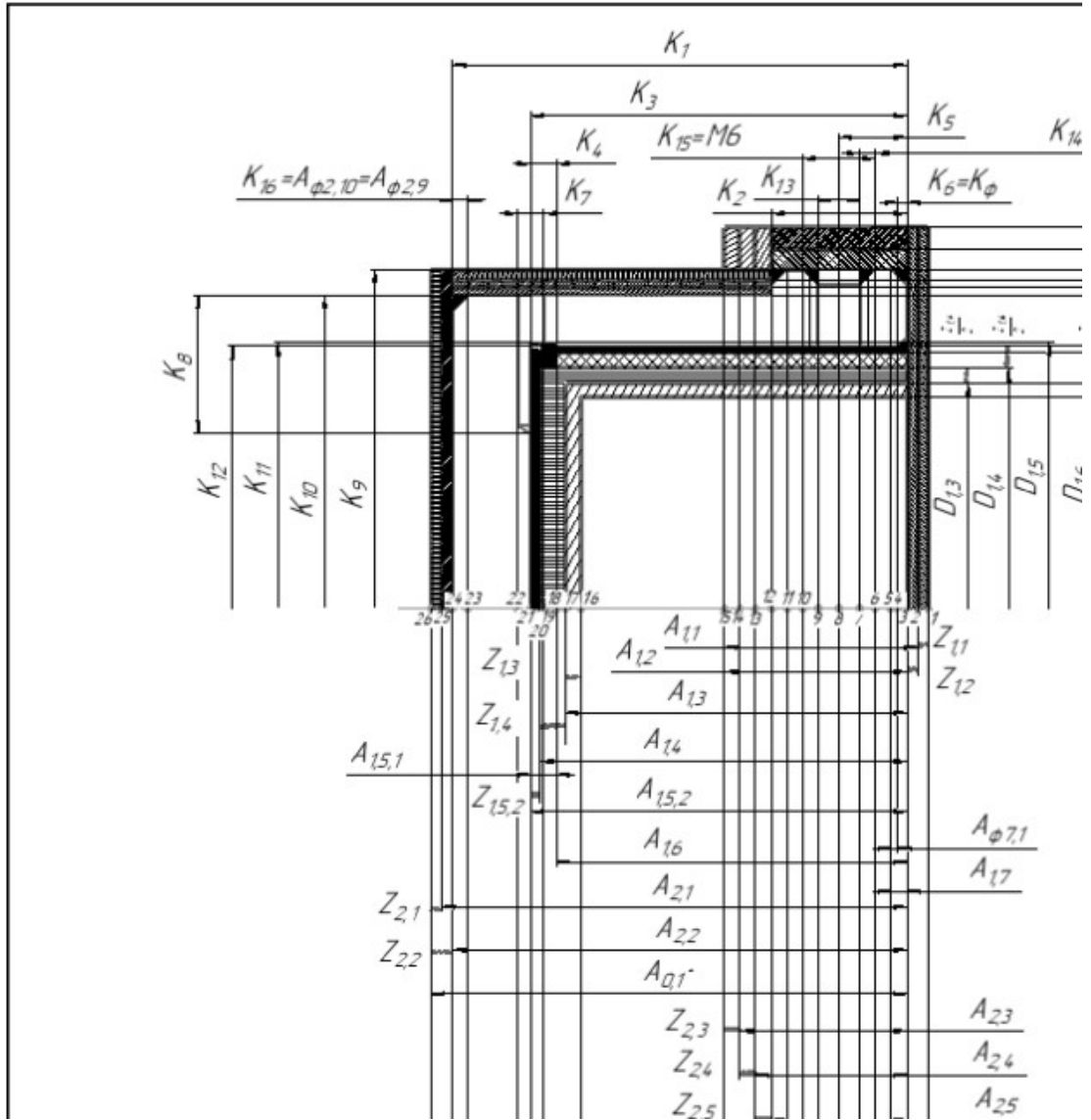


Рис. 3.7 – Комплексна схема обробки в осьовому напрямі

$$D_{0,1 \max} = A_{0 \max} = A_{1 \min} - 2Z_{1 \min} = D_{1,3 \min} - 2Z_{1,3 \min} = 96,7 - 1,9 = 94,8 \text{ мм};$$

$$D_{0,1 \min} = A_{0 \min} = A_{0 \max} - T_{d0} = d_{0,1 \max} - T_{d0,1} = 94,8 - 2,2 = 92,6 \text{ мм};$$

Попередньо приймаємо  $D_{0,зпр} = 92,6H16^{(+2,2)}$  мм.

Для розрахунку осьових технологічних розмірів, що визначаються не напряму, будуємо комплексну схему обробки (рис. 3.7).

Розміри товщини буртика 25h14 та габаритного розміру 140h14 визначаються аналогічним чином.

### 3.7 Перевірка забезпечення точності конструкторських розмірів

Для перевірки забезпечення точності конструкторських розмірів необхідно побудувати розмірну схему окремо в осьовому та радіальному напрямках. На цю схему наносять усі технологічні розміри, припуски на обробку, а також конструкторські розміри деталі.

На основі побудованої розмірної схеми виділяють розмірні ланцюги, замикальними ланками яких є конструкторські розміри та припуски на обробку. Виявлення розмірних ланцюгів розпочинають з останньої операції, тобто рухаючись за розмірною схемою знизу вгору.

Для спрощення процесу виявлення розмірних ланцюгів будують граф розмірних зв'язків (рис. 3.8). Спочатку формують граф технологічних розмірів, у якому оброблювані поверхні позначають кружечками з відповідними номерами; поверхню заготовки, від якої починається обробка, позначають подвійним кружечком.

Отриманий граф доповнюють схемою розмірів заготовки (рис. 3.7), при цьому розміри заготовки зображують подвійними лініями, у результаті чого формується суміщений граф. На цьому графі розміри готової деталі подають у вигляді дуг, а припуски на обробку у вигляді ламаних ліній; стрілка на таких лініях вказує, до якої поверхні належить відповідний припуск. Важливо будувати суміщений граф таким чином, щоб його ребра (лінії) не перетиналися, що спрощує аналіз розмірних зв'язків і підвищує наочність схеми.

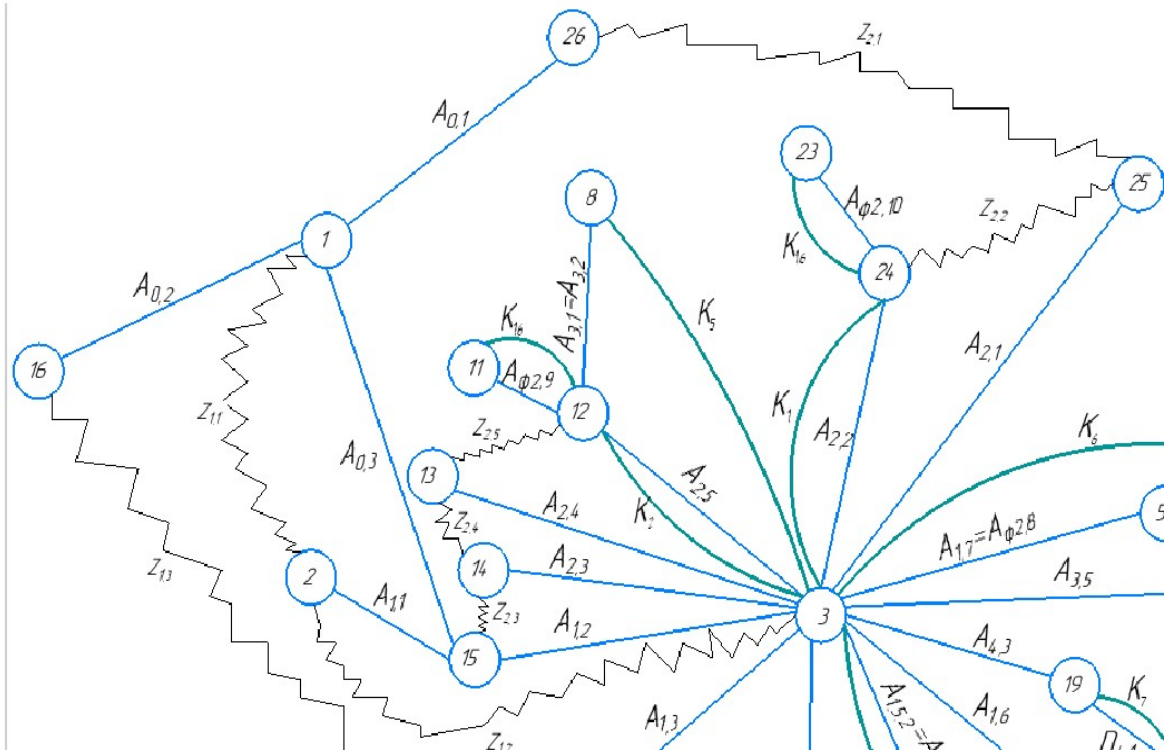


Рис. 3.8 – Граф розмірних зв'язків

Будь-який замкнений контур суміщеного графа утворює розмірний ланцюг. Останньою ланкою такого контуру, яку зазвичай беруть у квадратні дужки, є або конструкторський розмір деталі, або припуск на обробку. Розмірні ланцюги доцільно формувати таким чином, щоб припуски та розміри значень параметру  $A$  деталі не входили до їх складу як складові ланки.

Далі визначають конструкторські осьові розміри, які забезпечуються безпосередньо під час витримування остаточних технологічних розмірів.

Для кожного конструкторського розміру  $K_i$ , який безпосередньо не витримується при відпрацюванні технологічного процесу, в комплексній схемі обробки деталі виділяється розмірний ланцюг, до якого він входить. Такий розмірний ланцюг має містити мінімально можливу кількість складових ланок. Виділяємо розмірний ланцюг, що містить лише один

конструкторський розмір, і перевіряємо можливість розв'язання розмірного ланцюга, керуючись правилом: при розрахунку розмірних ланцюгів методом максимуму-мінімуму допуск вихідної ланки має бути не меншим за суму допусків складових ланок.

Розмірні ланцюги для конструкторських розмірів, які не витримуються безпосередньо визначаються окремо з прив'язкою до суміжних поверхонь, після чого записуємо всі розраховані технологічні розміри.

3.8 Розроблення операції 030 технологічного процесу, що виконується на верстаті з ЧПК моделі Naas VF-3

Процес формування технологічних операцій є одним із ключових етапів побудови сучасного та економічно обґрунтованого виробничого процесу. Він передбачає комплексне опрацювання всіх стадій обробки деталі від вибору обладнання, інструменту та пристосувань до організації раціональних і безпечних умов праці. Основною метою даного процесу є забезпечення стабільної якості продукції за мінімальних витрат часу, матеріальних ресурсів і енергії.

Розроблення технологічних операцій включає підготовку повного комплексу технологічної документації. Зокрема, складаються операційні карти, у яких регламентуються послідовність виконання переходів, режими різання, вимоги до точності та шорсткості оброблюваних поверхонь, норми часу, а також заходи з охорони праці та техніки безпеки.

Ефективність розробленого технологічного процесу оцінюється за допомогою техніко-економічного аналізу, у межах якого визначаються трудомісткість виконання операцій, рівень енергоспоживання та загальні фінансові витрати. Такий підхід дає змогу обґрунтувати доцільність прийнятих технологічних рішень і виявити резерви для їх оптимізації.

Комплексне опрацювання зазначених етапів дозволяє не лише забезпечити необхідний рівень якості виготовлення продукції, а й істотно підвищити продуктивність виробництва та знизити собівартість, що є важливим чинником підвищення конкурентоспроможності підприємства в сучасних умовах.


Вибір ріжучого інструменту та режимів різання здійснюється із застосуванням електронно-обчислювальної техніки шляхом використання онлайн-калькуляторів провідних виробників інструменту, зокрема Taegutec та Sandvik Coromant. Це забезпечує призначення оптимальних параметрів обробки для конкретної технологічної операції на верстатах з числовим програмним керуванням.

Для визначення найбільш доцільного інструменту та режимів різання було використано вебресурс компанії Sandvik Coromant, у відповідних розділах якого задано потужність верстата, матеріал заготовки, початкові та кінцеві значення діаметрів, а також необхідну шорсткість оброблюваної поверхні. На основі введених вихідних даних система автоматично сформувала рекомендований варіант інструменту та оптимальні режими різання. Окрім основного рішення, були запропоновані альтернативні варіанти інструментального оснащення з менш інтенсивними режимами, що дає можливість адаптувати вибір до наявної матеріально-технічної бази підприємства.

Розглянемо методику до вибору інструменту та режимів різання саме для реалізації операції №030 фрезерна з ЧПК

Свердлити отвори  $\varnothing 10,6$  згідно з креслеником; фрезерувати 12 отв.  $\varnothing 10,6$  до  $\varnothing 20,55$ ; фрезерувати внутрішню різьбу М 12x1.5 та М 22x1.5 згідно з креслеником.

ОТВЕРСТИЕ В ДЕТАЛИ ВРАЩЕНИЯ



**P**

175 HB  
P2 | Z AN  
низколегированная сталь

Токарный станок 03 - Средний (патрон 6-12')

25 kW, 4000 1/min


Плохие условия

Обрабатываемый диаметр ØM: 30 mm

Глубина элемента обработки DEPTH: 38 mm

Еще...

СВЕРЛЕНИЕ СВЕРЛАМИ С МОНОЛИТНОЙ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТЬЮ / СМЕННАЯ



CoroDrill 870

870-3000-30L32-3  
Инструмент

870-3000-30-PM 4334  
Пластина

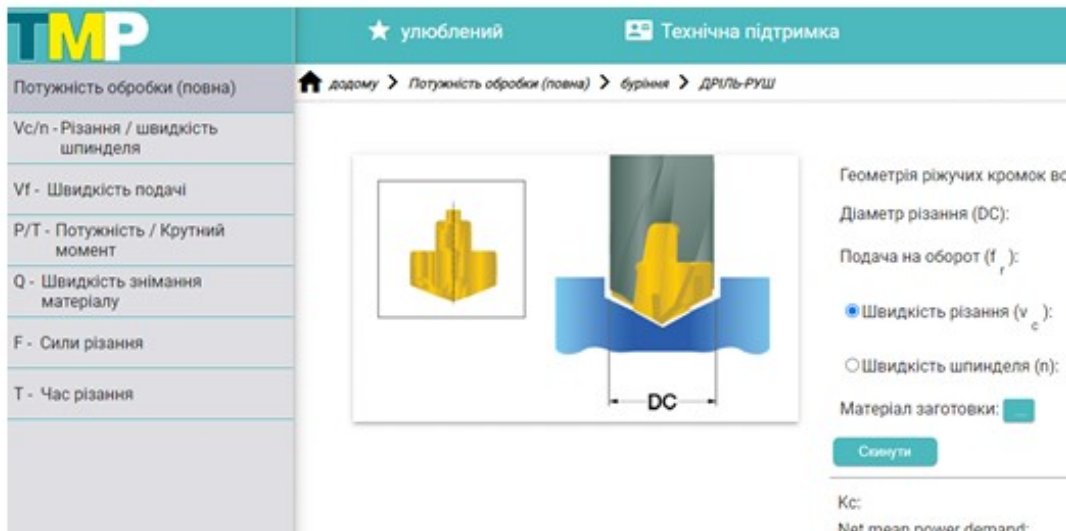
Стойкость, дет. TLIFEC	1160
Отверстия	
Время обработки на элемент TMF	00:06.480 минс

Інструмент – Свердло спіральне R841–1750–30–A1A Ø 10 мм «Sandvik»;

Фреза кінцева чотиризахідна твердосплавна, монолітна Ø8\*130\*L75;

Фреза різьбова M10\*1,5-1T Фреза тв. сплав. різьб.(55HRC).

*Режими:*



★ улюблений    Технічна підтримка

Потужність обробки (повна)    додому > Потужність обробки (повна) > буріння > ДРІЛЬ-РУШ

Геометрія ріжучих кромek вс

Діаметр різання (DC):

Подача на оборот ( $f_r$ ):

Швидкість різання ( $v_c$ ):

Швидкість шпинделя (n):

Матеріал заготовки:

Кс:  
Net mean power demand:

Проектування траєкторії вершини ріжучого інструменту (рис.3.9) та кількості проходів дозволили визначити машинний час оброблення ( $T=1.8\text{хв}$ ).

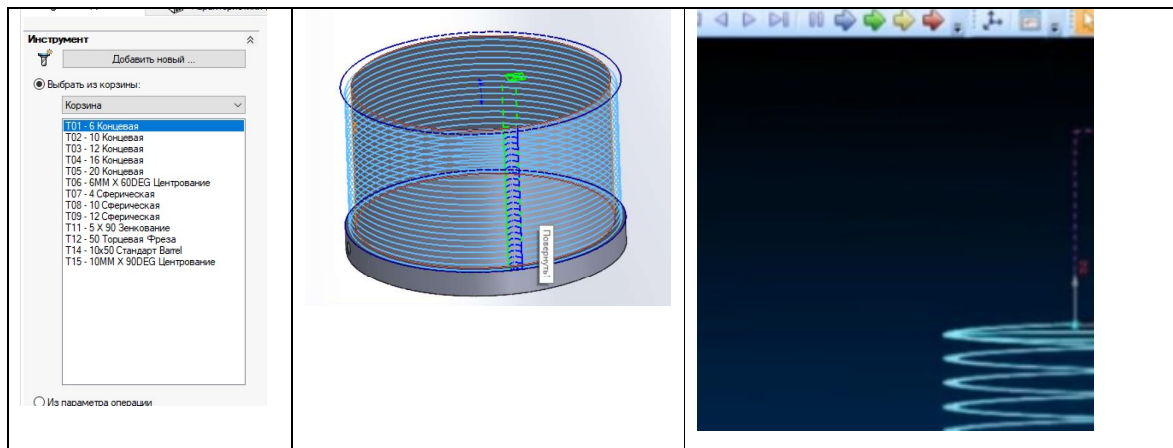


Рис. 3.9 – Траєкторія вершини ріжучого інструменту при фрезеруванні циліндричної поверхні та профілю внутрішньої різьби

Програма фрезерування різьби реалізує гвинтову (спіральну) інтерполяцію з поступовим заглибленням інструмента по осі  $Z$ . Така траєкторія застосовується для:

- вибирання внутрішньої порожнини;
- формування отвору або кільцевої канавки;
- плавного входу інструмента в матеріал без ударного навантаження.

Рух відбувається серією кругових інтерполяцій  $G3$  (проти годинникової стрілки) з одночасним зменшенням координати  $Z$ .

Команди виду:

$G3 X... Y... Z... I... J...$

означають:

- $G3$  — кругова інтерполяція проти годинникової стрілки;
- $X, Y$  — кінцева точка дуги;
- $Z$  — новий рівень заглиблення;
- $I, J$  — координати центра дуги відносно поточного положення.

Фізичний зміст:

- інструмент описує повні або часткові кола в площині  $XY$ ;
- після кожного кола опускається на  $0,312...0,375$  мм по осі  $Z$ ;
- формується гвинтова траєкторія (спіраль униз).

Таким чином інструмент:

- рівномірно знімає матеріал;
- працює зі сталою товщиною стружки;
- зменшує теплове й силове навантаження.

Фрагмент керуючої програми:

```
%  
O0123 (SPIRAL POCKET / INTERNAL CONTOUR)
```

```
(--- SAFETY BLOCK ---)
```

```
G21      (Metric units)  
G17      (XY plane)  
G90      (Absolute programming)  
G40 G49 G80 (Cancel compensation, cycles)  
G54      (Work offset)
```

```
(--- TOOL CALL ---)
```

```
T01 M06  (End mill / boring tool)  
S2500 M03 (Spindle ON, clockwise)  
G0 G43 H01 Z50.0  
M08      (Coolant ON)
```

```
(--- MOVE TO START POSITION ---)
```

```
G0 X1.0 Y0.0  
Z5.0
```

```
(--- HELICAL ENTRY / SPIRAL DOWN ---)
```

```
.....
```

```
128 G3X1Y0Z-7.5I0J1  
129 G3X0Y1Z-7.187I-1J0  
130 G3X-1Y0Z-6.875I0J-1  
131 G3X0Y-1Z-6.562I1J0  
132 G3X1Y0Z-6.25I0J1  
133 G3X0Y1Z-5.937I-1J0  
134 G3X-1Y0Z-5.625I0J-1  
135 G3X0Y-1Z-5.312I1J0  
136 G3X1Y0Z-5I0J1  
137 G3X0Y1Z-4.687I-1J0  
138 G3X-1Y0Z-4.375I0J-1  
139 G3X0Y-1Z-4.062I1J0
```

140 G3X1Y0Z-3.75I0J1  
141 G3X0Y1Z-3.437I-1J0  
142 G3X-1Y0Z-3.125I0J-1  
143 G3X0Y-1Z-2.812I1J0  
144 G3X1Y0Z-2.5I0J1  
145 G3X0Y1Z-2.187I-1J0  
146 G3X-1Y0Z-1.875I0J-1  
147 G3X0Y-1Z-1.562I1J0  
148 G3X1Y0Z-1.25I0J1  
149 G3X0Y1Z-0.937I-1J0  
150 G3X-1Y0Z-0.625I0J-1  
151 G3X0Y-1Z-0.312I1J0  
152 G3X1Y0Z0I0J1  
153 G0X0Y0  
154 G1Z-0.5625F750  
155 G1X0.529Y0F750  
156 G1X0.588Y0F50  
157 G3X0.588Y0Z-0.588J0F750  
158 G1X0.725Y0F50  
159 G3X0.725Y0Z-0.725J0F750  
160 G1X0.863Y0F50  
161 G3X0.863Y0Z-0.863J0F750  
162 G1X1Y0F50  
163 G3X1Y0I-1J0F750  
164 G0X0Y0  
165 G0Z10  
166 G0X0Y0  
167 M05  
168 M30  
%

3.9 Аналітичний розрахунок режимів різання на основі онлайн-калькуляторів та рекомендацій виробників інструменту

Аналітичний розрахунок режимів різання є важливим етапом проектування технологічного процесу механічної обробки, оскільки безпосередньо впливає на продуктивність, якість оброблюваних поверхонь, стійкість ріжучого інструменту та економічну ефективність виробництва. Сучасний підхід до визначення параметрів різання передбачає поєднання

класичних аналітичних методів із використанням цифрових інструментів і рекомендацій провідних виробників ріжучого інструменту.

Для визначення оптимальних режимів різання застосовуються онлайн-калькулятори виробників інструменту, зокрема Sandvik Coromant та Taegutec, які базуються на експериментальних даних, аналітичних залежностях і статистичних моделях. Використання таких ресурсів дозволяє врахувати широкий спектр чинників, що впливають на процес різання, та отримати технічно обґрунтовані рекомендації для конкретних умов обробки.

У процесі розрахунку в онлайн-калькулятори вводяться вихідні дані, а саме: матеріал заготовки та його механічні властивості, тип і геометрія ріжучого інструменту, потужність і жорсткість верстата, глибина різання, подача, початкові та кінцеві розміри оброблюваної поверхні, а також вимоги до шорсткості. На основі цих параметрів система автоматично визначає рекомендовані значення швидкості різання, частоти обертання шпинделя, подачі на оберт або зуб та прогнозовану стійкість інструменту.

Отримані в результаті аналітичного розрахунку режими різання перевіряються на відповідність можливостям конкретного обладнання та умовам виробництва. Крім основного рекомендованого варіанта, онлайн-системи, як правило, пропонують альтернативні режими різання з меншою інтенсивністю, що дає змогу адаптувати технологічний процес до наявного інструментального оснащення та забезпечити стабільність обробки.

Застосування в даній роботі онлайн-калькуляторів у поєднанні з рекомендаціями виробників інструменту дозволяє підвищити точність призначення режимів різання, зменшити ризик передчасного зношування інструменту, скоротити час налагодження верстатів та забезпечити досягнення заданих показників якості оброблюваних поверхонь. Це робить такий підхід ефективним і доцільним для використання в умовах сучасного машинобудівного виробництва.

## 4 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 4.1 Проектування спеціального технологічного оснащення

Як технологічне оснащення для виконання операції 030 технологічного процесу, що реалізується на верстаті з числовим програмним керуванням Haas VF-3, обрано кулачкову фланцеву розжимну оправку. Застосування даного пристосування забезпечує надійне базування та закріплення деталі за внутрішнім отвором, що є особливо важливим під час виконання фрезерної обробки з підвищеними динамічними навантаженнями.

Метою конструкторської частини є розроблення зазначеного пристосування для виконання фрезерної операції, а також визначення необхідної сили закріплення та робочого діапазону затиску внутрішнього отвору деталі. При цьому особлива увага приділяється забезпеченню достатньої жорсткості системи «верстат – пристосування – деталь» і запобіганню зсуву або деформації заготовки в процесі різання.

Вибір принципу дії розжимної оправки ґрунтується на аналізі приєднувальних, конструктивних і габаритних розмірів елементів шпindelного вузла верстата, а також умов сумісності з обраним інструментальним оснащенням. Це дозволяє забезпечити коректну установку пристосування, точність базування та можливість його багаторазового використання в серійному виробництві.

Концепція конструювання пристосування передбачає поєднання уніфікованих стандартних рішень, зокрема накладних кондукторів (рис.4.1), із спеціально спроектованими розжимними оправками. Такий підхід сприяє скороченню термінів проектування, зниженню витрат на виготовлення оснащення та підвищенню технологічної гнучкості виробничого процесу.

Підставка для накладного кондуктора з пневматичним затиском наведена на рис.4.1.

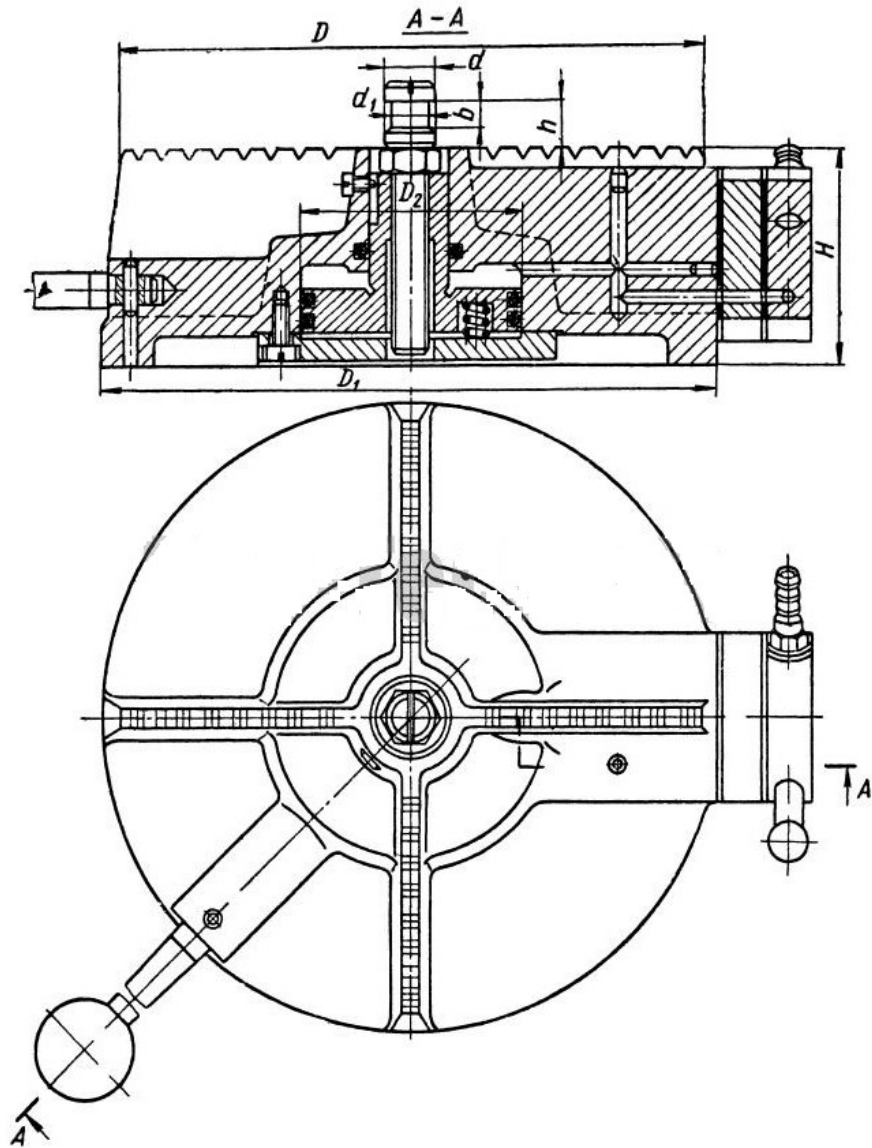


Рис.4.1 Підставка універсальна для накладного кондуктора з пневмоприводом

Закріплення заготовки здійснюється за допомогою розтискної оправки від пневматичного приводу. Осьове зусилля на шток пневмоприводу при тиску повітря в системі —  $4 \text{ кгс/см}^2$  для підставки  $D = 190 \text{ мм}$  складає  $\sim 260 \text{ кгс}$ , для підставки  $D = 315 \text{ мм}$  —  $\sim 400 \text{ кгс}$ . Основні параметри наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Параметри універсальної підставки для накладного кондуктора з пневмоприводом

D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	H	d(доп.викл. по С <sub>3</sub> )	dt	h <sub>min</sub>	t <sub>max</sub>	b
190	200	100	95	22	16	24	90	16
315	330	120	115	28	20		130	18

В межах фрезерної операції 030 базовою поверхнею слугує отвір Ø100H7, який буде посадковим діаметром d розтискної оправки для отвору Ø100H7<sup>(+0,047)</sup>.

$d_{\max}=D_{\max}=100,047$  мм, приймаємо діаметр до розтиску  $d=99,5$  мм.

Визначаємо найбільше переміщення (хід) кулачків для закріплення заготовки в отвір Ø100H7:  $\Delta_{\max}=(100,047-99,5)/2=0,273$  мм.

На рисунку 4.1 наведено ескіз технологічної оправки.

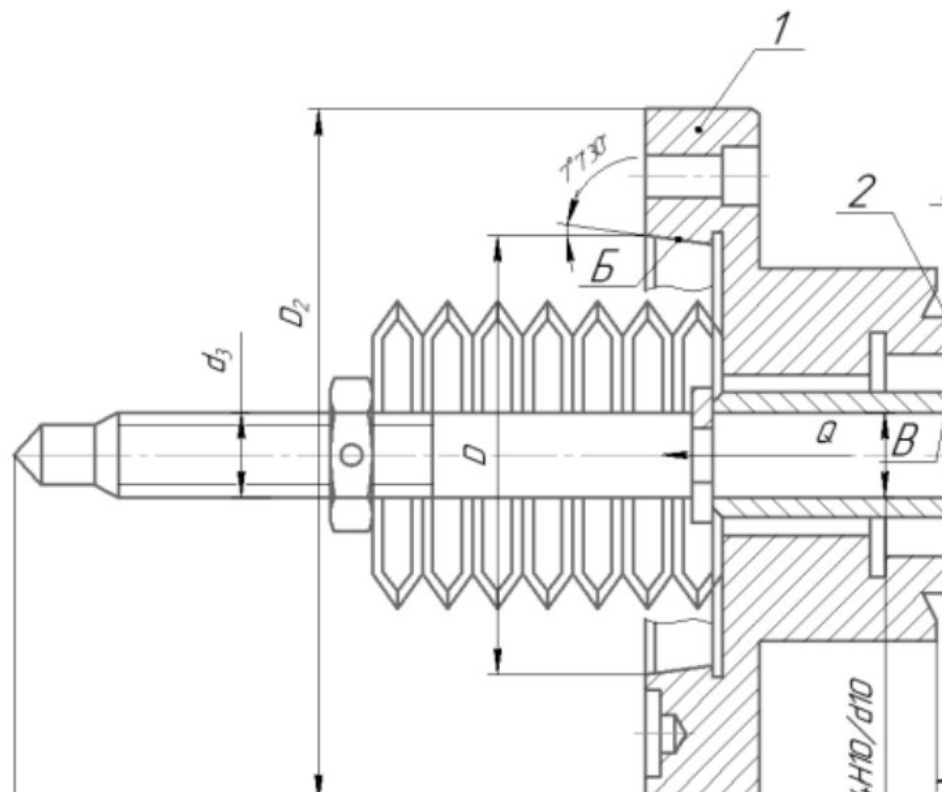


Рис. 4.1 – Оправка технологічна

Технологічна оправка є складним вузлом, що складається з значної кількості елементів, у зв'язку з чим до точності виготовлення її складових висуваються підвищені вимоги. Після складання розміри кулачків **3** повинні бути ідентичними, оскільки навіть незначна різниця призводить до нерівномірного розподілу зусиль затиску та, як наслідок, до погіршення точності базування заготовки.

З метою усунення початкових похибок виготовлення та складання після монтажу оправки і попереднього налаштування кулачків у корпусі плунжер висувають за допомогою гвинта **Е** і гайки. Після цього оправку встановлюють у шпиндель верстата та виконують обточування «по місцю». Така операція дозволяє усунути початкове биття кулачків і зменшити відхилення співвісності зовнішньої поверхні оправки відносно осі обертання шпинделя.

Перед виконанням обточування в конструкції встановлюють достатньо жорстке кільце, яке забезпечує щільне прилягання кулачків до конічної поверхні плунжера за рахунок пружного стиску та запобігає їх зміщенню під час обробки. У результаті обточування або шліфування діаметр кулачків дещо зменшується, що враховується під час подальшого налаштування оправки.

Розрізні пружинні кільця **4** (у кількості двох штук) виконують функцію фіксації кулачків, не допускаючи їх розходження після встановлення оправки у верстат. Крім того, вони запобігають розкиданню кулачків у разі подачі тиску в мембранну камеру без заготовки або при помилкових діях оператора, що суттєво підвищує безпеку та надійність експлуатації пристосування.

Основним завданням під час налагодження оправки є забезпечення можливості встановлення заготовки з внутрішнім отвором  $D_i = D_{\min} = 99,4$  мм без ускладнень. При цьому необхідно передбачити технологічний зазор **S**, який має бути не меншим за 0,02 мм (що відповідає  $d^*_{\min} = 99,38$  мм) і водночас не перевищувати 0,03 мм. Дотримання цього діапазону дозволяє

обмежити радіальне переміщення кулачків і забезпечити високу точність центрування заготовки.

На рис. 4.2 показано додаткову канавку, призначену для розміщення цільного жорсткого кільця, яке встановлюється перед виконанням обточування. У двох інших канавках розміщують пружинні кільця, що монтується після завершення обробки кулачків і забезпечують їх фіксацію, запобігаючи розходженню та випадінню з оправки під час її обертання.

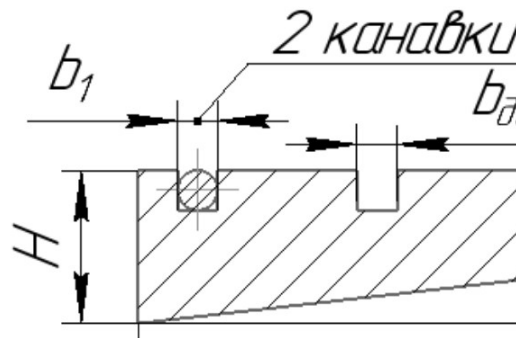


Рис. 4.2 – Конструктивне виконання кулачка оправки

Для фіксації внутрішнього жорсткого кільця та додаткового кільця в конструкції оправки передбачено канавку, виконану в середній частині кулачків. Товщина кільця обирається таким чином, щоб після встановлення воно не виступало за робочу поверхню кулачків і не впливало на умови контакту із заготовкою.

Глибина (ширина) канавки має становити не менше 2 мм, що забезпечує вільне розміщення кільця та не перешкоджає щільному приляганню кулачків до конічної поверхні плунжера. При цьому з внутрішнього боку притиск кулачків здійснюється кільцем діаметром  $\varnothing 60$ , яке слугує для кріплення оправки до шпинделя верстата. Таке конструктивне рішення забезпечує надійне центрування та створює зручні умови для встановлення заготовки на кулачки оправки перед виконанням обточування під час другої операції.

У розтискній оправці в якості робочого приводу для фіксації обрано пневмоциліндр двосторонньої дії. Зусилля циліндра використовується для стискання тарілчастих пружин і забезпечення розтискання заготовки, що спрощує конструкцію приводу, підвищує його надійність та знижує експлуатаційні витрати.

Проектування та визначення основних геометричних параметрів розтискної оправки здійснюється у зворотній послідовності за принципом «від деталі». Тому на початковому етапі на кресленні проводять лінію від оброблюваної поверхні до похилої поверхні плунжера. Далі, відповідно до креслення з урахуванням його масштабу, визначають допустимий максимальний осьовий хід плунжера  $L_{\text{плунжера max}}$ , вважаючи, що в крайньому правому положенні шток плунжера також перебуває у крайньому правому положенні, яке відповідає режиму «розтиск».

Найбільше діаметральне переміщення кулачків, тобто максимальне збільшення діаметра їх зовнішньої поверхні  $\Delta d_{\text{max}}$ , дорівнює подвоєному радіальному переміщенню. Це переміщення визначається залежно від максимального осьового ходу плунжера та кута нахилу спряжених поверхонь кулачків і плунжера.

Максимальне діаметральне переміщення кулачків визначається за формулою:

$$\Delta d_{\text{max}} = 2L_{\text{рад}} = 2 \cdot (\tan \alpha \cdot L_{\text{плунжера max}}) = 2 \cdot (\tan 6,5 \cdot 21) = 4,8 \text{ мм.}$$

$$d_{\text{кулачк. min}} = D_{\text{загот. min}} - 0,02 \text{ мм} = 100 - 0,02 = 99,98 \text{ мм,}$$

$$d_{\text{оправки max}} = d_{\text{кулачк. min}} - 2 \text{ мм} = 99,98 - 2 = 97,98 \text{ мм.}$$

Розраховуємо найбільший можливий діаметр отвору заготовки без перестановки кулачків:

$$D_{\text{внут max}} = d_{\text{кулачк. min}} + \Delta d_{\text{max}} = 100 + 4,8 = 104,8 \text{ мм.}$$

Таким чином, використовуючи один комплект кулачків на одній і тій самій оправці, теоретично можливо закріплювати заготовки з діаметром внутрішнього отвору в межах від  $D_{\text{внут min}} = 99,5 \text{ мм}$  до  $D_{\text{внут max}} = 104,18 \text{ мм}$ .

Однак на практиці таке застосування можливе лише після попереднього тонкого обточування кулачків «по місцю». Це пов'язано з тим, що зі збільшенням ходу кулачків зростає похибка встановлення заготовки.

У разі збільшення установчого діаметра більш ніж на 0,2 мм істотно підвищується похибка відхилення від співвісності зовнішньої оброблюваної поверхні заготовки діаметром  $d_{\text{заг}}$  відносно базового внутрішнього отвору  $D_{\text{внут}}$ , що негативно впливає на точність обробки.

Для запобігання надмірному розтисканню оправки при випадковій подачі стисненого повітря в конструкції передбачено застосування спеціальних розрізних обмежувальних кілець, а також механізм регулювання максимального ходу штоку пневматичної камери. Це підвищує надійність роботи пристосування та забезпечує безпечну експлуатацію в умовах виробництва.

#### 4.2 Проектування контрольно-вимірювального інструменту

Для контролю внутрішнього отвору з номінальним діаметром 100 мм та посадкою Н7 передбачається застосування граничного контрольно-вимірювального інструменту калібра-пробки (рис. 4.3). Використання даного типу калібра забезпечує оперативний і надійний контроль відповідності фактичних розмірів отвору встановленим граничним значенням без виконання вимірювань шкальними засобами.

Калібр-пробка належить до засобів граничного контролю та працює за принципом «прохід непрохід». Прохідна частина калібра повинна вільно входити в отвір, що контролюється, по всій довжині, тоді як непрохідна частина не повинна входити в отвір більше ніж на допустиму величину. Такий метод контролю дозволяє однозначно оцінити придатність деталі з точки зору забезпечення заданої точності обробки.

Відповідно до вимог стандартів системи ISO та даних, наведених у табл. 4.2, допуск для отвору з посадкою H7 при номінальному діаметрі 100 мм становить:

загальний допуск – T (допуск H7 для D = 100 мм) = 0,035 мм;

мінімально допустимий діаметр отвору:–  $D_{\min} = 100,000$  мм;

максимально допустимий діаметр отвору:–  $D_{\max} = 100,035$  мм.

На основі наведених граничних розмірів визначаються номінальні розміри та допуски прохідної і непрохідної частин калібра-пробки з урахуванням припусків на зношування та вимог до точності виготовлення самого калібра. Це забезпечує необхідну достовірність контролю протягом усього терміну експлуатації інструменту.

Таблиця 4.2

Допуски та параметри калібра (за стандартом ISO)

Позначення	Пояснення	Значення
Z	Відхилення середини поля допуску прохідного калібру	2,5 мкм
Y	Допустиме зношування прохідного калібру	2 мкм
H <sub>s</sub>	Допуск на виготовлення калібра з сферичними поверхнями	2,5 мкм
H <sub>i</sub>	Допуск на виготовлення непрохідної сторони калібра	4 мкм
α	Компенсація похибки для великих діаметрів (>180 мм)	0°

Застосування калібра-пробки для контролю отвору Ø100 H7 є технічно доцільним, оскільки дозволяє підвищити продуктивність контролю, зменшити вплив людського фактору та гарантувати стабільну якість виготовлення деталей у серійному та масовому виробництві.

Розрахунок розмірів калібр-пробки:

1) прохідна частина (нова):

$$PP_{\min} = D_{\min} + Z = 100,000 + 0,0025 = 100,0025 \text{ мм}$$

2) прохідна частина (зношена):

$$PR_{zn} = D_{min} - Y = 100,000 - 0,002 = 99,998 \text{ мм}$$

3) непрохідна сторона:

$$HE_{min} = D_{max} - H_1 = 100,035 - 0,004 = 100,031 \text{ мм}$$

$$HE_{max} = D_{max} + H_1 = 100,035 + 0,004 = 100,039 \text{ мм}$$

*Конструктивні вимоги.* Матеріал: інструментальна сталь (наприклад, ШХ15, 9ХС) з термообробкою до твердості HRC 58–62;

ручка калібра виконується згідно з рекомендаціями [6].

Поверхні: прохідна та непрохідна частини калібра мають бути поліровані з шорсткістю Ra 0,32 мкм.

Допуск форми: відхилення круглості та прямолінійності не повинні перевищувати 1/3 від поля допуску.

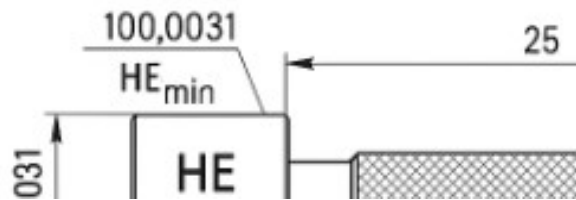


Рис. 4.3 – Калібр пробка для контролю отвору Ø100 H7

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 5.1 Заходи з охорони навколишнього середовища

Однією з основних умов забезпечення нормальної життєдіяльності людини є наявність чистого повітря з оптимальними параметрами мікроклімату, а саме: відповідним хімічним складом, температурою, відносною вологістю та швидкістю руху повітря. Відхилення цих показників від нормативних значень негативно впливають на стан здоров'я працівників, знижують працездатність та підвищують ризик виникнення професійних захворювань.

У виробничих приміщеннях під час експлуатації верстатів, машин та іншого технологічного обладнання, а також у процесі виконання технологічних операцій і перебування персоналу, можливе утворення надлишкової кількості тепла і вологи, а також виділення шкідливих газів, парів і пилу. Санітарними нормами проєктування промислових підприємств встановлено гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони та допустимі параметри мікроклімату, дотримання яких є обов'язковим.

Формування сприятливих метеорологічних умов у робочій зоні сприяє покращенню самопочуття працівників, підвищенню рівня безпеки праці та забезпеченню стабільної і високої продуктивності роботи. У зв'язку з цим технологічні процеси та виробниче обладнання повинні бути спроектовані і підібрані таким чином, щоб забезпечувати відсутність або мінімальне виділення в повітря приміщень, атмосферу та стічні води шкідливих речовин, пилу, надлишкового тепла і вологи, а також речовин з різким або неприємним запахом.

Для зменшення негативного впливу виробництва на навколишнє середовище та умови праці необхідно впроваджувати комплекс організаційних і технічних заходів. До таких заходів належать: заміна

шкідливих або небезпечних речовин менш шкідливими чи нешкідливими аналогами; використання вологих способів переробки порошкових матеріалів замість сухих; заміна пламеневого нагріву електричним; перехід від твердого та рідкого палива до газоподібного; застосування сучасних маловідходних та енергоощадних технологій.

Для створення нормативних параметрів мікроклімату в приміщеннях, а також для ефективного видалення шкідливих газів, парів і пилу необхідно правильно спроектувати та забезпечити надійну експлуатацію вентиляційних систем. Залежно від умов виробництва слід застосовувати природну, механічну або комбіновану (змішану) вентиляцію, а в місцях інтенсивного виділення шкідливих речовин — місцеві відсмоктувальні пристрої.

Окрім забруднення повітря, до шкідливих виробничих факторів належить також вібрація, яка виникає внаслідок роботи машин та механізмів. Тривалий вплив вібрації негативно позначається на нервовій, серцево-судинній та опорно-руховій системах людини. Тому з метою зменшення її впливу необхідно застосовувати віброгасні та вібропоглинальні пристрої, проводити своєчасне технічне обслуговування обладнання та дотримуватися раціональних режимів праці і відпочинку. Тривалий вплив вібрації негативно впливає на організм людини, зокрема на опорно-руховий апарат, нервову та серцево-судинну системи, а також може призводити до розвитку професійних захворювань.

Для захисту працюючих від шкідливого впливу вібрації застосовують комплекс технічних та організаційних заходів. До основних технічних засобів належать огорожувальні конструкції, віброізолюючі опори та прокладки, віброгасячі і вібропоглинаючі пристрої. Крім того, використовуються засоби автоматичного контролю і сигналізації, системи дистанційного керування технологічними процесами, що дозволяє зменшити час безпосереднього контакту працівника з джерелами вібрації.

Шум є одним з найбільш поширених шкідливих виробничих факторів. Він чинить негативний вплив на весь організм людини, передусім на центральну нервову та серцево-судинну системи, знижує концентрацію уваги, працездатність і може спричиняти професійну втрату слуху.

Для зменшення рівня шуму на шляху його поширення доцільно застосовувати звукоізолюючі та звукопоглинаючі конструкції, акустичні екрани, кожухи для шумного обладнання, а також глушники аеродинамічних шумів у вентиляційних та пневматичних системах. Додатково важливу роль відіграє правильне планування виробничих приміщень і раціональне розміщення джерел шуму.

Ультразвукові коливання, на відміну від чутних звуків, мають значно вищу частоту та не сприймаються органами слуху людини. Незважаючи на це, підвищені рівні ультразвуку можуть негативно впливати на центральну нервову систему, викликати функціональні порушення внутрішніх органів та загальне погіршення самопочуття.

Організаційно-профілактичні заходи захисту від шкідливої дії ультразвуку передбачають проведення інструктажів персоналу щодо характеру його впливу та способів захисту, вибір раціональних режимів праці та відпочинку, а також застосування засобів індивідуального захисту. За можливості ультразвукове обладнання слід розміщувати в ізольованих приміщеннях або забезпечувати його екранами.

Використання електромагнітного випромінювання в діапазоні радіочастот в електричних і електронних установках має значні технологічні переваги. Водночас систематичний вплив електромагнітних полів на організм людини у дозах, що перевищують допустимі рівні, може призводити до розвитку професійних захворювань. У результаті можливі функціональні зміни нервової, серцево-судинної, ендокринної та інших систем організму.

Для захисту персоналу від дії електромагнітних полів застосовують різноманітні інженерно-технічні та організаційні заходи. Основними з них є зменшення напруженості електромагнітного поля та густини потоку енергії, екранування робочих місць і обладнання, збільшення відстані між працівником та джерелом випромінювання, а також раціональне розміщення електроустановок у виробничому приміщенні.

Іонізуючі випромінювання, проникаючи в організм людини, здатні викликати тяжкі ураження тканин і органів, що може призводити до серйозних захворювань, втрати працездатності та, у крайніх випадках, до летальних наслідків. У зв'язку з цим роботи, пов'язані з джерелами іонізуючого випромінювання, повинні виконуватися з дотриманням суворих вимог радіаційної безпеки, використанням засобів колективного та індивідуального захисту, а також постійним дозиметричним контролем.

Захист персоналу від зовнішнього проникаючого іонізуючого випромінювання здійснюється з використанням основних принципів радіаційної безпеки. До них належать обмеження часу перебування працівників у зоні дії випромінювання, збільшення відстані між людиною та джерелом радіації, а також екранування джерел випромінювання за допомогою захисних матеріалів з високою поглинальною здатністю. Комплексне застосування зазначених заходів дозволяє суттєво знизити дозове навантаження на організм людини.

Дія електричного струму на організм людини проявляється у вигляді двох основних форм ураження: електричних травм та електричних ударів. Електричні травми включають опіки, металізацію шкіри, електроофтальмію та механічні ушкодження, тоді як електричні удари характеризуються загальним ураженням організму, порушенням роботи серцево-судинної та дихальної систем і можуть призводити до втрати свідомості або летального наслідку.

Заходи щодо запобігання електротравматизму спрямовані на усунення або мінімізацію ризику ураження електричним струмом. Основними з них є забезпечення недоступності струмоведучих частин для випадкового доторкання шляхом використання ізоляції та огорожень; застосування зниженої напруги в електроустановках; виконання захисного заземлення та занулення; використання пристроїв автоматичного відключення живлення у разі аварійних режимів; а також застосування засобів індивідуального захисту і проведення регулярних інструктажів персоналу.

До основних засобів колективного захисту, які широко застосовуються на машинобудівних підприємствах, належать огорожувальні пристрої для небезпечних зон обладнання, системи автоматичного контролю та сигналізації, запобіжні пристрої, засоби дистанційного керування технологічними процесами, гальмівні механізми, а також попереджувальні та заборонні знаки безпеки. Використання зазначених засобів у поєднанні з організаційними заходами забезпечує належний рівень безпеки праці та знижує ймовірність виникнення виробничого травматизму.

Важливу роль у системі охорони праці відіграє правильна організація робочих місць та дотримання ергономічних вимог. Робоче місце повинно бути спроектоване з урахуванням антропометричних, фізіологічних та психологічних особливостей людини. Раціональне розміщення обладнання, органів керування, інструменту та матеріалів дозволяє зменшити фізичне навантаження на працівника, знизити втому та підвищити ефективність і безпеку праці. Особлива увага приділяється забезпеченню зручної робочої пози, достатнього простору для рухів і безпечного доступу до елементів керування.

Значний вплив на умови праці має освітлення виробничих приміщень. Недостатнє або надмірне освітлення призводить до швидкої втоми зору, зниження точності виконання робіт та підвищення ризику травматизму. Тому освітлення повинно відповідати чинним нормативам і забезпечувати

достатній рівень освітленості робочої поверхні. У виробничих умовах доцільно застосовувати комбіноване освітлення, яке поєднує загальне та місцеве, з використанням світильників із захисними екранами для запобігання засліпленню.

Важливою складовою охорони праці є забезпечення пожежної безпеки на підприємстві. Джерелами пожежної небезпеки можуть бути електрообладнання, технологічні процеси з підвищеною температурою, легкозаймисті та горючі матеріали. Для запобігання пожежам необхідно дотримуватися вимог пожежної безпеки, передбачати використання вогнестійких матеріалів, справних електромереж і автоматичних систем захисту. Виробничі приміщення повинні бути оснащені первинними засобами пожежогасіння, такими як вогнегасники відповідного типу, пожежні крани та системи оповіщення.

Організаційні заходи пожежної безпеки включають проведення інструктажів і навчання персоналу правилам поведінки у разі виникнення пожежі, розробку планів евакуації та регулярне проведення тренувань. Чітке знання працівниками своїх дій у надзвичайних ситуаціях значно знижує ризик людських втрат і матеріальних збитків.

Особливу увагу в системі охорони праці слід приділяти санітарно-побутовому забезпеченню працівників. На підприємстві мають бути передбачені приміщення для відпочинку, гардеробні, душові та санітарні вузли, обладнані відповідно до встановлених норм. Наявність належних санітарно-побутових умов сприяє збереженню здоров'я працівників, зниженню рівня захворюваності та підвищенню загальної культури виробництва.

Не менш важливим є дотримання раціональних режимів праці та відпочинку. Тривала безперервна робота, особливо в умовах підвищеного шуму, вібрації або психоемоційного напруження, негативно впливає на організм людини. Запровадження регламентованих перерв, чергування видів

діяльності та обмеження тривалості роботи в шкідливих умовах дозволяє знизити втому та запобігти професійним захворюванням.

З метою зменшення впливу шкідливих і небезпечних факторів виробничого середовища широко застосовуються засоби індивідуального захисту. До них належать спеціальний одяг, взуття, захисні рукавиці, каски, окуляри, щитки, протишумні навушники та респіратори. Засоби індивідуального захисту повинні відповідати характеру виконуваних робіт, бути справними та використовуватися відповідно до інструкцій. Важливим є також контроль за своєчасною заміною та обслуговуванням таких засобів.

Система управління охороною праці на підприємстві передбачає постійний контроль за станом умов праці, аналіз виробничого травматизму та професійних захворювань, а також розробку і впровадження заходів з їх попередження. Регулярні перевірки технічного стану обладнання, дотримання технологічних регламентів і правил безпеки дозволяють своєчасно виявляти потенційно небезпечні ситуації та усувати їх.

Важливу роль у забезпеченні безпеки праці відіграє підготовка та навчання персоналу. Працівники повинні проходити вступний, первинний, повторний та позаплановий інструктаж з охорони праці, а також періодичне навчання та перевірку знань. Належний рівень обізнаності персоналу щодо небезпечних і шкідливих виробничих факторів, правил користування обладнанням та засобами захисту є запорукою зниження рівня травматизму.

Загалом, реалізація комплексу технічних, організаційних та санітарно-гігієнічних заходів з охорони праці забезпечує створення безпечних і комфортних умов роботи, збереження здоров'я працівників та зниження негативного впливу виробничої діяльності на навколишнє середовище. Дотримання вимог охорони праці є невід'ємною складовою ефективного функціонування сучасного машинобудівного підприємства та одним із ключових чинників сталого розвитку виробництва.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Groover M. P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. 7th ed. Hoboken : Wiley, 2020. 800 p.
2. Kalpakjian S., Schmid S. R. Manufacturing Engineering and Technology. 7th ed. Pearson Education, 2014. 1152 p.
3. Boothroyd G., Knight W. A. Fundamentals of Machining and Machine Tools. Boca Raton : CRC Press, 1989. 608 p.
4. Trent E. M., Wright P. K. Metal Cutting. 4th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2000. 446 p.
5. Shigley J. E., Mischke C. R., Budynas R. G. Mechanical Engineering Design. 10th ed. New York : McGraw-Hill, 2014. 1104 p.
6. Groover M. P. Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. 4th ed. Pearson, 2015. 816 p.
7. Oberg E. та ін. Machinery's Handbook. 30th ed. New York : Industrial Press, 2016. 2704 p.
8. Juvinall R. C., Marshek K. M. Fundamentals of Machine Component Design. 5th ed. Hoboken : Wiley, 2011. 912 p.
9. Yang S., Zhang G. (eds.). Precision Machining Process and Technology. Singapore : Springer, 2025. 620 p.
10. Dikshit M. K. та ін. (eds.). Advances in Manufacturing Engineering. Singapore : Springer, 2024. 540 p.
11. ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements. Geneva : ISO, 2015.
12. ISO 2768-1:1989 General tolerances — Part 1: Linear and angular dimensions. Geneva : ISO, 1989.
13. ISO 1302:2002 Geometrical Product Specifications (GPS) — Indication of surface texture. Geneva : ISO, 2002.
14. ISO 3685:1993 Tool life testing with single-point turning tools. Geneva : ISO, 1993.

15. ДСТУ ISO 9000:2015. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
16. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
17. ДСТУ ISO 2768-1:2018. Загальні допуски. Частина 1. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.
18. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
19. Мельничук П. П., Боровик А. І., Лінчевський П. А. Технологія машинобудування : навч. посіб. Житомир : ЖДТУ, 2009. 356 с.
20. Яковенко І. Є., Пермяков О. А., Фесенко А. В. Технологічні основи машинобудування : навч. посіб. Харків : НТУ «ХП», 2022. 412 с.
21. Яковенко І. Є., Пермяков О. А. Технологічні основи машинобудування. Лабораторний практикум. Харків : НТУ «ХП», 2024. 168 с.
22. Туташинський В. І. Технології сучасного виробництва : навч. посіб. Київ : КОНВІ ПРІНТ, 2021. 320 с.
23. Чумак М. Г. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. Київ : Либідь, 2000. 384 с.
24. Пахаренко В. Л., Марчук М. М., Пахаренко О. В. Обробка металів різанням : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2018. 298 с.
25. Чучман Ю. І. Технологія машинобудування : навч. посіб. Львів : Львівська політехніка, 2001. 280 с.
26. Вайнтрауб М. А., Засельський В. Й., Пополов Д. В. Технологія верстатних робіт. Київ : ІПТО НАПН України, 2015. 304 с.
27. Гоменюк Д. В., Романов Л. А., Шимановський М. М. Технології верстатних робіт. Житомир : Полісся, 2021. 260 с.

28. Добрянський С. С., Малафеев Ю. М. Технологічні основи машинобудування : метод. вказівки. Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2020. 120 с.

29. Технологія машинобудування : електронний навчальний курс / Хмельницький національний університет. Хмельницький, 2023.  
URL: <https://tm.khmnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/13/tehnologiya-mashynobuduvannya.pdf>

(дата звернення: 24.12.2025).

30. Дейрібо О. В. Основи технології машинобудування : навчальний посібник [Електронний ресурс]. Вінниця : ВНТУ, 2015.  
URL: [https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2025/Deribo\\_2015\\_P2\\_112.pdf](https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2025/Deribo_2015_P2_112.pdf)

(дата звернення: 24.12.2025).

31. Туташинський В. І. Основи машинознавства та технологій машинобудування : монографія [Електронний ресурс]. Київ, 2018.  
URL: <https://lib.iitta.gov.ua/715965>

(дата звернення: 24.12.2025).

32. Яковенко І. Є., Пермяков О. А., Фесенко А. В. Технологічні основи машинобудування : навчальний посібник [Електронний ресурс]. Харків : НТУ «ХП», 2022.  
URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/8b9dfb38-6ff9-4ae8-945f-ed84c3beef95>

(дата звернення: 24.12.2025).

33. Яковенко І. Є., Пермяков О. А. Технологічні основи машинобудування. Лабораторний практикум [Електронний ресурс]. Харків : НТУ «ХП», 2024.  
URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/e6aba0eb-10fa-4582-b897-32b107ebb606>

(дата звернення: 25.12.2025).

34. Пахаренко В. Л., Марчук М. М., Пахаренко О. В. Технологія конструкційних матеріалів та обробка металів різанням : навч. посіб.

[Електронний ресурс]. Рівне : НУВГП, 2018.  
URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/9347>

(дата звернення: 25.12.2025).

35. Гнатуш В. А. Тренди світового ринку матеріалообробного обладнання // *Mechanics and Advanced Technologies*. 2022. Т. 6, № 3 [Електронний ресурс].

URL: <https://ela.kpi.ua/collections/d37391d0-da96-420f-b6e0-6ed5f9e31169>

(дата звернення: 25.12.2025).

36. Journal of Manufacturing Processes [Electronic resource]. Elsevier.

URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-manufacturing-processes>

(date of access: 25.12.2025).

37. International Journal of Machine Tools and Manufacture [Electronic resource]. Elsevier.

URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-machine-tools-and-manufacture>

(date of access: 25.12.2025).

38. Journal of Materials Processing Technology [Electronic resource]. Elsevier.

URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-materials-processing-technology>

(date of access: 25.12.2025).

39. CIRP Annals – Manufacturing Technology [Electronic resource].

URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/cirp-annals>

(date of access: 25.12.2025).

40. Procedia Manufacturing [Electronic resource]. Elsevier.

URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/procedia-manufacturing>

(date of access: 25.12.2025).