

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

Механіко-машинобудівний факультет  
Кафедра технологій машинобудування та матеріалознавства

*До записки*

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
кваліфікаційної роботи ступеня магістра

Здобувача вищої освіти Почтовика Владислава Анатолійовича  
(ПІБ)

академічної групи 131М-23Н-1 ММФ  
(шифр)

спеціальності 131 Прикладна механіка

за освітньо-науковою програмою «Наскрізний інжиніринг  
машинобудівного виробництва»

на тему: «Розробка автоматизованого процесу виготовлення та  
дослідження міцності деталі «Вал шліцьовий» методами комп'ютерного  
моделювання»

Наказ ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 28.04.25 №317-с

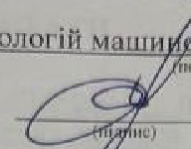
Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Алексееенко С.В.	84	<i>добре</i>	<i>[Підпис]</i>
розділів:				<i>[Підпис]</i>
Аналітичний	Алексееенко С.В.	84	<i>добре</i>	<i>[Підпис]</i>
Технологічний	Алексееенко С.В.	84	<i>добре</i>	<i>[Підпис]</i>
Спеціальний	Алексееенко С.В.	84	<i>добре</i>	<i>[Підпис]</i>
Науково- дослідницький	Алексееенко С.В.	84	<i>добре</i>	<i>[Підпис]</i>
Рецензент	<i>Сазанішвілі З.В.</i>	82	<i>добре</i>	<i>[Підпис]</i>
Нормоконтролер	Рубан В.М.	84	<i>добре</i>	<i>[Підпис]</i>

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

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

ЗАТВЕРДЖЕНО:  
завідувач кафедри

технологій машинобудування та матеріалознавства

  
(повна назва)  
(підпис)

В.А. Дербоба  
(ініціали та прізвище)

« 15 » 01 2025 року

## ЗАВДАННЯ на кваліфікаційну роботу ступеня магістра

здобувачу вищої освіти Почтовику Владиславу Анатолійовичу  
(прізвище та ініціали)

академічної групи 131М-23Н-1 ММФ  
(шифр)

спеціальності 131 Прикладна механіка

спеціалізації за освітньо-науковою програмою «Наскрізний інжиніринг  
машинобудівного виробництва»

### 1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

Наказ ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 28.04.25 №317-с

### 2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБИТ

Об'єкт досліджень – автоматизований технологічний процес механічної обробки та характеристики міцності деталі типу «Вал шліцьовий» в умовах серійного виробництва.

Предмет досліджень – методи комп'ютерного моделювання при розробці технологічного процесу виготовлення та дослідженні міцності деталі «Вал шліцьовий».

Мета – розробити та оптимізувати автоматизований технологічний процес виготовлення деталі «Вал-шліцьовий» із використанням сучасних методів комп'ютерного моделювання і дослідити її міцність з метою забезпечення її надійності в експлуатаційних умовах.

Вихідні дані для проведення роботи – 1) робоче креслення деталі «Вал шліцьовий»; 2) річна потреба у вузлах, що включають одну задану деталь – 310 штук; 3) заготівка – круглий прокат згідно ДСТУ 2590-98; 4) стандарти Єдиної системи технологічної документації, нормативи режимів різання, матеріальні та трудові нормативи; 5) розрахункові навантаження: крутний момент – 30 Н·м, радіальне навантаження – 300 Н.

### 3 ОЧКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Новизна – удосконалено підхід до проектування автоматизованого технологічного процесу виготовлення деталей типу «Вал шліцьовий» шляхом інтеграції комп'ютерного 3D-моделювання, САМ-програмування та інженерного аналізу міцності у єдиний цифровий цикл. Застосовано багатопозиційну обробку на верстатах з ЧПК для досягнення максимальної точності.

Практична цінність – розроблений процес дозволяє підвищити ефективність серійного виробництва шляхом зменшення кількості металорізальних верстатів, скорочення тривалості обробки, підвищення точності виготовлення, забезпечення гнучкого переналаштування під схожі вироби; результати роботи можуть бути впроваджені на підприємствах машинобудування.

### 4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Результати роботи мають забезпечити повне технологічне обґрунтування процесу виготовлення деталі «Вал шліцьовий» у серійному виробництві з використанням сучасного автоматизованого обладнання та програмного забезпечення. Необхідно розробити тривимірну модель деталі, керуючу програму для верстата з ЧПК, а також провести комп'ютерне дослідження її міцності з аналізом напружено-деформованого стану.

### 5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок-кінець)
Аналітичний розділ	29.01.2025-25.02.2025
Технологічний розділ	26.02.2025-24.03.2025
Спеціальний розділ	25.03.2025-21.04.2025
Науково-дослідницький розділ	22.04.2025-19.05.2025

Завдання видано


  
(підпис керівника)

С.В. Алексеєнко  
(ініціали та прізвище)

Дата видачі 15 січня 2025 р.

Дата подання до екзаменаційної комісії 9 травня 2025 р.

Прийнято до виконання

  
(підпис зловуначчя вищої освіти)

В.А. Почтовик  
(ініціали та прізвище)

## ЗМІСТ

Вступ	6
1. Аналітичний розділ	7
1.1 Характеристика об'єкта виробництва	7
1.2 Аналіз технологічності конструкції деталі	8
2. Технологічний розділ	11
2.1 Визначення типу виробництва і форма його організації	11
2.2 Обґрунтування форми і способу отримання заготовки	12
2.3 Розробка технологічного маршруту виготовлення деталей	12
2.4 Розрахунок припусків на механічну обробку	15
2.5 Детальна розробка технологічних операцій	17
2.6 Розрахунок автоматизованої технології обробки	26
3. Спеціальний розділ	31
3.1 Розрахунок керуючої програми для верстата з програмним керуванням	31
4. Науково-дослідницький розділ	38
4.1 ANSYS Static Structural	38
4.2 Підготовка необхідних даних для симуляції	38
4.3 <i>Математична постановка задачі</i>	39
4.4 Побудова моделі	41
4.5 Розрахунок характеристик міцності деталі	43
Висновки	51
Перелік посилань	52
Додаток А	55
Технологічна документація	56
Кресленики	56

## РЕФЕРАТ

### Тема дипломного проекту:

«Розробка автоматизованого процесу виготовлення та дослідження міцності деталі «Вал шліцьовий» методами комп'ютерного моделювання».

Випускна кваліфікаційна робота магістра виконана на \_\_\_ аркушах формату А4, складається з 4 розділів. Креслення виконані на \_\_\_ аркушах формату А2 і 1 аркуш формату А1. Додатки до розрахунково-пояснювальної записці складають \_\_\_ арк. формату А4.

Об'єктом розробки є автоматизований технологічний процес обробки деталі - «Вал шліцьовий».

Мета дипломного проекту - розробити та оптимізувати автоматизований технологічний процес виготовлення деталі «Вал-шліцьовий» із використанням сучасних методів комп'ютерного моделювання і дослідити її міцність з метою забезпечення її надійності в експлуатаційних умовах.

Методи досліджень, використані в дипломному проекті,

- Тривимірне твердотільне моделювання;
- Аналіз структурних складових технологічного процесу;
- Синтез структурних складових технологічного процесу.

Результати дипломного проектування позитивні:

досягнуто скорочення трудомісткості обробки деталі «Кулак» на 28% за рахунок впровадження поєднання ряду операцій в одну і впровадження обробного центру, зміна заводських режимів різання на більш прогресивні, скорочення допоміжного часу.

Новизна розробок полягає в тому, що: удосконалено підхід до проектування автоматизованого технологічного процесу виготовлення деталей типу «Вал шліцьовий» шляхом інтеграції комп'ютерного 3D-моделювання, САМ-програмування та інженерного аналізу міцності у єдиний цифровий цикл. Застосовано багатопозиційну обробку на верстатах з ЧПК для досягнення максимальної точності.

Висновки: Завдання на дипломний проект виконано в повному обсязі і в строк.

Ключові слова: технологічний процес, вал, пристосування, інструмент, режими різання, програма, верстат, ЧПК.

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

## 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Технічна характеристика об'єкта виробництва

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

шестерні репкової передачі.

Для захисту робочої частини валу від пилу і впливу вологості навколишнього середовища, характерних для виробничих приміщень,

застосовуються ущільнювальні пристрої. Тому шийки валу мають ділянки поверхні з низьким параметром шорсткості за незначної точності розміру.

Робочі поверхні валу призначені для створення нерухомих сполучень. Тому особливих вимог до їхньої твердості та зносостійкості не пред'являється. Для забезпечення міцності деталі достатньо механічних характеристик, які опосередковано задаються твердістю матеріалу – 310-340 НВ

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

На етапі проектування технологічного процесу механічної обробки, коли конструкторські документи вже затверджені і не підлягають радикальним змінам,

доцільно проводити якісний аналіз технологічності конструкції деталі з метою узагальнено, на підставі досвіду виконавця, встановити ступінь відповідності між показниками якості та прийнятими умовами виробництва. Кількісну оцінку виконують за деякими показниками, щоб охарактеризувати ступінь задоволення вимог до технологічності конструкції.

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

Основною характеристикою валів, що визначає технологічність конструкції, є жорсткість, яку оцінюють за величиною відношення  $L/d_{\text{пр}}$ ,

де:  $L$  – довжина валу, мм;

$d_{\text{пр}}$  – наведений діаметр валу, який визначається за формулою:

$$d_{\text{пр}} = \frac{\sum_1^n d_i \cdot l_i}{L} = \frac{25 \cdot 110 + 32,5 \cdot 40 + 55 \cdot 46 + 5 \cdot 23 + 93 \cdot 18 + 25}{320} = 27,3 \text{ мм} \quad (1.3)$$

де:  $d_i$  – діаметр  $i$ -того ступеня валу, мм;

$l_i$  – довжина  $i$ -того ступеня валу, мм.

В даному випадку відношення дорівнює 11,7, що більше рекомендованого значення (10). Отже, для ефективної механічної обробки без обмеження режимів різання та досягнення економічно обґрунтованої точності, необхідно застосовувати схеми базування для нежорстких валів.

Основні конструкторські бази деталі – дві циліндричні поверхні діаметром 25 мм з допуском шостого квалітету та граничними відхиленнями форми та розташування поверхонь по шостому ступені точності, відповідають службовому призначенню поверхонь. Їх обробка не збільшує технологічну собівартість виготовлення деталі.

Разом з тим наявність двох поруч розташованих поверхонь з лівого торця деталі номінальним діаметром 25 мм з різними полями допусків  $f9$  і  $d10$ , погіршують технологічність конструкції. Тому без шкоди для функціонального призначення поверхонь доцільно призначити одне поле допуску –  $d10$ .

Застосований матеріал забезпечує виконання вимог до механічних властивостей поверхонь і деталі в цілому і має хороші технологічні характеристики як при обробці тиском, так і різанням.

Конструкція валу дозволяє вести обробку у центрах, тобто забезпечити суміщення технологічних і вимірювальних баз, а також виконати вимогу сталості баз, що гарантує співвісне розташування робочих поверхонь валу.

Двостороннє розташування уступів і співвідношення діаметрів щаблів сприятливі для продуктивної токарної обробки та рівномірної концентрації операцій.

Співвідношення квалітетів і параметрів шорсткості у більшості оброблюваних поверхонь є оптимальним. Таким чином, технологічність конструкції деталі «Вал шліцьовий» після якісного аналізу можна оцінити як хорошу за основними показниками.

## 2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Встановлення виробничої програми випуску деталі

Виробнича програма випуску деталей встановлюється залежно від річної потреби виробів та організаційно-технічних умов збирання. На початковому етапі проектування технологічних процесів виготовлення деталей, що входять у виріб, річна виробнича програма випуску визначається за такою формулою:

$$N = N_v \cdot q \cdot \left(1 + \frac{h}{100}\right). \quad \text{шт/год.} \quad (1.1)$$

де:  $N_v$  – річна програма випуску виробів;

$q$  – кількість деталей цього найменування одному виробі;

$h$  – відсоток деталей, призначених запасні частини.

Річна потреба у вузлах, що включають одну задану деталь, становить 310 штук. Враховуючи умови роботи деталей, відсоток деталей, призначених на запасні частини, повинен бути 1,5%. Підставивши ці дані у формулу 1.1, отримаємо:

$$N = 310 \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{1,5}{100}\right) = 314,7 \text{ шт}$$

Приймаємо річну програму випуску деталей 315 штук.

Одним із показників, що характеризують серійне виробництво, є величина партії деталей, що одночасно запускаються у виробництво. Її величина визначається за такою формулою:

$$n = \frac{N \cdot a}{\Phi} = \frac{315 \cdot 12}{254} = 14,9 \text{ шт} \quad (1.2)$$

де:  $a$  – періодичність запуску деталей у виробництво, днів. Можливі значення – 3, 6, 12, 24. Для середньосерійного виробництва приймаємо, що запас деталей на складі забезпечує роботу складального цеху на 6 днів;

$\Phi$  – число робочих днів у році, 254.

Приймаємо кількість деталей у партії 15 шт. У цьому розмір партії має бути кратним річній програмі випуску.

### 2.2 Вибір заготовки

Для раціонального вибору заготовки необхідно одночасно враховувати призначення та конструкцію деталі, технічні вимоги, масштаб та серійність випуску, а також економічність виготовлення. Вибрати заготовку – значить

встановити спосіб її отримання, призначити припуски на обробку кожної поверхні, розрахувати розміри та вказати вимоги до точності виготовлення.

Оскільки на робочому кресленні деталі не зазначений вид заготовки та відсутні вимоги до структури матеріалу, пов'язані зі способом її отримання, розглянемо найбільш поширений для прийнятої річної програми випуску вид заготовки – сортовий прокат.

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

### 2.3 Розробка технологічного маршруту виготовлення деталі

Під час розробки маршрутної технології виготовлення деталі орієнтуємося на типовий технологічний маршрут виготовлення середніх валів.

Кількість технологічних операцій, їх концентрація визначатиметься методами обробки поверхонь, які призначені виходячи з необхідного квалітету розміру, параметра шорсткості та умов оброблюваності низьколегованих сталей. Перелік оброблюваних поверхонь та методи обробки, які можуть забезпечити виконання вимог креслення, наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Вид поверхні, розмір, мм	Квалітет	Шорсткість Ra, мкм	Метод обробки поверхні
Зовнішня $\varnothing 46h14$ , $\varnothing 30h14$ , $\varnothing 23h14$ мм	14	12,5	Точіння одноразове

Зовнішня $\varnothing 40f7$ мм	7	0,8	Точіння чорнове Точіння чистове Шліфування попереднє
Зовнішня $\varnothing 25j_s6$ мм	6	0,8	Точіння чорнове Точіння чистове Шліфування попереднє Шліфування остаточне
Зовнішня $\varnothing 25d10$ мм	10	3,2	Точіння одноразове Шліфування
Зовнішня M18x1-6h	-	6,3	Точіння одноразове Нарізання різьблення різцем
Зовнішня шліцьова	-	3,2	Фрезерування одноразове
Торцеві 320j_s15	15	12,5	Фрезерування одноразове
Торцеві 55j_s15; 25j_s15, 20j_s15 мм	15	12,5	Точіння одноразове

Технологічними базами для обробки всіх поверхонь деталі будуть торці валу та центрові отвори, що обробляються на першій операції. У разі серійного виробництва можливе використання як універсальних, так і спеціальних верстатів. Мінімальну трудомісткість операції при високій продуктивності і незначних витратах на переналагодження забезпечить використання фрезерно-центрувального верстата послідовної дії.

Враховуючи розміри кінцевих ступенів валу та вид заготовки, що передбачає видалення значного напуску, а також прагнучи збільшити продуктивність операції, чорнове точіння буде виконуватись на двох різних операціях. Для цієї мети може використовуватися як токарний багаторізцевий копіювальний напівавтомат для багатопрохідної обробки, так і токарний центровий верстат з ЧПУ.

Чистове точіння опорних шийок валу та канавок виконується на окремій операції. Крім центрових отворів, технологічною базою є правий торець деталі. При цьому забезпечується вільний доступ до поверхонь з лівого торця та можливість обробки без переустановки опорної шийки діаметром 25j\_s6 мм зворотним ходом супорта. На цій операції доцільно використовувати верстат з ЧПУ, враховуючи схему обробки, жорсткість деталі, форму і розташування канавок.

Обробка шліцевої поверхні, для забезпечення рівномірного розташування шліців, буде здійснюватися методом обкату на шліцефрезерному верстаті до шліфування опорних шийок.

Оскільки опорні шийки валу, що піддаються шліфуванню, мають один номінальний розмір, їх обробка, як попередня, так і остаточна, може здійснюватися на одній операції з переустановкою заготовки. Оскільки на операції попереднього шліфування обробляються досить протяжні поверхні діаметрами 25d10 і 40f7, необхідно застосовувати метод шліфування з поздовжньою подачею, а з іншого боку метод врізного шліфування. Для цього доцільно використовувати верстат із ЧПУ.

Технологічний процес виготовлення деталі завершується контрольною операцією, де здійснюється комплексний контроль розмірів поверхонь та їх взаємного розташування. Пропонований маршрут наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

№ оп.	Найменування операції	Короткий зміст операції	Модель верстата
1	Фрезерно-центрувальна	Фрезерування торців, свердління центрових отворів з двох сторін	AVIA Turn 63 з ЧПК
2	Токарна з ЧПУ	Попередня токарна обробка з лівого торця	
3	Токарна з ЧПУ	Попередня токарна обробка з правого торця	
4	Токарна з ЧПУ	Чистове точіння опорних шийок та канавок	
5	Шліцефрезерна	Фрезерування шести шліців	
6	Фрезерна	Фрезерування паза шпонки	
7	Покрівельно шліфувальна	Попереднє шліфування поверхонь $\varnothing 25d10$ $\varnothing 25j_s6$ мм з перевстановленням заготовки	E-Tech EGP CNC
8	Круглошліфувальна	Остаточне шліфування опорних шийок $\varnothing 25j_s6$ мм з перевстановленням заготовки	
9	Контрольна	Комплексний контроль деталі.	-

## 2.4 Розрахунок припусків на механічну обробку

Припуски на механічну обробку значною мірою впливають на технологічну собівартість виготовлення деталі. Видалення надмірного припуску пов'язане зі збільшенням машинного часу на чорнову обробку як у разі виконання додаткових обдирних проходів, так і за рахунок зниження режимів різання у разі значної глибини різання. При цьому підвищується витрата різального інструменту та загальні витрати на експлуатацію робочого місця.

Припуски на три поверхні призначаємо статистичним (табличним) методом. І тут загальний припуск визначається розміром прокату, а припуск на обробку, наступну після чорнової, за таблицями, які у довідковій літературі [10]. Методику розрахунку проілюструємо для зовнішньої поверхні діаметром 25<sub>js6</sub> мм.

Загальний припуск на діаметр дорівнює різниці між мінімальним розміром прокату та номінальним розміром поверхні ( $49 - 25 = 24$  мм), допуск на розмір заготовки 1,4 мм (див. розділ 3). На чистове точіння рекомендується припуск 1,1 мм діаметр [10, табл.1], на шліфування – 0,3 мм [10, табл.2]. Оскільки згідно з табл. 4.1 для обробки цієї поверхні передбачено чорнове та чистове шліфування, рекомендований припуск поділяємо відповідно до рекомендацій довідкової літератури – 0,2 мм на чорнове шліфування та 0,1 мм – на чистове.

Припуск на чорнове точіння визначається як різницю між загальним припуском на механічну обробку та сумою операційних припусків.

$$Z_{\text{чорн}} = Z_{\text{заг}} - Z_{\text{точ.чист}} - Z_{\text{шліф.чорн}} - Z_{\text{шліф.чист.}} = 24 - 1,1 - 0,2 - 0,1 = 22,6 \text{ (мм)} \quad (5.1)$$

Розрахунковий розмір для останнього переходу (шліфування) приймається рівним мінімальному розміру за кресленням (24,9935 мм). Для наступного переходу він визначається шляхом додавання призначеного припуску (25,0935 мм). Аналогічні обчислення виконуються всім переходів МОП. Отримані значення приймають як мінімальний операційний розмір після округлення з урахуванням значущих цифр технологічного допуску. Максимальні операційні розміри від мінімальних на величину допуску.

Граничні припуски для кожного переходу МОП визначаються шляхом віднімання граничних розмірів на двох сусідніх переходах:

$$\text{для чорнового точіння: } Z_{\text{чорн. min}} = 51,00 - 26,40 = 24,60 \text{ (мм)}$$

$$Z_{\text{чор. max}} = 52,40 - 26,73 = 25,67 \text{ (мм)}$$

для чистового точіння:  $Z_{\text{чист. min}} = 26,400 - 25,294 = 1,106 \text{ (мм)}$

$$Z_{\text{чист. max}} = 26,730 - 25,378 = 1,352 \text{ (мм)}$$

для шліф. чорного:  $Z_{\text{шліф. чорн. min}} = 25,294 - 25,094 = 0,200 \text{ (мм)}$

$$Z_{\text{шліф. чорн. max}} = 25,378 - 25,127 = 0,251 \text{ (мм)}$$

для шліф. чистового:  $Z_{\text{шліф. чист. min}} = 25,094 - 24,993 = 0,101 \text{ (мм)}$

$$Z_{\text{шліф. чист. max}} = 25,127 - 25,006 = 0,121 \text{ (мм)}$$

Правильність обчислень перевіряється за такою формулою:

$$Z_{i \text{ max}} - Z_{i \text{ min}} = \delta_{i-1} - \delta_i \quad (5.2)$$

Для цього розрахунку:  $27394 - 26,007 = 1400 - 13$  або  $1387 = 1387$ .

Розрахунок міжопераційних розмірів та граничних припусків на механічну обробку торців, пов'язаних розміром  $320j_s 15$  мм представлені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Метод обробки поверхні (МОП)	Припуск, мм	Розрахунковий розмір, мм	Допуск, мкм	Розмір, мм		Припуск, мкм	
				$d_{\text{min}}$	$d_{\text{max}}$	$Z_{\text{min}}$	$Z_{\text{max}}$
Зовнішня циліндрична діаметром $25 j_s 6 \pm 0.0065$ мм							
Заготовка	-	48,9935	1400	49	50,4	-	-
Точіння чорнове	22,6	26,3935	330	26,40	26,73	22,60	23,67
Точіння чистове	1,1	25,2935	84	25,294	25,378	1,106	1,352
Шліфування чорнове	0,2	25,0935	33	25,094	25,127	0,2	0,251
Шліфування чистове	0,1	24,9935	13	24,993	25,006	0,101	0,121
Торцеві, пов'язані розміром $320 \pm 1,15$ мм							
Заготовка	-	325,85	3200	325,9	329,1	-	-
Фрезерування торців	7	318,85	2300	318,9	321,2	7	7,9

## 2.5 Детальна розробка технологічних операцій

Основна мета детальної розробки технологічної операції – розробка технологічної документації, що містить повну інформацію про зміст операції, її технологічне та метрологічне оснащення, трудовитрати. Вихідними даними, що визначають послідовність операцій та їх призначення, є технологічний маршрут, наведений у таблиці 4.2. Призначення режимів різання, вимог до точності розмірів здійснюємо на підставі результатів розрахунку міжопераційних припусків та розмірів, наведених у таблицях 5.1.

Виготовлення деталі «Вал» передбачає 8 операцій механічної обробки. Розрахунок режимів різання виконаємо для фрезерно-центрувальної та шліцефрезерної операцій. Результати детальної розробки інших операцій та дані для заповнення технологічної документації наведено у таблиці 6.1.

### Операція 05, Фрезерно-центрувальна

Операція виконується на фрезерно-центрувальному верстаті моделі AviaTurn 63 і включає два технологічні переходи, що виконуються послідовно. Заготовка встановлюється у спеціальному пристосуванні при верстаті і базується на зовнішній циліндричній поверхні діаметром 50 мм і лівому торцю. Опорний елемент пристрою, призначений для базування по торцю, відводиться після закріплення заготовки.

На першому технологічному переході одночасно фрезеруються два торці. Використовуються дві торцеві фрези зі швидкорізальної сталі діаметром 63 мм за ДСТУ 9304, ліва 2210-0072 та права 2110-0071. Інструменти встановлюються на двох однакових оправках К2.478.000-02

На другому технологічному переході виконується свердління центрального отвору діаметром 2 мм форми А, глибиною 4,5 мм комбінованим центровочним свердлом зі швидкорізальної сталі за ДСТУ 14952. Свердло кріпиться у цанговому патроні К2.475.000-01 В якості мастильно-охолоджуючої рідини використовується 2-5% емульсія НГЛ 205.

## Характеристика верстата AviaTurn 63

Характеристика	Одиниці вимірювання	Значення
Максимальна довжина точіння	мм	1400
Відстань між центрами	мм	1450
Максимальний діаметр оброблюваної заготовки над станіною	мм	770
Максимальний діаметр обробки над поверхнею каретки	мм	630
Максимальний діаметр оброблюваного прутка	мм	90
Хід по осі Z	мм	1440
Хід по осі X	мм	-20/405
Максимальний діаметр оброблюваної заготовки над супортом	мм	550
Шпиндель		Виробництва AVIA
Шпиндель ремінний привід		Зубчасті ремені
Горець (фланець) шпинделя		A2-8
Діаметр отвору в шпинделі	мм	105
Діаметр самоцентрованого патрону (3-кулачкового) BISON або SMW	мм	400 (діаметр отвору в патроні 120)
Максимальна частота обертання шпинделя	об/хв	2800
Постійна потужність головного двигуна, S1	кВт	45
Найбільший крутний момент шпинделя	Нм	1266
Силова орієнтація шпинделя		Серво

Осі X/Z		Привід прямий
Швидкість швидких настановних переміщень по осях X	м/хв	24
Швидкість швидких настановних переміщень по осях Z	м/хв	24
Точність без оптичних лінійок		
Точність позиціонування / повторюваності на повний хід по осях X	мм	0,005/0,005
Точність позиціонування / повторюваності на повний хід по осях Z	мм	0,005/0,002
Система керування верстатом		ЧПК Fanuc 0i-TF Plus MGi
Роликові напрямні посилені		Кочення
Ширина напрямних	мм	50
ШВП і прямий привід від двигуна на гвинт		Пластична муфта
Кут нахилу станіни	°	45
Серво револьвер	Тп	VDI 50
Кількість інструменту в револьверній голівці	шт	12
Комплект різцетримачів	Комплект	Включений
Перетин державок у револьверній голівці (ШхВ)	-	32x32
Діаметр борштанги	м	40/50/60
Точність позиціонування револьвера	м	0,002

Призначення режимів різання виконуємо за методикою, наведеною в джерелі [9]. Матричне значення подачі при фрезеруванні торцевими фрезами вуглецевих сталей приймається 0,15 мм/зуб. Глибина різання приймається рівною максимальному припуску на обробку торців – 3,95 мм (див. табл. 5.1). Ширина фрезерування визначається розміром поперечного перерізу прокату і становить 50 мм. Матричне значення подачі уточнюється в залежності від ступеня жорсткості технологічної схеми та умов обробки, що змінюються за формулою:

$$S_Z = S_{ZT} \cdot K_{S_Z} = S_{ZT} \cdot K_{S_{Zc}} \cdot K_{S_{Zi}} \cdot K_{S_{ZR}} \cdot K_{S_{Z\phi}} = 0,15 \cdot 0,6 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 1 = 0,045 \text{ мм/зуб, (6.1)}$$

де:  $S_{ZT}$  - матричне значення, мм/зуб;

$K_{S_{Zc}}$  - коефіцієнт, що враховує технологічні умови обробки (по таблиці 108 ст. 299-301 встановлюється шифр типової схеми обробки (IV), потім за таблицею 109 - коефіцієнт  $K_{S_{Zc}} = 0,6$ );

$K_{S_{Zi}}$  - коефіцієнт, що враховує матеріал фрези (табл. 114 ст. 305);

$K_{S_{ZR}}$  - коефіцієнт, що враховує шорсткість обробленої поверхні;

$K_{S_{Z\phi}}$  - коефіцієнт, що враховує вид обробленої поверхні.

Визначаємо матричне значення швидкості різання ( $V_T$ ) залежно від діаметра фрези, глибини фрезерування та уточненого значення подачі ( $S_Z$ ).

$$V_T = 203 \text{ м/хв.}$$

Табличне значення швидкості різання уточнюється в залежності від ступеня жорсткості технологічної схеми і умов обробки, що змінюються за формулою:

$$V = V_T \cdot K_{Vc} = V_T \cdot K_{Vc} \cdot K_{Vm} \cdot K_{Vi} \cdot K_{Vn} \cdot K_{Vo} \cdot K_{V\phi} \cdot K_{VB} = 203 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 1 = 136,4 \text{ м/хв} \quad (6.2)$$

де:  $V_T$  – матричне значення швидкості;

$K_{Vc}$  - коефіцієнт, що враховує технологічні умови обробки (по таблиці 108 ст. 299-301 встановлюється шифр типової схеми обробки, потім за таблицею 109 - коефіцієнт  $K_{Vc} = 0,7$ );

$K_{Vm}$  - коефіцієнт, що враховує марку матеріалу, що обробляється (0,8);

$K_{Vi}$  - коефіцієнт, що враховує матеріал інструменту (1,0);

$K_{Vn}$  - коефіцієнт, що враховує стан поверхні, що обробляється (1,0);

$K_{Vo}$  - коефіцієнт, що враховує умови обробки (1,2);

$K_{V\phi}$  - коефіцієнт, що враховує головний кут у плані (1,0);

$K_{VB}$  - коефіцієнт, що враховує відношення фактичної ширини фрезерування до нормативної (1,0).

Розраховуємо частоту обертання фрези ( $n$ ), що забезпечує необхідну швидкість різання:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D_{\phi}} = \frac{1000 \cdot 136,4}{3,14 \cdot 63} = 689,5 \text{ об/хв} \quad (6.3)$$

де:  $V$  – рекомендована швидкість різання;

$D_{\phi}$  – діаметр фрези, мм.

Розрахункове значення  $n$  порівнюється з паспортними даними верстата. Для подальших розрахунків приймається найближче менше з низки частот обертання шпинделя. 552 об/хв, оскільки збільшувати розрахунковий параметр можна не більше, ніж на 5%. Тоді розрахункова подача фрези з 14 зубами складе 348 мм/хв і буде забезпечена за рахунок безступінчастого регулювання.

Визначаємо основний час на виконання переходу за формулою:

$$T_o = \frac{L_{px}}{S_{x6}} = \frac{l + l_1 + l_2}{S_{x6}} = \frac{65 + 1,5 + 0,5}{348} = 0,19 \text{ (хв)} \quad (6.4)$$

де:  $l$  - довжина обробки (65);

$l_1$  - врізання (1,5);

$l_2$  - перебіг (0,5).

На другому технологічному переході виконується свердління двох центрових отворів діаметром 2 мм. Розрахунок режимів різання виконаний за методикою, наведеною в [9]. Результати розрахунку обох технологічних переходів даної операції наведено у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

Перехід	$t$ , мм	$S_T$ , мм/об	$S_P$ , мм/об	$V_T$ , м/хв	$V_P$ , м/хв	$n$ , об/хв	$S_{CT}$ , мм/хв	$L_{px}$ , мм	$T_o$ , хв
Фрезерування	4	0,15	0,045	203	136,4	552	348	67	0,19
Свердління	1,0	0,06	0,037	32	16,9	1600	59	5	0,09

### Операція 10, Токарна з ЧПК

Операція виконується на центровому токарно-копіювальному напівавтоматі моделі AviaTurn 63 (рис.3), оснащеному чотирьохпозиційним копінним пристроєм, двопозиційною револьверною головкою та поперечним супортом.



Рис.3 Токарний оброблювальний центр AviaTurn 63

Заготовка базується на центрах. Задній центр - А-1-5-НП, що обертається, ЧПУ ДСТУ 8742. Крутний момент передається трикулачковим паводковим патроном з плаваючим центром моделі НУ.2516.100. Інструмент встановлений в одній позиції РГ та на поперечному супорті. Охолоджуюча рідина - 2-5% емульсія НГЛ 205. Зміст операції:

1) з використанням трьох позицій копірного пристрою здійснюється видалення напуску та точіння циліндричних поверхонь діаметрами  $46_{-0,62}$ ,  $41_{,7-0,39}$ ,  $30_{-0,52}$  та  $26_{,73-0,33}$  мм. Ріжучий інструмент – лівий різець з механічним кріпленням багатограних непереточуваних пластин (БНТП) з твердого сплаву Т15К6 2102-0306 21151 тип 4, з головним кутом у плані  $95^\circ$ , встановлюється в першій позиції РГ;

2) з поперечного супорта здійснюється підрізування торця у розмір  $227 \pm 0,36$  мм та точіння двох фасок  $2 \times 45^\circ$ . Застосовується багатоінструментна налагодження з використанням двох різців з напайними пластинами з твердого сплаву Т15К6. Різець 2112-0037 в результаті спеціального заточування забезпечує підрізування торця і точіння фаски в кінці робочого ходу. Інший прохідний прямий різець 2100-0469 призначений для точіння фаски з правого торця деталі.

#### Операція 15, Токарна з ЧПК

Операція оснащується аналогічно до попередньої. Вона призначена для попередньої токарної обробки деталі з правого торця.

#### Операція 20 Шліцефрезерна

Операція виконується на верстаті моделі AviaTurn 63. Деталь базується в двокулачковому патроні самоцентру 7102-0011 встановлюваному в шпинделі виробу і підтискається заднім центром 7032-000031 Для збільшення жорсткості застосовується люнет.

Фрезерування шести шліців здійснюється методом обкату черв'ячної чистової фрезою для шліцевих валів з прямобічним профілем D6x21x25-d10-C

Контроль оброблених поверхонь здійснюється комплексним калібром-пробкою. Як мастильно-охолоджувальну рідину використовується масло індустріальне І12А

Розрахунок режимів різання полягає у призначенні подачі фрези на один оборот заготовки та швидкості різання.

Враховуючи характер обробки, чистове нарізування шліців з параметром шорсткості  $Ra = 3,2$  мкм, а також висоту шліцю до 3 мм - призначаємо подачу 1

мм на оборот заготовки. Для цих умов рекомендована швидкість різання дорівнює 19 м/хв. Вона уточнюється, залежно від умов обробки, що змінюються, за допомогою поправочних коефіцієнтів за формулою:

$$V = V_P \cdot K_M \cdot K_\Phi \cdot K_W \cdot K_Z \cdot K_T = 19 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 1 = 20,5 \text{ м/хв} \quad (6.5)$$

де:  $V_P$  - рекомендована швидкість різання, м/хв ( $V_P = 19$ );

$K_M$  - коефіцієнт, що враховує марку і твердість оброблюваного матеріалу (сталь 20ХНР, твердість до 230 НВ,  $K_M = 0,9$ );

$K_\Phi$  - коефіцієнт, що враховує профіль зуба фрези (без вусиків,  $K_\Phi = 1$ );

$K_W$  - коефіцієнт, що враховує осьові перестановки фрези (два,  $K_W = 1,2$ );

$K_Z$  - коефіцієнт, що враховує кількість шліців (шість,  $K_Z = 1$ );

$K_T$  - коефіцієнт, що враховує відношення фактичного періоду стійкості фрези до нормативної (приймаємо стійкість фрези 300 хв,  $K_T = 1$ ).

Для фрези із зовнішнім діаметром 70 мм дана швидкість забезпечується частотою обертання шпинделя, що визначається за формулою:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D_\Phi} = \frac{1000 \cdot 20,5}{3,14 \cdot 70} = 93,3 \text{ (об/хв)} \quad (6.6)$$

Приймаємо за паспортом верстата 80 об/хв.

Машинний час виконання операції визначається за формулою:

$$T_O = \frac{(l + l_1) \cdot z}{n \cdot s_o} = \frac{(26 + 17) \cdot 6}{80 \cdot 1,0} = 5,48 \text{ (хв)} \quad (6.7)$$

де:  $l$  - довжина шліца (26), мм;

$l_1$  - довжина врізання та перебігу інструменту (17), мм;

$z$  - кількість шліців (6);

$n$  - кількість оборотів фрези (80), об/хв;

$s_o$  - подача вздовж осі деталі за її оборот (1,0), мм/об.

### Операція 25, Токарна з ЧПУ

Операція виконується на центровому токарно-гвинторізному верстаті з ЧПУ моделі AviaTURN63, оснащеним шестипозиційною револьверною головкою та оперативною системою управління «Fanuc». Заготівля базується на центрах.

Задній центр – обертовий А-1-5-НП ЧПУ Крутний момент передається повідковим патроном УДО 124.000000.000 з плаваючим центром. Інструмент встановлений у шести позиціях РГ без застосування допоміжних пристроїв. Охолоджуюча рідина – 2-5% емульсія НГЛ 205.

Операція включає шість інструментальних переходів:

1) здійснюється точіння циліндричної поверхні діаметром 18 мм та фаски з правого торця деталі. Використовується різець 2102-0312 тип 4

2) виконується точіння двох канавок шириною 3 і 4 мм правим канавковим різцем шириною 2,8 мм К.01.4328.100 ВНДП;

3) виконується точіння двох канавок шириною 2,8 і 3 мм лівим канавковим різцем шириною 2,4 мм К.01.4328.100-01 ВНДП;

4) обробляється різьбова поверхня М18х1,5-6h з використанням правого різьбового різця з механічним кріпленням ромбічної твердосплавної пластини К.01.4526-02 ВНДП;

5) здійснюється чистове точіння циліндричної поверхні діаметром 25,378-0,084 мм з лівого торця деталі з використанням лівого різця 2101-0642 тип 1

6) здійснюється чистове точіння циліндричної поверхні діаметром 25,378-0,084 мм з правого торця деталі з використанням правого різця 2101-0641 тип 1

#### Операція 30, Фрезерна

Операція виконується на верстаті моделі AviaTURN63. Деталь базується в універсально-налагоджувальному пристрої. За один прохід здійснюється фрезерування паза шириною 10 мм. Використовується шпонкова фреза зі швидкорізальної сталі з циліндричним хвостовиком що кріпиться у цанговому патроні 1-40-1-90 Як мастильно-охолоджувальну рідину застосовується 2-5% емульсія НГЛ 205.

#### Операція 35, Круглошліфувальна

Операція виконується на круглошліфувальному верстаті з ЧПУ моделі E-Tech EGP CNC (рис.4). Деталь базується у центрах. Передній та задній центри жорсткі 7032-0030 Для передачі крутного моменту використовується повідковий хомутик для шліфувальних робіт 7107-0068

Для підвищення жорсткості деталі використовується нерухомий люнет.



Рис.4 Круглошліфувальний верстат з ЧПК моделі E-Tech EGP CNC

Здійснюється попереднє шліфування за програмою опорних шийок валу до розміру  $25,135_{-0,033}$  мм та одноразове шліфування поверхні діаметром 25d9 та шліфування поверхні діаметром 40f7. Застосовується абразивне коло з електрокорунду ПП 600x63x305 24A50CT1K8 Розмір контролюється граничними гладкими калібрами. Як мастильно-охолоджуючої рідини застосовується 10-20% емульсія Аквол 6.

#### Операція 40, Круглошліфувальна

Операція виконується на круглошліфувальному верстаті моделі E-Tech EGP CNC. Деталь базується у центрах з використанням нерухомого люнета. Передній та задній центри жорсткі 7032-0030 Для передачі крутного моменту використовується повідковий хомутик для шліфувальних робіт 7107-0037

Здійснюється остаточне шліфування двох циліндричних поверхонь діаметром 25j<sub>s</sub>6 мм. Абразивним інструментом є коло ПП 400x25x203 24A25C1K8 Для контролю розмірів використовується граничний калібр-скоба. Як мастильно-охолоджувальну рідину застосовується 10-20% емульсія Аквол 6.

2.6. Моделювання тривимірної моделі деталі та розрахунок автоматизованої технології обробки деталі для верстата з ЧПК.

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

---

Обробка деталі виконується на верстаті AVIATURN 63 з ЧПУ FANUC 0i-TF у програмі «ESPRIT CAM».

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

Операція 005 – точіння торця різець PCLNR 2525-M12, СМП чорнова CNMG120408GH, NC3030. СМП чистова CNMG120404VM, NC3010

1)Режими різання  $t = 4$  мм  $S = 0,35$  мм/об  $V = 90$  м/м

Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.

1) Режими різання  $t = 4$  мм  $S = 0,35$  мм/об  $V = 90$  м/м

Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

патрон 500520\_25 BK40 Catam

Режими різання  $V = 80$  м/м  $S_z = 0,007$  мм/об

Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.

Операція 20 – Відрізка деталі. Державка MGENK 2525-2, СМП MGIN 200G,  
NC3030

Режими різання  $t = 1.5$  мм  $S = 0,5$  мм/об  $V = 150$  м/м

Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Таблиця 2.3 – Позначення та розміри прохідного різця

Позначення	Розміри, мм.					
	H	HF	B	LF	LH	WF
<b>2525 M12</b>	25	25	25	150	26	32

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

## Вибір вимірювального інструмента

Для контролю розмірів деталі після операцій використовуються такі вимірювальні інструменти:

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

цифровий штансциркуль для вимірювання зовнішніх канавок шліц-11 показаний на рис. 3.4:

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Розмір мостику, мм: 100

Точність,  $\pm$ мкм: 0,02

Ціна поділки мм/дюйм: 0,01/0,0005

Для обробки деталі використовується пристосування Трикулачковий токарний патрон чавунний з урізним кріпленням DIN 702-4 арт.312906

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

## 4. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

### 4.1 ANSYS Static Structural

ANSYS Static Structural – це програмне забезпечення для проведення статичного структурного аналізу та моделювання поведінки матеріалів у різних умовах навантаження. Воно дозволяє визначати механічні характеристики конструкцій та матеріалів, що використовуються у різних галузях.

### 4.2 Підготовка необхідних даних для симуляції

Задаємо матеріал деталі – сталь 20ХНР із відповідними механічними властивостями (табл. 1.2).

При вирішенні задач розрахунків на міцність в програмному забезпеченні ANSYS використовується метод скінчених елементів (МСЕ). Для геометричного моделювання може бути використано вбудований модуль Design Modeler.

В роботі вирішення задачі дослідження здійснено методом МСЕ в три етапи.

На першому етапі створено скінчено-елементну модель деталі Вал шліцьовий:

- задано фізичний тип завдання – механіка твердого деформованого тіла, здійснено відповідні налаштування програми;
- при обранні типу скінчених елементів обрано умову створення Automatic – де можливо за геометрією, використовувати форму паралелепіпедів, в інших випадках – форму тетраєдрів;

- обрано матеріал деталі та задано його властивості;
- побудовано геометричну твердотільну модель об'єкта (може бути використано один із вбудованих модулів, наприклад Design Modeler або Space Claim, або модель може бути експортована з іншого CAD-паketу);
- геометрична модель поділена на скінченні елементи;
- задано параметри розрахункової сітки.

На другому етапі на модель валу накладено необхідні фізичні умови:

- задано граничні умови – сили, моменти, накладено обмеження на переміщення;
- вибрано тип аналізу – статичний, задано параметри обчислювальних процедур: кількість кроків навантаження – 1, тривалість прикладення навантаження – 1 с, кількість кроків навантаження – 30;
- здійснено вирішення системи рівнянь, отриманої методом МСЕ.

На третьому етапі здійснено аналіз отриманих результаті:

- розраховано шукані фізичні величини: переміщення, деформації, напруження;
- результати наведено із застосуванням вбудованих інструментів ANSYS у вигляді зображень полів розподілу, анімацій, графіків та таблиць.

#### **4.3 Математична постановка задачі**

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

де

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

являють собою величини, що залежать тільки від пружних постійних  $E$  і  $\mu$  матеріалу, і називаються коефіцієнтами Ламе.

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

рівняння нерозривності деформацій в напругах (4.2).

#### **4.4 Побудова моделі**

У модулі Static Structural, у вкладці Engineering Data, вказуються характеристики матеріалу валу шліцьового. Для сталі 20ХНР:

коефіцієнт Пуассона – 0,33;

густина – 7,85 г/см<sup>3</sup>;

модуль пружності –  $2 \times 10^5$  МПа.

Для створення геометрії використовується вбудований модуль Design Modeler. Імпортується підготовлений файл у форматі \*.step, на основі якого

будується тривимірна модель валу шліцьового. Після виконання операції Generate отримується кінцева геометрія моделі (рис. 4.1).

Далі задаються граничні умови.

На поверхнях валу, призначених для підшипників, встановлюється умова Cylindrical Support з обмеженням переміщення в радіальному та аксіальному напрямках.

До бічних поверхонь шліцьового пазу прикладається обертальний момент  $M = 30 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , який лінійно зростає до заданого значення протягом 1 секунди.

Параметри розбиття навантаження задаються наступним чином:

Initial substeps – 30,

Minimum substeps – 30,

Maximum substeps – 50.

Ці значення визначають кількість кроків при отриманні результатів.

На поверхнях шліців задається умова Fixed Support.

Радіальну силу, що виникає в зоні зубчастого зчеплення, враховано шляхом прикладання до циліндричної поверхні контакту валу із зубчастим колесом розподіленої бічної сили  $F = 300 \text{ Н}$  (рис. 4.3).

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

Обравши тип скінчених елементів Automatic, виконуємо дискретизацію моделі скінчено-елементною сіткою задавши розмір елемента – 0,5 мм (рис. 4.2).

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

#### **4.5 Розрахунок характеристик міцності деталі**

Використавши модуль розрахунку Total deformation отримуємо результати деформацій (мм) при максимальному навантаженні (рис. 4.4). Значення мінімальної, максимальної та усередненої деформацій, в залежності від часу навантаження (графічна залежність та табличні дані) показані на рис. 4.4 б по кількості кроків, які були задані раніше.

Використавши модуль розрахунку Equivalent Total Strain отримуємо відносну повну деформацію (м/м) при максимальному навантаженні, зміну деформацій від часу (графічна залежність), кольором показані деформації в моделі по всій її довжині і шкала цифрових значень (рис. 4.5).

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

об'єму деталі, розташування точок з мінімальним та максимальним значенням повної деформації, б – графічна залежність деформацій від часу

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Рис. 4.5 – Значення відносних повних деформацій (м/м): а – розподіл деформацій по об'єму деталі, розташування точок з мінімальним та максимальним значенням відносної повної деформації, б – графічна залежність відносних деформацій від часу

Використавши модуль розрахунку Normal Stress визначаємо величину нормальних напружень при максимальному навантаженні вздовж осі Z. Залежність напружень від часу, та розподіл значень по довжині деталі

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

Рис. 4.6 – Значення нормальних напружень по осі z (Па): а – розподіл нормальних напружень по об'єму деталі, розташування точок з мінімальним та максимальним значенням напружень, б – графічна залежність нормальних

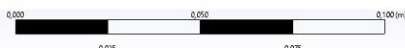
Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.



а)

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.



a)

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

Рис. 4.8 – Енергія деформації (Дж): а – розподіл енергії деформації по об'єму деталі, розташування точок з мінімальним та максимальним значенням енергії деформації, б – графічна залежність енергії деформації від часу

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

Рис. 4.9 – Напруження за фон Мізесом (Па): а – розподіл напружень по об'єму деталі, розташування точок з мінімальним та максимальним значенням напружень, б – графічна залежність напружень за фон Мізесом від часу

Максимальна повна деформація виникає в зоні буртика за посадковим місцем під зубчасте колесо і становить  $1,4 \times 10^{-5}$  м (рис. 4.4); еквівалентна відносна деформація (strain) сягає  $9,7 \times 10^{-4}$  м/м (рис. 4.5); найбільші нормальні напруження вздовж осі Z локалізуються в області шліцьового пазу і становлять 168,05 МПа (рис. 4.6); інтенсивні напруження досягають 149,6 МПа в місцях контакту із шпонкою і шліцьового з'єднання; максимальна повна енергія деформації дорівнює  $9,7 \times 10^{-3}$  Дж (рис. 4.8). На рисунку (4.9) зображено максимальні напруження за критерієм фон Мізеса – 129 МПа у місці переходу шліцьового з'єднання до зубчастого колеса. Ці значення не перевищують межу плинності сталі 20ХНР. Отже, конструкція вала за умови прикладених навантажень працює в еластичному діапазоні та задовольняє

вимоги міцності та жорсткості, що свідчить про працездатність та надійність шліцьового вала за заданих навантажень.

## ВИСНОВКИ

Спроектований технологічний процес механічної обробки заданої деталі дозволяє організувати ефективне виготовлення в організаційно-технічних умовах серійного виробництва.

Високу гнучкість виробництва забезпечує використання високоавтоматизованих верстатів з ЧПК. Використання таких верстатів дозволило розробити операції з високою концентрацією інструментальних переходів і зменшити кількість верстатів і організувати багатостантне обслуговування.

В аналітичному розділі проаналізовано використання спеціальних пристосувань на програмних операціях дозволило застосувати багатопозиційну обробку і забезпечити максимально можливу точність взаємного розташування оброблюваних поверхонь.

Проектування технологічних процесів механічної обробки характеризується великим обсягом обчислень і обробкою великих масивів даних. Для автоматизації цього процесу доцільно використовувати спеціалізоване інженерне програмне забезпечення.

Технологічний розділ присвячений комп'ютерному моделюванню тривимірної деталі «Вал шліцьовий» у програмі «SOLIDWORKS». Також розрахована керуюча програма для верстата AVIATURN 63 з ЧПК FANUC 0i-TF у програмі «ESPRIT CAM».

У спеціальному розділі відображені спеціалізовані верстатні пристосування, прогресивний ріжучий та вимірювальний інструмент, що задіяний на верстаті з ЧПК при механічній обробці деталі Вал.

Науково-дослідницький розділ присвячений аналізу на статичну міцність деталі «Вал шліцьовий» із використанням програмного забезпечення ANSYS Static Structural, досліджено розподіл деформацій та внутрішніх напружень деталі, визначено їх максимальне та мінімальне значення, виконана оцінка експлуатаційної надійності конструкції.