

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

**ПОЯСНОВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
**кваліфікаційної роботи ступеню магістра**

**студента Свідлова Євгенія Олександровича**  
**академічної групи 131М-22Н-1 ММФ**  
**спеціальності 131 Прикладна механіка**  
**за освітньо-науковою програмою « Наскрізний інжиніринг**  
**машинобудівного виробництва»**  
**на тему: «Дослідження і розрахунок характеристик міцності деталі**  
**«Вал шліцьовий» методами комп'ютерного моделювання»**  
**затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від**  
**30.04.2024 за №382-с**

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
Кваліфікаційної	Алексєєнко С. В.			

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

--	--	--	--	--

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

КЕНО:завідувач кафедри інженерства та матеріалознавства  
В.А. Дербаба  
(прізвище, ініціали)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 року

**ЗАВДАННЯ**  
**на кваліфікаційну роботу**  
**ступеню магістра**

студенту Свідлову Євгенію Олександровичу  
академічної групи 131М-22Н-1 ММФ  
спеціальності 131 Прикладна механіка

за освітньо-науковою програмою « Наскрізний інжиніринг  
машинобудівного виробництва»

на тему: «Дослідження і розрахунок характеристик міцності деталі  
«Вал шліцьовий» методами комп'ютерного моделювання»

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від  
30 квітня 2024 р. за №382-с.

Розділ	Зміст	Термін
--------	-------	--------

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

Прийнято до виконання \_\_\_\_\_

Є.О. Свідлов

## Реферат

Тема: Дослідження і розрахунок характеристик міцності деталі «Вал шліцьовий» методами комп'ютерного моделювання.

Ключові слова: деталь, технологія, токарна, фрезерна, операція, код, верстат, ЧПК.

Об'єкт розроблення у кваліфікаційній роботі – технологія механічної обробки деталі "вал шліцьовий" та її моделювання за допомогою САМ-системи. Метою кваліфікаційної роботи є розробка технологічного процесу механічної обробки деталі "вал шліцьовий" в умовах малосерійного виробництва, а також дослідження і розрахунок характеристик її міцності методами комп'ютерного моделювання. Результат роботи – аналіз переваг застосування сучасних САД-САМ-систем на прикладі автоматизованої обробки деталі складного профілю, технологічна документація та керуюча програма для верстату з ЧПК.

Перевагою програмованого керування за допомогою САМ-систем є мінімальна кількість відходів виробництва, менші енергозатрати та мінімізація негативного впливу на довколишнє середовище. Мінімізація кількості технологічних операцій та числа верстатів у поєднанні з високим рівнем автоматизації процесу.

Кваліфікаційна робота виконувалася як комп'ютерний експеримент. Вихідні (початкові) дані для проведення роботи – робочий кресленик деталі «Вал шліцьовий».

Наукова новизна кваліфікаційної роботи – вибір і обґрунтування критеріїв варіанту проектної технології виготовлення деталі, з використанням сучасних технологій програмного керування, прогресивного різального інструменту та обладнання.

Практична цінність – рекомендації, щодо застосування сучасних інструментальних матеріалів на прикладі автоматизованої технології обробки деталі складного профілю.

У кваліфікаційній роботі розроблені детальні технологічні операції.

Здійснено вибір сучасного багатоцільового верстата з ЧПК, прогресивного різучого інструменту та високоточного оснащення.

Запропоновано методичні рекомендації щодо раціонального використання функціоналу програмування в САМ системі FeatureCAM на прикладі токарно-фрезерної обробки деталі «вал шліцьовий».

## Зміст

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	7
1.1 Обрана деталь та середовище її використання .....	7
1.2 Технологічний контроль робочих креслень деталей та їх вимог.....	8
1.3 Аналіз технологічності конструкції деталі.....	10
1.4 Аналіз базового технологічного процесу деталі .....	11
2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	12
2.1. Визначення типу виробництва і форми його організації. ....	12
2.2. Вибір і обґрунтування способу отримання заготовки .....	13
2.3. Вибір методів обробки .....	15
2.4. Вибір технологічних баз і розробка маршруту обробки деталі .....	16
2.5. Вибір технологічного обладнання .....	18
2.6. Вибір різального інструменту та режимів різання.....	20
3. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ .....	21
3.1. Програмна візуалізація деталі в SolidWorks. ....	21
3.2. Програмна реалізація обробки деталі в FeatureCAM.....	23
3.3 Генерація керуючої програми для верстата з ЧПК .....	26
4. Науково-дослідний розділ .....	29
4.1 ANSYS Static Structural .....	29
4.2 Підготовка необхідних даних для симуляції.....	30
4.3 Математична постановка задачі .....	32
4.4 Побудова моделі.....	34
4.5 Розрахунок характеристик міцності деталі .....	37
Загальні висновки.....	47
Перелік посилань.....	48

Додаток А. Кресленик деталі

Додаток Б. Технологічна документація

Додаток В. Графічний матеріал до спеціального та наукового розділі

## Вступ

Мета дипломного проектування по технологічним основам машинобудування навчитися правильно застосовувати теоретичні знання, отримані в процесі навчання, використовувати свій практичний досвід роботи на машинобудівних підприємствах для вирішення професійних технологічних і конструкторських завдань.

При виконанні роботи ставляться наступні завдання:

Розширення, поглиблення, систематизація і закріплення теоретичних знань, і застосування їх для проектування прогресивних технологічних процесів виготовлення деталей.

Розвиток і закріплення навичок самостійної творчої інженерної роботи.

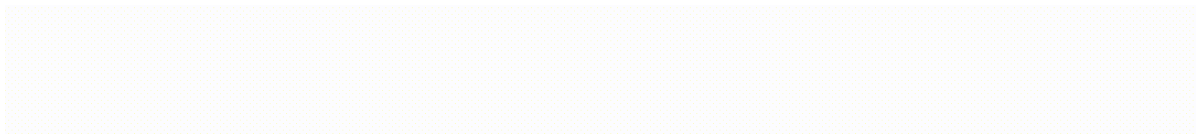
У даній роботі розробляється технологічний процес виготовлення деталі «Вал шліцьовий» а також досліджуються характеристики її міцності методами комп'ютерного моделювання». Метою даної роботи є визначення різних характеристик, таких як швидкість різання, технологічний і допоміжний час і інше, вибір оптимального технологічного обладнання, на якому буде виконуватися технологічний процес, технологічної оснастки, ріжучого інструменту, вибір типу заготовки, визначення виробничої партії, розрахунок припусків на механічну обробку, а також визначення максимальних переміщень, деформацій, внутрішніх напружень, які виникають під час експлуатації деталі.

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 «ІТЦ Технополіс».

## 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

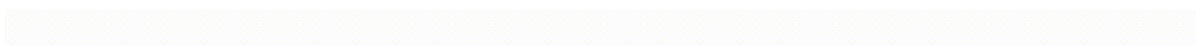
Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Рис 1.1 Тривимірний модель деталі «Вал шліцьовий»



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

Рис 1.2 Тривимірний модель трансмісії



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

У,  
Ж  
ЛВ  
ІА  
ІД  
ІІ  
И,  
ІЬ  
Іі,

суднобудуванні та інших галузях промисловості, де потрібні матеріали з високою міцністю та довговічністю. Ця сталь має хороші механічні властивості, включаючи високу міцність і зносостійкість.

Сталь має високу стійкість до утворення гартових структур та утворення тріщин як у гарячому, так і в холодному стані шва та його околицях. Її висока твердість та чудовий опір розриву роблять її надійним матеріалом в умовах експлуатації. Вона має підвищену стійкість до ударних навантажень, а поверхневі шари сталі рівномірно загартовуються.

Сталь піддається різним методам термічної обробки задля досягнення оптимальних механічних властивостей. Це може включати загартування та відпуску, що забезпечує сталі бажану твердість та міцність. Вона також може бути оброблена механічними методами, такими як різання та зварювання.

Ця сталь є популярним матеріалом завдяки своїм властивостям і широкому спектру застосувань в промисловості.

Хімічний склад представлений в таблиці 1.2.1.

Матеріал відноситься до конструкційних сталей механічні властивості та фізичні властивості при температурі 20° С представлені в таблицях 1.2.2, 1.2.3.

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

Таблиця 1.2.3 - фізичні властивості

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

900			26,7	7560		1140
1000			28	7510		1170
1100			28,8	7470		1200
1200				7430		1230

### 1.3 Аналіз технологічності конструкції деталі

Креслення виконано з дотриманням всіх вимог ДСТУ. На ньому показані всі необхідні для однозначного розуміння форми деталі види і перерізи, а також всі необхідні дані по виконанню деталі. При проектуванні витримані всі стандарти. Всі поверхні легко доступні в процесі обробки. На кресленні проставлені всі розміри з допусками і відхиленнями. Параметри шорсткості відповідають точності розмірів.

Основними базовими поверхнями є «тіло» валу шліцьовий і робоча частина з шорсткістю поверхні Ra12.5 мкм, геометрична вісь яких є основною конструкторською базою, що визначає положення валу в механізмі уздовж осі.

На кресленні вказані всі додаткові технічні вимоги до обробки деталі, і контролю якості її виконання.

Всі види і перерізи, показані на кресленні, дозволяють отримати повне уявлення про форму деталі. На кресленні вказані всі розміри і відхилення, а також параметри шорсткості.

Технологічність визначається ступенем відповідності конструкції деталі умовам її виготовлення. Державним стандартом передбачені якісний і кількісний аналізи технологічності.

Деталь «Вал шліцьовий» допускає застосування високопродуктивних режимів обробки, має хороші базові поверхні для початкових операцій.

Деталь «Вал шліцьовий» має поверхні, які можуть бути використані в якості чорнових технологічних баз.

Співвідношення геометричних параметрів деталі, в поєднанні з особливостями конструкції дозволяє призначити оптимальні режими різання.

Результати якісного аналізу представлені в таблиці 3.

Таблиця 1.3.1 Якісний аналіз технологічності конструкції деталі «Вал шліцьовий»

Показник технологічності	Оцінка технологічності	
	Припустимо	Неприпустимо

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

#### 1.4. Аналіз базового технологічного процесу деталі

Базовий технологічний процес аналізується для пошуку шляхів зниження трудомісткості і собівартості деталі, дотримуючись вимог до якості її виготовлення.

Аналіз базового технологічного процесу деталі «Вал шліцьовий»:

Базовий технологічний процес передбачає використання в якості заготовки круглий прокат довжиною 6м та масою 133,2 кг, з якої передбачено виготовлення дев'ятнадцяти деталей.

Базовий технологічний процес включає велику кількість розмічальних операцій, що виконуються кваліфікованими робітниками, і вимагають великих витрат часу. За допомогою використання високопродуктивного обладнання

(верстатів з ЧПК), яке координує розташування роботи інструменту, цих операцій можна уникнути, що значно зменшить трудомісткість виготовлення.

## 2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1. Визначення типу виробництва і форми його організації.

На цій стадії проектування, в якості вихідних даних для визначення типу виробництва приймаються маса і річна програма випуску деталі «Вал

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

“ -  $\Phi$  (2.1)

де  $\alpha$  - періодичність запуску деталей у виробництво. Визначається в днях.

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

Такт випуску деталі:

змі  
при  
вип  
необхідної якості деталі.

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

Технологічним процесом виготовлення деталі «Вал шліцьовий» передбачено використання в якості заготовки прокат

Розрахуємо довжину заготовки L:

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

С  
Г  
Б  
Д

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

С

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

60,00

використання в якості заготовки гарячий прокат, отриманий на прокатно-формувавальному верстаті.

Використовуючи дані робочого креслення виливки, визначаємо масу заготівлі.

### 2.3. Вибір методів обробки

Для складання раціонального технологічного маршруту аналізуємо технічні вимоги до кожної оброблюваної поверхні деталі.

Кількість технологічних операцій, їх концентрація буде визначається методами обробки поверхонь, які призначені виходячи з необхідного квалітету розміру, параметра шорсткості і умов оброблюваності матеріалу. Перелік оброблюваних поверхонь і методи обробки, які можуть забезпечити виконання вимог креслення, наведені в таблиці.

Таблиця 2.3.1. Методи обробки поверхонь деталі «вал шліцьовий»

Вид поверхні, розмір, мм	Квалітет	Шорсткість, мкм	Метод обробки поверхні
Торець Ø60	-	Ra12,5	1.Точіння чорнове 2.Точіння напівчистове

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

Ø56 – Ø40 L35	-	Ra12,5	1.Фрезерування
---------------	---	--------	----------------

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

Вибір баз є одним з найскладніших і принципових розділів проектування технологічних процесів. Від правильного вибору технологічних баз в значній мірі залежать: фактична точність виконання розмірів, правильність взаємного розташування поверхонь, ступінь складності пристрої, ріжучих і вимірювальних інструментів, загальна продуктивність обробки заготовок.

Вибір базових поверхонь залежить від конструктивних форм деталі і технічних вимог.

Чорнові технологічні бази використовуються тільки на початкових операціях для підготовки чистових баз для наступних операцій.

#### 2.4.1. Маршрут обробки деталі «Вал шліцьовий»

III  
4  
Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

1

Виходячи з прийнятих МОП, розробляємо маршрут обробки деталі на підставі типового маршруту з урахуванням обраних технологічних баз, і представляємо його у вигляді таблиці 2.4.1.

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

а  
п

## 2.5. Вибір технологічного обладнання

Вибір технологічного обладнання проводиться за його головними параметрами, які характеризують його функціональне значення і технологічні можливості. До них відносяться: вид обробки, габарити робочої зони і точність обробки. Для стрічково-відрізний операції вибираємо верстат TITAN HR6000 (Рис. 2.5.1)

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

Рис. 2.5.1 Зображення TITAN HR6000

Технічні характеристики:

Вага	750 кг
Потужність двигуна	1.5/2.2 кВт
Швидкість різання	60/80 м/хв
Макс. розмір круглої заготовки	Ø330

Макс. розмір прямокульної заготівлі	450x330 мм
-------------------------------------	------------

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

Вага	11300 кг
------	----------

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

Шпиндель та контршпиндель: GB-D Ø 140 - 315 mm;

Револьверну головку: BMT55P на 24 інструменти;

Для вимірювальних операцій були вибрані такі інструменти:

Штангенциркуль ШЦ-I-150 0,02;

## 2.6. Вибір різального інструменту та режимів різання

Для більшої економії, на декілька операцій було обрано універсальні інструменти.

Таблиця 2.6.1 Таблиця різального інструменту та режимів різання

Тип інструменту	Назва інструменту (Виробник)	Параметри інструменту
-----------------	------------------------------	-----------------------

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

		Загальна довжина: 15 мм
--	--	-------------------------

Таблиця 2.6.2 Обрані режими різання

Тип обробки	t	S	Vm	Vc	V
Чернове точіння	4	0.5	500	-	-
Чистове точіння	1,5	0.3	150	-	-
Фрезерування	-	-	-	2200	200

## 3. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

### 3.1. Програмна візуалізація деталі в SolidWorks.

SolidWorks - це інтегроване програмне забезпечення для 3D-моделювання і проектування, розроблене компанією Dassault Systèmes. Воно призначене для інженерів, дизайнерів і архітекторів для створення складних тривимірних моделей і технічних креслень.

Основна мета SolidWorks - забезпечити користувачів інструментами для створення високоякісних 3D-моделей, починаючи від простих деталей і закінчуючи складними збірними одиницями. Програма дозволяє легко і ефективно проектувати вироби, моделювати їх у різних ракурсах, а також аналізувати їх поведінку в різних умовах.

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

них

що

них

цій

над

проектами та обміну даними з іншими системами CAD.

SolidWorks є важливим інструментом для інженерів і дизайнерів у різних галузях, таких як машинобудування, електроніка, медицина та інші. Завдяки своєму зручному інтерфейсу, розширеним можливостям та широкій підтримці, SolidWorks продовжує залишатися одним із лідерів на ринку програмного забезпечення для 3D-моделювання.

У середовищі SolidWorks була створена 3D модель деталі «Вал шліцьовий».

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

Рис. 3.1.1 3D візуалізація деталі «Вал шліцьовий».

## 3.2. Програмна реалізація обробки деталі в FeatureCAM

Обробка деталі в Autodesk FeatureCAM

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

з  
ас  
та  
у.  
у  
го  
ції  
ги  
ня

інструменту, а також стрижини додичковий шпindel, так як однією з операцій деталі двома інструментами, двостороннє свердління, а також синхронізація операцій між основним та допоміжним шпинделем.

### Переваги Autodesk FeatureCAM:

- Вбудована база знань;
- Розпізнавання типових обробних елементів;
- 2D- і 2.5D обробка;
- Токарна обробка;
- Токарно-фрезерна обробка;
- високоефективні стратегії фрезерування;
- 3D-обробка;
- Позиційна (3+2) 5D-обробка;
- Дротова електроерозійна різка;
- Підтримка багатомісних застосувань і палет.

Початок обробки деталі «Вал шліцьовий» у середовищі Autodesk FeatureCAM.

Для початку деталь «Вал шліцьовий» була імпортована із середовища

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

Рис. 3.2.1 - Імпортована деталь у середовищі Autodesk FeatureCAM.

Далі було обрано і розбито на методи обробки для кожного переходу. Режими різання, форми та розміри ріжучого інструмента були обрані відповідно до необхідних типів обробки, матеріалу деталі, оптимізації під серійне виробництво.

База стандартних постпроцесорів програми FeatureCAM дозволяє здійснити візуалізацію обробки на верстаті, перевірити операції на зарізи і зіткнення виконавчих органів верстата та заготовки.

Візуалізація обробки:

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

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

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

Після виконання симуляції обробки деталі, програма FeatureCAM автоматично генерує код керуючої програми для обраного верстата.

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

eatureCAM.

Нижче представлено фрагмент коду для операції точіння. Цей фрагмент був автоматично генерований у середовищі FeatureCAM та може використовуватись на верстатах з ЧПК:

```
Обработка ( FILENAME = Обработка)  
N20 G20 G40  
N25 G28 U0
```





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

Основні можливості ANSYS Static Structural включають в себе:

- Статичний аналіз: Оцінка поведінки конструкцій під статичним навантаженням без врахування динамічних ефектів.
- Моделювання матеріалів: Визначення властивостей матеріалів, таких як міцність, жорсткість, деформація та інші, для точного аналізу.
- Аналіз напружень та деформацій: Виявлення зон перенапруження та деформації в конструкції під дією навантаження.
- Оптимізація конструкцій: Пошук оптимальних параметрів конструкцій для досягнення бажаних механічних характеристик.
- Візуалізація результатів: Побудова графіків, діаграм та інших візуалізацій для зручного аналізу отриманих даних.

ANSYS Static Structural знаходить широке застосування в автомобільній промисловості, авіації, будівництві, електроніці та інших галузях, де важливо забезпечити міцність та надійність конструкцій. Його потужність та точність роблять його незамінним інструментом для інженерного аналізу та проектування.

#### 4.2 Підготовка необхідних даних для симуляції

Деталь зроблена з матеріалу сталь 40X. Вихідні дані обрані для статистичного розрахунку:

Коефіцієнт Пуассона	0,3
Густина	7,85 г/см <sup>3</sup>
Модель пружності	2e+05 МПа
Крутний момент M	10 Нм

Програмне забезпечення ANSYS при вирішенні задач розрахунків на міцність використовує 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

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

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;
- здійснюється вирішення системи рівнянь, отриманої методом МСЕ.

На третьому етапі здійснено аналіз отриманих результаті:

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

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

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

02 02 01 1

Рівняння нерозривності

02 02 01 1

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

Фізичні рівняння Гука

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

$P, Q, R$  – об'ємні сили,

$u, v, w$  – переміщення у напрямках осей координат;

$\epsilon, \gamma$  – лінійна та кутова деформація.

Вирішення поставленої задачі може бути отримано у переміщеннях та у напругах.

У першому випадку геометричні рівняння (4.2) необхідно підставити у фізичні рівняння (4.5), а потім отриманий вираз підставити в рівняння рівноваги (4.1). Рішення отриманої системи із двох диференціальних рівнянь другого порядку щодо переміщень  $u$  та  $v$  буде розв'язком задачі.

У другому випадку напруги визначаємо за допомогою розв'язання системи з трьох диференціальних рівнянь: двох рівнянь рівноваги (4.1) і

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

В модулі Static structural у вкладці Engineering data вказуємо характеристики матеріалу Валу шліцьового (коефіцієнт Пуассона – 0,33, густина – 7,85 г/см<sup>3</sup>, модель пружності – 2e+05 МПа).

Обравши вбудований модуль для створення геометрії Design Modeler, створюємо тривимірну модель Валу шліцьового, імпортувавши дані з підготовленого файлу \*.step. Після виконання операції Generate отримуємо кінцеву геометрію моделі (рис. 4.4.1).

Для початку необхідно задати граничні умови. На кінцевих сторонах валу на поверхнях цапф задаємо умову Cylindrical Support з обмеженням переміщення в радіальному та аксіальному напрямках. До бічних поверхонь шліців прикладемо обертальний момент  $M = 10$  Нм із лінійним законом зростання до заданого значення протягом 1 секунди. Кількість кроків задаємо наступним чином: Initial substeps - 30, min substeps - 30, max substeps – 50, де числові значення кроків означають їх кількість при виведенні результатів. Оскільки в зубчастій шліцьовий найбільші внутрішні напруги виникають при контакті двох зубів, спрощено, позначимо на зубі, що перебуває в зачепленні, лінію контакту, та задаємо по цій лінії умову Fixed Support (рис. 4.4.3).

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

Рис. 4.4.1 – Геометрія моделі деталі Вал шліцьовий

Обравши тип скінчених елементів Automatic, виконуємо дискретизацію моделі скінчено-елементною сіткою задавши розмір елемента – 0,5 мм (рис. 4.4.2).

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

Рис. 4.4.2 – Дискретизована скінчено-елементна модель деталі Вал шліцьовий

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

Рис. 4.4.3 – Схема навантаження

#### 4.5 Розрахунок характеристик міцності деталі

Використавши модуль розрахунку Total deformation отримуємо результати деформацій (мм) при максимальному навантаженні (рис. 4.5.1). Значення мінімальної, максимальної та усередненої деформацій, в залежності від часу навантаження (графічна залежність та табличні дані) показані на рис. 4.5.1 б по кількості кроків, які були задані раніше.

Використавши модуль розрахунку Equivalent Total Strain отримуємо відносну повну деформацію (мм/мм) при максимальному навантаженні, зміну деформацій від часу (графічна залежність), кольором показані деформації в зразку по всій його довжині і шкала цифрових значень (рис. 4.5.2).

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



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

Рис. 4.5.1 – Значення повних деформації (мм): а – розподіл деформації по об'єму деталі, положення точок з мінімальним та максимальним значенням повної деформації, б – графічна залежність деформацій від часу

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

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

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 показані на рис. 4.5.3

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

„

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

максимальним значенням напружень, б – графічна залежність нормальних напружень по осі z від часу

На рис. 4.5.4, 4.5.5 та 4.5.6 наведені дані щодо розподілу та залежності від часу Stress Intensity – інтенсивних напружень (Па), Strain Energy (Дж) та Equivalent (von-Mises) stress – напружень за фон Мізесом (Па) при максимальному навантаженні.

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

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

напружень, б – графічна залежність напружень від часу

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

а)

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

об'єму деталі, положення точок з мінімальним та максимальним значенням енергії деформації, б – графічна залежність енергії деформації від часу

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

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

об'єму деталі, положення точок з мінімальним та максимальним значенням напружень, б – графічна залежність напружень за фон Мізесом від часу

Максимальна деформація в деталі виникає в місці контакту зубчастої шліцьової з'єднання  $8,20 \times 10^{-6} \text{ м}$  (рис. 4.5.1); максимальна скрутивна деформація

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

шліцьового з'єднання до зубчастого колеса.

#### 4.6 Порівняння напружень деталі.

Порівняємо навантаження отримані в ході симуляції в програмі

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

837

Будуть розглядатися 2 типи навантажень, контактне та вигинаюче.

Контактне напруження розраховується за формулою:

$$\sigma_H = \frac{F_t}{b \cdot m \cdot Y_F}$$

Вигинаюче напруження розраховується за формулою:

$$\sigma_F = \frac{F_t \cdot K \cdot Y_F}{b \cdot m}$$

Де:

$b$  - ширина зуба 6.3 мм

$m$  - модуль зуба мм

$F_t$  - Окружна сила Н

$Y_F$  - коефіцієнт форми зуба (приблизно 0.3 для стандартних прямозубих коліс).



## Загальні висновки

Після викладу розділів кваліфікаційної роботи зробимо висновки про виконану роботу в наступному:

- в аналітичному розділі проведено аналіз креслень конструкцій деталі «Вал шліцьовий» визначили якісну оцінку технологічності конструкцій та визначення коефіцієнта уніфікації деталей, що представляє собою кількісну оцінку технологічності конструкції деталі;

- в технологічному розділі визначили тип виробництва і форма організації технологічного процесу виробництва деталі «Вал шліцьовий», вибирали і економічно обґрунтували спосіб отримання заготовки, розробляється маршрут обробки деталі, визначаються режими різання. У розробленому маршруті обробки деталей досягли вищої точності і зниження основного технологічного часу за рахунок раціональної послідовності обробки деталі Вал;

- в спеціальному розділі була створена твердотільна модель «Вал шліцьовий» та виконана обробка поверхонь деталі за допомогою програми FeatureCAM, отримано код керуючої програми для верстата з ЧПК.

- в науково-дослідницькому розділі були розраховані статичні напруження на деталь «Вал шліцьовий». Вони були зрівняні з теоретичними розрахунками навантажень, які будуть впливати на деталь безпосередньо в роботі. І при порівнянні результатів, матеріал деталі є ефективним вибором.

Отже дані технічні можливості програм і обладнання на сьогоднішній день дозволяють виключити на 90% можливість появи небажано браку ще на стадії проектування і створення КП для верстатів, так як дозволяє побачити і перевірити обробку, відстежити переміщення інструменту в FeatureCAM за координатами, що в свою чергу, позитивно відбивається на економічній ефективності.

## Перелік посилань

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

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