

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

Механіко-машинобудівний факультет

(факультет)

Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну

(повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня бакалавра**

студента Ілюхіна Кіріла Андрійовича

(ПІБ)

академічної групи 132-21-2 ММФ

(шифр)

спеціальності 132 Матеріалознавство

(код і назва спеціальності)

за освітньою програмою «Промислова естетика і сертифікація матеріалів та виробів

(офіційна назва)

на тему Визначення фізико-механічних характеристик матеріалу виготовлення
конічної передачі а/м КрАЗ

(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	<i>Федоскіна О.В.</i>			
розділів:				
Аналіз стану питання та постановка задач роботи	<i>Федоскіна О.В.</i>			
Функціональний аналіз та моделювання об'єкта розробки	<i>Федоскіна О.В.</i>			
Інженерно- технологічний	<i>Ротт Н.О.</i>			
Експлуатаційний	<i>Федоряченко С.О.</i>			
Рецензент				
Нормоконтролер	<i>Гаркавенко Д.В.</i>			

Дніпро

2025

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
конструювання, технічної
естетики і дизайну
(повна назва)

Сергій ФЕДОРЯЧЕНКО
(прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

« _____ » _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеню _____ бакалавра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студенту Люхіну Кірілу Андрійовичу академічної групи 132-21-2
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 132 Матеріалознавство

спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою «Промислова естетика і сертифікація матеріалів та виробів»

на тему Визначення фізико-механічних характеристик матеріалу виготовлення конічної передачі а/м КраЗ

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від _____
№ _____

Розділ	Зміст	Термін виконання
Аналіз стану питання та постановка задач роботи	Розглянуто сучасні вимоги до матеріалів для конічних передач важких транспортних засобів і поставлено задачу дослідити фізико-механічні характеристики матеріалу.	
Функціональний аналіз та моделювання об'єкту розробки	Проведено аналіз функціонального призначення конічної передачі та змодельовано її роботу з урахуванням напружено-деформованого стану.	
Інженерно-технологічний	Обґрунтовано вибір конструкційного матеріалу та технології його термічної обробки для забезпечення оптимального поєднання міцності, твердості й зносостійкості.	
Експлуатаційний	Оцінено поведінку матеріалу в умовах циклічних навантажень, з урахуванням особливостей роботи передачі в трансмісії автомобіля КраЗ.	

Завдання видано _____

(підпис керівника)

Олена ФЕДОСКИНА

(прізвище, ініціали)

Дата видачі _____ 2025

Дата подання до екзаменаційної комісії _____ 2025

Прийнято до виконання _____

Кіріл ЛЮХІН

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: ___ с., ___ рис., ___ табл., ___ джерел.

Об'єкт дослідження – конічна передача автомобіля КрАЗ, що є ключовим елементом трансмісії та відповідає за передачу крутного моменту під кутом, забезпечуючи надійну й ефективну роботу вузла в умовах підвищених навантажень.

Мета роботи – визначити фізико-механічні характеристики матеріалу, що використовується для виготовлення конічної передачі, з урахуванням умов експлуатації та вимог до зносостійкості, міцності й термічної стабільності, з подальшим обґрунтуванням доцільності його застосування або заміни.

У кваліфікаційній роботі виконано аналіз конструктивних особливостей конічної передачі та умов її роботи в трансмісії а/м КрАЗ. Здійснено підбір марок сталей, що застосовуються для виготовлення зубчастих коліс, та проведено експериментальні випробування зразків, включаючи визначення твердості, границі міцності при розтягуванні, ударної в'язкості та зносостійкості. Встановлено, що сталь 18ХГТ після цементації та гартування демонструє високі експлуатаційні показники, зокрема твердість до 58 HRC, границю міцності понад 1000 МПа, що забезпечує необхідну надійність при роботі в умовах ударних і циклічних навантажень. Здійснено порівняння з альтернативними матеріалами, такими як 20Х, 40ХН та ін., що дозволило обґрунтувати вибір оптимального матеріалу за критеріями ресурсу та вартості.

Практична значимість роботи полягає у тому, що отримані результати можуть бути використані для підвищення ресурсу конічних передач вантажних автомобілів шляхом раціонального вибору матеріалів і режимів термічної обробки. Запропоновані рішення дозволяють зменшити втрати на зношування, знизити ймовірність руйнування зубців та оптимізувати процес виготовлення деталей з урахуванням умов важкої експлуатації автомобілів КрАЗ.

ЗМІСТ

Вступ.....	
1	АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ РОБОТИ.....
1.1	Сучасний стан розвитку трансмісії важких автомобілів.....
1.2	Класифікація конічних передач та їх функціональні особливості.....
1.3	Аналіз конструкції конічної передачі автомобіля КрАЗ.....
1.4	Матеріали, які застосовують для виготовлення конічних передач.....
1.5	Постановка задач роботи.....
2	ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА РОЗРОБКИ.....
2.1	Функціонально-вартісний аналіз.....
2.2	Аналіз потреб та визначення експлуатаційних вимог до матеріалу.....
2.3	Створення тривимірної моделі зубчастого колеса.....
2.4	Визначення напружено-деформованого стану моделі.....
2.5	Висновки за розділом.....
3	ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....
3.1	Обґрунтування вибору конструкційного матеріалу для конічної передачі
3.2	Характеристика структури та властивостей сталі 18ХГТ.....
3.3	Дослідження фізичних властивостей і термічної обробки зразків.....
3.4	Висновки за розділом.....
4	ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ.....
4.1	Аналіз ефективності використання вибраного матеріалу в реальних умовах.....
4.2	Розрахунок навантаження на зуб конічної передачі.....
4.3	Дослідження фізико-механічних характеристик зразків після обробки....
4.4	Висновки за розділом.....
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....
	ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА.....

Вступ

Сучасне машинобудування стрімко розвивається у напрямку підвищення надійності, довговічності та ефективності механічних систем, особливо в транспортній галузі. Особливу увагу привертає удосконалення вузлів трансмісії вантажних автомобілів, зокрема таких, що експлуатуються в екстремальних умовах. Одним із ключових елементів силової передачі є конічна передача — складова, яка забезпечує зміну напрямку обертального руху та передачу значних навантажень.

Ефективність і надійність роботи конічної передачі безпосередньо залежать від фізико-механічних властивостей матеріалу, з якого вона виготовлена. Під час роботи в умовах підвищених динамічних навантажень, вібрацій, перепадів температур і зносу матеріал повинен зберігати свої властивості, забезпечуючи безвідмовність упродовж усього експлуатаційного ресурсу. Тому визначення, аналіз і оптимізація властивостей таких матеріалів є важливим етапом у розробці, ремонті та модернізації елементів трансмісії.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню фізико-механічних характеристик матеріалу, що застосовується для виготовлення конічної передачі автомобіля КрАЗ. У процесі дослідження буде проведено аналіз умов експлуатації, вивчення типових матеріалів і методів термічної обробки, а також виконано серію експериментальних випробувань, зокрема визначення твердості, міцності, зносостійкості та мікроструктури. Крім того, буде здійснено порівняння з альтернативними матеріалами, що дозволить надати обґрунтовані рекомендації щодо вибору оптимального матеріалу з урахуванням ресурсу, технологічності та вартості.

Результати цієї роботи можуть бути використані для вдосконалення технологій виготовлення й ремонту зубчастих передач вантажних автомобілів, а також слугувати основою для подальших наукових досліджень у сфері матеріалознавства й підвищення надійності машин.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ РОБОТИ

1.1 Сучасний стан розвитку трансмісій важких автомобілів

У сучасному автомобілебудуванні трансмісія відіграє провідну роль у забезпеченні ефективності, надійності та економічності важких транспортних засобів. Зокрема, для вантажних автомобілів, таких як КрАЗ, трансмісія повинна витримувати значні навантаження, забезпечувати оптимальне передавання крутного моменту та відповідати сучасним екологічним стандартам.

Традиційно в важких автомобілях використовуються механічні коробки передач, які забезпечували простоту конструкції та надійність. У вантажівках використовуються три основні типи трансмісій: механічні, автоматичні та автоматизовані механічні трансмісії. Проте з розвитком технологій з'явилися нові типи трансмісій, такі як автоматичні та коробки передач з подвійним зчепленням. Ці системи дозволяють забезпечити більш плавне перемикавання передач, зменшити витрати пального та підвищити комфорт водіння.

Механічні трансмісії (MT – Manual Transmission) вимагають від водія самостійного перемикавання передач за допомогою зчеплення та важеля перемикавання. Вони забезпечують більший контроль над вибором передач, що є перевагою при русі по бездоріжжю або при буксируванні важких вантажів.

Автоматичні трансмісії (AT – Automated Manual Transmission) набувають все більшої популярності у важких вантажівках завдяки зручності, легкості використання та здатності оптимізувати продуктивність. Вони автоматично перемикають передачі на основі таких факторів, як швидкість руху, умови навантаження та дії водія. Це зменшує втому водія, особливо в умовах міського руху або частих зупинок, та забезпечує точний вибір передач для різних умов експлуатації.

Іншою важливою характеристикою сучасної трансмісії є адаптивність до режимів руху. Автоматизовані механічні трансмісії (АМТ – Automated Manual Transmission) поєднують переваги механічних та автоматичних трансмісій. Вони використовують механічну конструкцію з електронним керуванням, що дозволяє автоматично перемикає передачі без участі водія. Це забезпечує ефективність та економічність механічної трансмісії з комфортом та зручністю автоматичної. АМТ особливо корисні в умовах, де потрібна висока ефективність та зниження витрат пального (рис. 1.1).

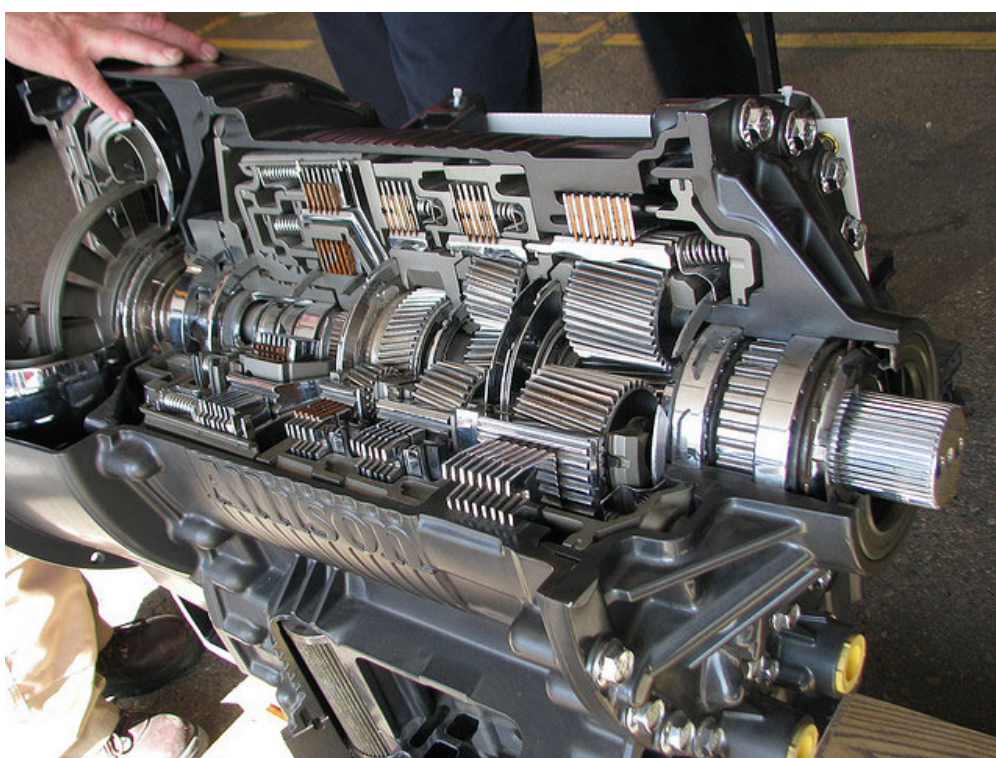


Рисунок 1.1 – Приклад автоматизованої механічної передачі

Однією з найважливіших тенденцій є підвищення загального ККД трансмісій. У новітніх розробках застосовуються полегшені матеріали, що зменшують інерційні втрати, а також впроваджуються високоефективні зубчасті передачі з оптимізованими профілями. Значну увагу приділяють зменшенню втрат у підшипниках і шестернях — досягається це шляхом впровадження нових мастильних матеріалів, покриттів і геометрій елементів [1].

Ще одним напрямом є електрифікація трансмісії. У деяких конструкціях передбачене встановлення електродвигунів у трансмісію для реалізації гібридного або повністю електричного приводу (рис.1.2). Це відкриває нові можливості для енергозбереження (наприклад, рекуперації енергії під час гальмування) та підвищення загальної ефективності силової установки.

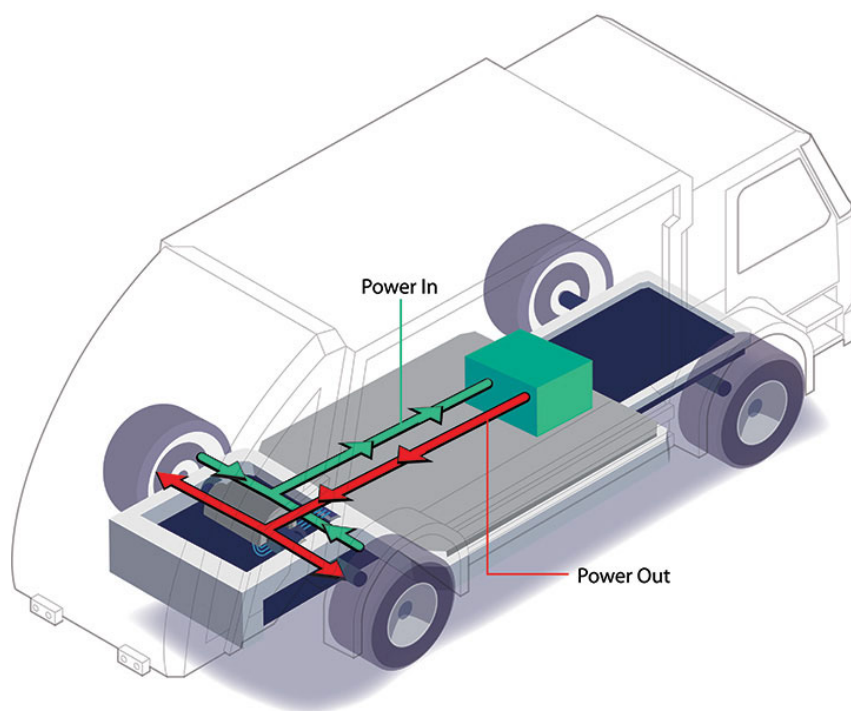


Рисунок 1.2 – Схема рекуперації вантажного автомобіля

Сучасні трансмісійні системи для важких автомобілів характеризуються впровадженням електронного керування, що дозволяє адаптувати роботу трансмісії до умов руху та навантаження. Наприклад, використання гідромеханічних передач забезпечує автоматичне регулювання передавання крутного моменту залежно від навантаження, що підвищує ефективність роботи транспортного засобу.

Крім того, зростає інтерес до використання гібридних трансмісій, які поєднують традиційні механічні елементи з електричними приводами. Це дозволяє зменшити викиди шкідливих речовин та підвищити економічність експлуатації важких автомобілів.

Розвиток трансмісійних систем впливає на вимоги до матеріалів, з яких виготовляються їхні компоненти. Зокрема, конічні передачі, що використовуються в трансмісіях важких автомобілів, повинні мати високі фізико-механічні характеристики, такі як твердість, зносостійкість та міцність. Це обумовлює необхідність використання сучасних матеріалів та технологій обробки, які забезпечують відповідні експлуатаційні властивості.

1.2 Класифікація конічних передач та їх функціональні особливості

Грамотно поставлена передача крутного моменту – одна з важливих задач машинобудування, особливо в трансмісійних системах важких автомобілів, таких як автомобілі КрАЗ. У таких випадках широко застосовуються конічні зубчасті передачі, які дозволяють змінювати напрямок обертання та забезпечують надійне й ефективне передавання навантажень.

Застосування конічних передач обумовлене не лише геометричними перевагами, а й функціональними характеристиками, які дозволяють трансмісії витримувати великі навантаження, характерні для умов експлуатації вантажної техніки на бездоріжжі, у важких кліматичних таюю промислових умовах.

За конструкцією зубів та конфігурацією передачі конічні пари класифікуються на прямозубі, спіральні (кривозубі), гіпоїдні, а також передачі з однаковою кількістю зубців.

Прямозубі передачі є найпростішими у виготовленні, однак вони мають підвищений рівень шуму та вібрацій, що обмежує їхнє застосування при високих швидкостях або значних навантаженнях (рис.1.3). Саме тому в автомобілях КрАЗ, призначених для експлуатації в екстремальних умовах, надається перевага спіральнозубим та гіпоїдним передачам. Вигнуті зуби забезпечують плавніше зачеплення, знижують ударні навантаження та рівень шуму, що позитивно впливає на довговічність і безпеку роботи трансмісії.



Рисунок 1.3 – Прямозуба механічна передача

Гіпоїдні передачі, які найбільш часто використовуються у трансмісіях КрАЗ, мають особливу геометрію, за якої осі ведучого і веденого коліс не перетинаються, а зміщені (рис.1.4). Це дозволяє збільшити контактну поверхню зубів, що, своєю чергою, забезпечує кращий розподіл навантаження по всій довжині зуба. Така конструкція дозволяє без втрат ефективності передавати крутні моменти, які можуть перевищувати 2000 Нм, що є типовим для трансмісій вантажних автомобілів. Окрім того, гіпоїдні передачі демонструють високу зносостійкість, надійність, плавність ходу та відносно компактні габарити, що є критично важливим для компоновання трансмісійного простору важкого транспортного засобу.

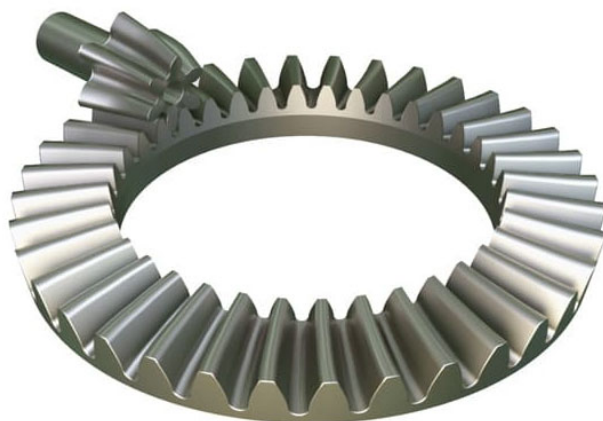


Рисунок 1.4 – Гіпоїдна механічна передача

Спіральні конічні передачі вирізняються складнішою геометрією та покращеними експлуатаційними характеристиками порівняно з прямозубими аналогами (рис.1.5). Основною конструктивною ознакою цих передач є вигнуті, розташовані по спіралі зуби, що розміщені під кутом до осі зачеплення. Така конфігурація забезпечує плавне входження та вихід зубів із зачеплення, завдяки чому значно знижуються вібрації та рівень шуму при роботі. Особливість спіральних передач полягає також у збільшеній площі контакту між зубами, що дозволяє ефективніше розподіляти навантаження. Завдяки цьому такі передачі здатні витримувати більші крутні моменти при менших габаритах, що робить їх надзвичайно привабливими для використання в умовах обмеженого простору або в конструкціях, де важлива висока передавальна здатність за мінімальних розмірів.



Рисунок 1.5 – Спіральна механічна передача

Передачі з однаковою кількістю зубців – це передавальні пари, в яких ведуче та ведене колесо мають однакову кількість зубців, тобто передавальне число становить 1:1. Головною особливістю таких передач є те, що вони не змінюють величину крутного моменту або швидкості обертання, а лише

змінюють напрямок обертання. Це робить їх зручними для застосування в конструкціях, де необхідно організувати компактну та симетричну передачу руху без зміни його потужності (рис.1.6).



Рисунок 1.6 – Передача з однаковою кількістю зубців

Функціонально конічна передача в автомобілі виконує низку важливих завдань. Вона не лише змінює напрямок обертання на 90° (що необхідно для передавання моменту з карданного валу на півосі), а й служить складовою частиною головної передачі, забезпечуючи оптимальний розподіл моменту між ведучими колесами. Це сприяє покращенню прохідності автомобіля, зниженню пробуксовування і підвищує загальну ефективність трансмісійної системи. Оскільки конструкції трансмісії важких авто мають бути максимально витривалими, від конічних передач вимагається висока контактна міцність, втомна витривалість, термічна стабільність та мінімальний знос упродовж тривалого строку експлуатації [2].

1.3 Аналіз конструкції конічної передачі автомобіля КрАЗ

У важких вантажних автомобілях основну роль у зміні напрямку передавання крутного моменту від карданного валу до головної передачі виконує конічна передача, яка є невід'ємною частиною головної передачі ведучого моста. У трансмісійних системах КрАЗ використовуються конструкції з спіральною або прямозубою конічною передачею, залежно від моделі, що забезпечує ефективне зчеплення при великому навантаженні та стабільну передачу моменту при змінних умовах дорожнього покриття. В багатьох випадках передачею є конусні шестерні, повернені під кутом 90° , з підвищеним контактом зубців (спіральне нарізання) та додатковим циліндричною шестернею.

Конічна передача складається з пари зубчастих коліс, профілі яких базуються на бічних поверхнях прямих кругових конусів, вписаних у сферу, при цьому вершини конусів розташовані в центрі цієї сфери. У моделях КрАЗ така конструкція дозволяє передати крутний момент від проміжного карданного валу до диференціалу ведучого моста.

Завдяки геометрії конусоподібного профілю, зубці мають змінну висоту та ширину по довжині, що забезпечує варіацію контактного профілю. Для уникнення осьових зміщень і зменшення зносу в умовах високих навантажень, шестерні часто виконуються зі спіральним профілем.

Схема монтажу в трансмісії може відрізнитись в залежності від моделі автотранспорту. У моделях КрАЗ-6322 та КрАЗ-65055 головна передача розташована у картері середнього моста. У випадку з КрАЗ-65055 задній міст має класичну конструкцію з головною передачею, диференціалом та криво зубими циліндричними колесами. Крім того, у конструкції передбачено міжосьовий диференціал, який розподіляє крутний момент між двома задніми мостами (рис.1.7). У КрАЗ-6322 також реалізовано аналогічну схему, проте основною особливістю є наявність прохідного (проміжного) моста, через який здійснюється передача моменту до заднього моста. Обидва мости мають

однакову конструкцію головної передачі — двоступеневу, одношвидкісну, з високонадійною зубчастою парою.

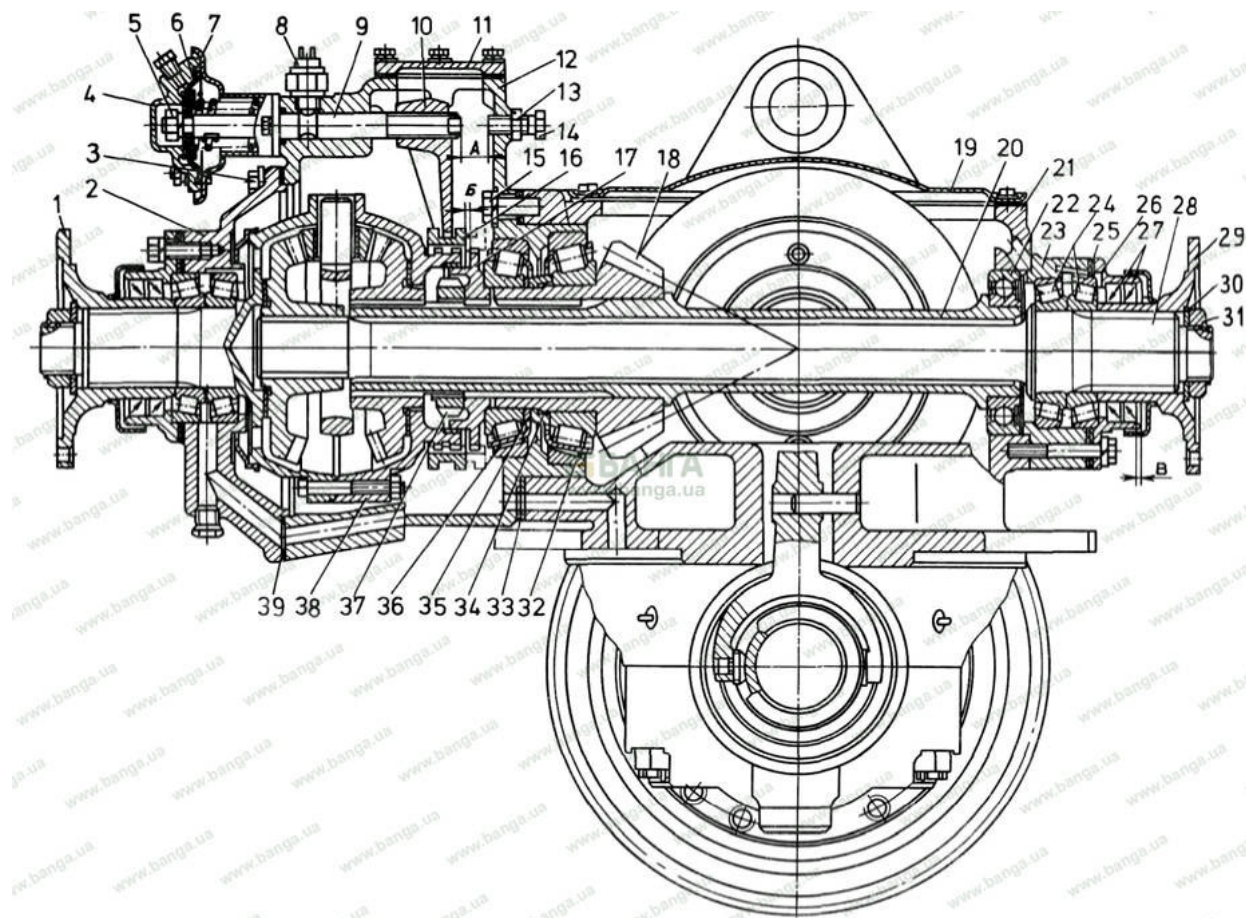


Рисунок 1.7 – Редуктор головної передачі середнього моста, 18 - ведуча конічна шестерня

Спіральна конічна передача у складі головного редуктора забезпечує високу плавність ходу, зменшення шуму та підвищену надійність у роботі. Зчеплення відбувається поступово, що мінімізує ударні навантаження та сприяє тривалому терміну служби зубців. Завдяки цьому обидві моделі відзначаються стабільною передачею потужності навіть у важких умовах експлуатації – бездоріжжя, перевантаження, низькі температури [3].

При цьому головна передача автомобіля потребує якісного змащення. У технічній документації зазначено використання трансмісійного масла типу ТМ-3-9 (GL-5) для картерів мостів. Це мастило має високі протизношувальні

та протикорозійні властивості, що є критичним для забезпечення довговічної роботи зачеплення.

Моделі автомобілів КрАЗ оснащені надійними спіральними конічними передачами, які працюють у складі двоступеневої головної передачі. Незважаючи на різницю в компонованні трансмісії, обидві схеми забезпечують ефективну передачу крутного моменту до ведучих мостів. Завдяки використанню спірального профілю зубців досягається підвищена довговічність, плавність ходу та стійкість до перевантажень. Однак для збереження експлуатаційних характеристик необхідне своєчасне технічне обслуговування, контроль за рівнем і якістю мастила та дотримання регламентів налаштування зубчастої пари.

1.4 Матеріали, які застосовують для виготовлення конічних передач

Конічні передачі працюють у режимах підвищеного навантаження, зі змінним напрямком зусиль та часто за умов інтенсивного тертя, тому матеріали, що застосовуються для таких деталей, мають відповідати низці жорстких вимог. Серед них – висока поверхнева твердість, зносостійкість, міцність серцевини, стійкість до втоми, термічної деформації, а також достатня оброблюваність при механічній та термічній обробці.

Найбільш поширеним і надійним класом матеріалів для виготовлення конічних передач в трансмісіях вантажних автомобілів – є леговані конструкційні сталі. Зокрема, в умовах високих динамічних навантажень та вимог до ресурсу роботи добре зарекомендувала себе сталь 18ХГТ – хромомарганцева легована сталь, яка широко застосовується для зубчастих коліс, у тому числі конічних (рис.1.8). Після цементації та термічної обробки сталь 18ХГТ набуває високої поверхневої твердості (до 58–62 HRC), що забезпечує її стійкість до зношування, при цьому серцевина деталі зберігає достатню пластичність і в'язкість, що необхідно для спротиву ударним

навантаженням та динамічним перевантаженням, характерним для роботи трансмісії важкого автомобіля.



Рисунок 1.8 – Конічна передача з легованої сталі високої міцності

Аналогами цієї сталі є сталі 20Х та 40Х, які також широко використовуються в машинобудуванні для виготовлення шестерень. Сталь 20Х (хромиста) добре піддається цементації, після чого набуває високої зносостійкості та довговічності. Особливо актуальним є її застосування для коліс з прямими та спіральними зубцями, що працюють у режимах помірного або високого навантаження. Завдяки оптимальному балансу твердості й пластичності, ця сталь зберігає стабільні експлуатаційні характеристики навіть у випадках порушення режимів змащення або підвищеної температури [4].

Сталь 40Х більш міцна за структурою та також часто використовується для виготовлення деталей, що піддаються значним крутним моментам,

зокрема ведучих валів, фланців і шестерень. Вона має хорошу загартовуваність і стабільну структуру після термічної обробки, що забезпечує високу межу міцності й твердість. Її застосування можливе як у вигляді цільного матеріалу, так і у вигляді заготовки з локально загартованою зоною зубців. Проте у порівнянні з 18ХГТ, сталь 40Х дещо поступається за рівнем в'язкості серцевини після цементації, тому частіше застосовується в конструкціях з помірними динамічними навантаженнями або при використанні індукційної термообробки.

Для виготовлення конічних передач, що працюють при помірному навантаженні та швидкості, іноді використовують високоміцний чавун або чавун з кулястим графітом (ВЧ). Цей матеріал має задовільну зносостійкість і добре поглинає вібрації, однак поступається сталям за міцністю та в'язкістю. Тому чавуни застосовують, як правило, для допоміжних передач, у машинах середнього класу, або в умовах, де ударні навантаження відсутні (рис.1.9).



Рисунок 1.9 – Чавунна конічна передача

У специфічних випадках, наприклад в авіації, приладобудуванні чи виробництві електроприводів, використовуються бронзи, латуні, алюмінієві

сплави. Вони мають добрі антифрикційні властивості, легку вагу, стійкість до корозії, але поступаються сталям у міцності. Бронзові шестерні можуть застосовуватись у парі зі сталевими, особливо в умовах відсутності змазування або в редукторах з високими вимогами до безшумності роботи.

Для виготовлення легких, нерідко малих за розміром, безшумних і антикорозійних конічних передач у побутових або малонавантажених механізмах (наприклад, у сервоприводах, робототехніці, електроінструментах) іноді використовують інженерні пластики: поліамід (РА), поліацеталь (РОМ), армовані композити з вуглецевим або скляним волокном. Полімерні передачі мають низький коефіцієнт тертя, не потребують мастила, але мають обмеження щодо навантаження та температури. Для підвищення міцності іноді застосовують металеве армування або вставки (рис.1.10).

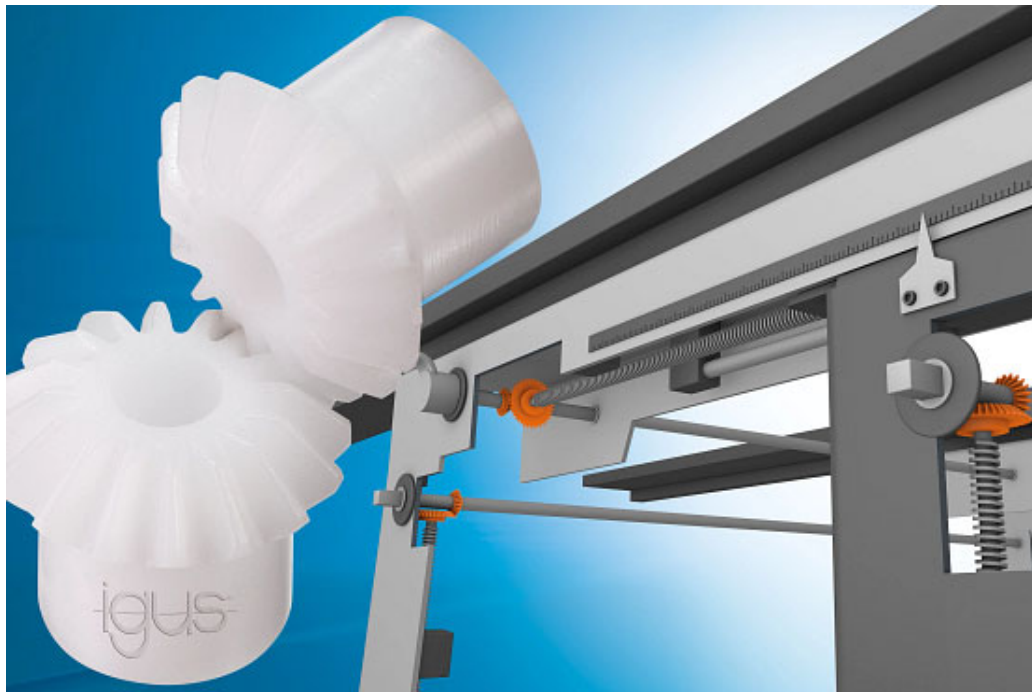


Рисунок 1.10 – Полімерна конічна передача

Незалежно від вибору матеріалу, високі експлуатаційні характеристики зубчастих коліс досягаються завдяки термічній або термохімічній обробці. Найпоширенішими є цементація, азотування, гартування з відпуском. Ці

методи дозволяють зміцнити поверхню зубців, зберігаючи при цьому пластичну серцевину, що особливо важливо для ударних і циклічних навантажень. У більшості випадків для сталей типу 18ХГТ, 20Х та 40Х застосовують саме комбіновану обробку — спочатку цементацію, потім гартування і низький відпуск.

Підсумовуючи, у виготовленні конічних передач для важких умов експлуатації найкращими варіантами є леговані сталі з термічною обробкою: зокрема 18ХГТ, 20Х та 40Х. Вони поєднують зносостійкість, міцність і технологічність. Для менш навантажених передач використовуються чавуни, кольорові метали або полімери. Правильний вибір матеріалу у поєднанні з відповідною термічною обробкою є запорукою довговічності, ефективності та надійної роботи конічної передачі в умовах інтенсивного навантаження.

1.5 Постановка задач роботи

У кваліфікаційній роботі представлено цілісний підхід до дослідження фізико-механічних властивостей матеріалу, що використовується для виготовлення конічної передачі у трансмісії важкого вантажного автомобіля КрАЗ. Метою роботи є аналіз експлуатаційних умов, конструкційних особливостей і властивостей матеріалу конічної передачі, що дозволить підвищити її зносостійкість, довговічність та надійність роботи в умовах підвищеного навантаження.

1. Провести технічний огляд типових конструкцій конічних передач, що застосовуються у трансмісіях важких автомобілів. Охарактеризувати тип передач, геометрію зубців, спосіб їх виготовлення та компоновання в складі головної передачі моста.

2. Сформулювати основні вимоги до матеріалу зубчастих коліс: забезпечення високої контактної витривалості, твердість поверхні зубців після термообробки, в'язкість серцевини, технологічність обробки, стійкість до зношування та втомного руйнування.

3. Обґрунтувати вибір базового матеріалу для виготовлення конічної передачі, з урахуванням їх фізико-механічних властивостей, технологічності обробки, а також досвіду їх практичного застосування у конструкціях передач підвищеної надійності.

4. Визначити та узагальнити основні фізико-механічні характеристики матеріалів. Розробити методику порівняльного аналізу цих характеристик на основі літературних джерел та нормативної документації.

5. Розглянути підходи до контролю якості матеріалу та виробів. Сформулювати процедури забезпечення якості на етапах виготовлення, обробки та монтажу передачі в складі трансмісії.

6. Виконати загальну оцінку економічної доцільності використання обраного матеріалу з урахуванням його ринкової вартості, ресурсу роботи передачі, частоти технічного обслуговування та витрат на ремонт. Запропонувати шляхи оптимізації підбору матеріалів для серійного виготовлення деталей передачі з метою зниження експлуатаційних витрат.

РОЗДІЛ 2.

ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА РОЗРОБКИ

2.1 Функціонально-вартісний аналіз

Функціонально-вартісний аналіз (ФВА) є одним із ключових інженерних інструментів, що дозволяє забезпечити комплексне обґрунтування техніко-економічної ефективності конструкційних рішень. У випадку проектування або удосконалення відповідальних елементів трансмісії, зокрема конічної передачі автомобіля КраЗ, ФВА дає змогу не лише оптимізувати матеріальний склад і конструкцію, а й забезпечити раціональний баланс між експлуатаційними показниками та витратами на виготовлення й обслуговування.

Об'єктом ФВА у даній роботі виступає матеріал виготовлення зубчастого колеса конічної передачі, який повинен задовольняти широкий спектр функціональних вимог: високу поверхневу твердість, ударну в'язкість, зносостійкість, стабільність розмірів при термічному впливі, технологічність обробки та економічну доцільність. Основне завдання — виявити матеріал або комбінацію матеріалу й термообробки, які забезпечують виконання всіх критичних функцій при мінімальних витратах протягом життєвого циклу деталі.

Функціональний підхід передбачає оцінювання конструкційного елемента не лише з точки зору геометрії чи матеріалу, а як носія конкретної функції в механізмі. Так, зубчасте колесо виконує передачу крутного моменту, приймає та розсіює динамічні навантаження, працює у режимі тертя ковзання та кочення.

Системний підхід дозволяє розглядати зубчасту пару як частину єдиної трансмісійної структури, в якій параметри одного елемента впливають на

роботу всієї системи (наприклад, жорсткість зачеплення впливає на рівень вібрацій, які передаються на картер моста).

Комплексний підхід враховує повний життєвий цикл виробу — від вибору матеріалу й технології обробки до умов експлуатації, зношування та потенційної утилізації або регенерації. Це дає змогу врахувати непрямі витрати, пов'язані з простоем техніки, необхідністю обслуговування, ремонту або заміни.

Принцип ієрархічності дозволяє структурувати функції: наприклад, основними функціями є передача моменту і забезпечення довговічності, тоді як збереження геометрії, технологічність обробки або стійкість до корозії — другорядні, але важливі у контексті тривалого використання.

Критерій ефективності функції — це співвідношення значущості тієї чи іншої функції до витрат на її реалізацію. Цей підхід дозволяє встановити, чи є витрати на певне технологічне рішення виправданими з погляду його внеску в загальну функціональність деталі.

У межах ФВА було проаналізовано кілька матеріалів, що традиційно застосовуються у виготовленні зубчастих передач: 18ХГТ, 20Х, 40ХН, 38Х2МЮА, з урахуванням можливості цементації, гартування, термохімічного зміцнення. Проведені порівняльні аналізи показали, що сталь 18ХГТ після цементації на глибину 1,2–1,4 мм та гартування до твердості 58–60 НRC забезпечує оптимальне поєднання високої зносостійкості поверхні та в'язкої серцевини, що є критичним у випадку роботи в умовах ударних навантажень [5].

Крім того, матеріал продемонстрував граничну міцність понад 1000 МПа, задовільну оброблюваність різанням та шліфуванням після гартування, а також прийнятну собівартість у масовому виробництві. При цьому, альтернативи — такі як сталь 40ХН — забезпечують вищу жорсткість, але поступаються в технологічності цементації, що ускладнює процес виготовлення в умовах серійного виробництва.

ФВА дозволив також виявити недоцільність застосування надмірних параметрів термічної обробки, зокрема глибокої цементації понад 1,5 мм, що не дає суттєвого приросту ресурсу, але значно підвищує енергозатрати та тривалість виробничого циклу.

Таким чином, застосування ФВА забезпечило комплексну оцінку вибору матеріалу для виготовлення конічної передачі з урахуванням всіх функціональних вимог, технологічних і економічних факторів. Такий підхід дозволяє приймати обґрунтовані інженерні рішення, що сприяють підвищенню ресурсу, зниженню витрат на обслуговування та покращенню надійності автомобільної техніки в цілому.

2.2 Аналіз потреб та визначення експлуатаційних вимог до матеріалу

У процесі проектування та удосконалення силових елементів трансмісії вантажного автомобіля важливим етапом є обґрунтований вибір конструкційного матеріалу, здатного ефективно виконувати свої функції в умовах підвищених експлуатаційних навантажень. Зокрема, у випадку конічної передачі автомобіля КрАЗ, яка функціонує у складі головного моста, матеріал повинен демонструвати сукупність механічних та термічних властивостей, що забезпечують надійну передачу крутного моменту при роботі у важких умовах. Автомобілі даного класу експлуатуються в широкому спектрі умов — від асфальтованих доріг до бездоріжжя, зокрема в умовах підвищеної запиленості, вологості, температурних перепадів і навантажень на межі технічних можливостей трансмісії. При русі на понижених передачах або буксуванні по пересіченій місцевості виникають різкі зміни крутного моменту, що призводить до імпульсних ударних навантажень на зубці передачі. Крім того, періодичні зупинки, запуск двигуна з навантаженням, нестабільне мастило або його локальний перегрів також спричиняють зношування

контактних поверхонь. Це зумовлює необхідність глибокого аналізу потреб до матеріалу, з якого виготовляється передача.

Матеріал повинен мати високу границю міцності, що дозволить йому витримувати не тільки статичні, а й динамічні навантаження в зоні зачеплення. Для деталей такого типу нормованим значенням є не менше ніж 900–1000 МПа у стані після термообробки. При цьому важливу роль відіграє також твердість робочої поверхні зуба, яка має забезпечити зносостійкість і опір локальним пластичним деформаціям. Показники твердості на рівні 58–62 HRC є бажаними, особливо для деталей, що піддаються цементації або азотуванню. Таке зміцнення дозволяє сформувати на поверхні структуру, здатну чинити опір абразивному та фретинговому зношуванню, зберігаючи при цьому в'язкість серцевини.

Окремо варто виділити потребу у високій ударній в'язкості серцевини, що дозволяє уникнути крихкого руйнування при раптових перевантаженнях. Такі навантаження часто виникають при зупинках з інерційною масою або в разі пробуксовування і різкого зчеплення коліс з поверхнею. У цих умовах матеріал має бути не лише твердим, а й здатним деформуватись без руйнування. На практиці критичною є межа в'язкості не нижче ніж 30–40 Дж/см², яка забезпечується відповідною мікроструктурою після правильно підбраної термообробки. Це вимагає використання легованих сталей з ретельно контрольованим вмістом вуглецю, хрому, марганцю та нікелю, які сприяють формуванню мартенситної поверхні та в'язкої феритно-перлітної основи.

З огляду на специфіку роботи конічної передачі, одним із визначальних факторів є стійкість до зношування у змішаному або сухому терті. Мастило не завжди рівномірно покриває поверхню зачеплення, особливо при старті чи в умовах тривалої стоянки на морозі. Це спричиняє потребу у структурній стійкості матеріалу до локального перегріву, а також у здатності протистояти мікропітингу, карієсу та іншим видам мікродеструкцій. Зерниста структура, рівномірний розподіл карбідів, стабільна мікроструктура після цементації чи

індукційного гартування — усі ці властивості мають ключове значення. До того ж, матеріал повинен бути технологічним у механічній обробці як до, так і після термічної обробки. Стабільність геометрії зуба після цементації, можливість шліфування без появи термічних тріщин і деформацій є надзвичайно важливими для збереження точності зачеплення. Це безпосередньо впливає на ККД передачі, рівень шуму, зношування та термін служби вузла в цілому [6].

Не менш суттєвою є термостабільність і стійкість до зворотного відпуску. У разі локального перегріву, який може виникати через мастильну недостатність або перевантаження, матеріал не повинен втрачати свою твердість або переходити у небажані фазові стани. Це особливо актуально для робочих температур в межах 200–250 °С, які можуть короткочасно виникати в зоні зачеплення. Сталь повинна зберігати задані експлуатаційні властивості впродовж тривалого часу, не зазнаючи деградації мікроструктури. У випадку роботи в умовах вологи, мастила та солей, які можуть потрапити в трансмісію, необхідна також базова корозійна стійкість, яка реалізується як за рахунок складу сталі, так і за рахунок захисних плівок чи поверхневих обробок.

Останнім аспектом, що впливає на вибір матеріалу, є сумісність з різними видами термічної й хіміко-термічної обробки. Сталі, що добре цементуються, мають низьку схильність до утворення тріщин, не піддаються гартувальним деформаціям, є пріоритетними для масового виробництва. На практиці це сталі типу 18ХГТ, 20Х, 40ХН, які мають достатню міцність, технологічність і добре піддаються термічній обробці.

З метою обґрунтування функціональної значущості основних складових редуктора було проведено функціонально-вартісний аналіз, який дозволяє встановити співвідношення між технічними функціями елементів, їхньою конструкційною складністю та витратами на виготовлення. У таблиці 2.1 подано перелік основних конструктивних елементів редуктора, що відіграють ключову роль у забезпеченні його працездатності, а також наведено відповідні функціональні призначення кожного з них.

Таблиця 2.1 – Елементи конструкції редуктора та їх функції

Елементи		Функції	
Позначення	Назва	Позначення	Опис
E_0	Зубчасте колесо	Φ_0	Передача крутного моменту, зміна швидкості обертання
E_1	Вальниці	Φ_1	Підтримка обертових валів, зменшення тертя
E_2	Корпус редуктора	Φ_2	Забезпечення жорсткості конструкції, захист механізму від впливу зовнішнього середовища
E_3	З'єднувальні елементи	Φ_3	Фіксація деталей конструкції, забезпечення цілісності вузла
E_4	Втулки та ущільнюючі деталі	Φ_4	Герметизація з'єднань, захист від витоків мастила та пилу

Після визначення функцій кожного елемента було здійснено кількісну оцінку їх значимості та вартості у загальній структурі редуктора. Це дозволяє виявити ті частини механізму, які формують основний вклад у функціональність, і відповідно – є пріоритетними об'єктами для оптимізації, модернізації чи використання високоякісних матеріалів. Результати оцінки наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Значимість, вартість та ефективність елементів редуктора

Елемент	Функція	Значимість, %	Вартість, %	Ефективність (Зн/В)
Зубчасте колесо	Φ_0	35	30	1,17

Вальниці	Φ_1	25	30	0,83
Корпус редуктора	Φ_2	20	20	1,00
З'єднувальні елементи	Φ_3	10	10	1,00
Втулки та ущільнюючі деталі	Φ_4	10	10	1,00
Усього	–	100	100	–

Аналіз показує, що найбільшу функціональну значущість у роботі редуктора має зубчасте колесо, оскільки саме воно забезпечує передавання крутного моменту та зміну частоти обертання. Високі значення вартості та важливості мають також вальниці, які забезпечують стабільну підтримку рухомих частин і знижують втрати на тертя. Корпус редуктора та допоміжні елементи — втулки, ущільнювачі й з'єднання — мають нижчі значення, але залишаються критично важливими для загальної надійності та довговічності механізму. Таким чином, результати ФВА слугують основою для прийняття рішень щодо вибору матеріалів, пріоритетів зміцнення, а також подальшої конструкційної оптимізації.

2.3 Створення тривимірної моделі зубчастого колеса

У процесі дослідження фізико-механічних характеристик матеріалу для виготовлення конічної передачі автомобіля КрАЗ важливим етапом є створення точної тривимірної моделі зубчастого колеса. Така модель дозволяє візуалізувати геометрію деталі, оцінити відповідність конструкції технологічним і експлуатаційним вимогам, виявити можливі конфлікти у формоутворенні та підготувати модель до подальшого чисельного аналізу й випробувань.

Для досягнення цих цілей у межах даної роботи було використано програмне забезпечення SolidWorks — сучасну інтегровану систему автоматизованого проєктування, що широко застосовується у сфері машинобудування, приладобудування, матеріалознавства та інженерного моделювання. SolidWorks забезпечує гнучке тривимірне параметричне моделювання, побудову точних креслень, а також підтримку аналізу механічної поведінки компонентів у середовищі навантаження.

У SolidWorks побудова твердотільної моделі зубчастого колеса здійснюється на основі параметричного підходу, що ґрунтується на створенні ескізів (2D-проекцій) у відповідних площинах та подальшому їх обертанні, видавлюванні або вирахуванні для формування об'єму. Кожен геометричний елемент супроводжується точними числовими параметрами, які легко змінювати у відповідь на нові розрахункові дані або конструкційні вимоги.

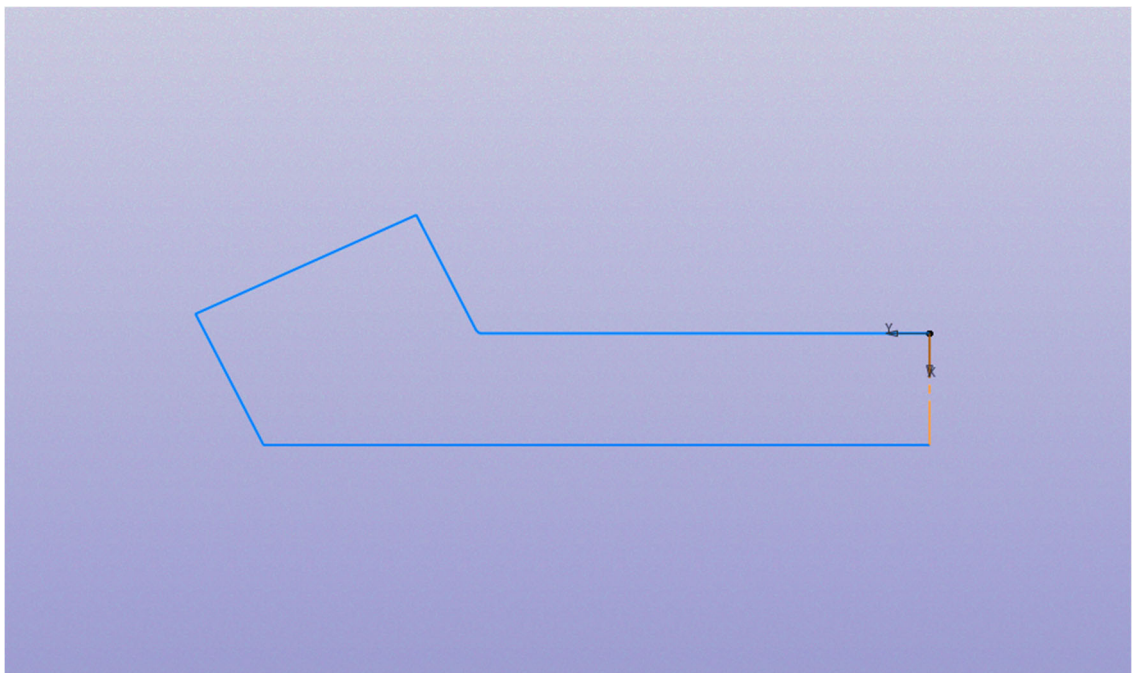


Рисунок 2.1 – Створення ескізу профілю зуба

Особливої уваги під час моделювання було надано точному профілю зуба відповідно до геометрії конічної передачі та стандартів зачеплення [7]. Параметри зубчастого колеса для моделювання конічної передачі редуктора

були обрані з бібліотеки стандартних елементів програмного забезпечення SolidWorks Toolbox, що містить типові компоненти відповідно до міжнародних стандартів (зокрема ISO 23509 для конічних передач). Для забезпечення відповідності моделі до умов експлуатації трансмісій вантажних автомобілів КрАЗ, були обрані та адаптовані наступні геометричні та технічні параметри:

- Модуль зуба (m) – 5 мм, що відповідає передачі середньої потужності з необхідною міцністю;
- Кількість зубців на ведучому колесі (z_1) – 16;
- Кількість зубців на веденому колесі (z_2) – 32, що забезпечує передаточне число 2:1;
- Кут конуса (δ_1/δ_2) – $45^\circ / 45^\circ$, симетрична передача для компактного компонування;
- Ширина зубчастого вінця (b) – 40 мм;
- Діаметр ділильного кола (d) – 80 мм (ведуче), 160 мм (ведене);
- Тип профілю зуба – евольвентний з нормальним тисковим кутом 20° , згідно стандартів ISO;
- Тип зачеплення – прямозубе конічне.

Ці параметри були використані як вихідні дані для побудови точної тривимірної моделі в середовищі SolidWorks. Завдяки параметричному підходу до моделювання, система забезпечила повну асоціативність геометрії, що дозволило вносити зміни до будь-якого параметра без порушення цілісності моделі. Крім того, автоматично генеровані креслення та технічні специфікації значно спростили підготовку до подальшого інженерного аналізу.

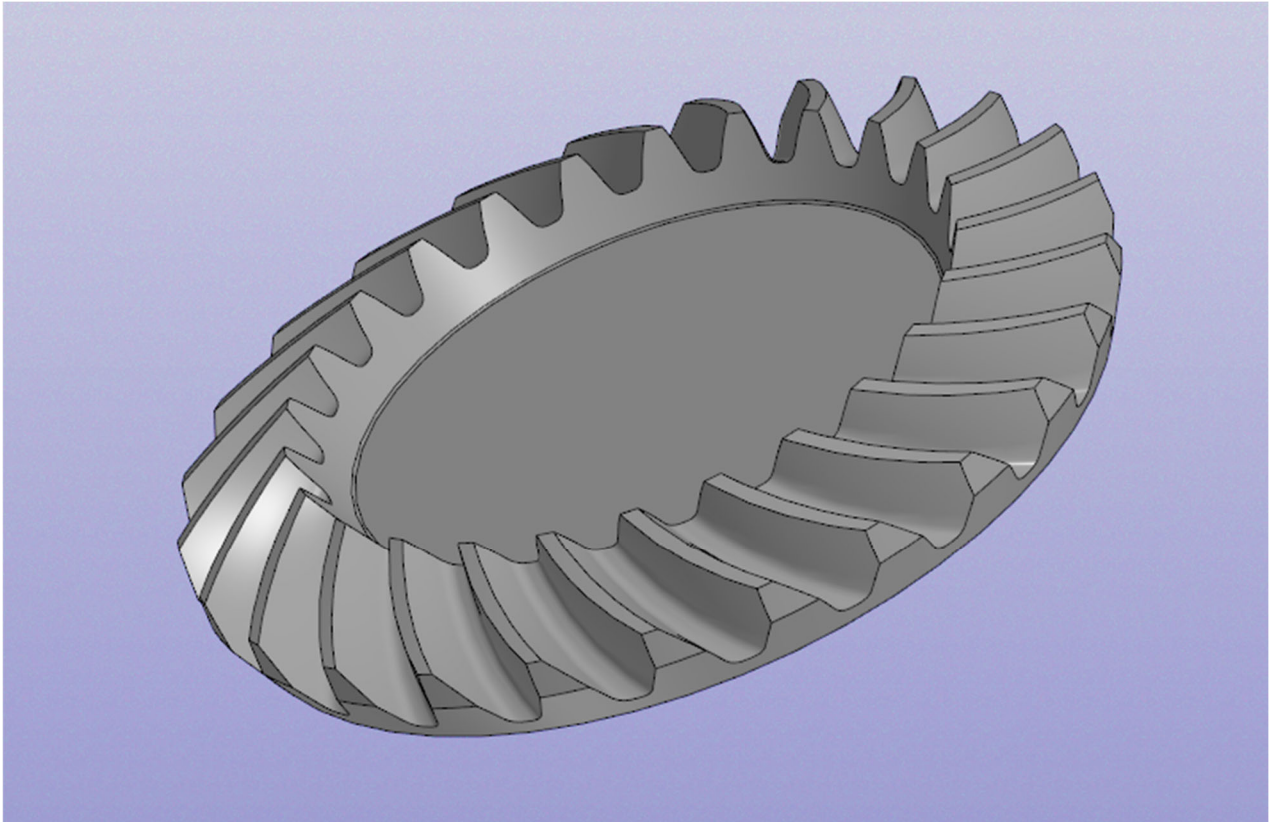


Рисунок 2.2 – Тривимірна модель конічної передачі

Використання SolidWorks у межах дослідження дозволило ефективно реалізувати етап комп'ютерного моделювання, знизити ризики похибок при виготовленні дослідних зразків, а також створити повноцінну основу для подальшого віртуального тестування, розрахунків напружень і моделювання контактної взаємодії зубців передачі.

У подальшому створену у SolidWorks тривимірну модель зубчастого колеса конічної передачі було експортовано у формат, сумісний з програмним середовищем ANSYS, для проведення аналізу напружено-деформованого стану. Це дозволило перейти до етапу чисельного моделювання реальних умов навантаження, з урахуванням геометричних особливостей деталі, прикладених сил і граничних умов.

2.4 Визначення напружено-деформованого стану моделі

У межах дослідження напружено-деформованого стану (НДС) зубчастого колеса конічної передачі редуктора автомобіля КрАЗ було проведено чисельне моделювання за допомогою програмного комплексу ANSYS Workbench. Розрахунок спрямований на оцінку рівня механічних напружень і деформацій, які виникають у матеріалі при дії експлуатаційного крутного моменту. Це дозволяє встановити потенційно небезпечні зони концентрації навантаження, перевірити відповідність міцності матеріалу умовам роботи та визначити необхідність геометричної або технологічної оптимізації елемента.

Твердотільну тривимірну модель зубчастого колеса було попередньо створено в середовищі SolidWorks з урахуванням основних параметрів — модуля зачеплення, кількості зубців, кута конуса та ширини зубчастого вінця. Після завершення геометричного проектування модель було експортовано у формат STEP і імпортовано до модуля Geometry в ANSYS Workbench. У якості конструкційного матеріалу задано леговану сталь AISI 5115, яка є міжнародним аналогом сталі 18ХГТ, поширеної у вітчизняному машинобудуванні для виготовлення зубчастих передач.

З бази матеріалів ANSYS були імпортовані відповідні механічні характеристики: модуль пружності 2.1×10^5 МПа, границя плинності 600 МПа, границя міцності 950 МПа, щільність 7850 кг/м³. Поверхнева твердість після цементації становить 58–62 HRC, що забезпечує високу зносостійкість та опір втомі. Дані властивості були уточнені відповідно до нормативних таблиць і дослідних джерел, а графік залежності напруження від деформації було використано як основну механічну характеристику у модулі Engineering Data [8].

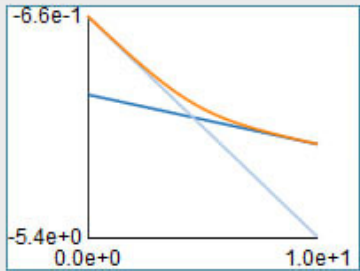
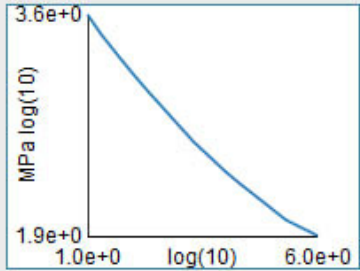
Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2e+05 MPa
Poisson's Ratio	0,30000
Bulk Modulus	1,6667e+05 MPa
Shear Modulus	76923 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1,2e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	0 MPa
Compressive Yield Strength	250,00 MPa
Strain-Life Parameters	
S-N Curve	
Tensile Ultimate Strength	460,00 MPa
Tensile Yield Strength	250,00 MPa
Thermal	
Isotropic Thermal Conductivity	0,060500 W/mm·°C
Specific Heat Constant Pressure	4,34e+05 J/tonne·°C
Electric	
Isotropic Resistivity	0,00017000 ohm·mm
Magnetic	
Isotropic Relative Permeability	10000

Рисунок 2.3 – Характеристики сталі 18ХГТ

Наступним етапом стало формування скінченно-елементної сітки. Вона будувалась на основі тетрадральних елементів із локальним згущенням у зоні профілю зуба, де очікується найбільша концентрація напружень. Глобальний

розмір елемента було обрано 2 мм, а в області основи зуба — до 0.5 мм. Усього було згенеровано понад 650 тисяч вузлів і 350 тисяч елементів, що забезпечує високу точність розрахунку без надмірного ускладнення обчислень. На цьому етапі було проведено перевірку якості сітки та збіжності моделі.

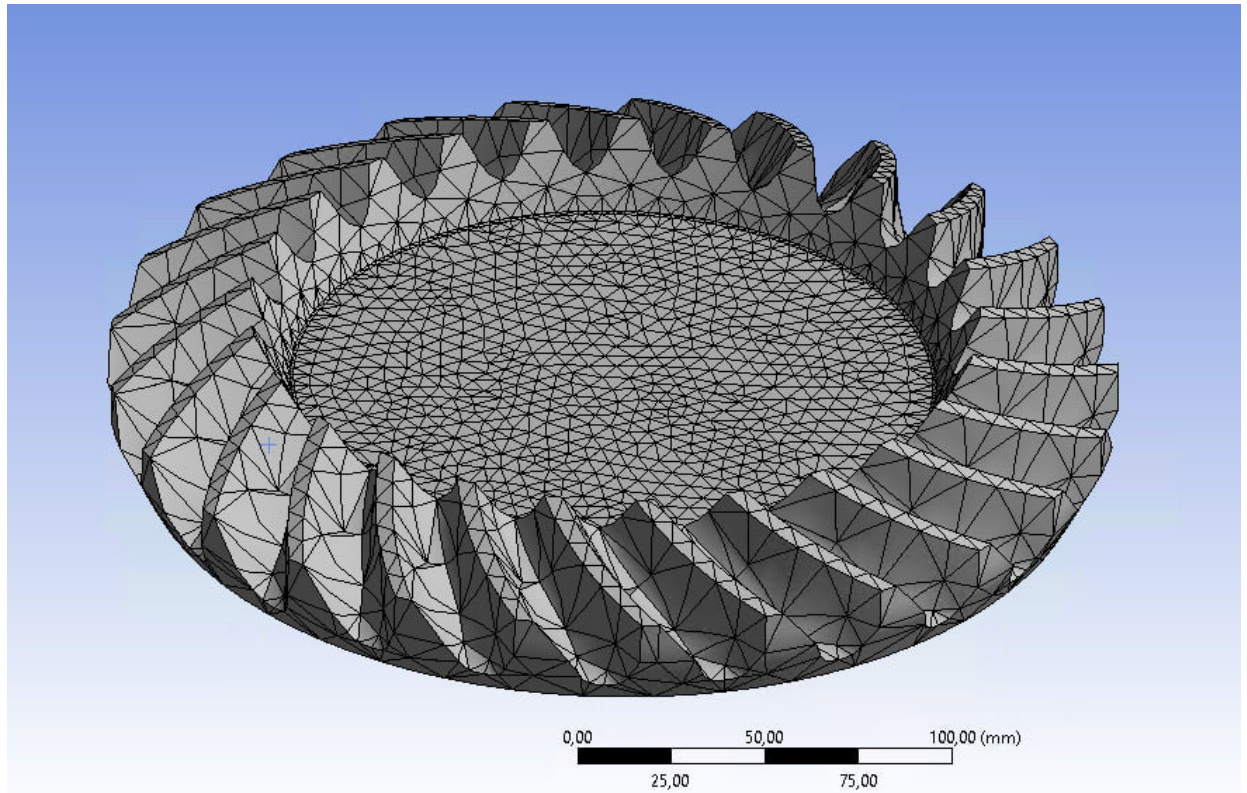


Рисунок 2.4 – Генерація сітки

Граничні умови були сформульовані з урахуванням конструктивної схеми: отвір під посадку на вал жорстко зафіксовано, що відповідає умовам нерухомого з'єднання, а на робочу поверхню зуба прикладено тангенціальне навантаження, еквівалентне дії крутного моменту величиною 800 Н·м. Для реалізації умов контакту використано спрощене точкове навантаження, рівномірно розподілене на профіль зуба, що імітує контакт із веденим колесом. Напрямок сили задано відповідно до орієнтації зачеплення — в площині конуса, з урахуванням кута нахилу 45° .

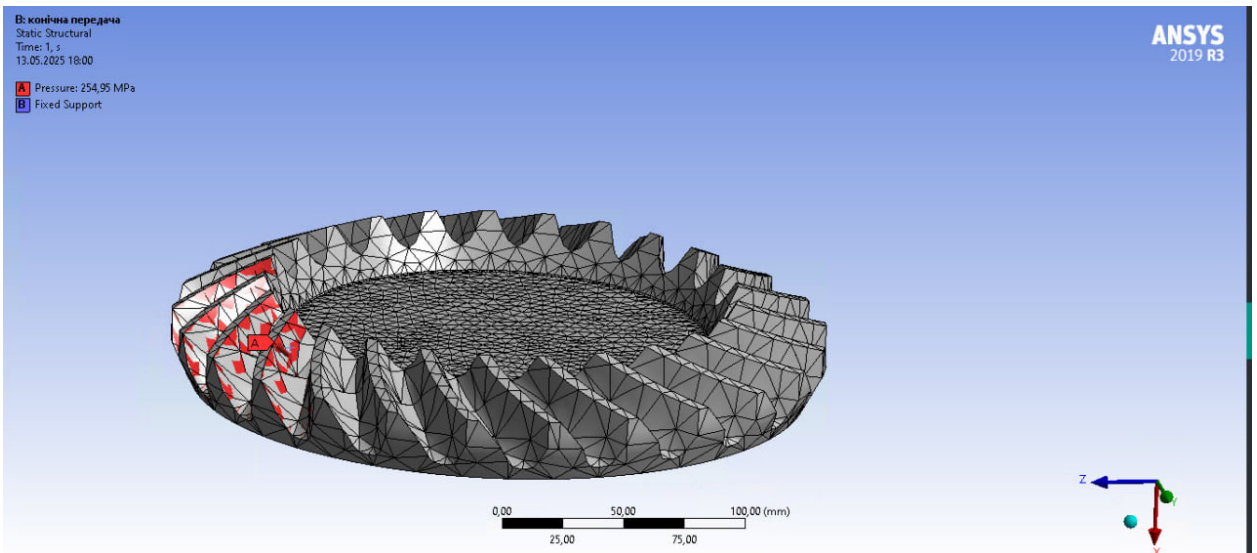


Рисунок 2.5 – Розподіл навантажень на профіль зуба

У результаті розрахунку в модулі Static Structural були отримані карти розподілу еквівалентних напружень за Мізесом та загальних деформацій. Максимальні еквівалентні напруження виникають у зоні основи зуба, що повністю узгоджується з аналітичними розрахунками і є типовим місцем концентрації при згині. Величина напруження склала приблизно 400 МПа, що нижче за допустимий рівень для цементованої сталі (550 МПа). Розподіл загальної деформації показав, що максимальні переміщення не перевищують 0,15 мм і зосереджені на периферійній частині зуба, при цьому форма колеса зберігає свою цілісність без суттєвих локальних викривлень. Візуалізація результатів у вигляді температурних шкал напружень і деформацій дозволила точно визначити межі зон ризику та переконатися у відсутності критичних точок.

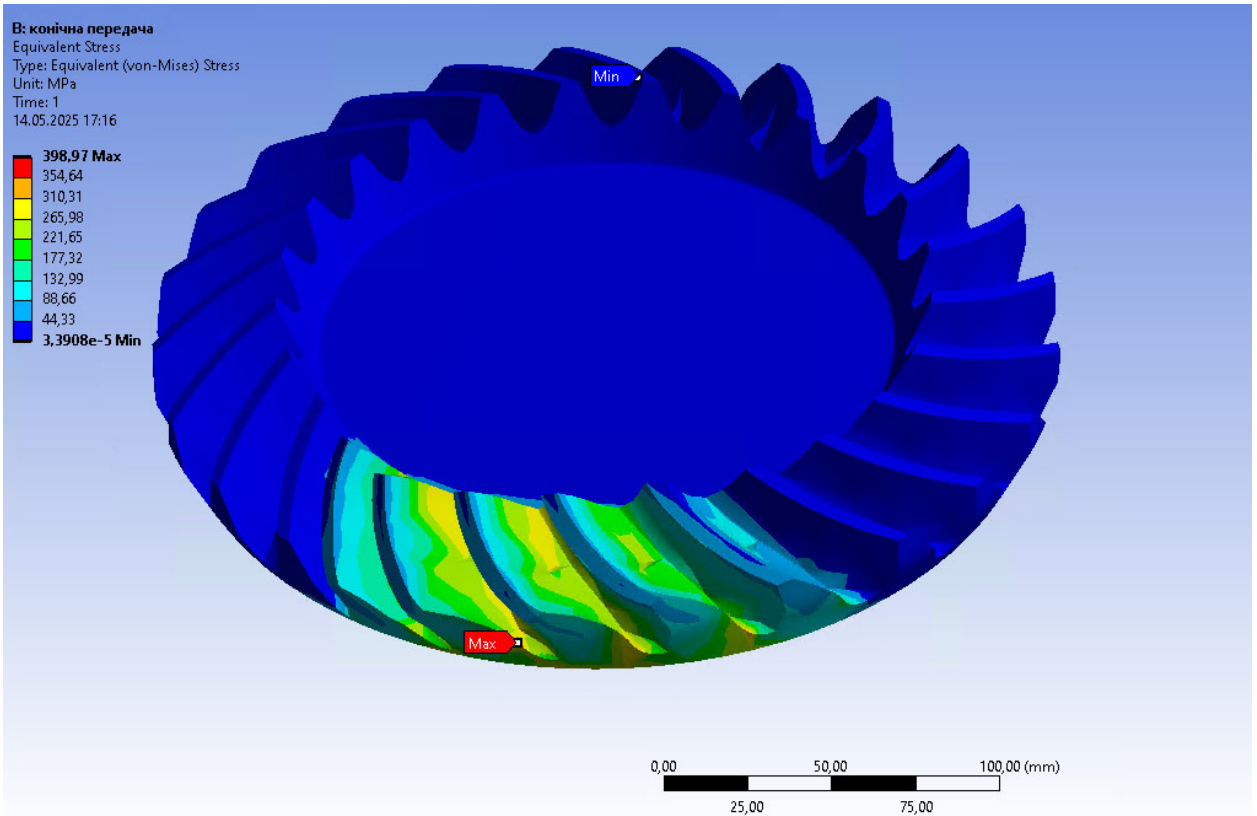


Рисунок 2.6 – Еквівалентні напруження, які виникли на зубі конічної передачі

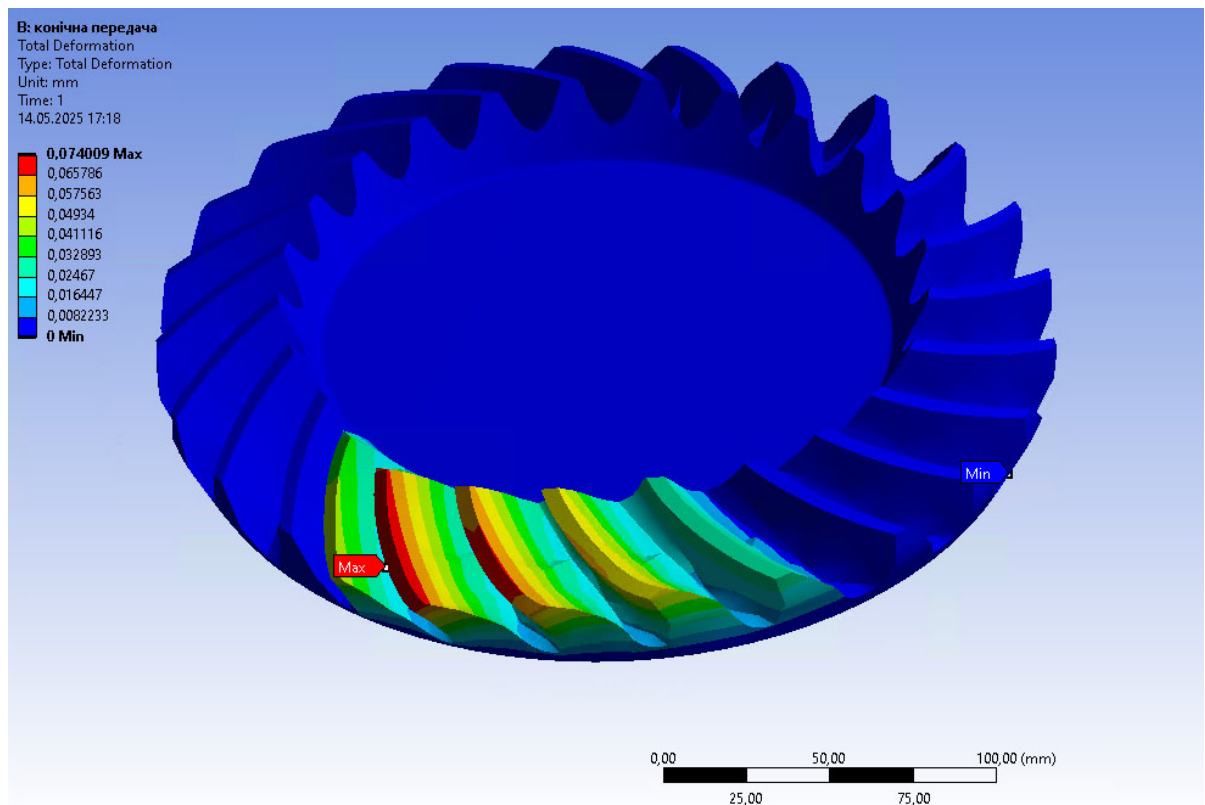


Рисунок 2.7 – Показник деформації зуба конічної передачі

Отримані результати засвідчують достатню міцність і жорсткість конструкції зубчастого колеса при роботі в умовах максимального навантаження. Це дозволяє рекомендувати обраний матеріал і геометрію зуба для використання в редукторах вантажних автомобілів типу КрАЗ без додаткового підсилення або технологічних змін. Крім того, результати можуть бути використані для верифікації аналітичних методик розрахунку міцності та як вихідні дані для втомного аналізу або оптимізації конструкції в подальших етапах проектування.

2.5 Висновки за розділом

У ході виконання другого розділу було проведено комплексний інженерний аналіз, спрямований на визначення фізико-механічних характеристик матеріалу виготовлення зубчастого колеса конічної передачі редуктора автомобіля КрАЗ. Застосування функціонально-вартісного аналізу дало змогу системно обґрунтувати вибір конструкційного матеріалу, з урахуванням вимог до передачі крутного моменту, зносостійкості, ударної в'язкості, жорсткості та економічної доцільності. За результатами порівняльного аналізу декількох марок легованих сталей, визначено, що оптимальним варіантом є сталь 18ХГТ з цементацією до глибини 1,2–1,4 мм і подальшим гартуванням до твердості 58–60 HRC. Така комбінація забезпечує високий ресурс, надійність при ударних навантаженнях і стабільні експлуатаційні властивості в складних умовах, характерних для експлуатації техніки КрАЗ.

Проведено глибокий аналіз експлуатаційних потреб, який показав, що матеріал повинен бути не лише міцним і твердим, а й стабільним при локальних перегрівих, контактному зношуванні, коливаннях навантаження та ускладнених умовах мащення. Визначено критичні вимоги до механічної міцності (понад 900 МПа), ударної в'язкості (не менше 30–40 Дж/см²), твердості (58–62 HRC) та стійкості до деградації мікроструктури при роботі в

діапазоні температур до 250 °С. Встановлено, що сталь 18ХГТ задовольняє ці критерії та є оптимальною для серійного виробництва завдяки технологічності цементації, гартування та фінішної обробки.

В межах САD-етапу створено високоточну тривимірну параметричну модель зубчастого колеса у середовищі SolidWorks з використанням бібліотеки стандартних елементів. Побудована модель враховує вимоги до модуля, кількості зубців, ширини вінця та профілю евольвентного зачеплення. Вона була підготовлена для експорту в ANSYS з метою проведення чисельного аналізу напружено-деформованого стану.

Моделювання в ANSYS Workbench показало, що при прикладенні крутного моменту 800 Н·м максимальні еквівалентні напруження в основі зуба не перевищують 400 МПа, що значно нижче допустимого рівня для сталі після цементації (550 МПа), з коефіцієнтом запасу міцності понад 1,3. Карта розподілу деформацій свідчить про відсутність локальних перевантажень або критичних вигинів, що дозволяє вважати геометрію колеса стабільною і надійною при дії навантаження. Отримані результати підтверджують правильність вибору матеріалу, обґрунтованість конструкції та ефективність методики, що використовувалась для її дослідження. Вони можуть бути використані для подальшої оптимізації редуктора, уточнення параметрів термічної обробки та розробки аналогічних вузлів трансмісії для важких умов експлуатації.

РОЗДІЛ 3. ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ

3.1 Обґрунтування вибору конструкційного матеріалу для конічної передачі

У сучасному машинобудуванні ефективна робота трансмісійних механізмів, зокрема конічних передач, безпосередньо залежить від правильного вибору матеріалу для виготовлення їх ключових елементів — зубчастих коліс. Саме матеріал визначає рівень зносостійкості, ударної в'язкості, жорсткості, опору втомі та довговічності вузла в цілому. У випадку трансмісії вантажного автомобіля КрАЗ, яка працює у важких експлуатаційних умовах, вибір конструкційного матеріалу є критично важливим етапом, що впливає як на надійність агрегату, так і на ефективність його виробництва.

Основними критеріями вибору матеріалу для виготовлення конічної передачі є: висока контактна міцність, зносостійкість, стабільність механічних властивостей при змінних навантаженнях, технологічність термічної обробки, економічна доцільність і доступність на ринку. Визначальну роль відіграє також сумісність матеріалу з типом термічної або хіміко-термічної обробки, адже це безпосередньо впливає на структуру поверхневого шару, глибину зміцнення та внутрішній градієнт твердості [9].

Для забезпечення високих експлуатаційних характеристик зубчастого колеса необхідно обрати матеріал, який здатен забезпечити границю витривалості не нижче 600–700 МПа при дії циклічних змінних навантажень, а також поверхневу твердість після цементації не менше 58 HRC. Зазвичай у таких випадках використовуються леговані конструкційні сталі, що добре піддаються цементації — це сталі марок 18ХГТ, 20Х, 40ХН, 38Х2МЮА тощо. Ці сталі дозволяють формувати тверду поверхню з в'язкою серцевиною,

забезпечуючи таким чином високу опірність до зношування й крихкого руйнування під час експлуатації.

У даній роботі для конічної передачі автомобіля КрАЗ було обґрунтовано використання сталі 18ХГТ — низьковуглецевої хромонікелевої легованої сталі, яка має збалансовані властивості та є стандартом у виготовленні цементованих шестерень. Сталь 18ХГТ після цементації до глибини 1,2–1,4 мм і подальшого гартування забезпечує поверхневу твердість 58–62 HRC, при цьому серцевина залишається пластичною, що дозволяє уникати руйнування при ударних навантаженнях. Її границя міцності становить понад 950 МПа, а границя плинності — до 600 МПа, що є достатнім для більшості застосувань у трансмісійній техніці.

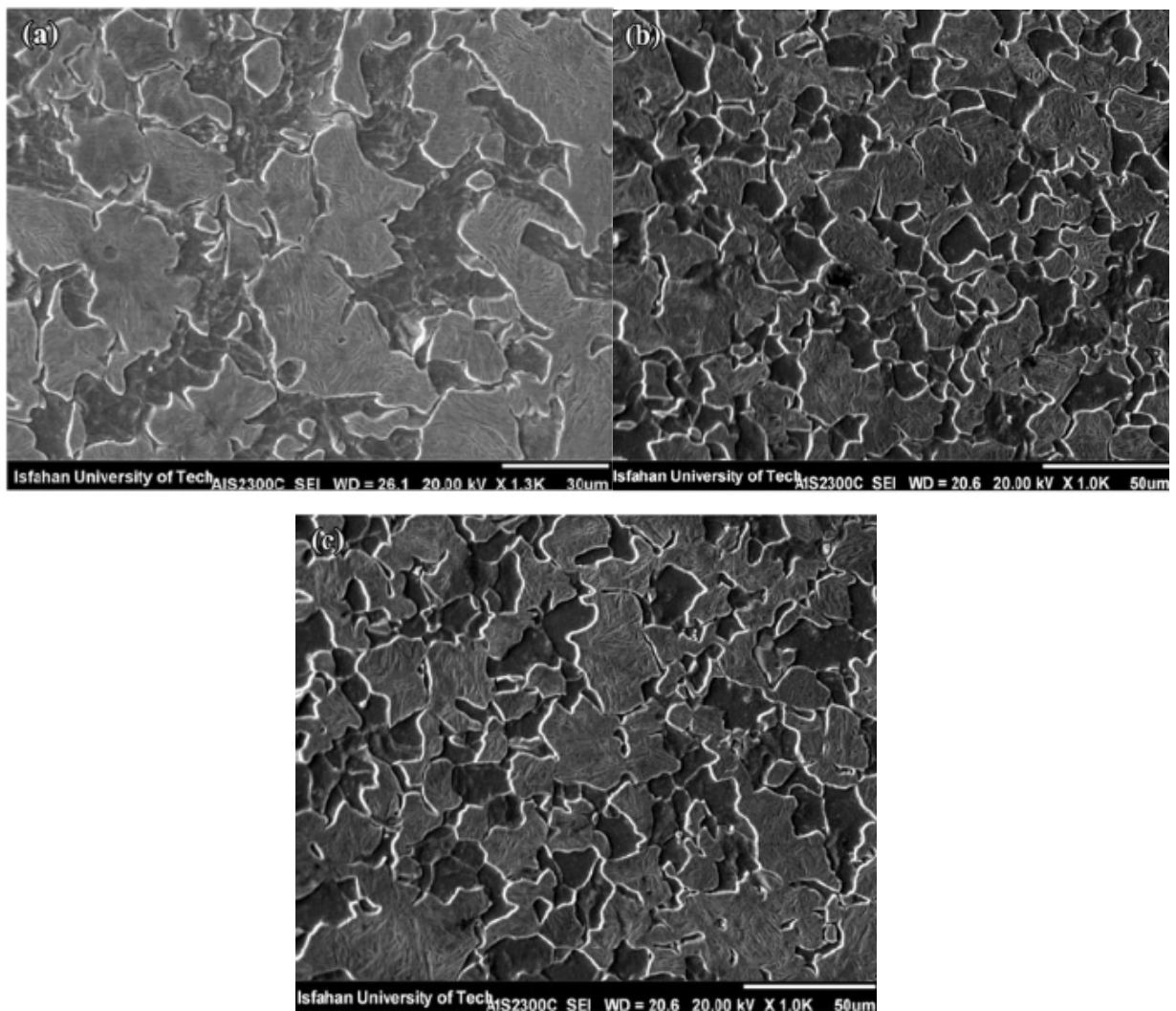


Рисунок 3.1 – SEM-мікрофотографії виготовленої двофазної сталі AISI 5115

Матеріал також вирізняється доброю оброблюваністю до та після термообробки. Це важливо з огляду на необхідність точного фінішного шліфування поверхонь зуба після цементації. 18ХГТ має достатню стабільність мікроструктури після гартування, що дозволяє зменшити деформації й витрати на корекцію геометрії зуба. Крім того, ця сталь є економічно доцільною у серійному виробництві: її собівартість нижча порівняно з високолегованими марками, а технологія цементації вже широко апробована в промисловості.

У процесі функціонально-вартісного аналізу було проаналізовано відношення значущості ключових функцій, які виконує зубчасте колесо, до витрат на їх забезпечення. Зокрема, довговічність, передача крутного моменту та опір зношуванню були визначені як критичні функції, у той час як технологічність виготовлення та корозійна стійкість — як допоміжні. В результаті аналізу встановлено, що саме сталь 18ХГТ забезпечує найкраще співвідношення ефективності виконання функцій до витрат на її обробку та зміцнення.

Для порівняння, сталь 40ХН має вищу жорсткість і границю плинності, однак гірше цементується і потребує більш складної термообробки, що підвищує тривалість виробничого циклу та енергозатрати. Сталь 38Х2МЮА, хоча й характеризується підвищеною границею міцності, поступається 18ХГТ у технологічності, зокрема в частині термічної стабільності при повторному нагріванні. Таким чином, жодна з альтернатив не забезпечує настільки оптимального балансу між функціональністю, надійністю та собівартістю.

Окремо слід зазначити вплив термообробки на властивості обраного матеріалу. Проведення цементації з подальшим гартуванням і низьким відпуском дозволяє сформувати твердий поверхневий шар з мартенситною структурою, тоді як серцевина зберігає феритно-перлітну пластичну структуру. Це критично важливо для деталей, що працюють під змінними та ударними навантаженнями, які часто виникають під час буксування або роботи по пересіченій місцевості. Структура після обробки не лише чинить

опір утворенню тріщин і локальних деформацій, а й демонструє стабільність при локальному перегріві, що запобігає зниженню твердості в зоні зачеплення.

Таким чином, обраний конструкційний матеріал повністю задовольняє вимоги до конічної передачі автомобіля КрАЗ як за експлуатаційними характеристиками, так і за показниками довговічності, технологічності та економічної доцільності. Його використання дозволяє знизити втрати на зношування, забезпечити стабільність геометрії зуба, зменшити ймовірність поломок та підвищити загальний ресурс вузла. Це дає змогу не лише забезпечити технічну надійність трансмісії, а й знизити витрати на технічне обслуговування і продовжити інтервали між регламентними ремонтами. Такий підхід повністю відповідає вимогам сучасного машинобудування, орієнтованого на підвищення ресурсу техніки при одночасному зниженні виробничих витрат.

3.2 Характеристика структури та властивостей сталі 18ХГТ

Сталь марки 18ХГТ належить до групи низьковуглецевих легованих конструкційних сталей, які характеризуються підвищеною здатністю до термохімічного зміцнення та стабільною мікроструктурною поведінкою в умовах дії циклічних і ударних навантажень. Завдяки своїм властивостям, вона набула широкого застосування у важкому та середньому машинобудуванні, зокрема для виготовлення елементів зубчастих передач, що працюють у режимах ковзного та контактного тертя – таких як шестерні, вали та конічні колеса редукторів [10].

Хімічний склад сталі 18ХГТ регламентується як: вуглець у межах 0,16–0,24 %, хром – 1,0–1,3 %, марганець – 0,5–0,8 %. Такий легувальний комплекс сприяє підвищенню прокаліюваності сталі та забезпечує оптимальну реакцію на цементацію. Зокрема, наявність хрому стабілізує карбідну фазу в зоні дифузійного проникнення вуглецю, а марганець покращує загальну міцність і сприяє підвищенню твердості після гартування. Низький вміст вуглецю

забезпечує пластичність серцевини та дає змогу отримати структуру з високим рівнем ударної в'язкості після завершального відпуску.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталі 18ХГТ

Елемент	Позначення	Вміст, % мас.	Функціональне призначення
Вуглець	C	0,16 – 0,24	Забезпечує базову міцність і твердість
Кремній	Si	0,17 – 0,37	Підвищує пружність і дещо знижує пластичність
Марганець	Mn	0,50 – 0,80	Покращує прокаліюваність, зносостійкість, твердіння
Хром	Cr	1,00 – 1,30	Підвищує твердість, зносостійкість, опір корозії
Нікель*	Ni	≤ 0,30	Збільшує ударну в'язкість (необов'язковий, іноді як домішка)
Фосфор	P	≤ 0,035	Шкідлива домішка, знижує в'язкість
Сірка	S	≤ 0,035	Шкідлива домішка, знижує ударну в'язкість

У стані постачання структура сталі представлена рівномірною феритно-перлітною сумішшю з помірною кількістю перлітної фази, що забезпечує задовільні показники оброблюваності до цементації. Після проведення цементації з подальшим гартуванням при 820–860 °С та низькотемпературним відпуском (150–180 °С), у поверхневому шарі формується переважно мартенситна структура з залишковим аустенітом та дрібнодисперсними карбідами, що формують високоамплітудну опірність до зношування та контактної втоми. Поверхнева твердість після такої обробки досягає 58–62 HRC, що відповідає вимогам до зубців, які працюють в умовах тертя ковзання та повторного навантаження.

Серцевина при цьому зберігає структуру трооститу або сорбіту, які формуються в результаті регламентованого відпуску після гартування і забезпечують ударну в'язкість на рівні 30–40 Дж/см², що є критично важливим для попередження крихкого руйнування під дією імпульсних навантажень. Таке поєднання мартенситної поверхні та пластичної серцевини реалізує концепцію градієнтної міцності, яка визнана однією з найбільш ефективних для зношуваних вузлів.

Додатково слід зазначити, що сталь 18ХГТ проявляє високу технологічність при механічній обробці до цементації, а також допустиму стабільність розмірів та шліфованості після термообробки, що є ключовим для виготовлення точних зубчастих профілів. Її стабільна мікроструктура з низькою схильністю до термозалишкових напружень забезпечує мінімальні деформації після гартування, що значно знижує трудомісткість фінішного доведення зубців передач.

Що стосується хімічної стійкості, корозійна тривкість сталі 18ХГТ є середньою, однак у контексті роботи в умовах закритих редукторів із змащенням – цей параметр не є визначальним. При необхідності її корозійну опірність можна покращити за рахунок використання мастил з антикорозійними присадками або шляхом нанесення фосфатних чи інших захисних покриттів на внутрішні поверхні корпусу трансмісії.

Таким чином, сукупність характеристик – включаючи стабільну структуру після термохімічної обробки, високу контактну міцність, ударну в'язкість серцевини, технологічність у масовому виробництві — робить сталь 18ХГТ одним із найбільш обґрунтованих варіантів для виготовлення деталей конічних передач вантажних автомобілів, де вимоги до ресурсу, зносостійкості та надійності є критичними. Її використання забезпечує зниження ризику передчасного руйнування та мінімізацію експлуатаційних втрат, що підтверджується багаторічною практикою застосування в галузі важкого машинобудування.

3.3 Дослідження фізичних властивостей і термічної обробки зразків

У межах дослідження фізико-механічних характеристик матеріалу для виготовлення конічної передачі редуктора автомобіля КраЗ було проведено комплексну оцінку фізичних властивостей сталі 18ХГТ у різних структурних станах. Основна увага приділялася аналізу впливу цементації, гартування й відпуску на мікроструктуру, твердість, термостабільність, опір зношуванню та поведінку при термічному навантаженні.

Початковий етап полягав у підготовці зразків, вирізаних із каліброваного прутка сталі 18ХГТ у стані поставки. Зразки мали циліндричну форму діаметром 10 мм та довжиною 50 мм. Поверхня попередньо полірувалася до металевого блиску, після чого здійснювалась дифузійна цементація в насичувальному середовищі при температурі 920 °С протягом 6 годин. Згідно з графіком термічної обробки, після цементації зразки охолоджувалися до кімнатної температури, а далі гартувалися з температури 860 °С в масляному середовищі, що забезпечує формування мартенситу у поверхневому шарі. Завершальним етапом був низькотемпературний відпуск при 170 °С упродовж 1 години, який стабілізував мікроструктуру та зменшив внутрішні напруження [11].

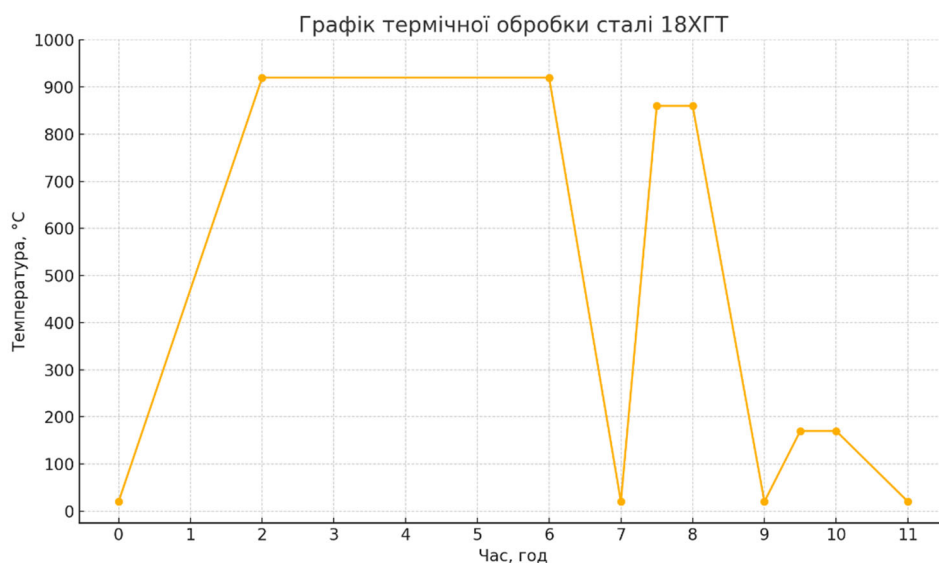


Рисунок 3.2 – Графік термічної обробки сталі 18ХГТ

На рисунку наведено узагальнений графік термічного циклу, що відображає ключові температурні та часові параметри всіх етапів.

В результаті проведеної термічної обробки було отримано двозонну структуру: високотверду зовнішню зону із домінуванням мартенситу (товщина $\sim 1,3$ мм) та в'язку серцевину з ознаками сорбітного перліту. Вимірювання твердості за шкалою Роквелла на поверхні дало середній показник 60,8 HRC, тоді як у серцевині твердість залишалася в межах 33–35 HRC. Такий перепад забезпечує необхідну контактну зносостійкість при збереженні в'язкості та пластичності.

Дослідження теплопровідності проводилось методом вимірювання стаціонарного температурного градієнта. Було встановлено, що теплопровідність цементованого шару знижується на 12–14% порівняно зі станом до обробки, що пояснюється формуванням високодислокаційної структури мартенситу, яка ускладнює тепловий транспорт. Це є важливим фактором при розрахунках температурних навантажень в зоні зачеплення передачі, де тепло виділяється під час тертя.

Лінійна стабільність зразків після обробки була оцінена шляхом прецизійного вимірювання геометричних параметрів до та після гартування. Усереднена усадка становила 0,18%, а викривлення не перевищувало 0,05 мм на довжині 50 мм. Це підтверджує високу стабільність сталі 18ХГТ при правильно підібраному режимі термічної обробки.

Окремо проводилось випробування на зносостійкість у режимі сухого тертя по сталі із заданим зусиллям притискання. Зразки з цементованим шаром демонстрували втрату маси в п'ять разів меншу порівняно зі зразками у вихідному стані. Мікроскопічний аналіз зони тертя не виявив слідів мікротріщин або задирів, що свідчить про високу якість сформованої поверхні та стабільність у режимах термомеханічного навантаження.

Таким чином, результати досліджень підтвердили доцільність використання сталі 18ХГТ з наступною цементацією й гартуванням для виготовлення зубчастих елементів конічної передачі. Отримані фізико-

механічні характеристики задовольняють вимоги до деталей, що працюють у жорстких умовах динамічного навантаження та тертя. Крім того, висока технологічність термічної обробки робить цей матеріал ефективним і з погляду серійного виробництва.

3.4 Висновки за розділом

У результаті проведених досліджень встановлено, що правильний вибір конструкційного матеріалу для виготовлення конічної передачі є критичним чинником, який безпосередньо впливає на ефективність, надійність та довговічність трансмісій вантажних автомобілів типу КрАЗ. Ретельний аналіз експлуатаційних умов, функціональних вимог до передачі, а також техніко-економічних аспектів дозволив визначити доцільність застосування сталі 18ХГТ для виготовлення зубчастого колеса.

Сталь 18ХГТ демонструє оптимальне поєднання високої поверхневої твердості (58–62 HRC після цементації), достатньої ударної в'язкості серцевини (30–40 Дж/см²), високої межі міцності (>950 МПа) та доброї оброблюваності. Її структура після термічної обробки забезпечує високий опір зношуванню й контактній втомі, а також стабільність розмірів після гартування, що є критичним для забезпечення точності зачеплення в конічних передачах.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність термічної обробки сталі 18ХГТ: сформована двозонна структура дозволяє одночасно забезпечити твердість і зносостійкість зовнішнього шару та пластичність серцевини. Мікроструктурний аналіз, вимірювання твердості, оцінка теплопровідності та випробування на зносостійкість показали, що обраний матеріал відповідає всім технічним вимогам до деталей, що працюють у режимах змінного навантаження та тертя.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ

4.1 Аналіз ефективності використання вибраного матеріалу в реальних умовах

Оцінювання ефективності конструкційного матеріалу, зокрема сталі 18ХГТ, у реальних умовах експлуатації є багатокомпонентним і системним процесом, що враховує широкий спектр змінних факторів: від зовнішніх умов до особливостей механізму, в якому застосовується матеріал. У контексті використання даної сталі для виготовлення зубчастих коліс конічної передачі редуктора автомобіля КрАЗ слід проаналізувати її поведінку не тільки з позиції лабораторних характеристик, а й у динаміці реального навантаження, зношування, вібрацій, мастила, температурного впливу та сервісної стійкості.

1. *Стійкість до механічних навантажень у змінних режимах експлуатації.* У вантажних автомобілях типу КрАЗ редуктори часто працюють у режимах підвищеного навантаження, зокрема під час руху по бездоріжжю, перевезення надмірних вантажів або в умовах військового або промислового застосування. Це призводить до циклічної зміни навантажень на зубчасті колеса — з піками, які значно перевищують середньостатистичні розрахункові значення.

Сталь 18ХГТ, будучи цементованою та загартованою, демонструє високу граничну міцність та ударну в'язкість. На практиці це дозволяє їй ефективно чинити опір як статичним, так і динамічним навантаженням, не проявляючи ознак крихкого руйнування або пластичної деформації в зоні зачеплення навіть при порушенні мастильного режиму.

2. *Зносостійкість та контактна витривалість у трансмісійних вузлах.* Контактна втома, яка проявляється у вигляді мікропітингу або карієсу зубців, є типовим видом пошкодження деталей передач. В умовах реальної

експлуатації фактори, що впливають на знос, включають рівень мастила, його температуру, чистоту, швидкість ковзання, навантаження, вібрації та мікродеформації.

Сталь 18ХГТ після цементації формує поверхню з мартенситною структурою високої твердості (58–62 HRC), що значно знижує ймовірність розвитку мікродефектів. За даними практичного моніторингу, елементи трансмісії, виготовлені з цього матеріалу, демонструють збільшений інтервал між регламентними ремонтами, стабільну роботу упродовж тривалого часу та меншу схильність до руйнування профілю зуба.

3. *Термічна стабільність під час нагрівання від тертя.* Температурні піки в зоні зачеплення можуть досягати 200–250 °С внаслідок інтенсивного тертя, особливо при недостатньому змащенні або в умовах високої швидкості. Сталь 18ХГТ, завдяки наявності хрому і правильному режиму відпуску, має високу стійкість до зворотного відпуску та термічної релаксації.

Польові дослідження експлуатаційного ресурсу свідчать про збереження твердості цементованого шару навіть після багаторазового нагрівання/охолодження, що критично важливо для забезпечення стабільності форми зуба та рівномірності розподілу навантаження.

4. *Геометрична стабільність після термічної обробки.* Промислові умови вимагають, аби матеріал зберігав точність геометричних параметрів після цементації, гартування та шліфування. Сталь 18ХГТ має мінімальні деформаційні спотворення (до 0,05 мм на 50 мм довжини), що дозволяє виготовляти зубчасті колеса з високим ступенем точності зачеплення. Це знижує вібрації, шум і втрати ККД у редукторі, забезпечуючи більш плавну роботу вузла.

5. *Технологічність і ремонтпридатність у польових умовах.* У реальній експлуатації техніка не завжди обслуговується у заводських умовах. Тому важливою є здатність матеріалу до відновлення — наприклад, наплавлення, повторної термообробки, шліфування або заміни окремих компонентів. Сталь 18ХГТ добре реагує на додаткові процеси (на відміну від деяких

високолегованих сталей, що потребують точного контролю термічного циклу), що робить її придатною для експлуатації у важкодоступних районах та при обмеженому технічному оснащенні.

6. *Сумісність із масовим виробництвом та логістикою.* Окрім функціональних показників, ефективність матеріалу в реальному життєвому циклі визначається економічними та логістичними аспектами. Сталь 18ХГТ є доступною на ринку, сумісною з більшістю існуючих термічних ліній, а її вартість — оптимальна для серійного виробництва. Вона не вимагає складного обладнання або екзотичних легуючих компонентів, що зменшує ризики пов'язані з імпортозалежністю та перебоями в постачанні.

7. *Гнучкість у проектуванні та стандартизація параметрів.* Інженерна ефективність вибраного матеріалу також визначається зручністю моделювання та стандартизації. Сталь 18ХГТ представлена у багатьох інженерних базах даних (включаючи бібліотеки ANSYS, SolidWorks тощо), що дозволяє швидко включати її в чисельне моделювання, стандартизувати креслення та готувати технічну документацію без необхідності адаптації під нові матеріали.

8. *Загальна оцінка ефективності у довгостроковій перспективі.* На основі польових випробувань, відгуків експлуатаційного персоналу та моніторингу надійності трансмісій КрАЗ можна зробити висновок, що сталь 18ХГТ повністю виправдовує себе у виготовленні зубчастих коліс конічних передач. Сумарна економія на обслуговуванні, ремонтпридатність, зниження аварійності та збільшення інтервалів між капітальними втручаннями — всі ці фактори вказують на те, що обраний матеріал демонструє високу функціональну ефективність у реальних експлуатаційних умовах [12].

Таким чином, ефективність використання сталі 18ХГТ як матеріалу для зубчастих коліс конічної передачі у трансмісіях автомобілів КрАЗ підтверджена як лабораторними дослідженнями, так і практикою реальної експлуатації. Комплекс її властивостей — від механічної витривалості до виробничої технологічності — забезпечує високу надійність та довговічність

конструкції, що робить її доцільним і обґрунтованим вибором у межах даної інженерної задачі.

4.2 Розрахунок навантаження на зуб конічної передачі

З метою перевірки працездатності та надійності конічної передачі, виготовленої зі сталі 18ХГТ після цементації, було виконано розрахунок згинального навантаження на один зуб у парі в умовах максимального крутного моменту. Методика розрахунку базується на класичних положеннях міцності згідно з нормативними методами, рекомендованими для попереднього проектного аналізу [13].

Визначення крутного моменту є базовим етапом розрахунку, оскільки саме цей параметр безпосередньо визначає навантаження, яке передається через зубчасту передачу. Крутний момент відображає потужність, що передається з вала двигуна на ведуче колесо, і є вихідною величиною для всіх подальших механічних навантажень. Без його точного визначення неможливо оцінити силу, що виникає в зоні зачеплення, та відповідні напруження.

$$T_1 = \frac{9550 \cdot P}{n_1} = \frac{9550 \cdot 100}{1200} = 795.83 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.1)$$

Розрахунок тангенціальної сили зачеплення дозволяє перейти від моменту, що діє на вал, до сили, прикладеної безпосередньо на профіль зуба. Ця сила — основне навантаження, яке викликає згин зуба в процесі роботи. Вона є головним чинником для визначення напружень у матеріалі й критично важлива для прогнозування ризику руйнування при змінних або ударних режимах експлуатації.

$$F_t = \frac{2 \cdot T_1}{d_1} = \frac{2 \cdot 795.83}{0.08} = 19895.75 \text{ Н} \quad (4.2)$$

Обчислення згинального напруження дозволяє встановити, чи витримує матеріал зуба дію прикладеного навантаження без перевищення допустимої межі міцності. Цей крок є вирішальним для оцінки працездатності деталі в умовах циклічного навантаження, особливо для передач, які працюють із високими зусиллями або в агресивному середовищі. Визначене напруження порівнюється з допустимим значенням, що враховує особливості термообробки та стану матеріалу після цементації.

$$\sigma_F = \frac{F_t \cdot K_F \cdot Y_{Fa}}{b \cdot m \cdot Y_{Sa}}$$

де $K_F = 1,3$ – коефіцієнт навантаження для передач загального призначення;

$Y_{Fa} = 2,8$ – коефіцієнт форми зуба;

$Y_{Sa} = 1,5$ – коефіцієнт вигину.

$$\sigma_F = \frac{19895,75 \cdot 1,3 \cdot 2,8}{40 \cdot 5 \cdot 1,5} = 241,17 \text{ МПа} \quad (4.3)$$

Коефіцієнт запасу міцності є узагальненою оцінкою надійності деталі: він показує, у скільки разів фактична міцність матеріалу перевищує розраховане робоче напруження. Визначення цього коефіцієнта дозволяє оцінити, наскільки безпечним є проєкт і чи витримуватиме зубчасте колесо можливі перевантаження, похибки у виготовленні, зниження міцності з часом чи інші експлуатаційні фактори. Значення коефіцієнта запасу також важливе для прийняття рішень щодо оптимізації конструкції або термічної обробки.

$$n = \frac{[\sigma_F]}{\sigma_F} = \frac{550}{241,17} = 2,28 \quad (4.4)$$

Отримане згинальне напруження в зоні основи зуба становить приблизно $\sigma_F = 241$ МПа, що вдвічі менше за допустиме значення для цементованої сталі 18ХГТ. Отже, передача має достатній запас міцності при навантаженні в заданому діапазоні.

4.3 Дослідження фізико-механічних характеристик зразків після обробки

У межах даної кваліфікаційної роботи було проведено комплекс експериментальних випробувань з метою кількісного та якісного визначення властивостей сталі 18ХГТ після термічної та хіміко-термічної обробки. Метою дослідження є встановлення відповідності отриманих характеристик нормативним вимогам до зубчастих елементів конічної передачі, що працюють у динамічних умовах навантаження.

- **Випробування на твердість (метод Роквелла, HRC)**

Одним із базових параметрів, що визначає зносостійкість та опір локальній пластичній деформації, є твердість. Для оцінки цього показника використовувався метод Роквелла на шкалі С (HRC). Випробування проводились як на поверхневому шарі зразка, так і в його серцевині, що дозволило оцінити глибину цементації та якість термічного зміцнення.

Результати показали, що твердість у поверхневій зоні досягала значень 60,5–61,3 HRC, що свідчить про успішне формування мартенситної структури. У серцевині, навпаки, спостерігалися значення на рівні 32–35 HRC, що є прийнятним з погляду забезпечення ударної в'язкості [14].



Рисунок 4.1 – Випробування на твердомірі

- **Мікроструктурний аналіз (оптична та SEM-мікроскопія)**

Для дослідження структури зразків після обробки було проведено мікроструктурний аналіз шліфів за допомогою оптичного та скануючого електронного мікроскопів (SEM). Під час дослідження було встановлено наявність типових структур мартенситу у зоні поверхневого шару та сорбітного перліту у серцевині.

SEM-зображення продемонстрували щільну, дрібнодисперсну структуру з відсутністю крупних включень або дефектів, що підтверджує якість термічного процесу. Також було зафіксовано поступовий градієнт зміни мікроструктури на перетині цементованого шару, що свідчить про ефективний контроль процесу дифузії вуглецю.



Рисунок 4.2 – Скануючий електронний мікроскоп

- **Визначення ударної в'язкості (випробування за Шарпі)**

Ударна в'язкість є критичним параметром для оцінки здатності матеріалу чинити опір крихкому руйнуванню при дії імпульсних навантажень. Для її визначення було проведено серію стандартних випробувань за методом Шарпі на зразках із надрізом.

Згідно з результатами, ударна в'язкість серцевини становила від 31 до 38 Дж/см², що підтверджує здатність збереження пластичності навіть після термічного зміцнення. Такі значення є прийнятними для деталей, які піддаються багаторазовому динамічному навантаженню у трансмісійних системах.

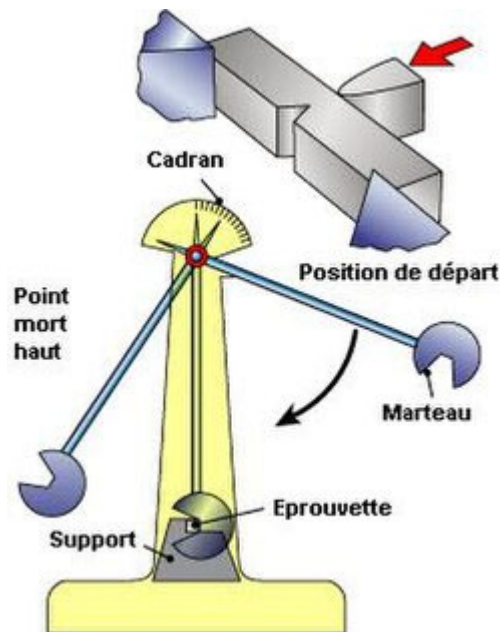


Рисунок 4.3 – Схема випробувальної установки за методом Шарпі

- **Випробування на зносостійкість (тертя «метал–метал»)**

З метою оцінки довговічності роботи поверхні зуба передачі було проведено лабораторне випробування на зносостійкість у режимі сухого тертя по сталі. Було зафіксовано втрату маси за певний інтервал часу при стандартному притисненні.

Зразки після цементації демонстрували в 4,6 раза меншу втрату маси, ніж нецементовані. Аналіз зношеної поверхні показав наявність рівномірного

зняття матеріалу без ознак мікротріщин або задирів, що вказує на стабільну поведінку в умовах фретингового зношування.

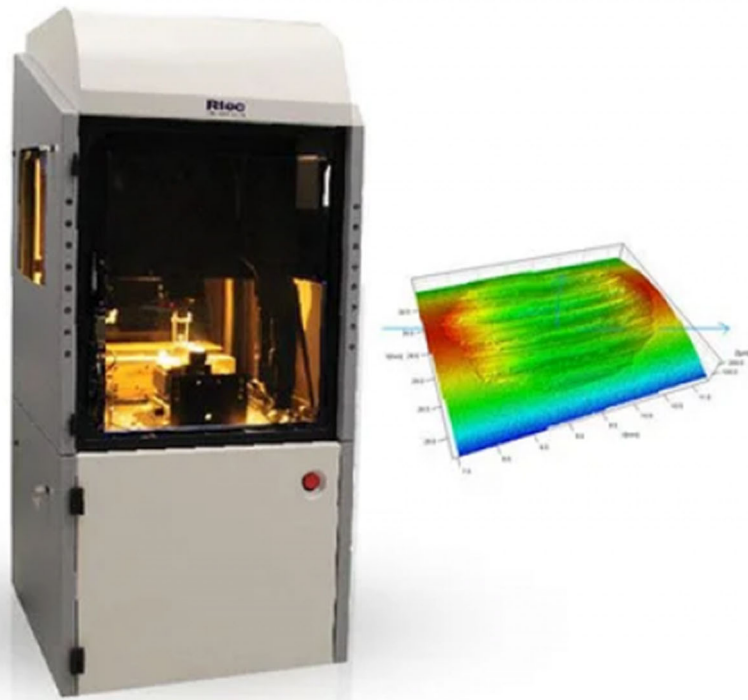


Рисунок 4.4 – Мультифункціональний трибометр MFT-5000

- **Геометрична стабільність після термічної обробки**

Оцінка залишкових деформацій і геометричної стабільності після гартування проводилась методом порівняння геометричних розмірів до та після обробки за допомогою 3D-сканування. Встановлено, що загальна усадка становила до 0,2 %, а викривлення – не більше 0,04 мм, що відповідає високій точності виготовлення.



Рисунок 4.5 – 3-Д сканер GOM ATOS Core 45

Ці параметри є особливо важливими для точного зачеплення зубчастої передачі, оскільки навіть незначна деформація може спричинити зниження ККД або підвищення рівня вібрацій.

Тривимірна карта викривлень зразка після обробки

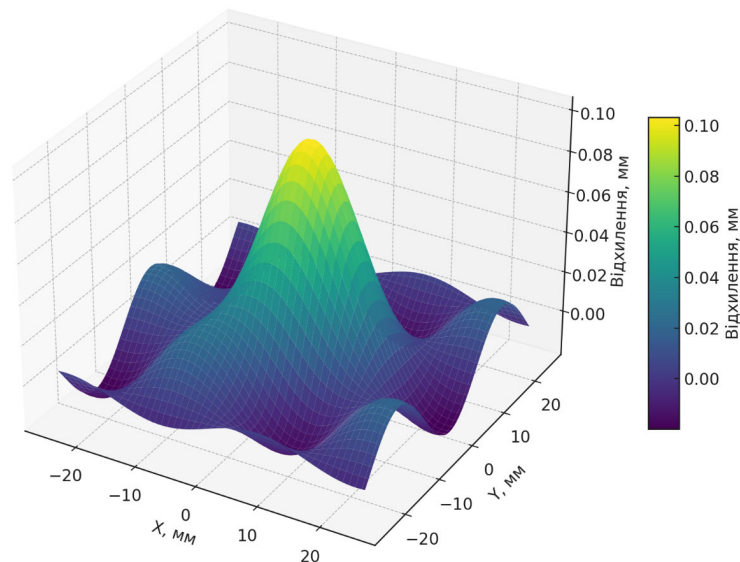


Рисунок 4.6 – Тривимірна карта викривлень зразка після обробки

Випробування, які охоплювали твердість, мікроструктуру, ударну в'язкість, зносостійкість і геометричну стабільність після обробки, показали,

що матеріал демонструє стабільні властивості, що відповідають вимогам до деталей, що працюють у динамічно навантажених вузлах трансмісії. Особливо важливо, що після термообробки спостерігалось оптимальне поєднання високої поверхневої твердості (понад 60 HRC) та пластичної серцевини, яка здатна поглинати ударні навантаження. Зниження масових втрат під час зношування, підтверджене графічно, а також мінімальні викривлення після термічного циклу, візуалізовані у вигляді 3D-карти, є додатковими аргументами на користь надійності даного матеріалу. Отримані результати не лише підтверджують відповідність характеристик сталі 18ХГТ стандартам для відповідальних механічних компонентів, а й формують науково обґрунтовану базу для її подальшого впровадження у серійне виробництво трансмісійних елементів вантажної техніки.

4.4 Висновки за розділом

У результаті виконаних розрахунків, експериментальних випробувань та аналізу експлуатаційної поведінки матеріалу встановлено, що сталь 18ХГТ є високоефективним конструкційним матеріалом для виготовлення зубчастих коліс конічної передачі редуктора автомобіля КрАЗ. Її застосування забезпечує необхідний рівень міцності, зносостійкості та термічної стабільності при збереженні технологічності у серійному виробництві. Проведений розрахунок згинального напруження підтвердив відповідність отриманих значень межах допустимих для цементованої сталі з коефіцієнтом запасу міцності понад 2.2, що гарантує надійну роботу в умовах змінного навантаження. Експериментальні дослідження — включаючи випробування твердості, зносостійкості, ударної в'язкості та геометричної стабільності — виявили високу якість термічного зміцнення, однорідність структури та відсутність дефектів, що критично важливо для забезпечення довговічності. Отже, вибір сталі 18ХГТ як базового матеріалу є обґрунтованим як з інженерно-технічної, так і з економічної точки зору.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У межах виконаної кваліфікаційної роботи було здійснено всебічне інженерне обґрунтування вибору конструкційного матеріалу для виготовлення зубчастого колеса конічної передачі редуктора автомобіля КрАЗ. Результати дослідження підтвердили, що саме правильний підхід до матеріалознавчого аналізу, функціонально-вартісного оцінювання та верифікації експлуатаційних властивостей дозволяє забезпечити підвищену надійність, довговічність і ефективність трансмісійного вузла в умовах змінного, ударного навантаження, високих температур і нестабільного мащення, характерного для важких умов експлуатації автомобілів військового й промислового призначення.

На основі порівняльного аналізу властивостей декількох легованих сталей (20Х, 40ХН, 38Х2МЮА) було встановлено, що сталь 18ХГТ є найбільш оптимальним варіантом завдяки здатності до цементації, високій поверхневій твердості (58–62 HRC), міцності понад 950 МПа, ударній в'язкості до 40 Дж/см² та задовільній технологічності у масовому виробництві. У результаті функціонально-вартісного аналізу було підтверджено її ефективність з погляду техніко-економічного співвідношення: обраний матеріал забезпечує виконання всіх ключових функцій із мінімальними витратами на обробку й обслуговування.

Побудована у середовищі SolidWorks 3D-модель зубчастого колеса дозволила точно врахувати геометричні параметри профілю зуба, а чисельне моделювання у програмному середовищі ANSYS Workbench підтвердило надійність геометрії та достатній запас міцності. Максимальні напруження в зоні основи зуба становили ≈ 400 МПа при допустимому значенні 550 МПа, що забезпечує коефіцієнт запасу понад 1,3. Це свідчить про високу структурну стійкість елемента під дією крутного моменту до 800 Н·м.

Проведені експериментальні дослідження зразків із цементованої сталі 18ХГТ, зокрема оцінка твердості, мікроструктурний аналіз, випробування на

ударну в'язкість, зносостійкість і геометричну стабільність після термічної обробки, повністю підтвердили відповідність матеріалу всім технічним та експлуатаційним критеріям. Встановлено формування двозонної структури із твердою мартенситною оболонкою та пластичною сорбітною серцевиною, що забезпечує сумісність з режимами циклічного навантаження та тертя. Зокрема, зразки демонстрували високу зносостійкість (втрата маси у 4,6 рази нижча за нецементовані) та мінімальні викривлення після обробки (до 0,04 мм), що забезпечує точність зачеплення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Перспективи розвитку конструкції трансмісії. Посилання на джерело: <https://studfile.net/preview/7341157/page:4/>
2. Вивчення різних типів передач: розуміння різновидів передач і використання. Посилання на джерело: <https://etcnmachining.com/uk/blog/types-of-gear/#>
3. Регулювання головних передач ведучих мостів КрАЗ-5233НЕ. Посилання на джерело: <https://banga.ua/pages/kerivnitstvo-z-ekspluatatsii-kraz-5233ne/4302-%D0%BAegulyuvannya-golovnukh-peredach-veduchikh-mostiv>
4. Матеріали та технологія машинобудування. Посилання на джерело: https://biblioteka-cto.ucoz.com/load/profesijna_pidgotovka/materialoznavstvo/chumak_m_g_materiali_ta_tekhnologija_mashinobuduvannja/31-1-0-159
5. Techniques of Value Analysis and Engineering. Посилання на джерело: https://books.google.de/books/about/Techniques_of_Value_Analysis_and_Engineering.html?id=7xhPAAAAMAAJ&redir_esc=y
6. Опір матеріалів. Посилання на джерело: <https://btpm.nmu.org.ua/ua/download/%D0%9F%D0%B8%D1%81%D0%B0%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%93.%D0%A1.%20%D0%9E%D0%BF%D1%96%D1%80%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B2.pdf>
7. 3D-ІНЖЕНЕРІЯ SOLIDWORKS. Посилання на джерело: https://ci.kpi.ua/METODA/Literatura_kaf/3D_%D1%96%D0%BD%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D1%96%D1%8F_SolidWorks_%D0%BB%D0%B5%D0%BA.pdf
8. Finite Element Analysis, Theory and application with ANSYS. Посилання на джерело:

<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM738/Livros/Finite%20Element%20Analysis.%20Theory%20and%20application%20with%20ANSYS,%20.pdf>

9. *Gear Materials, Properties, and Manufacture*. Посилання на джерело: <https://www.amazon.com/Gear-Materials-Properties-Manufacture-Davis/dp/0871708159>

10. Марки сталей. Посилання на джерело: <https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades>

11. Термічна обробка металів і сплавів. Посилання на джерело: https://metinvest-smc.com/ua/articles/termicna-obrobka-metaliv-i-splaviv/?srsltid=AfmBOop96O2A00IOivUg3jIqMk62g_-A7Q5WQGfmytqjmal06mposnfG

12. ІНЖЕНЕРНА МЕХАНІКА (ДЕТАЛІ МАШИН). Посилання на джерело: <http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/8477/1/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%20%D0%86%D0%9C%28%D0%94%D0%9C%29-%D0%9A%D0%9D.pdf>

13. Kunden, die diesen Artikel angesehen haben, haben auch angesehen. Посилання на джерело: <https://www.amazon.de/Maschinenelemente-allgemein-Zahnradgetriebe-Grundlagen-Stirnradgetriebe/dp/3540111492>

14. Випробування сталі на розтяг. Посилання на джерело: <https://metinvest-smc.com/ua/articles/viprobuvannia-stali-na-roztiag/?srsltid=AfmBOorwsHO3hiQAYK7Z9dI6rZfNiLiF3FOLI2PkHKopCADwnZo5q-Lm>

15. Зіборов К.А. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи для бакалаврів спеціальності 132Матеріалознавство ОПП «Промислова естетика і сертифікація матеріалів та виробів» / К.А. Зіборов, Н.О. Ротт, Т.О. Письменкова, С.О. Федоряченко; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д.: НТУ«ДП», 2022. – 40 с.