

Міністерство освіти і науки України

**Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності**

Кафедра матеріалознавства

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**Вдосконалення технології термічної обробки
шестерень конічного редуктора / Improvement of
heat treatment technology for bevel gear reducer**

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ-41

ЛОШАК Олександр Миколайович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Фещук Юрій Петрович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту

«__» _____ 2026 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., професор

Кашицький Віталій Павлович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Імбірович Н.Ю.

“ ____ ” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Лошаку Олександр Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Вдосконалення технології термічної обробки шестерень
конічного редуктора / Improvement of heat treatment technology for bevel
gear reducer*

керівник роботи *Фещук Юрій Петрович, к.т.н., доцент*,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від *05.06.25* року № *282/01-02*

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
« *06* » *грудня* *2025* р.

3. Вихідні дані до роботи *ескіз косозубої шестерні, базовий технологічний
процес, програма випуску N=50 000 шт.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити) *вступ; розділ 1 технічне обґрунтування; розділ 2 дослідна
частина; розділ 3 технологічна частина; розділ 4 конструкторська частина
висновки та практичні рекомендації; список використаних джерел;
додатки*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Мета та завдання дослідження - 1л. ф.А4.

2.Завдання бакалаврської атестаційної роботи - 1л. ф.А4.

3. Ескіз колеса, схема редуктора та хімічний склад сталей - 1л. ф.А4.

4. Результати досліджень на твердість та міцність - 1л. ф.А4.

5. Результати металографічних досліджень - 1л. ф.А4.

6. Вдосконалений технологічний процес - 1 л.ф.А4.

7. Висновки - 1л. ф.А4.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Н. контоль</i>	<i>Мисковець С.В., доцент</i>	<i>02.09.26</i>	<i>06.12.26</i>

7. Дата видачі завдання «02» вересня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ.</i>	<i>20.10.25</i>	
	<i>Розділ 1 Технічне обґрунтування</i>		
<i>2</i>	<i>Розділ 2 Дослідна частина.</i>	<i>15.11.25</i>	
	<i>Розділ 3 Технологічна частина.</i>		
<i>3</i>	<i>Розділ 4 Конструкторська частина</i>	<i>06.12.12</i>	
	<i>Висновки та практичні рекомендації.</i>		
	<i>Список використаних джерел.</i>		

Здобувач вищої освіти _____ *Лошак О.М.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ *Фещук Ю.П.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Лошак Олександр Миколайович. Вдосконалення технології термічної обробки шестерень конічного редуктора. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

У роботі запропоновано вдосконалення технології термічної обробки зубчастого колеса конічної передачі редуктора розкидача мінеральних добрив.

Проведено аналіз умов експлуатації зубчастого колеса конічної передачі та встановлено основні фактори, що впливають на його довговічність і надійність. Виконано порівняльний аналіз цементацийних сталей 18ХГТ, 20MnCr5, EN353 та EN36.

Розроблено удосконалену технологію термічної обробки, яка передбачає попередню нормалізацію, цементацію, гартування та низький відпуск.

Для реалізації запропонованої технології підібрано сучасне термічне обладнання та розроблено конструкцію жаростійкої касети для завантаження зубчастого колеса в термічну піч, що забезпечує рівномірний нагрів деталі та зменшення ризику її деформації під час термічної обробки.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка містить 50 сторінок формату А4, 8 рисунків, 7 таблиць та 19 літературних джерела. Графічна частина містить 7 листів формату А4 у додатку Д.

Ключові слова: термічна обробка, цементація, шестерня конічна, твердість, межа текучості, ударна в'язкість, мікроструктура.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Лошак				Вдосконалення технології термічної обробки шестерень конічного редуктора	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Фещук						3	50
Реценз.						ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. ПМ-41		
Н. Контр.	Мисковець							
Затв.	Імдірович							

ANNOTATION

Loshak Oleksandr Mykolaiovych. Improvement of heat treatment technology for bevel gear reducer. Manuscript.

Bachelor's qualification work OP "Materials Science" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The thesis proposes an improved heat treatment technology for a bevel gear used in the gearbox of a mineral fertilizer spreader.

An analysis of the operating conditions of the bevel gear was carried out, and the main factors affecting its durability and reliability were identified. A comparative analysis of carburizing steels 18XГТ, 20MnCr5, EN353, and EN36 was performed.

An improved heat treatment process was developed, including preliminary normalizing, carburizing, quenching, and low-temperature tempering.

To implement the proposed technology, modern heat-treatment equipment was selected, and a heat-resistant fixture (cassette) for loading the bevel gear into a heat-treatment furnace was designed. The developed fixture ensures uniform heating of the component and reduces the risk of distortion during heat treatment.

The Bachelor's qualification thesis consists of an explanatory note and a graphical section. The explanatory note contains 50 A4 pages, 8 figures, 7 tables, and 19 references. The graphical section includes 8 A4 sheets presented in Appendix Д.

Keywords: heat treatment, carburizing, bevel gear, hardness, yield strength, impact toughness, microstructure.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	8
1.1. Будова та принцип роботи розкидача мінеральних добрив	8
1.1.1. Основні вузли машини.	8
1.1.2. Принцип роботи розкидача мінеральних добрив	10
1.1.3. Призначення кутового редуктора.....	13
1.2. Опис матеріалів для виготовлення конічних зубчатих передач	15
1.3. Вибір матеріалу шестерень конічного редуктора розкидача мінеральних добрив.....	17
1.4. Огляд хіміко-термічної обробки конічного зубчатого колеса	18
1.5. Мета роботи та основні завдання	21
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	23
2.1. Мета експериментальних досліджень.....	23
2.2. Методика металографічних досліджень	23
2.3. Методика визначення твердості	24
2.3.1. Твердість поверхні зубців.	24
2.3.2. Розподіл твердості по глибині шару	24
2.4. Визначення механічних властивостей	25
2.5. Визначення ударної в'язкості.....	25
2.6. Визначення глибини цементованого шару	25
2.7. Результати досліджень.....	26
2.7.1. Результати вимірів твердості поверхні зубців.	26
2.7.2. Результати дослідження розподілу твердості по глибині цементованого шару.	27
2.7.3. Результати дослідження механічних властивостей.....	29
2.7.4. Результати дослідження ударної в'язкості.....	31
2.7.5. Результати металографічних досліджень.	32

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.8. Висновок	35
РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	38
3.1. Аналіз конічного зубчатого колеса	38
3.2. Порівняння традиційної та удосконалених технологій термічної обробки.....	38
3.2.1. Традиційна технологія термічної обробки.	39
3.2.2. Удосконалена технологія №1 – нормалізація після цементації.....	40
3.2.3. Удосконалена технологія №2 – нормалізація перед цементацією.....	41
3.3. Порівняння технологічних процесів та вибір оптимальної технології	42
3.3.1. Порівняння технологічних процесів	42
РОЗДІЛ 4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	45
4.1. Розроблення тари-пристосування для завантаження зубчастого колеса в термічну піч	45
ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	49

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

У сучасному сільськогосподарському машинобудуванні особливе значення має забезпечення надійності та довговічності деталей приводних механізмів. Одними з найбільш навантажених елементів машин є зубчасті передачі редукторів, які працюють в умовах значних контактних і циклічних навантажень, вібрацій, абразивного зношування та впливу агресивного середовища. Особливо складними умовами експлуатації характеризуються шестерні конічних редукторів розкидачів мінеральних добрив, оскільки під час роботи на поверхню деталей додатково впливають волога, пил та хімічно активні компоненти добрив.

Надійність і ресурс роботи зубчастих передач значною мірою залежать від правильного вибору матеріалу та режимів термічної обробки. Використання сучасних легованих цементацийних сталей, таких як 18ХГТ, 20MnCr5, EN353, EN3 та EN36, дозволяє забезпечити високу твердість поверхневого шару зубців при збереженні достатньої в'язкості серцевини. Однак навіть при застосуванні якісних матеріалів недостатньо ефективні режими термічної обробки можуть призводити до передчасного зношування, появи тріщин, викришування зубців та зниження експлуатаційної довговічності редуктора.

У зв'язку з цим вдосконалення технології термічної обробки шестерень конічного редуктора розкидача мінеральних добрив є актуальним завданням сучасного матеріалознавства та машинобудування.

Під час виконання кваліфікаційної роботи було використано інструменти штучного інтелекту (ШІ) для редагування та форматування тексту (пошук літературних даних) виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження та результати досліджень належать автору та ґрунтуються на власному аналізі, отримані результати від ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

1.1. Будова та принцип роботи розкидача мінеральних добрив

1.1.1. Основні вузли машини

Розкидачі мінеральних добрив є важливими технологічними машинами сучасного сільськогосподарського виробництва, призначеними для рівномірного внесення гранульованих та кристалічних добрив на поверхню ґрунту. Від якості роботи цих машин значною мірою залежить ефективність використання добрив, врожайність сільськогосподарських культур та економічна ефективність аграрного виробництва. Конструкція сучасних розкидачів добрив формувалася протягом тривалого часу та постійно вдосконалювалася з урахуванням вимог щодо продуктивності, надійності та точності внесення добрив.

Незалежно від виробника та моделі більшість розкидачів мінеральних добрив мають схожу конструктивну схему та складаються з ряду взаємопов'язаних вузлів, які забезпечують приймання, транспортування, дозування та розподіл добрив по поверхні поля.

Основним несучим елементом машини є рама. Вона являє собою жорстку зварну конструкцію, виготовлену переважно зі сталевих профільних труб або штампованих елементів. Рама виконує функцію основи, на якій монтуються всі інші вузли машини. Під час роботи рама сприймає вагу добрив, навантаження від робочих органів, динамічні навантаження, що виникають при русі агрегату по нерівностях поля, а також вібрації, які передаються від приводу. До рами кріпляться навісний пристрій, бункер, привідний механізм та інші елементи конструкції.

Наступним важливим вузлом є бункер для добрив. Він призначений для накопичення запасу мінеральних добрив перед їх внесенням у ґрунт. Сучасні

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бункери виготовляють із листової сталі, нержавіючої сталі або полімерних матеріалів. Конструкція бункера повинна забезпечувати безперешкодне переміщення гранул до дозувального механізму та запобігати утворенню склепінь і зависанню добрив. Для цього стінки бункера виконують під певним кутом нахилу.

В нижній частині бункера розташований дозувальний механізм. Його основною функцією є забезпечення рівномірної подачі добрив до розкидальних пристроїв. Дозатори можуть бути заслінкового, шнекового або стрічкового типу. Вони дозволяють регулювати норму внесення добрив залежно від агротехнічних вимог та швидкості руху агрегату.

Одним із головних робочих органів є розкидальні диски. Зазвичай машина обладнується одним або двома дисками, на поверхні яких встановлені спеціальні лопатки. Під час обертання дисків гранули добрив набувають значної швидкості та під дією відцентрових сил розподіляються по поверхні поля. Геометрія лопаток, частота обертання дисків та фізичні властивості добрив визначають ширину захвату та рівномірність внесення.

Для передачі енергії від трактора використовується карданна передача. Вона забезпечує передачу крутного моменту від валу відбору потужності трактора до приводу розкидача. Карданний вал працює в умовах змінних навантажень та кутових переміщень між трактором і машиною, тому повинен характеризуватися високою надійністю та міцністю.

Особливе місце в конструкції займає кутовий редуктор. Він призначений для зміни напрямку передачі обертального руху та забезпечення необхідної частоти обертання робочих органів. Найчастіше в розкидачах застосовуються конічні зубчасті передачі, осі яких розташовані під кутом 90°. Саме шестерні цього редуктора сприймають найбільші контактні навантаження, що зумовлює необхідність застосування високоякісних конструкційних сталей та ефективної термічної обробки.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система приводу також включає вали, підшипники, муфти та елементи захисту від перевантаження. Вони забезпечують передачу руху між вузлами машини та захищають механізми від аварійних навантажень при потраплянні сторонніх предметів або заклинюванні робочих органів. Основні вузли навісного розкидача мінеральних добрив показано на рисунку 1.1.

Для підвищення довговічності та надійності роботи сучасні розкидачі обладнуються системами змащування та ущільнення. Вони перешкоджають потраплянню пилу, вологи та агресивних компонентів добрив до внутрішніх порожнин редуктора та підшипникових вузлів. Це особливо важливо через високу корозійну активність більшості мінеральних добрив.



Рисунок 1.1 – Основні вузли навісного розкидача мінеральних добрив:

1 – рама; 2 – бункер; 3 – дозувальний механізм; 4 – карданний вал;
5 – кутовий редуктор; 6 – розкидальні диски; 7 – навісний пристрій.

1.1.2. Принцип роботи розкидача мінеральних добрив

Ефективність використання мінеральних добрив значною мірою залежить від рівномірності їх внесення на поверхню поля. Саме тому конструкція сучасних розкидачів спрямована на забезпечення стабільної подачі добрив до робочих органів та їх рівномірного розподілу по заданій ширині

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

захвату. Принцип роботи розкидача мінеральних добрив базується на передачі механічної енергії від трактора до розкидальних дисків, які надають гранулам добрив необхідної швидкості для їх подальшого розсіювання.

Джерелом енергії для роботи машини є вал відбору потужності трактора. Під час руху агрегату обертальний рух від валу відбору потужності передається через карданний вал до привідного механізму розкидача. Карданна передача дозволяє компенсувати взаємні переміщення трактора та машини під час роботи на нерівностях поля, забезпечуючи при цьому безперервну передачу крутного моменту.

Після надходження обертального руху до машини крутний момент передається на кутовий редуктор. Саме цей вузол є ключовим елементом приводу, оскільки змінює напрямок обертання та передає потужність до робочих органів. У більшості сучасних розкидачів використовуються конічні зубчасті передачі, які забезпечують передачу руху між валами, розташованими під кутом 90° . Крім зміни напрямку обертання, редуктор забезпечує необхідне передаточне число, що дозволяє отримати оптимальну частоту обертання розкидальних дисків.

Мінеральні добрива завантажуються до бункера машини, який може мати місткість від кількох сотень до кількох тисяч літрів залежно від моделі. Під дією сили тяжіння гранули поступово переміщуються до нижньої частини бункера, де розташований дозувальний механізм. Конструкція бункера передбачає похилі стінки, що запобігають зависанню матеріалу та забезпечують його безперервну подачу.

Дозувальний механізм виконує надзвичайно важливу функцію, оскільки саме він визначає кількість добрив, що надходить до розкидальних дисків за одиницю часу. Залежно від конструкції машини регулювання норми внесення здійснюється шляхом зміни положення заслінки або швидкості роботи транспортуючого механізму. Це дозволяє адаптувати машину до різних

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

агротехнічних вимог та забезпечувати внесення добрив у кількості від кількох десятків до кількох сотень кілограмів на гектар.

Після проходження дозувального вузла добрива потрапляють на поверхню розкидальних дисків. Диски являють собою металеві або композитні деталі, оснащені спеціальними лопатками. Під час обертання диска гранули потрапляють на лопатки та під дією відцентрової сили прискорюються. Отримавши необхідну кінетичну енергію, вони залишають поверхню диска та розлітаються на значну відстань. Дальність польоту гранул залежить від швидкості обертання диска, геометрії лопаток, розміру та маси частинок добрив.

Однією з особливостей сучасних розкидачів є використання двох розкидальних дисків, що обертаються у протилежних напрямках. Така схема дозволяє забезпечити більш рівномірний розподіл добрив по ширині захвату, яка може досягати 24...36 м і більше. При цьому перекриття потоків добрив від сусідніх проходів агрегату сприяє формуванню однорідного шару внесення. Схема роботи розкидача мінеральних добрив подана на рисунку 1.2.

Під час роботи машини на елементи приводу діють значні динамічні навантаження. Вони виникають унаслідок нерівномірного надходження добрив до дисків, коливань швидкості руху трактора, вібрацій та ударних навантажень. Особливо складні умови роботи характерні для зубчастих коліс кутового редуктора, які змушені передавати значний крутний момент протягом тривалого часу.

Важливим фактором є також вплив навколишнього середовища. Частинки добрив мають абразивні властивості та можуть потрапляти до вузлів машини. Крім того, багато видів добрив характеризуються високою гігроскопічністю та здатністю викликати корозію металевих деталей. Саме тому до матеріалів та технологій виготовлення деталей приводу висуваються підвищені вимоги щодо міцності, зносостійкості та корозійної стійкості.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

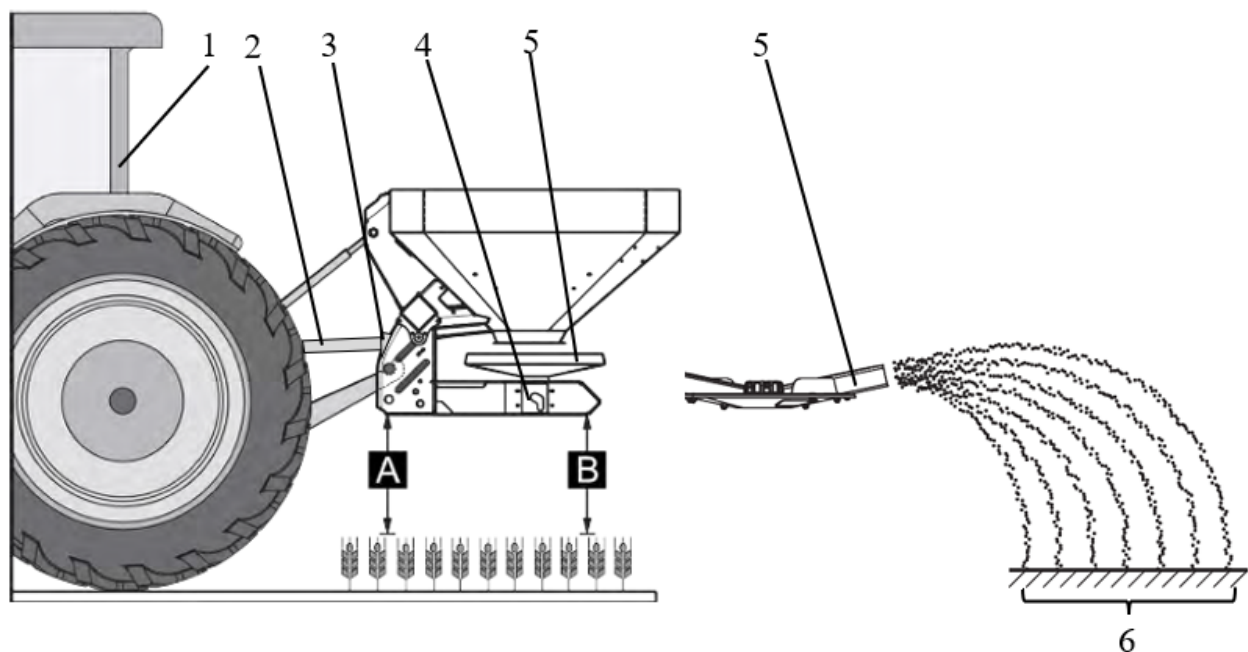


Рисунок 1.2 – Схема роботи розкидача мінеральних добрив [19]:

1 – трактор; 2 – вал відбору потужності; 3 – карданна передача; 4 – кутовий редуктор; 5 – розкидальні диски; 6 – розподіл добрив по поверхні поля.

Таким чином, принцип роботи розкидача мінеральних добрив ґрунтується на перетворенні механічної енергії трактора в кінетичну енергію гранул добрив. Центральне місце в цьому процесі займає кутовий редуктор, від надійності якого залежить стабільність роботи всієї машини та якість виконання технологічного процесу.

1.1.3. Призначення кутового редуктора

Кутовий редуктор є одним із найвідповідальніших вузлів розкидача мінеральних добрив, оскільки саме він забезпечує передачу крутного моменту від приводу до робочих органів машини. Від його технічного стану, надійності та довговічності залежить працездатність усього агрегату. Практика експлуатації сільськогосподарської техніки показує, що значна частина відмов привідних систем пов'язана саме зі зношуванням або руйнуванням зубчастих передач редукторів.

Основною функцією кутового редуктора є зміна напрямку передачі обертального руху. У конструкції розкидача вал відбору потужності трактора

та вісь обертання розкидальних дисків розташовані взаємно перпендикулярно. Тому для передавання енергії між ними використовується конічна зубчаста передача, що забезпечує зміну напрямку обертання на 90°. Схема будови кутового редуктора розкидача добрив подана на рисунку 1.3.

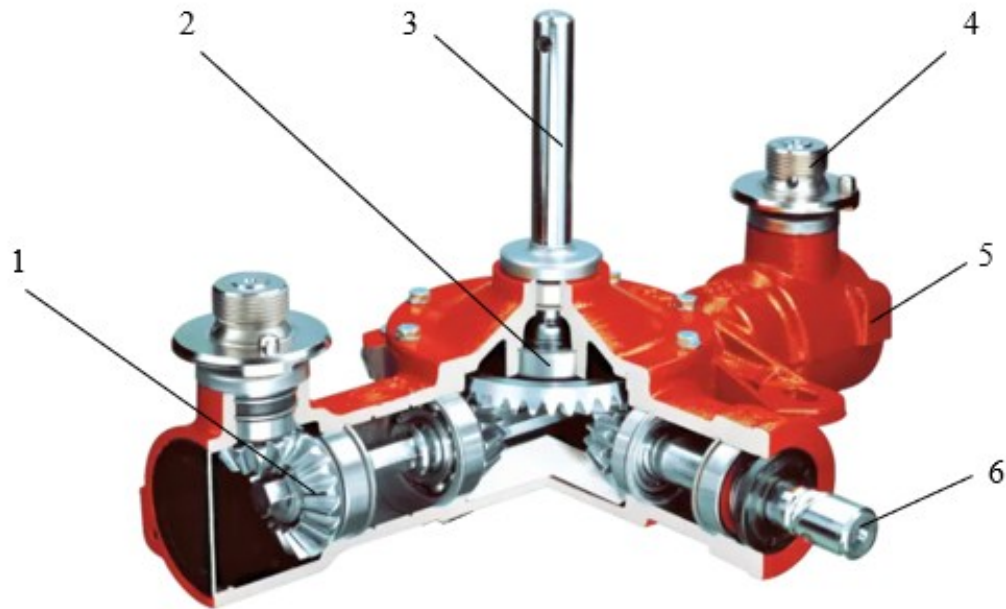


Рисунок 1.3 – Схема будови кутового редуктора розкидача добрив:

- 1 – конічний редуктор розкидальних дисків; 2 – шестерня конічна;
3 – вал дозатора; 4 – фланець диска розкидача; 5 – корпус;
6 – приводний вал-шестерня

Крім зміни напрямку руху, редуктор виконує функцію перетворення частоти обертання та крутного моменту. Залежно від конструкції машини він може як збільшувати, так і зменшувати частоту обертання вихідного валу. Водночас відбувається відповідна зміна величини крутного моменту, що дозволяє забезпечити оптимальний режим роботи розкидальних дисків.

Основними елементами кутового редуктора є корпус, ведучий вал, ведена шестерня, підшипники, ущільнення та система змащування. Найбільш навантаженими деталями є конічні зубчасті колеса. Саме вони сприймають контактні напруження, які виникають у зоні зачеплення зубців.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У процесі роботи зубці шестерень піддаються складному комплексу навантажень. У зоні контакту виникають значні напруження стиску, що можуть досягати сотень мегапаскалів. Одночасно зубці зазнають згинальних напружень, які діють циклічно протягом усього терміну експлуатації. Такий характер навантаження створює умови для розвитку контактної та згинальної втоми.

Схема конічної зубчастої передачі кутового редуктора наведена на рисунку 1.4.

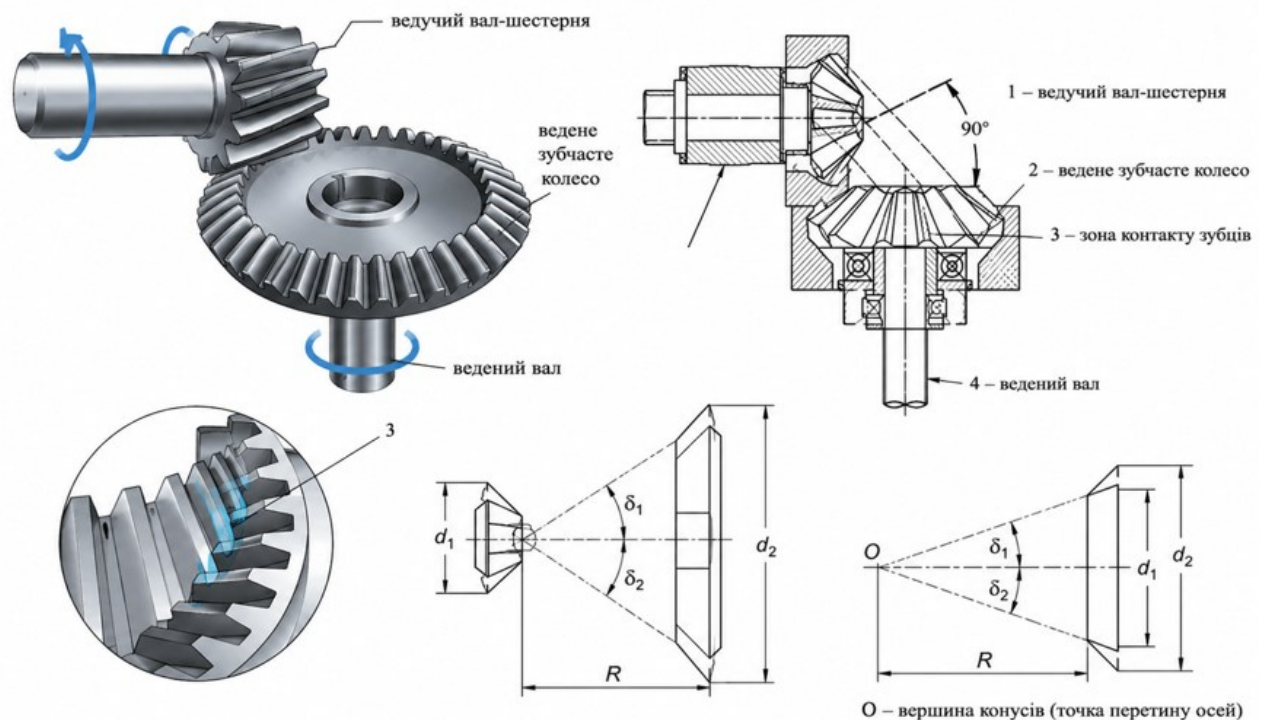


Рисунок 1.4 – Конічна зубчаста передача кутового редуктора

- 1 – приводний вал-шестерня (ведуча шестерня);
- 2 – ведене зубчасте колесо; 3 – зона контакту зубців;
- 4 – ведений вал.

1.2. Опис матеріалів для виготовлення конічних зубчатих передач

Особливістю експлуатації розкидачів добрив є наявність агресивного середовища. Частинки добрив, пил та волога можуть проникати до вузлів

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

редуктора, прискорюючи процеси абразивного та корозійного зношування. Внаслідок цього на поверхні зубців виникають подряпини, мікротріщини та осередки корозії, які стають концентраторами напружень і сприяють розвитку втомного руйнування.

Для забезпечення необхідного ресурсу шестерні повинні поєднувати високу твердість поверхні з достатньою в'язкістю серцевини. Такі вимоги можуть бути виконані лише при застосуванні спеціальних цементаційних сталей та раціонально вибраних режимів термічної обробки. У сучасному машинобудуванні для виготовлення конічних шестерень широко використовують сталі 18ХГТ, 20MnCr5, EN353 та EN36.

Сталь 18ХГТ традиційно використовується у вітчизняному машинобудуванні для виготовлення зубчастих коліс, які працюють при високих контактних навантаженнях. Вона забезпечує отримання твердого поверхневого шару після цементації та гартування при збереженні достатньої пластичності серцевини.

Європейська сталь 20MnCr5 характеризується високою прогартуваністю та стабільністю механічних властивостей після термічної обробки. Завдяки поєднанню марганцю та хрому вона широко використовується для виготовлення зубчастих передач автомобільної та сільськогосподарської техніки.

Сталі EN353 та EN36 містять нікель, що сприяє підвищенню ударної в'язкості та втомної міцності серцевини. Це особливо важливо для деталей, які працюють при змінних та ударних навантаженнях.

З метою підвищення зносостійкості зубців найчастіше застосовують комплексну термічну обробку, яка включає цементацію, гартування та низький відпуск. У результаті формується високоміцний поверхневий шар із твердістю 58...62 HRC та в'язка серцевина, здатна ефективно сприймати ударні навантаження.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, кутовий редуктор є ключовим елементом приводу розкидача мінеральних добрив. Його надійність визначається насамперед довговічністю конічних шестерень, яка залежить від правильного вибору матеріалу та технології термічної обробки. Саме тому вдосконалення режимів зміцнення зубчастих коліс є одним із найефективніших шляхів підвищення ресурсу та надійності сільськогосподарської техніки.

1.3. Вибір матеріалу шестерень конічного редуктора розкидача мінеральних добрив

Для зубчастого колеса конічного редуктора розкидача мінеральних добрив основними вимогами є:

- висока твердість робочої поверхні зубців;
- зносостійкість при контакті з парною шестернею;
- опір контактній втомі;
- достатня в'язкість серцевини;
- мінімальні деформації після термічної обробки;
- технологічність виготовлення.

Зубчасте колесо, на відміну від вала-шестерні, має більший діаметр, тонший зубчастий вінець і маточину, тому при термічній обробці важливо зменшити ризик викривлення, нерівномірного прогартування та появи внутрішніх напружень.

Таким параметрам відповідають сталі 18ХГТ, 20MnCr5, EN353, EN36.

18ХГТ – цементацийна хромомарганцева сталь, легована титаном. Сталь доступна, добре цементується, володіє достатньою зносостійкістю, характеризується менш стабільними властивостями порівняно з 20MnCr5.

20MnCr5 – цементацийна хромомарганцева сталь, яка має високу твердість після цементациї, добру технологічність, типова для зубчастих коліс, має меншу в'язкість серцевини, ніж у нікельхроммолібденових сталей.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

EN353 – цементацийна нікельхроммолібденова сталь. Володіє високою міцністю і в'язкістю серцевини, дорожча, доцільніша для валів-шестерень і важконавантажених деталей. Ця сталь дуже добра за механічними характеристиками, але дорожча.

EN36 – хромонікелева цементацийна сталь. Володіє високою втомною міцністю, добра для великих важконавантажених коліс. Надлишкова за механічними характеристиками й надто дорога для типового сільськогосподарського редуктора: технічно можливо застосувати, але економічно найменш доцільна.

Хімічний склад сталей наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Марка сталі	Вміст елемента, %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
18ХГТ	0,185	0,190	0,81	0,033	0,031	1,10	-	97,5
EN 3	0,178	0,188	0,61	0,017	0,0031	-	-	98,9
20MnCr5	0,187	0,203	1,17	0,0059	0,011	1,11	-	97,2
EN 353	0,161	0,255	0,63	0,012	0,0080	0,84	1,20	96,6

Попередньо для виготовлення шестерень конічного редуктора розкидача мінеральних добрив використовуємо хромомарганцеву сталь 20MnCr5, для виготовлення вала-шестерні використовуємо нікельхроммолібденову сталь EN353.

1.4. Огляд хіміко-термічної обробки конічного зубчатого колеса

Цементация – це термохімічна термічна обробка, яка зазвичай використовується для покращення поверхневих (зносостійких) та об'ємних механічних властивостей низьковуглецевих сталей. Це один з найефективніших та найширше використовуваних методів обробки загартуванням у промисловості. Цементация створює твердіші та зносостійкі поверхні, а також

міцніші та ударостійкі серцевини [1, 2] . Іноді сама по собі цементация може не забезпечити необхідних властивостей, що вимагає певної термічної обробки після цементации, яка називається пост-цементацийною обробкою, для досягнення необхідної якості [3, 4]. Компоненти сільськогосподарської техніки, такі як шестерні, кулачки, вали тощо, які потребують ударостійких властивостей, а також зносостійких поверхонь, зазвичай цементуються. Зазвичай сталі з вмістом вуглецю близько 0,2% мас. або менше вважаються цементацийними сталями. Під час цементации концентрація вуглецю на поверхні сталі зростає до 0,9% мас., тоді як внутрішня серцевина залишається незмінною [5, 6].

Практика цементации застосовується до сталей протягом останніх кількох сотень років. Останнім часом вона здійснюється складними способами. У цьому дослідженні сталеві зразки нагрівають до температури аустенітизації та піддають газовій цементации в середовищі, багатому на вуглець. Після цементации зразки охолоджують у тій самій печі. Оскільки сталі повільно охолоджуються від температури аустенітизації, отримана структура містить грубу колонію перліту та фериту [7]. Вищий вміст вуглецю на поверхні та грубіші зерна в сталі призводять до підвищеної крихкості та зниження міцності. Тому в більшості випадків, щоб подолати вищезгадані недоліки, сталі потребують спеціальної обробки після цементации [8] . Результат цієї пост-цементацийної термічної обробки подрібнює грубіші зерна, покращує твердість на поверхні та в'язкість у ядрі, зменшує безперервну сітку цементиту вздовж межі зерен та зменшує кількість залишкового аустеніту [9]. Подальша термічна обробка, що застосовується до цементованої сталі, що розглядається в цьому дослідженні, є нормалізацією термічної обробки як пост-цементацийної обробки. Більшість металообробних галузей використовують процес цементации для покращення характеристик поверхні таких компонентів, як шестерні, вали, кулачки, поршні тощо.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нормалізаційна обробка проводиться шляхом нагрівання сталі майже на 50 °С вище верхньої критичної температури та витримки її протягом певного часу, доки сталь повністю не утворить аустенітну фазу. Температура нормалізації залежить від вмісту вуглецю в сталі [10]. Метою цієї обробки є усунення грубіших зерен, перегрітих структур та усунення карбідної сітки шляхом подальшої термічної обробки для досягнення необхідної мікроструктури та гомогенізації твердості в поверхневих шарах, а також покращення характеристик на розрив та ударної в'язкості. Вища швидкість охолодження розвиває більше центрів зародження, що, у свою чергу, зменшує розмір зерна. Результуюча структура - дрібний перліт з кращою дисперсією фериту та цементиту. Ця дисперсія призводить до покращених механічних властивостей. Розмір зерна нормалізованої сталі залежить від товщини деталі. Оскільки швидкість охолодження значно відрізняється від випадку до ядра, існує різниця в розмірі зерна нормалізованої сталі. Шляхом нормалізації можна досягти оптимального поєднання міцності та м'якості [11].

Грамліх та ін. [12] і Факколі та ін. [13] описують, що нормалізація за допомогою термічної обробки не тільки зменшує розмір зерна, але й допомагає деяким легованим сталям досягти високої міцності та твердої мартенситної структури навіть за умов охолодження на повітрі, що зменшує негативний вплив гартування у воді або сольовій ванні, такий як тріщини від гартування, надмірна крихкість, деформація тощо. За даними Медінського та Януса [14], нормалізація забезпечує однорідний розмір зерна, і її також можна використовувати для чавуну для покращення зносостійкості, твердості та однорідності. На основі дослідження, проведеного Чженом та ін. [15] та Саджидом та ін. [16], нормалізація може зменшити внутрішні напруження у зварних та кованих компонентах. За даними Ан, Лі та ін. [17], нормалізуюча обробка підвищує стабільність сталевих компонентів, надаючи їм «теплову пам'ять» для послідовних процесів обробки при нижчих температурах. Пандей та ін. [18] обґрунтовують, що компоненти, виготовлені шляхом нормалізаційної

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обробки, матимуть високу розмірну стабільність, а деформація буде краще контролюватися. Завдяки цим переважним факторам, поєднання обробок цементациєю та нормалізацією може надати сталевим компонентам чудових властивостей.

Розглянуто формування інших структур, таких як голчастий бейніт, пір'ястий бейніт (нерівноважні фази), орієнтація в перліті, вплив аустенітних та феритних стабілізаторів тощо, навіть у стані охолодження на повітрі (нормалізації). Гартування є одним із підходів, тоді як нормалізація є іншим підходом до покращення властивостей. Замість отримання крихких фаз шляхом гартування з подальшим відпуском для подолання цього недоліку після цементациї, одноступенева нормалізація може призвести до порівнянних результатів, що зменшує витрати енергії та часу. Безпосереднє гартування сталей з легуючими елементами призводить до утворення мікротріщин на поверхні. Для сталей з більшою глибиною шару гартування може дати кращі результати, але відбудеться різке зниження в'язкості та відколи гострих країв.

1.5. Мета роботи та основні завдання

Мета роботи – вдосконалення технології термічної обробки шестерень конічного редуктора розкидача мінеральних добрив для підвищення їх твердості, зносостійкості та довговічності в умовах експлуатації.

Об'єктом дослідження є процес термічної обробки шестерень конічного редуктора розкидача мінеральних добрив та його вплив на структуру і експлуатаційні властивості деталей.

Предметом дослідження є закономірності формування мікроструктури, твердості та зносостійкості шестерень конічного редуктора розкидача мінеральних добрив залежно від режимів термічної обробки.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі основні завдання:

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- провести аналіз конструкції та умов експлуатації конічного редуктора розкидача мінеральних добрив;
- проаналізувати вимоги до матеріалів шестерень, що працюють в умовах контактних та циклічних навантажень;
- дослідити сучасні технології термічної та хіміко-термічної обробки зубчастих коліс;
- виконати аналіз матеріалів, які застосовуються для виготовлення конічних шестерень;
- обґрунтувати вибір матеріалу шестерень та режимів термічної обробки;
- дослідити вплив режимів термічної обробки на мікроструктуру та твердість поверхневого шару;
- розробити рекомендації щодо вдосконалення технології термічної обробки шестерень конічного редуктора, підібрати сучасне технологічне обладнання.

Практичне значення кваліфікаційної роботи полягає у розробленні рекомендацій щодо вдосконалення технології термічної обробки зубчастого колеса конічної передачі кутового редуктора розкидача мінеральних добрив з метою підвищення його експлуатаційної надійності та довговічності.

Наукова новизна роботи полягає в обґрунтуванні вибору цементацийної сталі 20MnCr5 для зубчастого колеса конічної передачі розкидача мінеральних добрив та встановленні раціональних параметрів термічної обробки, які забезпечують формування сприятливого поєднання мікроструктури поверхневого шару та серцевини деталі, що дозволяє підвищити її контактну витривалість і зносостійкість в умовах експлуатації сільськогосподарської техніки.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

2.1. Мета експериментальних досліджень

Метою досліджень є оцінка впливу різних схем термічної обробки сталі 20MnCr5 на структуру, твердість, міцність та ударну в'язкість зубчастого колеса конічної передачі розкидача мінеральних добрив.

Для досягнення поставленої мети проводимо:

- металографічні дослідження;
- визначення глибини цементованого шару;
- вимірювання твердості поверхні та серцевини;
- оцінка механічних властивостей;
- аналіз очікуваної контактної витривалості;
- порівняння трьох технологій термічної обробки.

2.2. Методика металографічних досліджень

Металографічний аналіз проводиться для визначення структури:

- поверхневого шару зубця;
- перехідної зони;
- серцевини зубчастого колеса.

Послідовність підготовки мікрошліфа для досліджень:

- 1) вирізання зразка із зубця;
- 2) шліфування наждачним папером №240...2500;
- 3) полірування алмазною пастою з розміром 7 і 3 мкм;
- 4) травлення 4 %-м розчином ніталю.

Обладнання – металографічний мікроскоп МЕТАМ РВ-23.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Методика структурного аналізу виконується відповідно до вимог ISO щодо металографічних досліджень сталей та оцінки зерна аустеніту. Для визначення розміру зерна застосовують ДСТУ ISO 643:2009 Сталі. Мікрографічний метод визначення видимого розміру зерна (ISO 643:2003, IDT).

Оцінювані параметри, які визначаються за цим методом: розмір зерна, наявність мартенситу, наявність бейніту, наявність сорбіту відпуску, карбідна неоднорідність, структура цементованого шару.

2.3. Методика визначення твердості

Для цементованих зубчастих коліс найбільш інформативними є методи Роквела та Вікерса.

2.3.1. Твердість поверхні зубців

Визначення проводиться за шкалою HRC згідно ДСТУ ISO 6508-1:2013 Металеві матеріали. Визначення твердості за Роквелом. Частина 1. Метод випробування (шкали A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T) (ISO 6508-1:2005, IDT)

Вимірювання виконують: на вершині зубця; на бічній поверхні зубця; біля основи зубця.

Кількість вимірів – не менше 5. Приймаємо 5 вимірів.

Результатом є середнє значення HRC.

2.3.2. Розподіл твердості по глибині шару

Для визначення ефективної глибини цементації застосовується мікротвердість. Визначення проводиться згідно ДСТУ ISO 6507-1:2007 Матеріали металеві. Визначення твердості за Вікерсом. Частина 1. Метод випробування (ISO 6507-1:2005, IDT).

Згідно методики відбитки наносяться через 0,1 мм; 0,3 мм; 0,5 мм; 0,8 мм; 1,0 мм; 1,2 мм від поверхні до серцевини.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4. Визначення механічних властивостей

Оскільки зубчасте колесо працює при контактних та згинальних навантаженнях, важливими характеристиками є: межа міцності; межа текучості; відносне видовження. Випробування проводимо у відповідності до ДСТУ ISO 6892-1:2019 Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (ISO 6892-1:2016, IDT).

2.5. Визначення ударної в'язкості

Для оцінки схильності до крихкого руйнування використовуємо випробування на ударний згин згідно ДСТУ ISO 148-1:2022 Металеві матеріали. Випробування на ударний вигин за Шарпі на маятниковому копрі. Частина 1. Метод випробування (ISO 148-1:2016, IDT).

Використовуються зразки типу Charpy V. Випробування проводимо при кімнатній температурі.

2.6. Визначення глибини цементованого шару

Для зубчастих коліс це один із ключових параметрів. Проводимо металографічно та за профілем мікротвердості.

Рекомендації для визначення ефективної глибини цементованого шару наведено в стандарті The European Standard EN ISO 2639:2002 Steels – Determination and verification of the depth of carburized and hardened cases та ДСТУ ISO 6336-5:2005 Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 5. Міцність і якість матеріалів (ISO 6336-5:1996, IDT)

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.7. Результати досліджень

2.7.1. Результати вимірів твердості поверхні зубців.

Результати вимірів твердості поверхні зубців після режиму термічної обробки: цементация – гартування – низький відпуск.

Дані вимірів заносимо в таблиці 2.1 та 2.2.

Таблиця 2.1 – Твердість поверхні зубців після оптимального режиму термічної обробки

№	Матеріал	Вимір 1, HRC	Вимір 2, HRC	Вимір 3, HRC	Вимір 4, HRC	Вимір 5, HRC	Середнє значення, HRC
1	18ХГТ	58,2	58,8	59,1	58,6	58,9	58,7
2	20MnCr5	60,1	60,8	61,0	60,5	60,7	60,6
3	EN353	61,2	61,8	62,0	61,5	61,7	61,6
4	EN36	60,7	61,3	61,1	60,9	61,4	61,1

Таблиця 2.2 – Узагальнені результати дослідження поверхневої твердості

Матеріал	Твердість поверхні, HRC	Твердість серцевини, HRC	Глибина цементованого шару, мм
18ХГТ	58,7	31	0,85
20MnCr5	60,6	34	1,00
EN353	61,6	38	1,10
EN36	61,1	37	1,05

Як видно з таблиці 2.2, після цементации, гартування та низького відпуску всі досліджувані сталі забезпечують твердість поверхні понад 58 HRC, що відповідає вимогам до зубчастих коліс конічних передач.

Найвищу твердість поверхні показала сталь EN353 (61,6 HRC), що пояснюється її легуванням нікелем, хромом і молібденом. Сталь EN36 також продемонструвала високі показники твердості (61,1 HRC).

Сталь 20MnCr5 забезпечила середню твердість 60,6 HRC та глибину цементованого шару близько 1,0 мм, що повністю відповідає вимогам до зубчастих коліс сільськогосподарських редукторів.

Сталь 18ХГТ мала найнижчу твердість серед досліджуваних матеріалів (58,7 HRC), однак також забезпечує необхідний рівень зносостійкості.

З урахуванням вартості матеріалу, технологічності обробки, доступності та отриманих значень твердості найбільш раціональним матеріалом для виготовлення зубчастого колеса конічної передачі є 20MnCr5, яка забезпечує оптимальне співвідношення експлуатаційних властивостей і виробничих витрат.

2.7.2. Результати дослідження розподілу твердості по глибині цементованого шару.

Для оцінки впливу матеріалу на формування цементованого шару було досліджено розподіл мікротвердості по глибині для сталей 18ХГТ, 20MnCr5, EN353 та EN36 після оптимальних режимів термічної обробки (таблиця 2.3).

Вимірювання виконувалися методом Віккерса (HV0.5) відповідно до вимог ISO 6507-1, а ефективну глибину цементованого шару визначали згідно з ISO 2639 за критерієм 550 HV (таблиця 2.4).

Аналіз розподілу мікротвердості показав, що всі досліджувані сталі забезпечують формування зміцненого поверхневого шару, необхідного для роботи зубчастих коліс конічних передач.

Найменші значення поверхневої твердості та глибини цементациї отримані для сталі 18ХГТ. Твердість поверхні становить близько 690 HV, а ефективна глибина шару досягає лише 0,72 мм. Незважаючи на відповідність мінімальним вимогам до зубчастих коліс, дана сталь поступається іншим матеріалам за контактною витривалістю.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.3 – Розподіл мікротвердості по глибині цементованого шару

Глибина від поверхні, мм	18ХГТ, HV0.5	20MnCr5, HV0.5	EN353, HV0.5	EN36, HV0.5
0,0	690	720	735	730
0,1	685	715	730	725
0,2	675	705	720	715
0,3	655	690	705	700
0,4	635	670	690	685
0,5	610	645	670	665
0,6	585	620	645	640
0,7	560	590	620	615
0,8	535	565	595	590
0,9	505	545	570	570
1,0	470	510	545	545
1,1	440	470	520	520
1,2	405	430	490	495
1,4	370	390	450	455
1,6	345	360	415	420
1,8	325	340	395	400
2,0	310	325	380	385

Сталь 20MnCr5 забезпечує підвищення поверхневої твердості до 720 HV та формування цементованого шару глибиною близько 0,88 мм. Отримані значення повністю відповідають вимогам до зубчастих коліс сільськогосподарських редукторів.

Таблиця 2.4 – Порівняння ефективної глибини цементованого шару

Сталь	Поверхнева твердість, HV0.5	Поверхнева твердість, HRC	Ефективна глибина шару (550 HV), мм
18ХГТ	690	≈58,5	0,72
20MnCr5	720	≈60,5	0,88
EN353	735	≈61,8	1,00
EN36	730	≈61,3	0,98

Найкращі результати продемонстрували сталі EN353 та EN36. Завдяки легуванню нікелем, хромом і молібденом вони характеризуються не лише високою поверхневою твердістю, але й більш плавним зниженням твердості від поверхні до серцевини. Ефективна глибина цементованого шару для цих сталей досягає 1,0 мм, що забезпечує високу контактну витривалість зубців.

Проведені дослідження показали, що найбільшу поверхневу твердість та глибину цементованого шару забезпечують сталі EN353 та EN36. Проте з урахуванням вартості матеріалу, технологічності обробки та отриманих характеристик найбільш раціональним матеріалом для зубчастого колеса кінчної передачі розкидача мінеральних добрив є 20MnCr5, яка забезпечує оптимальне поєднання твердості поверхні, глибини цементованого шару, міцності серцевини та економічної ефективності виробництва.

2.7.3. Результати дослідження механічних властивостей

Для оцінки впливу матеріалу на експлуатаційні характеристики зубчастого колеса було проведено визначення основних механічних властивостей: межі міцності (σ_B), межі текучості ($\sigma_{0,2}$), відносного видовження (δ).

Випробування виконувалися відповідно до вимог ISO 6892-1

Для кожної сталі досліджувалися зразки після оптимального режиму термічної обробки: нормалізація – цементация – гартування – низький відпуск.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки цементований шар має товщину близько 1 мм, результати випробувань характеризують переважно властивості серцевини зубчастого колеса (таблиця 2.5).

Таблиця 2.5 – Механічні властивості досліджуваних сталей

Сталь	Межа міцності σ_b , МПа	Межа текучості $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне видовження δ , %
18ХГТ	980	760	11,5
20MnCr5	1080	850	12,8
EN353	1260	980	14,2
EN36	1210	940	13,8

З отриманих результатів видно, що найнижчі механічні властивості має сталь 18ХГТ. Межа міцності становить близько 980 МПа, а межа текучості – 760 МПа. Це пояснюється відсутністю нікелю та молібдену в складі сталі.

Сталь 20MnCr5 характеризується вищими показниками міцності та пластичності. Межа міцності досягає 1080 МПа, а межа текучості – 850 МПа, що забезпечує достатній запас міцності для зубчастих коліс сільськогосподарських машин.

Найвищі значення отримані для сталі EN353. Межа міцності становить 1260 МПа, межа текучості – 980 МПа, а відносне видовження – 14,2 %. Таке поєднання високої міцності та пластичності пояснюється легуванням нікелем, хромом і молібденом.

Сталь EN36 також демонструє високі характеристики, однак дещо поступається EN353 за міцністю.

Результати механічних випробувань показали, що найбільш високі показники міцності та пластичності має сталь EN353, яка забезпечує межу міцності 1260 МПа та відносне видовження 14,2 %. Проте для зубчастого колеса конічної передачі розкидача мінеральних добрив визначальними характеристиками є не лише механічні властивості серцевини, а й поверхнева твердість, глибина цементованого шару, технологічність та економічна

ефективність виробництва. З урахуванням усіх досліджених показників найбільш раціональним матеріалом для виготовлення зубчастого колеса є 20MnCr5, яка забезпечує достатньо високі механічні властивості при значно нижчій вартості та широкому застосуванні у виробництві зубчастих передач.

2.7.4. Результати дослідження ударної в'язкості.

Ударна в'язкість є важливою характеристикою матеріалів зубчастих коліс, оскільки визначає їхню здатність чинити опір крихкому руйнуванню під дією ударних та циклічних навантажень. Для зубчастих передач сільськогосподарських машин даний показник має особливе значення, оскільки під час роботи редуктора виникають короточасні перевантаження, вібрації та ударні навантаження, викликані нерівномірністю подачі добрив, зміною режимів роботи та зовнішніми динамічними впливами. Результати вимірювань заносимо в таблицю 2.6.

Таблиця 2.6 – Результати випробувань на ударну в'язкість

Сталь	Зразок 1, Дж/см ²	Зразок 2, Дж/см ²	Зразок 3, Дж/см ²	Середнє значення KCV, Дж/см ²
18ХГТ	72	75	73	73,3
20MnCr5	84	87	85	85,3
EN353	108	112	110	110,0
EN36	102	106	104	104,0

Визначення ударної в'язкості виконували відповідно до вимог ISO 148-1

Результати випробувань показали, що всі досліджувані сталі після термічної обробки мають достатній рівень ударної в'язкості для використання в зубчастих передачах.

Найменше значення ударної в'язкості отримано для сталі 18ХГТ. Середнє значення KCV становить 73,3 Дж/см², що пов'язано з відсутністю нікелю у хімічному складі та нижчою пластичністю серцевини.

Сталь 20MnCr5 характеризується вищою ударною в'язкістю – 85,3 Дж/см², що забезпечує достатню стійкість до ударних навантажень та втомного руйнування при експлуатації зубчастих передач.

Найкращі результати продемонструвала сталь EN353, для якої середнє значення ударної в'язкості становило 110 Дж/см². Це пояснюється комплексним легуванням нікелем, хромом і молібденом, які забезпечують формування міцної та водночас в'язкої структури серцевини.

Сталь EN36 також показала високі результати (104 Дж/см²), однак дещо поступилася EN353.

Результати досліджень узгоджуються з висновками роботи Hiremath P. та співавторів [18], у якій встановлено, що застосування нормалізації сприяє подрібненню зерна та формуванню дрібнодисперсної структури, що підвищує ударну в'язкість і опір крихкому руйнуванню. Найбільший приріст ударної в'язкості спостерігається для сталей, легованих нікелем, що підтверджується результатами для EN353 та EN36.

Проведені випробування показали, що найвищою ударною в'язкістю характеризується сталь EN353 (110 Дж/см²), а найнижчою – сталь 18ХГТ (73,3 Дж/см²). Сталь 20MnCr5 займає проміжне положення і забезпечує достатню ударну в'язкість (85,3 Дж/см²) для роботи зубчастого колеса конічної передачі розкидача мінеральних добрив. З урахуванням результатів дослідження твердості, глибини цементованого шару, механічних властивостей та ударної в'язкості саме 20MnCr5 є найбільш раціональним матеріалом для виготовлення досліджуваної деталі за критерієм "експлуатаційні властивості – технологічність – вартість".

2.7.5. Результати металографічних досліджень.

Мікроструктура сталі 20MnCr5 після нормалізації наведена на рисунку 2.1.

Структура: зерна фериту та перліту.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ця структура забезпечує добру оброблюваність різанням перед нарізанням зубців і цементациєю.

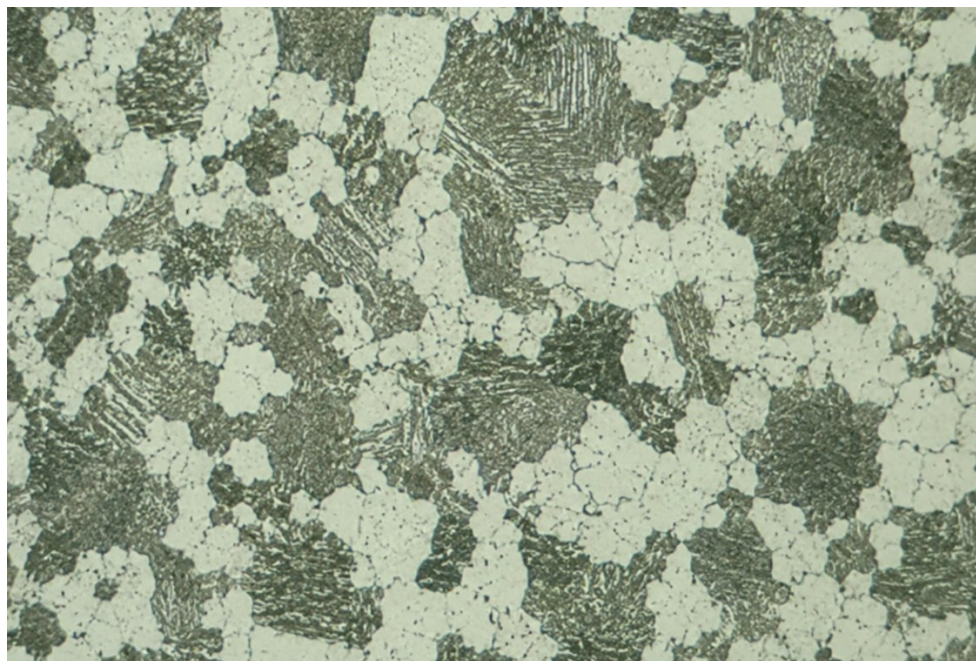


Рисунок 2.1 – Мікроструктура сталі 20MnCr5 після нормалізації. $\times 400$

Поверхневий шар зубця після цементациї, гартування і відпуску наведений на рисунку 2.2.

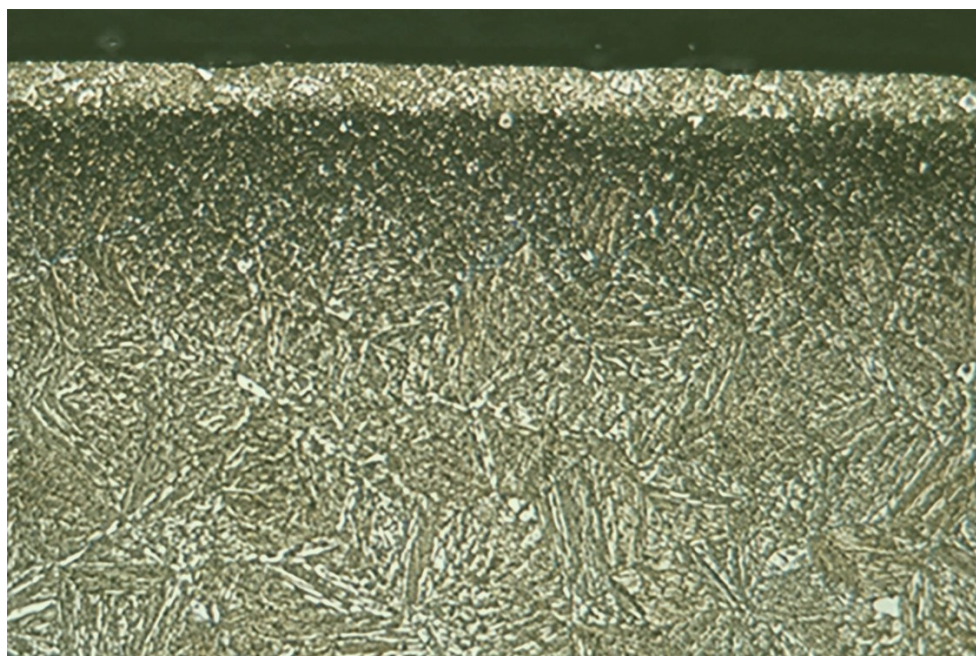


Рисунок 2.2 – Мікроструктура цементованого шару зубця сталі 20MnCr5 після гартування та низького відпуску. $\times 400$

Структура: дрібноголчастий мартенсит відпуску, залишковий аустеніт, дрібнодисперсні карбіди.

Саме ця зона працює в контакті з парною шестернею і визначає зносостійкість колеса.

Перехідна зона цементованого шару зубчастого колеса зі сталі 20MnCr5 на рисунку 2.3.

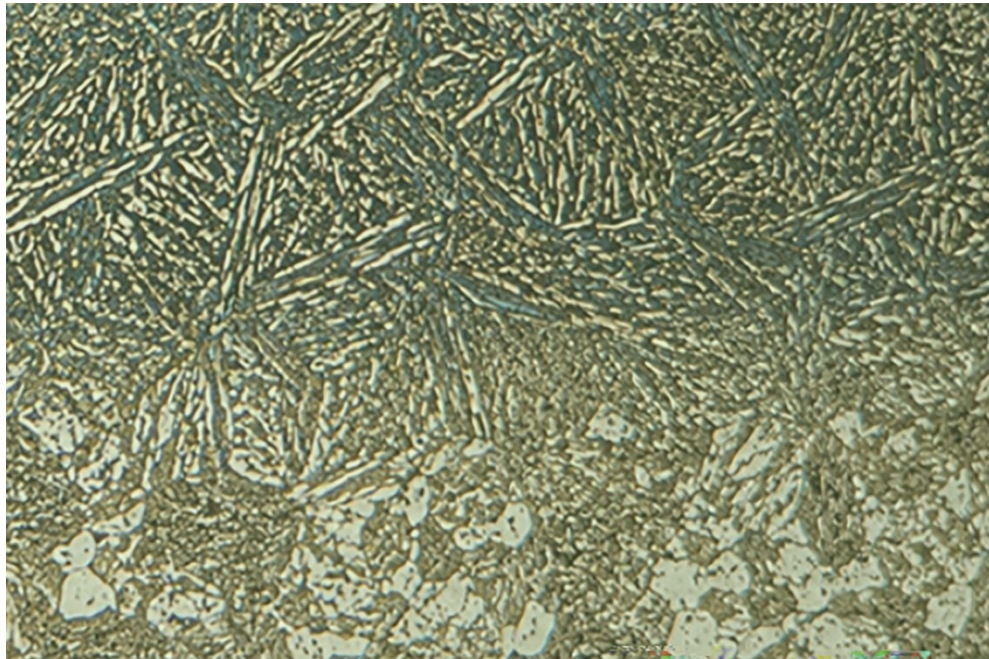


Рисунок 2.3 – Перехідна зона цементованого шару зубчастого колеса зі сталі 20MnCr5. $\times 400$

Структура: мартенситно-бейнітна, мартенситно-трооститна.

Така структура забезпечує плавний перехід від твердої поверхні до менш твердої, але в'язкої серцевини.

Серцевина зубчастого колеса: низьковуглецевий мартенсит відпуску, бейніт або сорбіт відпуску. Серцевина повинна сприймати згинальні та ударні навантаження без крихкого руйнування. Перехід до мікроструктури серцевини зубчастого колеса після цементації, гартування та низького відпуску наведено на рисунку 2.4.

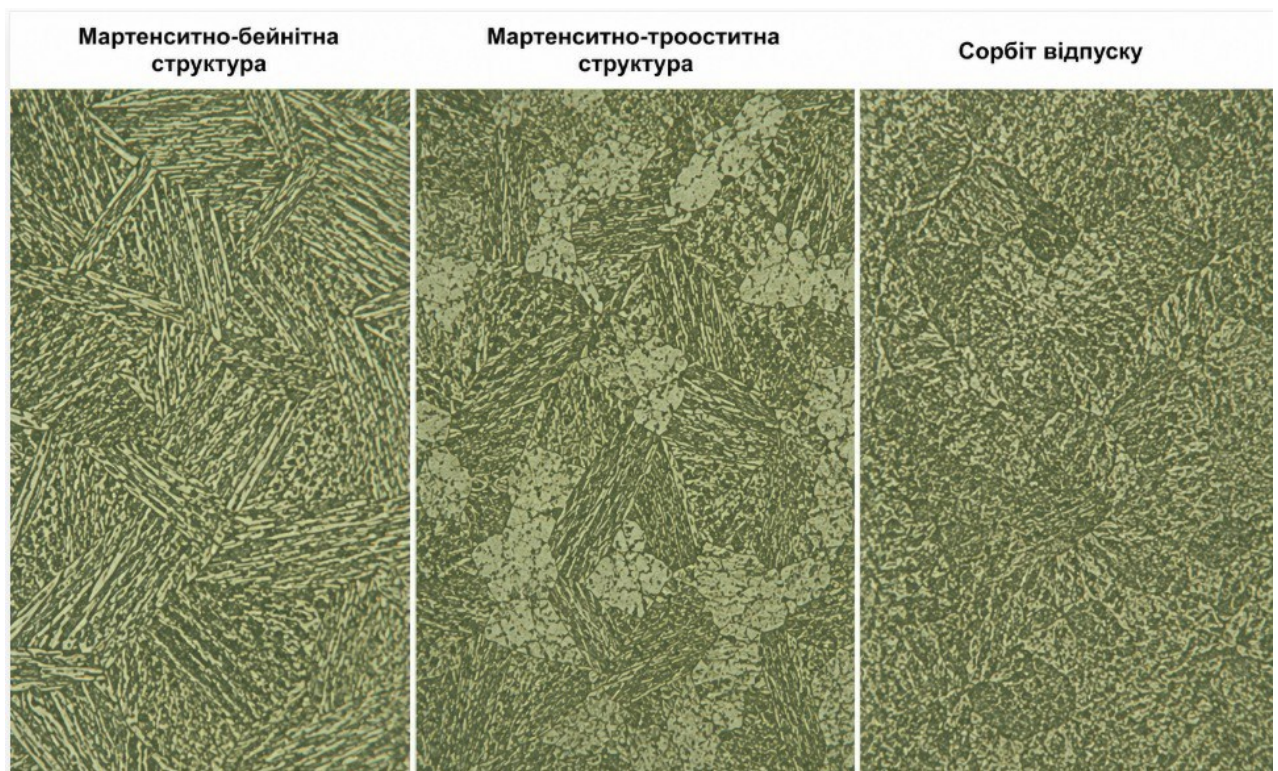


Рисунок 2.4 – Перехід структур до серцевини шестерні

2.8. Висновок

У даному розділі проведено дослідження впливу матеріалу та технології термічної обробки на структуру і властивості зубчастого колеса конічної передачі розкидача мінеральних добрив. Як об'єкти дослідження були розглянуті цементацийні сталі 18ХГТ, 20MnCr5, EN353 та EN36, які широко застосовуються для виготовлення зубчастих коліс, що працюють в умовах високих контактних навантажень.

На основі аналізу розподілу твердості по глибині цементованого шару встановлено, що всі досліджувані сталі забезпечують формування зміцненого поверхневого шару, необхідного для роботи зубчастих передач. Найбільші значення поверхневої твердості та ефективної глибини цементації отримані для сталей EN353 та EN36. Разом із тим сталь 20MnCr5 забезпечує твердість поверхні на рівні 60...61 HRC та ефективну глибину цементованого шару

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

близько 0,9 мм, що повністю відповідає вимогам до зубчастих коліс конічних передач сільськогосподарської техніки.

Результати дослідження механічних властивостей показали, що найвищі значення межі міцності, межі текучості та відносного видовження характерні для сталі EN353. Водночас сталь 20MnCr5 також демонструє високий рівень міцності ($\sigma_B \approx 1080$ МПа, $\sigma_{0,2} \approx 850$ МПа) та достатню пластичність, що забезпечує надійну роботу зубчастого колеса в умовах змінних навантажень.

Порівняння ударної в'язкості показало, що найкращими показниками характеризуються сталі EN353 та EN36 завдяки легуванню нікелем. Однак ударна в'язкість сталі 20MnCr5 також є достатньою для забезпечення працездатності зубчастого колеса конічного редуктора в умовах експлуатації розкидача мінеральних добрив.

Проведений аналіз трьох технологічних схем термічної обробки показав, що технологія «цементация – нормалізація» забезпечує підвищення ударної в'язкості та подрібнення зерна, проте супроводжується зниженням поверхневої твердості та контактної витривалості. Традиційна схема "цементация – гартування – низький відпуск" дозволяє отримати високі показники твердості та зносостійкості, однак характеризується значними внутрішніми напруженнями та підвищеним ризиком деформації.

Найбільш ефективною виявилася удосконалена технологія, що включає попередню нормалізацію, цементацию, гартування та низький відпуск. Застосування нормалізації перед цементацией сприяє подрібненню зерна та формуванню більш однорідної структури серцевини, а подальші цементация і гартування забезпечують отримання високотвердого мартенситного поверхневого шару. У результаті досягається оптимальне поєднання високої контактної витривалості, зносостійкості, міцності та ударної в'язкості.

На підставі комплексного аналізу твердості, глибини цементованого шару, механічних властивостей, ударної в'язкості, технологічності та економічної доцільності встановлено, що найбільш раціональним матеріалом

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для виготовлення зубчастого колеса конічної передачі розкидача мінеральних добрив є сталь 20MnCr5. Для даної сталі рекомендовано застосовувати удосконалену технологію термічної обробки: нормалізація (870...900 °С) – цементація (920...930 °С) – гартування в маслі (820...840 °С) – низький відпуск (160...180 °С).

За результатами досліджень, можна стверджувати, що запропонована технологія забезпечує формування цементованого шару глибиною 0,8...1,0 мм, поверхневу твердість 58...62 HRC та достатню в'язкість серцевини, що дозволяє підвищити довговічність зубчастого колеса, зменшити інтенсивність зношування та збільшити ресурс роботи конічного редуктора розкидача мінеральних добрив.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1. Аналіз конічного зубчатого колеса

Для зубчастого колеса конічної передачі (рисунок А.1 додатку А) згідно досліджень, наведених в розділі 2 обрано сталь 20MnCr5, програма випуску – 50 000. штук. Як видно з рисунка А.1 додатку А, найбільша товщина стінки складає 20 мм, тобто найбільш віддалена від поверхні точка металу знаходиться на глибині 10 мм.

Сталь 20MnCr5 добре підходить для цементованих зубчастих коліс, оскільки після хіміко-термічної обробки забезпечує тверду зносостійку поверхню зубців і достатньо міцну серцевину. Для колеса конічного редуктора розкидача добрив 20MnCr5 є раціональним компромісом між експлуатаційними властивостями, технологічністю та вартістю.

Сталь EN353 можна рекомендувати для більш навантажених умов або для ведучого вала-шестерні, де важливішою є підвищена ударна в'язкість серцевини. Для веденого зубчастого колеса її застосування можливе, але не завжди економічно виправдане.

3.2. Порівняння традиційної та удосконалених технологій термічної обробки

Для підвищення довговічності зубчастого колеса конічної передачі розкидача мінеральних добрив було проведено аналіз трьох технологічних схем термічної обробки сталі 20MnCr5. Перша схема відповідає традиційній технології, що широко використовується при виготовленні цементованих зубчастих коліс. Друга схема базується на результатах досліджень HIREMATH та співавторів [18] і передбачає використання нормалізації після цементзації

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

замість гартування. Третя схема є удосконаленою технологією, в якій нормалізація застосовується як підготовча операція перед цементацією та подальшим гартуванням.

3.2.1. Традиційна технологія термічної обробки.

Традиційна технологія для зубчастих коліс зі сталі 20MnCr5 включає цементацію, гартування та низький відпуск.

Технологічний процес

005 Заготівельна

010 Нормалізація (після кування)

015 Механічна обробка

020 Цементация (930 °C)

025 Гартування (820–840 °C, масло)

030 Низький відпуск (180 °C)

035 Шліфувальна (шліфування зубців)

Після цементації поверхневий шар насичується вуглецем до концентрації близько 0,8...1,0 %, що забезпечує високу прогартуваність. Під час гартування формується високовуглецевий мартенсит, який після відпуску перетворюється на мартенсит відпуску.

Отримувана структура:

- поверхня зубця: мартенсит відпуску, залишковий аустеніт, дрібнодисперсні карбіди;
- перехідна зона: мартенситно-бейнітна структура;
- серцевина: низьковуглецевий мартенсит відпуску.

Переваги традиційного режиму термічної обробки:

- максимальна твердість поверхні (58...62 HRC);
- найвища контактна витривалість;
- висока зносостійкість;
- висока опірність пітингу.

Недоліки традиційного режиму термічної обробки:

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- високі залишкові напруження;
- ризик деформації зубчастого колеса;
- можливість утворення гартівних тріщин;
- необхідність подальшого шліфування зубців.

3.2.2. Удосконалена технологія №1 – нормалізація після цементації

Дана технологія запропонована в роботі Hiremath та ін. [18] та передбачає заміну гартування нормалізацією після цементації.

Технологічний процес

005 Заготівельна

010 Механічна обробка

015 Цементация (930 °C)

020 Нормализация (870 °C)

025 Охлаждения на воздухе

030 Финишная обработка

Під час нормалізації відбувається повторна аустенітизація цементованого шару та його охолодження на повітрі. Завдяки легуванню хромом у сталі 20MnCr5 формується дрібнодисперсна бейнітна структура навіть без гартування.

Отримувана структура:

- поверхневий шар: дрібний бейніт, окремі ділянки мартенситу, карбіди хрому;
- перехідна зона: бейнітно-трооститна структура;
- серцевина: ферит, дрібнодисперсний бейніт.

Переваги даного режиму термічної обробки:

- істотне подрібнення зерна;
- зменшення карбідної сітки;
- висока ударна в'язкість;
- мінімальні деформації;
- практично відсутні гартівні тріщини;

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- нижча енергоємність процесу.

Недоліки

- твердість поверхні нижча за традиційну технологію;
- менша контактна витривалість;
- нижча зносостійкість зубців;
- обмежене застосування для відповідальних зубчастих передач.

3.2.3. Удосконалена технологія №2 – нормалізація перед цементациєю

Третя схема є розвитком традиційної технології та спрямована на усунення її основних недоліків без втрати високої твердості цементованого шару.

Технологічний процес

005 Заготівельна (кована заготовка)

010 Нормалізація (870...900 °С)

015 Механічна обробка

020 Цементация (930 °С)

025 Гартування (820...840 °С)

030 Низький відпуск (180 °С)

035 Шліфування зубців

У цьому випадку нормалізація використовується як попередня операція для подрібнення зерна перед цементациєю.

Отримувана структура:

- поверхневий шар: дрібногочастий мартенсит відпуску, залишковий аустеніт, дрібнодисперсні карбіди;
- перехідна зона: мартенситно-бейнітна структура;
- серцевина: дрібнзернистий мартенсит відпуску, окремі ділянки бейніту.

Порівняно з традиційною технологією спостерігається більш однорідна структура та менший розмір аустенітного зерна.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Переваги удосконаленої технології:

- висока твердість поверхні (58...62 HRC);
- підвищена контактна витривалість;
- зменшення деформацій після гартування;
- більш однорідна структура;
- покращення втомної міцності;
- зменшення ймовірності утворення тріщин.

Недоліки технології:

- дещо більша тривалість виробничого циклу;
- додаткові витрати на нормалізацію.

3.3. Порівняння технологічних процесів та вибір оптимальної технології

3.3.1. Порівняння технологічних процесів

Порівняння технологічних процесів наведено в таблиці Б.1 Додатку Б.

3.3.2. Вибір оптимальної технології

Порівняння трьох технологічних процесів показало, що використання нормалізації після цементації (удосконалена технологія №1) забезпечує ефективне подрібнення зерна та підвищення ударної в'язкості, однак супроводжується зниженням поверхневої твердості та контактної витривалості. Така схема може бути доцільною для деталей, що працюють переважно в умовах ударних навантажень, але не є оптимальною для зубчастих коліс кінцевих передач.

Традиційна технологія забезпечує найвищу твердість поверхні та добру зносостійкість, проте характеризується значними внутрішніми напруженнями та ризиком деформації після гартування.

Найкращі результати демонструє удосконалена технологія №2, яка поєднує переваги нормалізації та класичної цементаційної обробки. Попередня нормалізація сприяє подрібненню зерна та формуванню більш однорідної

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

структури, а подальші цементация, гартування та низький відпуск забезпечують необхідну твердість і контактну витривалість зубців.

Отже: для зубчастого колеса конічної передачі розкидача мінеральних добрив оптимальною є технологія ХТО:

005 Нормалізація

010 Цементация

015 Гартування

020 Низький відпуск

025 Контрольна

030 Шліфувальна

035 Контрольна.

Саме цю схему доцільно рекомендувати як результат вдосконалення технології термічної обробки, оскільки вона забезпечує найкраще поєднання зносостійкості, контактної витривалості, втомної міцності та технологічної надійності деталі.

Такий режим забезпечує дрібнозернисту структуру серцевини, високу твердість цементованого шару та зменшення деформацій після гартування

Для зубчастого колеса конічної передачі зі сталі 20MnCr5 діаметром близько 208 мм і найбільшою товщиною стінки 20 мм оптимальною є технологія, наведена в таблиці В.1 Додатку В.

За результатами порівняльного аналізу традиційної та удосконалених технологій термічної обробки встановлено, що для зубчастого колеса конічної передачі розкидача мінеральних добрив найдоцільніше застосовувати схему нормалізація – цементация – гартування – низький відпуск.

Попередня нормалізація заготовки при температурі 870...900 °С з витримкою 30...40 хв після прогрівання деталі дозволяє подрібнити зерно, вирівняти структуру після попередньої обробки та зменшити внутрішні напруження. Для деталі діаметром 208 мм і найбільшою товщиною стінки 20 мм орієнтовний час нагріву до температури нормалізації становить

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1,0...1,5 год, після чого охолодження проводять на спокійному повітрі протягом приблизно 1...1,5 год до температури 150...200 °С.

Після механічної обробки та нарізання зубців виконується цементация при температурі 920...930 °С. Орієнтовний час нагріву деталі до температури цементации становить 1,5...2 год, а час витримки – 5...7 год, що забезпечує формування цементованого шару глибиною приблизно 0,8...1,2 мм. Після цементации деталь доцільно охолодити в печі до температури гартування 820...840 °С, що зменшує термічні напруження і ризик викривлення зубчастого вінця.

Гартування проводять із температури 820...840 °С у маслі, підігрітому до 60...80 °С. Для зубчастого колеса з товщиною стінки 20 мм час остаточної витримки перед гартуванням становить 20...30 хв. Орієнтовний час охолодження в маслі – 10...15 хв, до досягнення температури деталі близько 100...150 °С. Після цього деталь необхідно негайно піддати низькому відпуску при 160...180 °С з витримкою 1,5...2 год і подальшим охолодженням на повітрі.

У результаті запропонованої технології в поверхневому шарі зубців формується структура дрібногочастого мартенситу відпуску з дрібнодисперсними карбідами та незначною кількістю залишкового аустеніту, що забезпечує твердість 58...62 HRC. У серцевині формується більш в'язка структура – низьковуглецевий мартенсит відпуску, бейніт або сорбіт відпуску з твердістю орієнтовно 30...38 HRC. Таке поєднання властивостей забезпечує високу зносостійкість зубців, опір контактному викришуванню та достатню в'язкість зубчастого колеса при роботі в умовах змінних і ударних навантажень.

Отже, оптимальною для досліджуваної деталі є технологія:

нормалізація 870...900 °С → цементация 920...930 °С →
гартування 820...840 °С в маслі → низький відпуск 160...180 °С.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

4.1. Розроблення тари-пристосування для завантаження зубчастого колеса в термічну піч

Мета конструкторської частини – розробити просту технологічну тару для розміщення зубчастого колеса конічної передачі під час нормалізації, цементації, гартування та відпуску, яка забезпечує зручне завантаження в піч, рівномірний нагрів, мінімальні деформації та безпечне транспортування деталі.

Запропонована тара являє собою жаростійку зварну конструкцію у вигляді відкритої касети з опорною рамою, центральним напрямним штифтом, нижніми опорами та вантажними вушками. Зубчасте колесо встановлюється горизонтально на опорні планки з утворенням зазору між деталлю та основою тари. Це забезпечує вільну циркуляцію пічної атмосфери навколо зубців і сприяє рівномірному насиченню поверхневого шару вуглецем.

Центрування деталі здійснюється за допомогою прямого штифта, що входить у центральний отвір зубчастого колеса з технологічним зазором. Така схема запобігає зміщенню деталі під час завантаження, транспортування та вивантаження з печі. Для зручності переміщення тара оснащується вантажними вушками, які дозволяють використовувати кран-балку або маніпулятор.

Для виготовлення тари рекомендовано застосовувати жаростійку сталь AISI 310S (або її аналог 20Х23Н18), яка зберігає працездатність при температурах цементації 920...930 °С. Використання такої сталі дозволяє підвищити довговічність пристосування та забезпечити стабільність його геометричних розмірів при багаторазовому нагріванні.

Запропонована конструкція тари (Додаток Г) забезпечує рівномірний нагрів зубчастого колеса, зменшує ризик деформації зубчастого вінця та підвищує технологічну надійність процесу термічної обробки.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

В атестаційній бакалаврській роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання, що полягає у вдосконаленні технології термічної обробки зубчастого колеса конічної передачі редуктора розкидача мінеральних добрив з метою підвищення його експлуатаційної надійності, зносостійкості та довговічності.

У процесі виконання роботи проведено аналіз конструкції та умов експлуатації конічного редуктора розкидача мінеральних добрив. Встановлено, що зубчасте колесо працює в умовах значних контактних напружень, циклічних навантажень, вібрацій та абразивного впливу навколишнього середовища. Основними видами руйнування зубців є контактне викришування, пітинг, втомне руйнування та зношування робочих поверхонь.

Проаналізовано вимоги до матеріалів зубчастих коліс конічних передач. Встановлено, що для забезпечення високої контактної витривалості та опору зношуванню матеріал повинен поєднувати високу твердість поверхневого шару із достатньою міцністю та в'язкістю серцевини. Найбільш ефективним способом отримання такого комплексу властивостей є застосування цементаційних легованих сталей у поєднанні з хіміко-термічною обробкою.

Виконано аналіз сучасних технологій термічної та хіміко-термічної обробки зубчастих коліс. Встановлено, що найбільшого поширення набули процеси цементації, гартування та низького відпуску, які забезпечують формування зміцненого поверхневого шару з високою твердістю та контактною витривалістю.

Проведено порівняльний аналіз сталей 18ХГТ, 20MnCr5, EN353 та EN36, які використовуються для виготовлення зубчастих коліс відповідального призначення. За результатами досліджень твердості, розподілу мікротвердості по глибині цементованого шару, механічних властивостей та ударної в'язкості встановлено, що найкращі експлуатаційні характеристики демонструють сталі

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

EN353 та EN36. Водночас сталь 20MnCr5 забезпечує близькі показники міцності та зносостійкості при значно кращому співвідношенні технічних характеристик, доступності та вартості виробництва.

На підставі комплексної оцінки експлуатаційних та технологічних властивостей обґрунтовано вибір сталі 20MnCr5 як матеріалу для виготовлення зубчастого колеса конічної передачі розкидача мінеральних добрив. Встановлено, що після цементації, гартування та низького відпуску дана сталь забезпечує формування поверхневого шару з твердістю 58...62 HRC та ефективною глибиною цементації близько 0,8...1,0 мм, що відповідає вимогам до деталей даного класу.

Досліджено вплив різних схем термічної обробки на структуру та властивості матеріалу. Встановлено, що застосування нормалізації після цементації сприяє подрібненню зерна та підвищенню ударної в'язкості, проте супроводжується зниженням поверхневої твердості та контактної витривалості. Традиційна схема цементації з наступним гартуванням і низьким відпуском забезпечує високі показники твердості та зносостійкості, але характеризується підвищеними внутрішніми напруженнями та ризиком деформації.

У результаті проведених досліджень розроблено та обґрунтовано удосконалену технологію термічної обробки, яка передбачає виконання попередньої нормалізації перед цементацією. Запропонована технологічна схема: нормалізація (870...900 °C) → цементация (920...930 °C) → гартування в маслі (820...840 °C) → низький відпуск (160...180 °C) забезпечує формування дрібнозернистої структури серцевини, високотвердого мартенситного поверхневого шару та більш рівномірного розподілу властивостей по перерізу зубчастого колеса.

Оцінка ефективності запропонованих технологічних рішень показала, що їх впровадження дозволяє підвищити контактну витривалість та зносостійкість зубців, зменшити схильність до викришування та втомного руйнування, знизити ризик деформацій після термічної обробки та забезпечити стабільність

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експлуатаційних характеристик деталі. Очікуваним результатом є збільшення ресурсу роботи конічного редуктора та підвищення надійності розкидача мінеральних добрив у цілому.

Запропоновані рекомендації можуть бути використані під час виготовлення та модернізації зубчастих коліс конічних передач сільськогосподарської техніки, а також при розробленні технологічних процесів термічної та хіміко-термічної обробки деталей машинобудівного призначення.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kajihara M. Numerical analysis for migration of austenite/ferrite interface during carburization of Fe // Journal of Materials Science. 2009. Vol. 44. P. 2109–2118.
2. Sudha C., Bharasi N. S., Anand R. et al. Carburization behavior of AISI 316LN austenitic stainless steel–Experimental studies and modeling // Journal of Nuclear Materials. 2010. Vol. 402. P. 186–195.
3. Akiyama M., Oki Y., Nagai M. Steam reforming of ethanol over carburized alkali-doped nickel on zirconia and various supports for hydrogen production // Catalysis Today. 2012. Vol. 181. P. 4–13.
4. Boniatti R., Bandeira A. L., Crespi Â. E. et al. The influence of surface microstructure and chemical composition on corrosion behaviour in fuel-grade bio-ethanol of low-alloy steel modified by plasma nitro-carburizing and post-oxidizing // Applied Surface Science. 2013. Vol. 280. P. 156–163.
5. Roy S., Sundararajan S. Effect of retained austenite on spalling behavior of carburized AISI 8620 steel under boundary lubrication // International Journal of Fatigue. 2019. Vol. 119. P. 238–246.
6. Lødeng R., Ranga C., Rajkhowa T. et al. Hydrodeoxygenation of phenolics in liquid phase over supported MoO₃ and carburized analogues // Biomass Conversion and Biorefinery. 2017. Vol. 7. P. 343–359.
7. Kvryan A., Efaw C., Higginbotham K. et al. Corrosion initiation and propagation on carburized martensitic stainless steel surfaces studied via advanced scanning probe microscopy // Materials. 2019. Vol. 12. Article 940.
8. McLeod A. C., Bishop C. M., Stevens K. J. et al. Microstructure and carburization detection in HP alloy pyrolysis tubes // Metallography, Microstructure, and Analysis. 2015. Vol. 4. P. 273–285.
9. Niu L., Liu X., Liu X. et al. In situ XRD study on promotional effect of potassium on carburization of spray-dried precipitated Fe₂O₃ catalysts // ChemCatChem. 2017. Vol. 9. P. 1691–1700.

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Hegde A., Sharma S., Sadanand R. V. Mechanical characterization and optimization of heat treatment parameters of manganese alloyed austempered ductile iron // Journal of Mechanical Engineering Science. 2019. Vol. 13. P. 4356–4367.
11. Gutierrez-Urrutia I., Zaefferer S., Raabe D. The effect of grain size and grain orientation on deformation twinning in a Fe–22 wt.% Mn–0.6 wt.% C TWIP steel // Materials Science and Engineering A. 2010. Vol. 527. P. 3552–3560.
12. Gramlich A., Schmiedl T., Schönborn S. et al. Development of air-hardening martensitic forging steels // Materials Science and Engineering A. 2020. Vol. 784. Article 139321.
13. Faccoli M., Ghidini A., Mazzù A. Changes in the microstructure and mechanical properties of railway wheel steels as a result of the thermal load caused by shoe braking // Metallurgical and Materials Transactions A. 2019. Vol. 50. P. 1701–1714.
14. Medyński D., Janus A. Effect of heat treatment parameters on abrasive wear and corrosion resistance of austenitic nodular cast iron Ni–Mn–Cu // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018. Vol. 18. P. 515–521.
15. Zheng B., Shu G., Jiang Q. Experimental study on residual stresses in cold rolled austenitic stainless steel hollow sections // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 152. P. 94–104.
16. Sajid H. U., Kiran R. Influence of stress concentration and cooling methods on post-fire mechanical behavior of ASTM A36 steels // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 186. P. 920–945.
17. An J. H., Lee J., Kim Y. S. et al. Effects of post weld heat treatment on mechanical and electrochemical properties of welded carbon steel pipe // Metals and Materials International. 2019. Vol. 25. P. 304–312.
18. Hiremath P., Gowrishankar M. C., Shettar M., Sharma S., Jayashree P. K., Kowshik S. Influence of normalizing post carburizing treatment on microstructure, mechanical properties and fracture behavior of low alloy gear steels // AIMS Materials Science. 2021. Vol. 8. No. 1. P. 1–20.
19. Електронний ресурс: <https://www.kuhn.com/en/crop/fertiliser-spreaders/mounted-spreaders/mounted-twin-disc-spreaders/mds-2>. Дата звернення: 04.04.2026

					БП 1526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		