

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
**Кафедра прикладного матеріалознавства  
і технології конструкційних матеріалів**

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
В. о.завідувача кафедри  
Гапонова О. П.

\_\_\_\_\_

дата, підпис

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НА ЗДОБУТТЯ СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА**

**за напрямом підготовки 132 «Матеріалознавство»**

Тема роботи : «Вибір матеріалу, маршрутної технології виготовлення заготовки і термічної обробки вал-шестірні циліндричного редуктора»

Виконала:  
студентка Єгорова Олена Миколаївна

Керівник:  
Доцент Говорун Тетяна Павлівна

Залікова книжка № \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

дата, підпис

\_\_\_\_\_

підпис

Захищена з оцінкою

Секретар ЕК:  
Сидоренко Ю.Ю.

\_\_\_\_\_

оцінка, дата

\_\_\_\_\_

дата, підпис

Суми 2020

Сумський державний університет  
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій  
Кафедра «Прикладне матеріалознавство і технології конструкційних матеріалів»  
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Гапонова О.П.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 року

**ЗАВДАННЯ  
ДЛЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА ЗДОБУТТЯ СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА**

Єгорова Олена Миколаївна

1. Тема проекту (роботи)\_\_\_

«Вибір матеріалу, маршрутної технології виготовлення заготовки і термічної обробки вал-шестірні циліндричного редуктора»\_\_\_\_\_ затверджена наказом по університету від “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.№\_\_\_\_\_

2. Термін здачі студентом закінченого проекту(роботи)\_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту (роботи)\_\_\_\_\_

---

---

---

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

---

---

---

---

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

---

---

---

---

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пор	Назва етапу дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапу проекту (роботи)	Примітка
1	Розділ 1. Характеристика та умови експлуатації деталі. Вимоги до матеріалу		
2	Розділ 2. Огляд літератури		
3	Розділ 3. Вибір матеріалу та методів дослідження		
4	Розділ 4. Маршрутна технологія отримання деталі «вал-шестерня»		
5	Розділ 5. Розрахунково-експериментальна частина		

6. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Керівник проекту \_\_\_\_\_

(підпис)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра містить 65 сторінок, зокрема 8 таблиць, 16 рисунків, список із 41 використаних джерел на 5 сторінках.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: вибір матеріалу, маршрутної технології виготовлення заготовки і термічної обробки вал-шестірні циліндричного редуктора.

Редуктори широко застосовують в різних галузях машинобудування завдяки високим економічним, споживчим та інші характеристики. Вал-шестерня є складовою частиною редуктора зубчастого циліндричного двоступеневого горизонтального типу Ц2-750. Втрата виробом, таким як вал-шестерня, працездатності відбувається з поверхні в результаті зношування, ерозії, сколювання зубів і інших, а це може призвести до відмови роботи машини чи механізму в цілому.

Мета роботи – це встановлення закономірностей комплексного впливу вибору матеріалу, маршрутної технології виготовлення, термічної та хіміко–термічної обробки на формування структури, фазового складу та механічних властивостей хромомарганцевої сталі 25ХГТ для виготовлення вала-шестірні редуктора типу Ц2-750.

Методи досліджень – дані, отримані з експериментів із застосуванням стандартних методів визначення механічних властивостей і структури сталі 25ХГТ для виготовлення вала-шестірні, і сучасних металографічних й мікроскопічних методів дослідження, які виконано за допомогою теоретичних і практичних методів. Висновки зроблені за результатами аналізу літературних джерел, патентного пошуку та проведених експериментів.

Ключові слова: редуктор, вал-шестерня, міцність, структура, термічна обробка, нітроцементация

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....</b>	<b>6</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>7</b>
<b>РОЗДІЛ 1.....</b>	<b>10</b>
<b>ХАРАКТЕРИСТИКА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИРОБУ. ВИМОГИ ДО МАТЕРІАЛУ.....</b>	<b>10</b>
1.1 Умови експлуатації вал-шестірні циліндричного редуктора.....	10
1.2 Види руйнування зубів зубчастих передач.....	15
1.2 Вимоги до матеріалу деталі «вал-шестерня».....	16
Висновки.....	19
<b>РОЗДІЛ 2.....</b>	<b>20</b>
<b>ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>20</b>
2.1 Матеріали для виготовлення виробів зубчастих передач .....	20
2.2 Методи покращення властивостей вал-шестірні .....	22
2.3 Нітроцементация для підвищення властивостей валів-шестірен.....	28
Висновки.....	30
<b>РОЗДІЛ 3.....</b>	<b>31</b>
<b>ВИБІР МАТЕРІАЛУ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>	<b>31</b>
3.1 Вибір оптимального матеріалу для деталі «вал-шестерня».....	31
3.2 Вплив легувальних елементів на властивості сталі 25ХГТ .....	34
3.3 Вибір методів дослідження.....	35
Висновки.....	40
<b>РОЗДІЛ 4.....</b>	<b>41</b>
<b>МАРШРУТНА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ДЕТАЛІ «ВАЛ-ШЕСТЕРНЯ».....</b>	<b>41</b>
4.1 Розробка технологічного процесу отримання деталі.....	41
4.2 Технологія отримання деталі.....	42
Висновки.....	44
<b>РОЗДІЛ 5.....</b>	<b>45</b>
<b>РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....</b>	<b>45</b>
5.1 Призначення режиму термічної та хіміко–термічної обробки деталі .....	45
5.2 Вибір основного та допоміжного обладнання .....	53
Висновки.....	58
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>59</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>61</b>

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ**

ККД – коефіцієнт корисної дії

ТО – термічна обробка

ХТО – хіміко-термічна обробка

$\sigma_{0,2}$  – межа текучості умовна, МПа

$\sigma_B$  – межа міцності при розтягу, МПа

$\sigma_T$  - межа пропорційності (межа текучості для залишкової деформації), МПа

$\delta_5$  – відносне подовження при розриві, %

$\psi$  – відносне звуження, %

КСУ – ударна в'язкість, кДж/м<sup>2</sup>

НВ – твердість за Бринелем

НРС – твердість за Роквелом, шкала С

## ВСТУП

Редуктор є невід'ємною складовою частиною сучасного обладнання. Редуктором називають агрегат, що містить передачі зачепленням і призначений для підвищення крутного моменту і зменшення кутової швидкості двигуна. Редуктори широко застосовують в різних галузях машинобудування завдяки високим економічним, споживчим та інші характеристики. У корпусі редуктора розміщені зубчасті або черв'ячні передачі, нерухомо закріплені на вали. Вали спираються на підшипники, розміщені в гніздах корпусу. Установка передачі в окремому корпусі гарантує точність складання, кращу мастило, більш високий ККД, менший знос, а також захист від попадання в неї пилу та бруду. У всіх відповідальних установках замість передач призначають редуктори. Редуктори мають виключно широке застосування. Призначення редуктора – зниження кутової швидкості і відповідно підвищення крутного моменту веденого вала в порівнянні з ведучим [1].

Переваги циліндричних редукторів і побудованих на них приводів [2]:

1. Високий ККД редуктора. Циліндричні зубчасті передачі мають один з найвищих ККД. Наслідком з цього є енергетична економічність цих редукторів. ККД циліндричної зубчастої передачі, яка застосовується в редукторах, незалежно від передавального відношення, зазвичай дорівнює 95-98 %.

2. Висока здатність навантаження. Циліндричні редуктори відповідних габаритів здатні передавати майже без втрат велику потужність.

3. Низький люфт вихідного вала, внаслідок цього кінематична точність циліндричних редукторів вище, ніж черв'ячних.

4. Низький нагрів внаслідок високого ККД передачі – майже вся енергія не розсіюється, а передається від джерела до споживача.

5. Оборотноість при будь-якому передавальному числі, інакше кажучи, відсутність самогальмування. У будь-якого циліндричного редуктора можна повернути вихідний вал.

6. Впевнена робота при нерівномірних навантаженнях, а так само при частих пусках-остановах. Це властивість диктує доцільність застосування

виключно циліндричних редукторів в приводах дробарок, подрібнювачів, шредерів і інших машин з пульсуючими навантаженнями на робочих органах.

#### 7. Висока надійність [2].

У даній роботі розглядається редуктор зубчастий циліндричний двоступінчастий горизонтальний типу Ц2-750, який застосовується в механізмах вантажо-підіймальних машин, а також може бути використаний для приводу інших машин в діапазоні передавальних чисел від 8 до 50 в повторно-короткочасних режимах навантаження.

Актуальними в даний час є питання підвищення надійності і довговічності машин, приладів, установок, підвищення їх якості та ефективності роботи, питання економії металів, боротьби з корозією і зносом деталей машин. Як правило, поверхневі шари деталі піддаються найбільш сильному механічному, тепловому, хімічному та іншим видам впливу [1]. Втрата виробом, таким як вал-шестерня, працездатності відбувається з поверхні в результаті зношування, ерозії, сколювання зубів і інших, а це може призвести до відмови роботи машини чи механізму в цілому. Вал-шестерня працює в умовах дії радіального знакозмінного зосередженого навантаження, осьового навантаження, крутного моменту і служить для підтримки обертових деталей і передачі моменту обертання з одного вала на інший. Основним критерієм її працездатності є: контактна витривалість, витривалість при вигині, стійкість до зношування і заїдання. Різні умови роботи вала-шестерні вимагають різних матеріалів для їх виготовлення. Найважливішими властивостями матеріалу є твердість і міцність. В основному ці властивості ми отримуємо в результаті термічної обробки. Правильне проведення термічної обробки деталі позначається на її експлуатації. Змінити властивості поверхні можна різними способами: нанесенням на поверхню нового матеріалу з необхідними властивостями та зміною складу поверхневого шару металу. У другому випадку поверхневі шари металу піддають дифузійній хіміко-термічній обробці (ХТО), в результаті якої на поверхні виробу утворюється новий, що відрізняється від серцевини, сплав. Застосування способів ХТО матеріалів дозволяє отримати в поверхневому шарі виробу сплав практично будь-якого



складу і, отже, забезпечити комплекс необхідних властивостей - фізичних, хімічних, механічних, експлуатаційних та інших [3].

Тому **тема роботи** по вибору матеріалу, розробці маршрутної технології виготовлення заготовки і термічної та хіміко-термічної обробки деталі «вал-шестірня» редуктора типу Ц2-750 є **актуальною**.

**Метою роботи** є встановлення закономірностей комплексного впливу вибору матеріалу, маршрутної технології виготовлення, термічної та хіміко-термічної обробки на формування структури, фазового складу та механічних властивостей хромомарганцевої сталі 25ХГТ для виготовлення вал-шестірні редуктора типу Ц2-750.

**До завдань досліджень** відносяться такі: вивчення та проведення аналізу літературних джерел (наукових публікацій (статей і тез), підручників, патентів), провести пошук з метою вивчення винаходів, що стосуються вдосконалення вибору матеріалу, технології виготовлення й термічної та хіміко-термічної обробки вала-шестірні. Запропонувати своє рішення щодо підвищення надійності та покращення експлуатаційних властивостей вал-шестерні.

**Методи досліджень** – дані, отримані з експериментів із застосуванням стандартних методів визначення механічних властивостей і структури сталі 25ХГТ для виготовлення вала-шестірні, і сучасних металографічних й мікроскопічних методів дослідження, які виконано за допомогою теоретичних і практичних методів. Висновки зроблені за результатами аналізу літературних джерел, патентного пошуку та проведених експериментів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Було вибрано матеріал для виготовлення вала-шестірні редуктора Ц2-750, визначено оптимальну технологію отримання та режими термічної обробки й хіміко-термічної обробки, що сприяє досягненню істотного підвищення комплексу механічних властивостей матеріалу.

**Апробація результатів роботи. -**

# РОЗДІЛ 1

## ХАРАКТЕРИСТИКА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДЕТАЛІ. ВИМОГИ ДО МАТЕРІАЛУ

### 1.1 Умови експлуатації вал-шестірні циліндричного редуктора

Редуктори (латинське слово *reductor*) набули широкого поширення у всіх галузях промислового і аграрного господарства, тому їх виробництво з кожним роком збільшується, з'являються нові модифікації, удосконалюються вже існуючі моделі. Редуктор служить для зниження частоти обертання тихохідного вала і збільшення зусилля на вихідному валу [4].

Редуктор є невід'ємною складовою частиною сучасного обладнання. Для редукторів загальномашинобудівного застосування характерні: високий технічний рівень за габаритними показниками і за величиною крутного моменту, що реалізується редуктором конкретного типорозміру; відповідність конструкції деталей і ступеня їх уніфікації вимог великосерійного виробництва; висока економічна ефективність, а також максимальне задоволення запитів споживачів (найважливішими показниками при оцінці конструкцій необхідно вважати коефіцієнт питомих витрат, тобто витрат на виготовлення і експлуатацію, віднесених до реалізованого крутного моменту) [4].

Циліндричні редуктори є найпопулярнішими в машинобудуванні. Вони дозволяють передавати досить великі потужності, при цьому їх ККД досягає порядку 95 %. В циліндричних редукторах застосовуються передачі, що складаються із валів-шестерень та косозубих, прямозубих, або шевронних зубчастих коліс. Циліндричний редуктор представляє собою одну або кілька послідовно з'єднаних циліндричних передач, укладених в загальний корпус. Редуктор має вхідний і вихідний вали, які за допомогою муфт або інших сполучних елементів з'єднуються з двигуном і робочою машиною відповідно. Коли до вхідного валу прикладається крутний момент, він, як і закріплене на ньому зубчасте колесо, приводиться в рух. За допомогою циліндричної передачі

зусилля передається від колеса вхідного вала до колеса, що знаходиться з ним в зачепленні. Обертаючий момент послідовно передається з вхідного вала на проміжний, а з проміжного на вихідний [4].

У двоступеневих редукторах розташовані три вала. Перший з них, розташований ближче до двигуна, називається ведучим і має індекс 1 (наприклад,  $d_1$ ); другий вал є проміжним і має індекс 2 (наприклад,  $d_2$ ); третій вал називається веденим і має індекс 3 (наприклад,  $d_3$ ). Ведучий і проміжний вали утворюють швидкохідну ступінь, що має індекс 1 або б ( $a_1, U_1$  або  $a_6, U_6$ ), проміжний і ведений вали утворюють тихохідну ступінь, що має індекс 2 або т ( $A_2, U_2$  або  $a_t, U_t$ ). Шестірні і черв'яки мають непарні індекси, колеса – парні індекси. Наприклад, шестерня, розташована на ведучому валу, має індекс 1 ( $d_1, z_1, HB_1$ ), а шестерня, розташована на проміжному валу, має індекс 3 ( $d_3, z_3, HB_3$ ). Колесо, розташоване на відомому валу має індекс 4 ( $d_4, z_4, HB_4$ ) [4].

Вал-шестерня є складовою частиною редуктора зубчастого циліндричного двоступеневого горизонтального типу Ц2-750 (рис. 1.1).

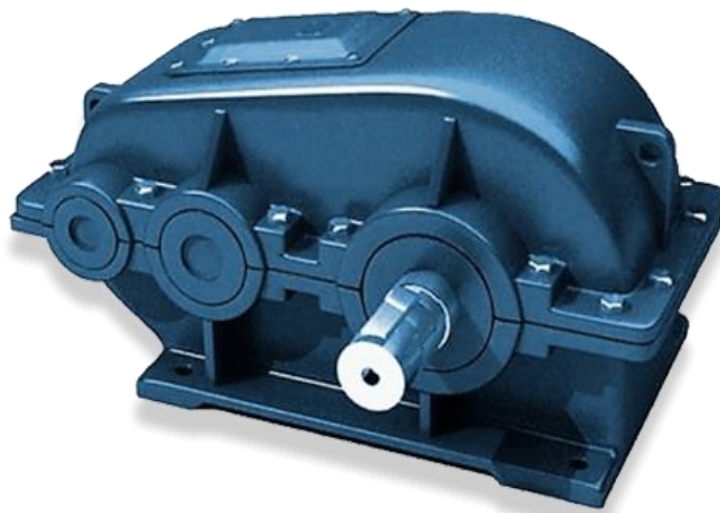


Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд редуктора зубчастого циліндричного двоступеневого горизонтального типу Ц2-750

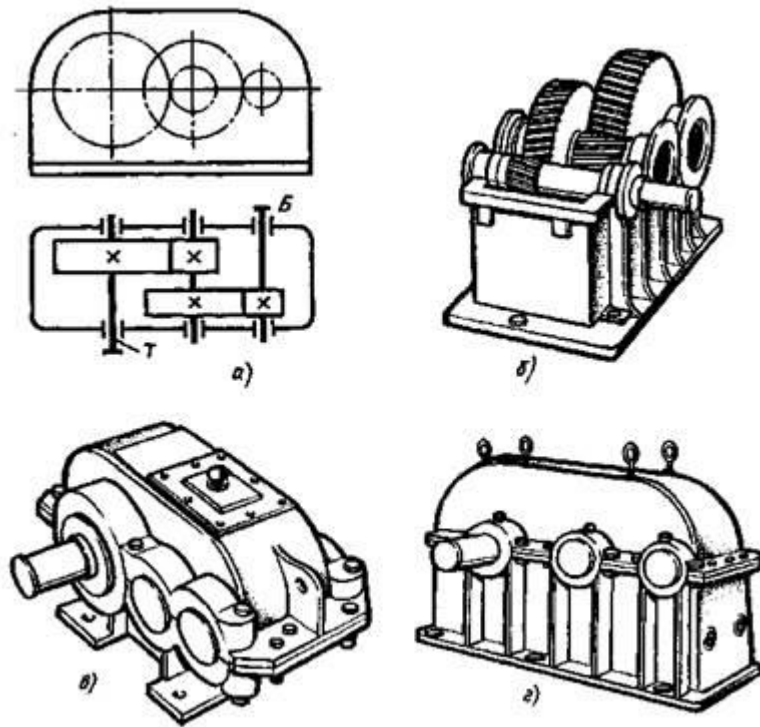


Рисунок 1.2 – Двоступеневий горизонтальний редуктор з циліндричними колесами типу Ц2-750: а – кінематична схема; б – редуктор зі знятою кришкою (колеса косозубі); в – загальний вигляд редуктора, у якого підшипникові вузли закриті врізаними кришками; г – загальний вигляд редуктора, у якого підшипникові кришки прикручені гвинтами [4]

Редуктор Ц2-750 володіє невеликими габаритами і високим крутним моментом в порівнянні з іншими видами редукторів. Редуктор Ц2-750 розрахований для роботи в наступних умовах [1]:

- обертання валів в обидві сторони;
- кліматичні умови У, Т, категорія розміщення – 2,3 за ГОСТ 15150-89;
- неагресивна среда, помірна запиленість і вологість;
- частота обертання вхідного вала – не більше 1500 об/хв.

Вал-шестерня – одна з найміцніших та навантажених деталей редуктора. Вал-шестерня працює в умовах дії радіального знакозмінного зосередженого навантаження, осьового навантаження, крутного моменту і служить для підтримки обертових деталей і передачі моменту обертання з одного вала на інший [5].

Переваги косозубої передачі в порівнянні з прямозубою: зменшення шуму при роботі; менші габаритні розміри; висока плавність зачеплення; косі зуби входять в зачеплення не відразу по всій довжині, а поступово; велика навантажувальна здатність; значно менші додаткові динамічні навантаження. Вал-шестерня має косі зуби (з лівим напрямком зуба) і модулем  $m = 8$ . У косозубого колеса і вала-шестерні зуби розташовані під деяким кутом  $\beta = 12^\circ$  (рис. 1.3). Осі деталей при цьому залишаються паралельними. Профіль косоного зуба в нормальній перетині  $n-n$  збігається з профілем прямого зуба. У торцевому перетині  $t-t$  параметри косоного зуба змінюються в залежності від кута  $\beta$ . [1, 4-5].

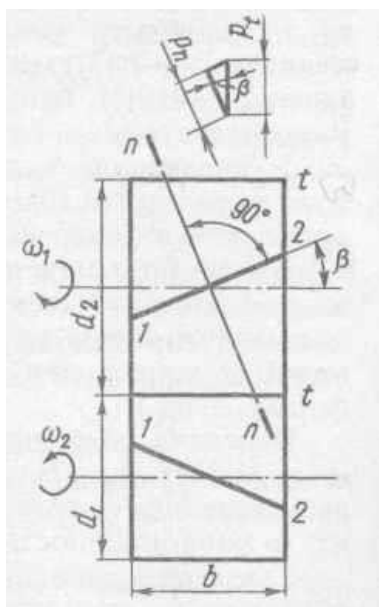


Рисунок 1.3 – Косозуба циліндрична передача

Розглянемо умови роботи зуба в зачепленні. При передачі крутного моменту  $M_1$  (рис. 1.3) в зачепленні діє сила:  $Q = 2M_1 / d_{01}$ , спрямована по лінії зачеплення  $N_1N_2$ , яка є спільною нормаллю до евольвентним поверхням зубів. У точці контакту спостерігається перекошування і ковзання зубів. Максимальне ковзання спостерігається на ніжках і голівках зубів, на початковій окружності воно дорівнює нулю і змінює напрямок [1, 4-5].

Від ковзання в зачепленні утворюється ще сила тертя  $F = Q \cdot f$ . Тертя є причиною втрат в зачепленні і зносу зубів. Під дією цих сил зуб має складний напружений стан. Вирішальний вплив на його працездатність мають дві основні напруги: контактні напруги  $\sigma_k$  і напруження вигину  $\sigma_i$ . Для кожного зуба  $\sigma_k$  і  $\sigma_i$  не є постійно діючими. Вони змінюються в часі по деякому преривистому віднульованому (пульсуючому) циклу (рис. 1.4) [5].

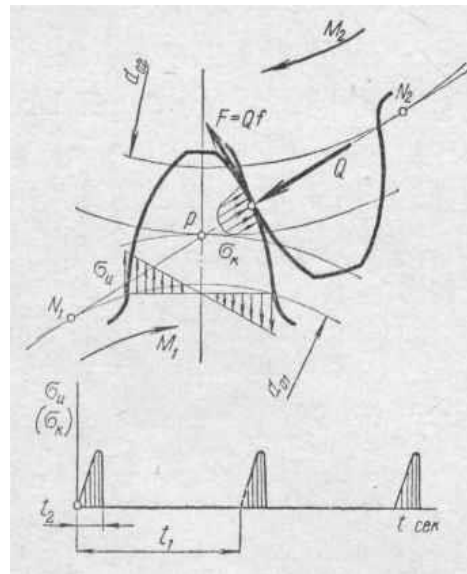


Рисунок 1.4 – Умови роботи зуба в зачепленні [5]

При зачепленні на зуб діє рівнодіюча сил тиску і сили тертя. Для кожного зуба напруження змінюється в часі за віднульовим циклом. Змінні напруження є причиною руйнування зубів від втоми металу (поломки, викришування робочих поверхонь та ін.). Тертя в зачепленні викликає спрацювання і заїдання зубів. Поломка зубів виникає як наслідок змінних напружень на згин та перевантажень. При цьому виникають тріщини поблизу ніжки зуба з того боку, де від згину виникають найбільші розтягуючі напруження. Прямі короткі зуби виламуються повністю, а довгі, особливо косі, ламаються по косому перерізу. Поломку від втоми металу попереджують розрахунком на міцність за напругами згину  $\sigma_F$  (індекс  $F$  надається всім параметрам, пов'язаним із напруженням згину, який виконують для ніжки (основи) зуба (англ. foot)), використанням коригування та збільшенням точності виготовлення і монтажу [1, 4-5].

## 1.2 Види руйнування зубів зубчастих передач

До видів руйнування зубів зубчастих передач відносяться [1, 4-5]:

1) Втомне викришування активних поверхонь зубців – пов'язане з дією циклічно змінних контактних напружень. Ці напруження сприяють виникненню втомних тріщин у поверхневих шарах і викришуванню металу. Це руйнування не завжди небезпечне. При припрацюванні спостерігається обмежене викришування. Небезпечне – прогресуюче руйнування. При наявності мастила – сприятливі умови для розвитку мікротріщин та викришування. Запобігання: обмеження контактних напружень, підвищена твердість, точності виготовлення і монтажу.

2) Поломка зубців може бути:

а) від великих перевантажень;

б) втомна поломка внаслідок дій змінних напружень згину;

в) тріщини виникають в області переходу зубців у середину вал-шестірні.

Поломки найчастіше мають місце в чавунних колесах і вал-шестірнях із високою твердістю зубів.

Заходи з усунення руйнування зубів зубчастих передач: збільшення модуля, використання додатних коефіцієнтів зміщення при нарізуванні, зміцнення поверхонь в основі зуба, захист від перевантаження, підвищення точності виготовлення та монтажу.

3) Відшарування поверхневих шарів зубів. Через періодичну дію глибинних контактних напружень під зміцненим шаром виникають втомні тріщини (вал-шестірні з цементованим, азотованим або поверхнево загартованим шаром).

Заходи з усунення руйнування зубів зубчастих передач: потрібно забезпечити відповідно товщину шару та достатню міцність серцевини зуба.

4) Абразивне спрацювання зубців. Основна причина – недостатнє змащування. Сутність – в стиранні активних поверхонь, яке залежить від тиску, швидкості ковзання зубів, абразивних частинок. В результаті спрацювання збільшуються зазори, шум, динамічне навантаження, зменшується міцність.

Заходи з усунення руйнування зубів зубчастих передач: збільшення твердості поверхонь зубців, використання мастил, захист від попадання абразивних частинок.

5) Пластична деформація зубів може виникнути в зоні контакту зубів. Заходи з усунення руйнування зубів зубчастих передач: збільшення твердості зубів.

б) Заїдання спостерігається переважно у висконавантажених і високошвидкісних передачах. У зоні контакту розвивається висока температура, в результаті – розрив масляної плівки  $\Rightarrow$  металевий контакт  $\Rightarrow$  зчіплювання частинок металу з подальшим відриванням.

Заходи з усунення руйнування зубів зубчастих передач: азотування, ціанування, модифікація профілю, інтенсивне охолодження мастилом. [1, 4-5].

### **1.3 Вимоги до матеріалу деталі «вал-шестерня»**

Деталі редуктора повинні мати достатню міцність, твердість; бути довговічними, тобто мати достатню зносостійкість; задовольняти заданим умовам роботи. Крім того, повинна допускатися можливість виготовлення з недорогих і недефектних матеріалів. Однак основні вимоги, що пред'являються до конструкції деталей машин можна звести до двох – надійності і економічності [4].

Надійність визначається як властивість об'єкта виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення експлуатаційних показників в заданих межах. Надійність характеризується ймовірністю безвідмовної роботи матеріалу при його експлуатації. Експлуатаційні відмови діляться на поступові і раптові. Поступові відмови викликаються надмірним зносом і втомним руйнуванням. Шлях боротьби з поступовою відмовою - правильний інженерний розрахунок, який передбачає створення запасу міцності [5].

Раптові відмови – наслідок крихкого руйнування матеріалу, тому конструкційні матеріали повинні володіти достатньою в'язкістю (КСУ) і пластичністю ( $\delta$ ,  $\psi$ ). Необхідно також враховувати так звану тріщиностійкість.



Тріщиностійкістю називають властивість матеріалів чинити опір розвитку тріщин при механічних та інших впливах [5].

Економічність – система заходів, що забезпечують мінімальні витрати на придбання матеріалів і обладнання для виготовлення [6].

Вал-шестірні повинні мати високу твердість і зносостійкість поверхневого шару, підвищену контактну витривалість, а також в'язку, м'яку серцевину для того, щоб сприймати (гасити) знакозмінні напруги, які діють на деталі. Вали-шестірні і зубчасті колеса в основному виготовляють із сталей, що допускають термічну або хіміко-термічну обробку для забезпечення високої несучої здатності і довговічності зубчастих передач. Залежно від твердості такі деталі діляться на дві групи [5, 7-8]:

1. Група А: якщо зуби нарізують після термообробки заготовки, то максимальна допустима твердість поверхонь  $H \leq 350$  НВ (термообробка: нормалізація, поліпшення, об'ємне гартування з низьким відпуском). Достатня точність валів-шестерен і зубчастих коліс досягається без використання дорогих фінішних операцій. Така технологія характерна для умов малосерійного та індивідуального виробництва. Колеса і вали-шестірні добре припрацьовуються. Для кращого припрацювання рекомендується призначати твердість робочих поверхонь зубців шестірні більшою від твердості робочих поверхонь зубців колеса:  $H_1 = H_2 + 20...50$  НВ – для прямозубих коліс;  $H_1 = H_2 + 60...100$  НВ – для косозубих і шевронних коліс.

2. Група Б: у передачах з підвищеною навантажувальною здатністю – використовуються колеса і вали-шестірні з твердістю робочих поверхонь зубців  $H > 350$  НВ. Застосування таких зубчастих коліс значно підвищує втомну контактну міцність зубців і, відповідно, навантажувальну здатність передачі, що призводить до зниження габаритів передачі, зростає зносостійкість коліс і валів-шестерен й опір заїданню зубців [8].

Способи підвищення конструкційної міцності [5,7]:

1. При рівній міцності чистіші сплави мають більш високий опір крихкому руйнуванню, отже, більш низький поріг холодноламкості, тобто забезпечують

більшу надійність. Тому видалення неметалевих включень (S, P і газоподібних домішок), тобто підвищення металургійного якості, завжди призводить до підвищення конструкційної міцності сталей і сплавів.

2. Застосування легованих конструкційних сталей. Легуючі елементи підвищують ефективність термічної обробки. Завдяки меншій критичній швидкості гартування леговані сталі гартуються в маслі, при цьому виникає менше гартівних напруг, менше деформацій і викривлення деталей.

Легуючі елементи підвищують весь комплекс механічних характеристик конструкційної міцності:  $\sigma_b$ ,  $\sigma_t$ ,  $\sigma_{-1}$ ,  $\delta$ , КСУ.

Несуча здатність валів-шестірень визначається, в першу чергу, станом поверхневих шарів, так як руйнування починається саме з поверхні.

Для підвищення втомної витривалості, зносостійкості необхідно підвищувати твердість поверхні, що досягається поверхневим гартуванням, хіміко-термічною обробкою, пластичною деформацією для створення на поверхні деталей залишкових напружень стиску. Товщина дифузійного шару має досить істотний вплив на міцність (перш за все на опір втоми при вигині і на контактну витривалість). Вибір марки сталі та методу її зміцнення для валів-шестерен залежить від ступеня їх навантаженості: мало- і середньонавантажені виготовляють із безнікелевих сталей – 20Х, 18ХГТ, 25ХГТ, 30ХГТ, 20ХГР та із малонікелевих – 20ХГНМ, 19ХГН, 20ХНМ, 20ХНР, 20ХГНР – сталей; важконавантажені – із більш легованих сталей – 12ХН3А, 20ХН3А, 15ХГН2ТА, 15Х2ГНТРА, 20ХГН2ТА, 25Х2ГНТА; в одиничному і дрібносерійному виробництві – із поліпшуваних сталей 40, 45, 50Г, 40Х, 30ХГС, 50Х, 50ХН; шестерні великих діаметрів виготовляють литими з сталей 35Л-50Л, 40ХЛ, 30ХГСА. При виборі матеріалу для виготовлення деталей за кресленнями замовника необхідно враховувати механічні характеристики після термічної обробки, ціну і дефіцитність легуючих добавок сталі і її загальну вартість. Для додання зубцям більшої твердості і зносостійкості вали-шестерні піддають зміцненню за допомогою цементації, нітроцементації, азотування або нанесення зносостійких покриттів [3].

## Висновки

Редуктор є невід'ємною складовою частиною сучасного обладнання. Циліндричні редуктори є найпопулярнішими в машинобудуванні. Вони дозволяють передавати досить великі потужності, при цьому ККД досягає порядку 95 %.

Вал-шестірня є складовою частиною редуктора зубчастого циліндричного двоступінчастого горизонтального типу Ц2-750. Вал-шестерня – одна з найміцніших та навантажених деталей редуктора. Вал-шестірня працює в умовах дії радіального знакозмінного зосередженого навантаження, осьового навантаження, крутного моменту і служить для підтримки обертових деталей і передачі моменту обертання з одного вала на інший.

При зачепленні на зуб діє рівнодіюча сил тиску і сили тертя. Для кожного зуба напруження змінюється в часі за віднульовим циклом. Змінні напруження є причиною руйнування зубів від втомленості металу (поломки, викришування робочих поверхонь та ін.). Тертя в зачепленні викликає спрацювання і заїдання зубів. Поломка зубів виникає як наслідок змінних напружень на згин та перевантажень.

Вали-шестірні повинні мати високу твердість і зносостійкість поверхневого шару, підвищену контактну витривалість, а також в'язку, м'яку серцевину для того, щоб сприймати (гасити) знакозмінні напруги, які діють на деталі.

Вал-шестірні виготовляють з застосуванням легованих конструкційних сталей. Легуючі елементи підвищують весь комплекс механічних характеристик конструкційної міцності:  $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma_{-1}$ ,  $\delta$ , КСУ. Вали-шестірні в основному виготовляють із сталей, що допускають термічну або хіміко-термічну обробку для забезпечення високої несучої здатності і довговічності зубчастих передач.

## РОЗДІЛ 2

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

В процесі виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи було проведено огляд літератури, в тому числі статей і патентів, з метою розроблення найбільш ефективних експлуатаційних характеристик деталі «вал-шестерня».

#### **2.1 Матеріали для виготовлення виробів зубчастих передач**

При проектуванні зубчастої або черв'ячної передачі в першу чергу увагу звертають на матеріал, з якого будуть виконані такі передачі редуктора, адже від цього буде залежати контактна міцність і зносостійкість зубів, і, як наслідок, довговічність проектного редуктора. Основним показником, за допомогою якого підбирають матеріал для зубчастих передач, є твердість. Треба зазначити, що чим вище твердість матеріалу, тим менше вага і вище міцність вала-шестірні, шестірні, зубчастого колеса, виготовленого з цього матеріалу [9-10].

Обраний матеріал повинен забезпечувати успішну роботу деталі в конструкції (виробі); після зміцнюючої обробки властивості його повинні гарантувати необхідну від виробу якість, перш за все за показниками надійності в відповідних умовах експлуатації.

При виборі матеріалів для валів-шестерень і зубчастих коліс необхідно забезпечити опір контактної втоми поверхневих шарів зубів, міцність зубів на вигин, опір заїдання і зносу. Основними матеріалами є термічно або хіміко-термічно оброблювані сталі [11].

Розглянемо результати патенту [12].

Винахід відноситься до чорної металургії, а саме до складів сталей, що застосовуються для виготовлення ведучого і веденого зубчастих коліс, які працюють в парі. Провідне колесо виконане зі сталі, що містить елементи при наступному співвідношенні, мас. %: вуглець 0,26–0,30, кремній 0,17–0,37, марганець 2,3–2,7, бор 0,010–0,018, ванадій 0,35–0,46, мідь 0,6–0,8, кобальт

0,05–0,15, молібден 0,6–0,8, хром не більше 0,030, нікель не більше 0,030, сірка не більше 0,035, фосфор не більше 0,035, залізо інше. Ведене колесо виконане зі сталі, що містить елементи при наступному співвідношенні, мас. %: вуглець 0,18–0,23, кремній 0,17–0,37, марганець 2,3–2,7, бор 0,010–0,018, ванадій 0,35–0,46, мідь 0,6–0,8, кобальт 0,05–0,15, хром не більше 0,030, нікель не більше 0,030, сірка не більше 0,035, фосфор не більше 0,035, залізо інше. Підвищується контактено-втомна міцність і, як наслідок, довговічність пари шестерень [12].

Відомо виконання зубчастих коліс з сталей 18ХГТ, 25ХГТ, 20ХГР, 20ХНР, 12ХНЗА, 20ХНЗА, 20Х2Н4А, 20ХГНР, 20ХНМ по ГОСТ 4543-71, з сталей 25ХНТЦ, 20ХНМАЮ за технічними умовами. Сталь 20ХГНР після нормалізації 950 °С, гартування при 830 °С в маслі і низького відпуску 200 °С має наступні властивості: межа плинності 110 кгс/мм<sup>2</sup>, тимчасовий опір 130 кгс/мм<sup>2</sup>, подовження 10 %, звуження 50 %. Це найбільш високі властивості з застосовуваних сталей. У винаході досягається технічний результат в підвищенні контактено-втомної міцності на 25-30 % [12].

Зазначений технічний результат досягається тим, що зубчаста пара, яка містить провідне і ведене зубчасті колеса, виконані зі сталі, що містить вуглець, кремній, марганець, ванадій, хром, нікель, сірку, фосфор, що відрізняється тим, що для ведучого колеса сталь додатково містить мідь, кобальт, молібден і збільшений вміст бору. Присадка бору до цементуємих сталей покращує їх прогартуваність і підвищує міцність серцевини. При значних присадках бору у легованих сталей з вмістом вуглецю менше 0,3 % спостерігалось збільшення твердості при відпуску 100-300 °С. У зв'язку з цим встановлено межі вмісту бору 0,010–0,018 %. При цьому дія бору посилюється при підвищенні температури гартування в цьому інтервалі вмісту, тобто при безпосередньому гартуванні з цементацийного нагріву, а мартенситну точку бор практично не змінює. Однак при цьому по межах зерен виявляються сполуки бору, що призводить до погіршення в'язкості руйнування. Розробка цементуємої сталі з можливо меншою схильністю до утворення вільних карбідів в поверхневому шарі і максимальною в'язкістю серцевини привела до необхідності застосування в сталі міді в кількості

0,6–0,8 %. Мала схильність сталі, легованої міддю, до надмірного вуглецювання при тривалій цементації і при сильно діючих карбюризаторах усуває карбідоутворення по межах зерен. Легування міддю збільшує прокалюваність на 16–20 % в прийнятих кількостях. Важливою властивістю для контактної міцності є усунення локальної корозії при легуванні міддю від 0,6 % і теплостійкість до температури 300–400 °С. Треба звернути увагу, що максимально досяжна твердість сталі при присадці міді до 0,8 % практично не змінюється і температура початку мартенситного перетворення також не змінюється [12].

Позитивний вплив марганцю при термічній обробці, в основному, пов'язано зі збільшенням прокалюваності. З підвищенням кількості марганцю в сталі до 2,7 % збільшується ступінь дисперсності маловуглецевого мартенситу. Мінімальна кількість марганцю 2,3 % встановлена, щоб перетворення в центрі зуба починалося з попереднього утворення складного карбіду, а аустеніт збіднюється вуглецем, щоб температура початку мартенситного перетворення не знижувалася. Вміст кремнію 0,17–0,37 % встановлено для достатнього розкислення металу. Вуглець обмежений межами 0,18–0,23 % для веденого колеса і 0,26–0,30 % для ведучого колеса. Вміст вуглецю встановлено для забезпечення необхідної твердості шару після хіміко-термічної обробки і в'язкості серцевини зуба [12].

## **2.2 Методи покращення властивостей вал-шестірни**

До методів покращення властивостей вал-шестірень відносяться: методи підвищення конструкційної міцності, технологічні, металургійні, конструкторські та інші. Їх мета – підвищення міцності матеріалу. Для цього застосовують наступні методи: легування, пластичну деформацію, термічну, термомеханічну та хіміко-термічну обробки. Підвищення міцності зазначеними методами засноване на ряді структурних факторів [5, 13]:

- збільшення щільності дислокацій. Чим більше щільність дислокацій, тим вище опір пластичного деформації;

- створення дислокаційних бар'єрів у вигляді меж зерен, субзерен, дисперсних частинок вторинних фаз. Важлива особливість цього фактора зміцнення полягає в тому, що подрібнення зерен (збільшення протяжності їх меж) супроводжується підвищенням ударної в'язкості. Сильне гальмування дислокацій створюють дисперсні частинки вторинної фази;

- утворення полів пружних напружень спотворюють кристалічну решітку. Такі поля утворюються поблизу точкових дефектів – вакансій, домішкових атомів і, головним чином, атомів легуючих елементів. Утворення атмосфер Коттрелла атомами впровадження. Разом з тим підвищення міцності, засноване на зменшенні рухливості дислокацій, супроводжується зменшенням пластичності, в'язкості і тим самим надійності. Проблема підвищення конструкційної міцності полягає не стільки в підвищенні міцності властивостей, скільки в тому, що при високій міцності забезпечити високий опір вязкому руйнуванню, тобто надійність матеріалу. Наприклад, в вуглецевих сталях гартуванням на мартенсит і низьким відпуском можна отримати при вмісті 0,4 % C –  $\sigma_B \sim 2400$  МПа, при 0,6 % C  $\sigma_B \sim 2800$  МПа. Раціональне легування передбачає введення в сталь і сплави декількох елементів при невисокій концентрації кожного з них, щоб підвищити пластичність і в'язкість. Подрібнення зерна здійснюється легуванням і термічною обробкою, особливо при використанні високошвидкісних способів нагріву – індукційного і лазерного. Для підвищення циклічної міцності і зносостійкості важливо утруднити деформацію поверхні деталей. Це досягається технологічними методами поверхневого зміцнення: поверхневим гартуванням, ХТО, поверхневим пластичним деформуванням (обдуванням дробом, обкаткою роликми) [5, 13].

Мета металургійних методів – підвищення чистоти металу і сплаву, тобто видалення шкідливих домішок: сірки, фосфору, газоподібних елементів (кисню, водню, азоту і залежних від змісту неметалічних включень) [5, 13].

Конструкторські методи передбачають забезпечення рівної міцності високонапружених деталей. При їх проектуванні уникають різких перепадів жорсткості, глибоких канавок, жолобників малого радіусу і інших конструктивних надрізів. Якщо цього уникнути не можна, то для пом'якшення

концентрації напружень застосовують місцеве зміцнення для формування залишкових напружень стиску [5, 13].

Хіміко-термічною обробкою (ХТО) називають технологічні процеси, що призводять до дифузионному насиченню поверхневого шару деталей різними елементами. Мета ХТО – підвищення твердості, зносостійкості, опору втоми і контактної витривалості, а також для захисту від електрохімічної та газової корозії [13, 14].

В залежності від умов роботи вал-шестірні, їх покращення досягається хіміко-термічною обробкою, частіше цементацією або нітроцементациєю з послідовним гартуванням та низьким відпуском, рідше азотуванням. ХТО застосовують для деталей машин, які повинні опиратися зносу при різних тисках, мати високу міцність при вигині, а також високі значення опору втоми при вигині, контактних напругах, чинити опір схоплюванню і задирам в умовах тертя без мастильного матеріалу [14-16].

Вміст легуючих елементів в сталі, призначеної для виготовлення деталей, покращуваних нітроцементациєю або цементацією, не повинен бути дуже високим, але повинен забезпечувати необхідну прогартованість поверхневого шару та серцевини та гальмувати ріст зерна аустеніту при нагріві.

Цементация (на товщину 0,5 – 2,0 мм) або нітроцементация (на товщину 0,4 – 0,8 мм) та послідовне гартування й низький відпуск підвищують межу витривалості на 50 – 80 %, межу контактної витривалості на 60 – 80 %, зносостійкість в 3 – 20 разів, довговічність в 5 – 10 разів та опір фреттинг – корозії в 2 – 5 разів. Твердість серцевини 28 – 40 HRC та шару 58 – 62 HRC.

Максимальна довговічність в області малоциклової втоми досягається при високому значенні в'язкості серцевини. Зі збільшенням товщини цементованного шару і вмісту в ньому вуглецю в'язкість руйнування (рис. 2.1) зменшується [14].



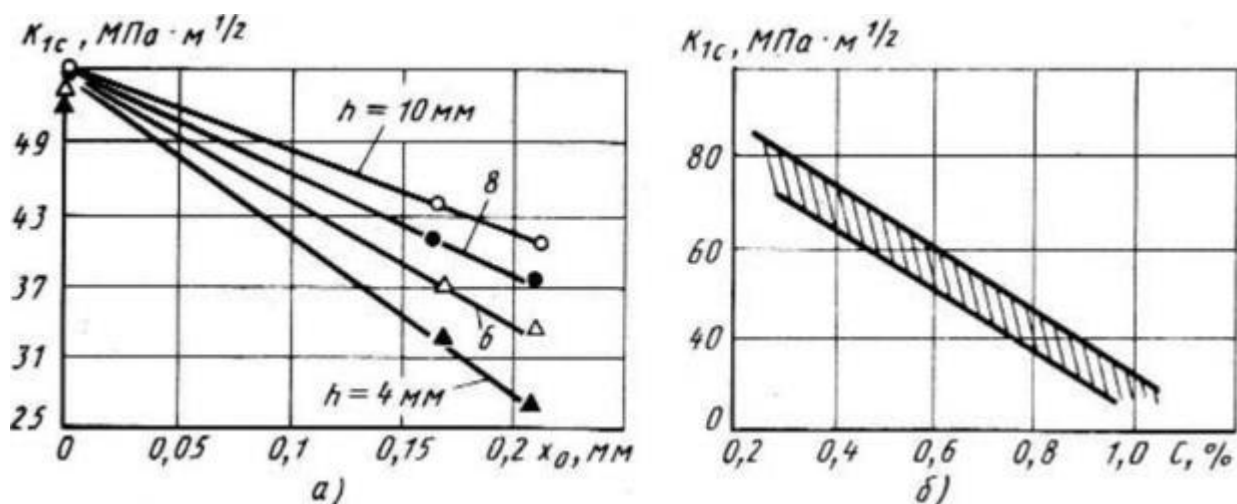


Рисунок 2.1 – Вплив товщини шару  $x_0$  (а) і вмісту на поверхні шару вуглецю (б) на в'язкість руйнування [14]

Підвищення вмісту вуглецю на поверхні шару вище 0,7–0,8 % сильно знижує також  $\sigma_{-1}$  (рис. 2.2). Найбільше зміцнення після цементації (нітроцементації) досягається, коли шар складається з мартенситно-аустенітної структури, серцевина і шар мають дрібне зерно і відсутні такі дефекти, як карбідна або троостітная сітка, виділення по границях зерен карбонитридов хрому і темної складової при нітроцементації [14].

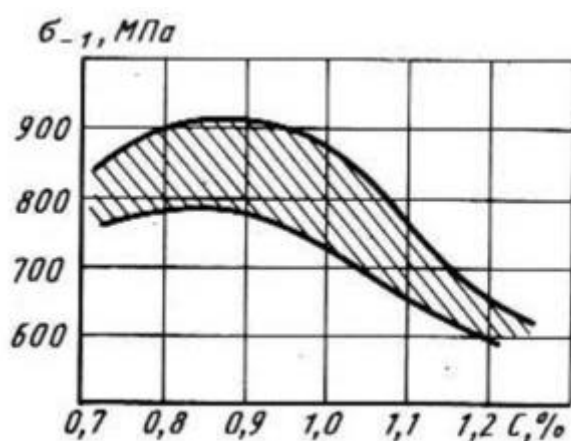


Рисунок 2.2 – Вплив вмісту вуглецю в цементованном шарі на межу витривалості стали типу ХГТ [14]

Тому потрібно вживати заходів, що виключають появу зазначених дефектів зміцненого шару в процесі хіміко-термічної обробки, або передбачати способи їх усунення остаточної механічної обробкою.

На конструктивну міцність деталей великий вплив має товщина зміцненого шару. Ефективна товщина шару (700 HV або 500 HV) визначається оптимальним відношенням товщини шару до характерного розміру деталі [14].

Твердість на поверхні зуба, щоб уникнути його крихкого руйнування, не повинна перевищувати 63 HRC, а в серцевині 30–45 HRC. З підвищенням твердості серцевини, наприклад при збільшенні вмісту вуглецю в сталі, зростає межа контактної витривалості зубчастих коліс, в той же час збільшується небезпека крихких руйнувань [14].

Переваги нітроцементзації перед цементазії наступні: зміщуються критичні точки перетворень до більш низьких температур. Це дозволяє знизити температуру процесу до 810-850 °С. Така температура, в порівнянні з температурою цементазії 910-1050 °С призводить до набагато менше викривлення виробів. Через відносно невисокі температури процесу, аустенітне зерно при нітроцементазії може вирости набагато менше, ніж при процесі цементазії. Процес нітроцементазії в ряді випадків проходить набагато швидше, ніж процес цементазії. При цьому найчастіше, немає необхідності робити гартування з повторного нагріву, як при цементазії [14-16].

На даний час для ряду деталей і вузлів машин застосовуються конструкційні низьковуглецеві сталі типу (20 ... 30) ХГТ, що працюють при підвищених навантаженнях. Однак зносостійкість і втомна міцність цих сталей після стандартної термообробки (гартування при 850 °С з подальшим відпуском на необхідну твердість) є недостатніми. Усунути вказаний недолік, тобто підвищити експлуатаційні властивості сталі, наприклад 25ХГТ, можна ХТО в пастоподібному карбюризаторі, що містять в своєму складі вуглецевоазотисті компоненти. Карбюризатор у вигляді пасти (обмазки) наноситься безпосередньо на будь-які зміцнюємі поверхні, що прискорює реакцію генерування активних атомів азоту і вуглецю до поверхні сталі, на якій вони безпосередньо

адсорбуються і дифундують углиб матеріалу деталі. При такому механізмі витрата компонентів карбюризатора мінімальна, а насичуюча здатність висока [17, 18].

Авторами [19] представлені результати дослідження структури, фазового складу і експлуатаційних властивостей зразків зі сталі типу 25ХГТ після об'ємного гартування із відпуском, а також після стандартного гартування із додатковою хіміко-термічною обробкою, що складається з нітроцементації із застосуванням азотисто-вуглецевих пастоподібних карбюризаторів при різних температурах 540 – 760 °С. Було зроблено висновки, що насичуюче пастоподібне середовище на основі сажі з азотовмісними добавками (сечовиною і жовтою кров'яною сіллю) цілком придатне й ефективно для поверхневої зміцнюючої обробки сталевих виробів в широкому діапазоні температур, а тверді карбонітриди, що утворюються на поверхні оброблюваних в цій пасті виробів, сприятимуть підвищенню їх зносостійкості і інших експлуатаційних властивостей; карбонітридам кірка на поверхні досліджуваної сталі, що утворюється в процесі пропонованої ХТО має ту ж твердістю, але значно підвищену витривалість в (1,4 – 1,5) рази, також карбонітридна кірка на поверхні сталі 25ХГТ, що утворюється в процесі нітроцементації в пастоподібному карбюризаторі не знижує зносостійкість, але значно підвищує втомну міцність матеріалу і працездатність деталей і вузлів.

У роботі [20] розглянуто головні переваги і недоліки різних видів ХТО, які змінюючи структуру, а також і властивості поверхневих шарів металевих матеріалів, є ефективними методами підвищення довговічності деталей машин і інструменту, працюючих в умовах зношування, при підвищених температурно-силових і циклічних впливах.

Щоб додати зубам зносостійкості й більшої твердості вал-шестірні піддають зміцненню [21] із застосуванням поверхневого гартування, нітроцементації, цементації, азотування та нанесення зносостійких покриттів.

До основних видів термічної і хіміко-термічної обробки валів-шестерен відносяться [22]:

- поверхнєве гартування з нагріванням СВЧ (для виробів малих і середніх розмірів) або ацетиленовим полум'ям. Сталі 45, 40X, 40XH (до 50-55 HRC);
- цементация - насичення вуглецем поверхневого шару металу з наступним гартуванням. Сталі 15, 20, 20X, 18ХГТ і т. д. (до 58-63 HRC);
- азотування (насичення поверхневого шару азотом) без подальшого гартування. Сталі 38X2МЮА і ін., що містять молібден; 40X, 40XM, 40XНМА. Зуби не шліфують;
- ціанування (насичення вуглецем і азотом), зокрема нітроцементация, з наступним гартуванням. Сталі 25ХГТ, 30ХГТ, 25ХГМ і ін. (до 60-63 HRC);
- лазерне гартування (до 64 HRC) не вимагає складного легування сталей, не викликає викривлення [22].

### **2.3 Нітроцементация для підвищення властивостей валів-шестірен**

Нітроцементацияю називається процес насичення поверхневих шарів вуглецем і азотом з наступним гартуванням, який забезпечує їм високу міцність, зносостійкість і опір заїданню. Нітроцементация йде з досить високою швидкістю і в зв'язку з малими товщиною зміцнюваного шару і його деформаціями дозволяє обійтися без подальшого шліфування [21, 23].

Винахід [24] відноситься до галузі металургії, а саме до хіміко-термічної обробки деталей, оснащення й інструменту. Склад суміші для нітроцементацияі наступний, мас. %: карбамід 10-15, трилон 10-15, триетаноламін 10-15, деревесноугольного основа - інше. Як деревне вугілля до складу може входити товчений відпрацьований деревинновугільний карбюризатор, або вугілля товчене вільхове, або деревна тирса. Прискорюється процес формування зміцненого шару, покращується його якість і збільшується зносостійкість. Запропонований спосіб може знайти свле застосування для зміцнення малорозмірних деталей в приладобудуванні, машинобудуванні, текстильній промисловості й малих ремонтних підприємствах та дільницях.

У патенті [25] авторами розглянуто один із методів хіміко-термічної обробки металів і сплавів – швидкісний процес нітроцементації в пастах. Формула винаходу: пропонований спосіб нітроцементації сталевих виробів в пасті, що містить азотовмісні компоненти (карбамід мас.ч. % – 50-55) і сажу (мас.ч. % – 50-45). Процес нітроцементації проводять протягом 4 годин у печі за температури 550 °С.

Авторами роботи [26] було досліджено зразки із сталі 30ХГТ у нормалізованому стані за різних температурних режимів для визначення підвищення втомної міцності при проведенні низькотемпературної нітроцементації. Це дозволило зробити висновки, що нітроцементація для сталі 30ХГТ у азотисто-вуглецевій пасті значно збільшує (в 1,5 - 1,6 рази) межу витривалості. Нітроцементація за 650 °С впродовж 3 годин після попереднього гартування забезпечує максимальну величину межі втоми для сталі 30ХГТ – 460 МПа.

Винахід [27] відноситься до ХТО конструкційних й інструментальних сталей та може бути використано для поверхневого зміцнення деталей машин і інструменту в машинобудівній, металургійній, хімічній та інструментальній промисловості.

В роботі [28], було запропоновано спосіб нітроцементації для сталевих деталей, що включає нітроцементацію за методом ЕЕЛ (НЦЕЕЛ).

## Висновки

В процесі виконання даної кваліфікаційної роботи був ретельно проведений огляд літератури, статей і патентів, що дозволяє розробити процес підвищення експлуатаційних властивостей.

При виборі матеріалів для валів-шестерень і зубчастих коліс необхідно забезпечити опір контактної втоми поверхневих шарів зубів, міцність зубів на вигин, опір заїдання і зносу. Основними матеріалами є термічно або хіміко-термічно оброблювані сталі.

До методів покращення властивостей вал-шестірень відносяться: методи підвищення конструкційної міцності, технологічні, металургійні, конструкторські та інші. Їх мета – підвищення міцності матеріалу. Для цього застосовують наступні методи: легування, пластичну деформацію, термічну, термомеханічну та хіміко-термічну обробки.

В залежності від умов роботи вал-шестірні, їх покращення досягається хіміко-термічною обробкою, частіше цементациєю або нітроцементациєю з послідувачим гартуванням та низьким відпуском, рідше азотуванням.

Нітроцементациєю називається процес насичення поверхневих шарів вуглецем і азотом з наступним гартуванням, який забезпечує їм високу міцність, зносостійкість і опір заїданню. Нітроцементация йде з досить високою швидкістю і в зв'язку з малими товщиною зміцнюваного шару і його деформаціями дозволяє обійтися без подальшого шліфування

Провівши аналіз літературних даних, можна зробити висновок, що проведення процесу нітроцементации дозволяє значно збільшити експлуатаційні і технологічні характеристики сталей типу ХГТ.

## РОЗДІЛ 3

### ВИБІР МАТЕРІАЛУ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 3.1 Вибір оптимального матеріалу для деталі «вал-шестерня»

Вибір матеріалу для виготовлення вал-шестірен необхідно проводити виходячи з умов експлуатації та технічних вимог. Таким чином, вал-шестірня повинен мати високу твердість і зносостійкість поверхневого шару, підвищену контактну витривалість, а також в'язку, м'яку серцевину для того, щоб сприймати (гасити) знакозмінні напруги, які діють на нього.

За базовим варіантом деталь «вал-шестерня» виготовляється зі сталі 20ХН3А. Виходячи з вимог до матеріалу ми обираємо заміну сталі 20ХН3А на сталь 25ХГТ.

Розглянемо характеристики вище наведених марок сталей. Конструкційна легована хромонікелева сталь 20ХН3А використовується для виготовлення цементуємих деталей з високою міцністю, пластичністю та в'язкістю серцевини, твердістю поверхні, що працюють при негативних температурах під впливом ударних навантажень – вали, шестерні, силові шпильки, втулки, муфти.

Таблиця 3.1

Хімічний склад сталі 20ХН3А [29]

C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Cu
0,17- 0,24	0,30-0,60	0,17-0,37	0,60-0,90	2,75- 3,15	Не більше 0,025	Не більше 0,025	Не більше 0,30

При можливості і без втрати якості та експлуатаційних показників, дорогі сталі з вмістом нікелю заміняють на більш дешеві. Так як наш редуктор працює в нормальних умовах, то така заміна є доцільною. Економно легovanі сталі 18ХГТ, 25ХГТ, 30ХГТ, 25ХГМ застосовують для заміни дорогих хромонікелевих сталей. Хром, марганець і молібден забезпечують високу прогартовуваність, титан і

молібден знижують чутливість до перегріву, сприяють отриманню дрібного зерна. Ці сталі по прогартовуваності та ударній в'язкості поступаються хромонікелевим проте значно перевершують їх за межею текучості, яка досягає 1000 – 1300МПа. Їх застосовують для відповідальних деталей (наприклад для виготовлення зубчастих коліс і валів-шестірень, для коробок передач автомобілів) [7].

Конструкційна легована хромомарганцева сталь 25ХГТ (табл. 3.2 – 3.5) використовується для виготовлення навантажених деталей з твердістю HRC більш 59, це – зубчасті колеса, вали-шестірні та інші вироби, до яких пред'являються вимоги високої міцності, пластичності, в'язкості серцевини і високої поверхневої твердості, що працюють при великих швидкостях, середніх і високих питомих зусиллях при наявності ударних навантажень.

Таблиця 3.2

## Характеристика матеріалу 25ХГТ [29]

Марка	25ХГТ
Замінник	18ХГТ; 30ХГТ; 25ХГМ
Класифікація	Сталь конструкційна легована
Застосування	Навантажені зубчасті колеса колеса та інші деталі, твердість яких більш HRC <sub>э</sub> 59.

Таблиця 3.3

## Хімічний склад сталі 25ХГТ [29]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ti	Cu
0,22-0,29	0,17-0,37	0,8-1,1	До 0,3	До 0,035	До 0,035	1-1,3	0,03-0,09	До 0,3

Сталь 20ХН3А із середнім вмістом вуглецю 0,2 %, легована хромом і нікелем для збільшення прогартованості. Також нікель забезпечує хорошу в'язкість серцевини зуба. Сталь 25ХГТ із середнім вмістом вуглецю 0,25 %, також містить по 1 % хрому і марганцю (дешевого заміника нікелю ) і 0,03 – 0,09 %



титану. Підвищуючи стійкість аустеніту, марганець знижує критичну швидкість гартування і підвищує прогартованість сталі. Введення титану подрібнює зерно і зменшує чутливість сталі до перегріву. Сталь спадково дрібнозерниста [7].

Однак вибираючи матеріал для вала-шестірні на виробництві, необхідно вибирати не тільки сталь, яка б забезпечила високі вимоги, що пред'являються до механічних властивостей на поверхні і в серцевині, але необхідно оцінювати вартість і самого матеріалу, виготовлення деталі, термічну обробку, а також дефіцитність цього матеріалу. Як відомо найбільш дефіцитними є сталі, що містять Ni, наприклад, 20ХНЗА. Значить дешевим матеріалом і економно легованим є сталь 25ХГТ.

У сталі 20ХНЗА більший вміст дорогих легуючих елементів, що робить її дорожче. А так як сталь 25ХГТ забезпечує всі необхідні властивості і є спадково дрібнозернистою, то вона є більш придатною для виготовлення вала-шестірні. Також сталь 25ХГТ не флокеночутлива.

Таблиця 3.4

Температури критичних точок для сталі 25ХГТ, °С [29]

$A_{c1}$	$A_{c3}(A_{cm})$	$A_{r3}(A_{rcm})$	$A_{r1}$	Сталь
770	825	740	660	25ХГТ

Таблиця 3.5

Механічні властивості при  $T=20^{\circ}\text{C}$  матеріалу 25ХГТ [29]

Сортамент	$S_B$	$S_T$	$d_5$	$\Psi$	КСУ	Термообробка
-	МПа	МПа	%	%	кДж / м <sup>2</sup>	-
Пруток, ГОСТ 4543-91	1270	980	10	50	690	Нормалізація 880 – 895 °С, повітря, Гартування 850 °С, масло, Відпуск 200° С, вода

### 3.2 Вплив легувальних елементів на властивості сталі 25ХГТ

Сталь 25ХГТ – це економно-легована, конструкційна якісна сталь. Містить 0,25 % вуглецю, 1,0 % хрому, 1,0 % марганцю, до 1,0 % титану, а також кремній, мідь, нікель, фосфор і сірку, які впливають на властивості сталі.

Основними легуючими елементами сталі є хром, марганець і титан. Одночасне введення в сталь хрому і марганцю підвищує її прогартованість та властивості міцності. Хромомарганцеву сталь часто застосовують в якості замітника більш дорогої та дефіцитної хромонікелевої сталі. Введення титану подрібнює зерно та зменшує чутливість сталі до перегріву [7].

Хром є порівняно дешевим елементом і широко використовується для легування сталі. Він розчиняється в фериті і цементиті, сприятливо впливає на механічні властивості. Хром підвищує прогартованість, твердість, межу міцності, корозійну стійкість; незначно зменшує характеристики пластичності сталі [7].

Марганець – дешевий елемент, приміняється як замітник в сталі нікелю. Як і хром, марганець розчиняється в фериті і цементиті. Підвищуючи стійкість аустеніту, марганець знижує критичну швидкість гартування, проте мало впливає на прогартованість нітроцементованого шару, визначає схильність до внутрішнього окислення. Марганець при утриманні його більше одного відсотка підвищує твердість, зносостійкість; підвищує стійкість проти ударних навантажень. Марганець різко зменшує червоноломкість сталі, тобто крихкість при високих температурах, викликану впливом сірки [7].

Вміст кремнію в сталі як домішки не перевищує 0,37 %. Кремній і марганець переходять в сталь в процесі її розкислення при виплавці. Вони розкислюють сталь, тобто, з'єднуючись з киснем закису заліза FeO, у вигляді оксидів переходять в шлак. Ці процеси розкислення покращують властивості сталі. Кремній, що залишається після розкислення в твердому розчині (в фериті), сильно підвищує межу плинності  $\sigma_T$  [7].

Додаткове легування сталі 25ХГТ нікелем (його міститься всього лише 0,30 %) підвищує опір крихкому руйнуванню сталі, збільшуючи пластичність і

в'язкість, зменшуючи чутливість до концентраторів напруг і знижує температуру порога холодноломкості [7].

Титан подрібнює первинне зерно, є сильним утворювачем карбїду, внаслідок чого з'являється збільшення зносостійкості, теплостійкості; значне поліпшення твердості після відпуску, зменшення чутливості до перегріву [7].

Сірка є шкідливою домішкою в сталі. Сірчисті включення знижують ударну в'язкість (КСУ) і пластичність ( $\delta$ ,  $\psi$ ) в поперечному напрямку витяжки при прокатці і куванні, а також межу витривалості. Сірка погіршує зварюваність і корозійну стійкість. Сульфід заліза з усіх домішок в сталі дає найсильнішу ліквіацію. Сульфід заліза призводить до червоноломкості, або «горячеламкості», оскільки низькоплавка сульфїдна евтектика у вигляді сітки охоплює кристаліти, так що має місце низьке зчеплення останніх, і при гарячій деформації переважно руйнуються межі зерен; ефект посилюється під дію кисню. Сірка в середньому істотно знижує в'язкість. Присутність в сталі марганцю, який володіє більшим спорідненням до сірки, ніж залізо, і утворює з сіркою тугоплавкое з'єднання MnS, практично виключає явище червоноломкості. У затверділої сталі частки MnS розташовуються у вигляді окремих включень. У деформованій сталі ці включення деформуються і виявляються витягнутими в напрямку прокатування. Вміст сірки в сталі строго обмежується; він не повинен перевищувати 0,035-0,06 % [7].

Фосфор є шкідливою домішкою, і вміст його залежно від якості сталі допускається не більше 0,025-0,045 %. Розчиняючись в фериті, фосфор сильно спотворює кристалічну ґратку і збільшує межі міцності і текучості, але зменшує пластичність і в'язкість. Зниження в'язкості тим значніше, чим більше в сталі вуглецю. Фосфор підвищує поріг холодноломкості сталі. Здатність фосфору до сегрегації по межах зерен також сприяє окрихчуванню сталі [7].

### **3.3 Вибір методів дослідження**

Дослідження мікроструктур ведемо за допомогою металографічного мікроскопа, який дозволяє вивчати при збільшенні непрозорі тіла (мікрошліфи) у

відбитому світлі. Мікроскоп металографічний вертикальний МІМ - 7 (рис. 3.1) призначений для спостереження і фотографування мікроструктури металів в звичайному світлі в світлому і темному полі і в поляризованому світлі в світлому полі.

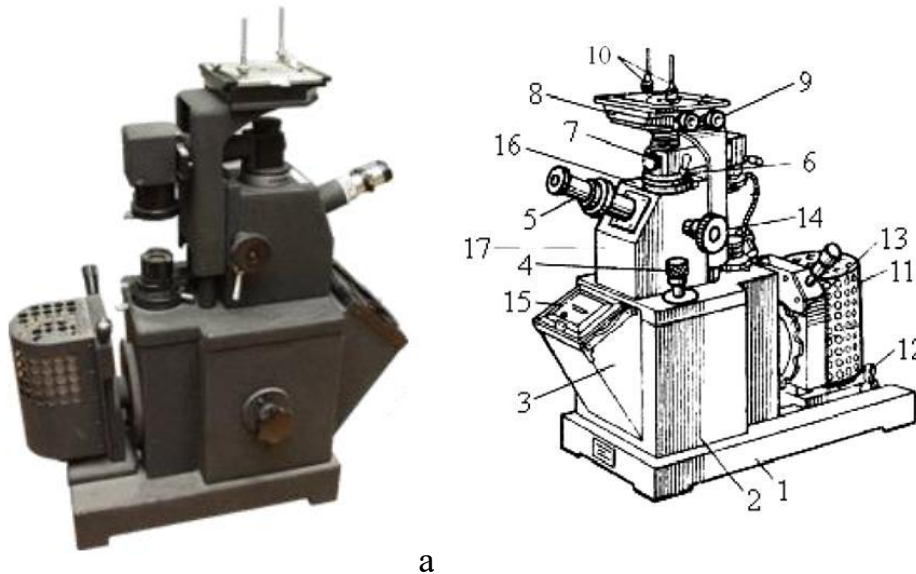


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд мікроскопа МІМ – 7 (а) і його основні складові (б) [30]: 1 - підставка мікроскопа; 2 - корпус; 3 - фотокамера; 4 - гвинт мікрометричною (точної) подачі об'єктива; 5 --візуальний тубус; 6 - рукоятка діафрагми; 7 - ілюмінатор; 8 --предметний столик; 9 - рукоятка переміщення столика; 10 - клеми; 11 - освітлювач; 12 – пристрій освітлювача; 13 - рукоятка зміни світлофільтрів; 14 - гвинт грубої подачі столика; 15 - рамка з матовим склом; 16 - аналізатор; 17 - корпус центральної частини

Набір об'єктивів і окулярів забезпечує збільшення мікроскопа від 60х до 1440х при візуальному спостереженні і від 70х до 1350х при фотографуванні. Як джерело світла використана кінопроекційна лампа К-30 17 В, 170 Вт [30].

За допомогою мікроаналізу визначають [30] форму і розмір кристалічних зерен, з яких складається метал або сплав, зміну структури сплаву, що відбувається під впливом різних режимів термічної і хіміко-термічної обробки, а також після зовнішнього механічного впливу на сплав, мікропори металу – мікротріщини, раковини і інші, неметалеві включення – сульфіді, оксиди і інші,

хімічний склад деяких структурних складових за їх характерною формою і характерному фарбуванню спеціальними реактивами.

Для мікроаналізу з випробувального матеріалу вирізають зразок і шляхом ряду операцій (шліфування, полірування, травлення) доводять його поверхню до такого стану, що стає можливим досліджувати мікроструктуру. Підготовлена для дослідження під мікроскопом поверхня зразка називається мікрошліф. Таким чином мікроскопічний аналіз складається: з приготування мікрошліфа і дослідження мікрошліфа за допомогою металографічного мікроскопа [30].

Приготування мікрошліфів [31] включає наступні етапи:

- вирізка зразка з деталі зазвичай здійснюється механічним способом в необхідному для дослідження місці, не допускаючи розігріву і пластичної деформації, які можуть змінити структуру металу;
- досліджувану площину зразка шліфується спочатку на шліфувальному колі, потім шліфування папером різних номерів, послідовно зменшуються розміри абразивних зерен вручну або на обертових плоских дисках. При переході на більш дрібнозернистий папір шліф кожен раз повертають  $90^\circ$  навколо осі і шліфують до зникнення поперечних рисок. Від залишків абразиву шліф очищають промиванням водою; до дзеркального блиску шліф полірується на оксамиті або сукні, на які наносять окис хрому або алюмінію, підтримуючи достатню вологість. Після полірування шліф промивають у воді, а потім в етиловому спирті, щоб попередити окислення поверхні. Більш досконалим методом є електролітичне полірування. Під дією електричного струму виступи на поверхні, що шліфується розчиняються, і вона поступово стає дзеркальною; для виявлення мікроструктури на приготованому мікрошліфі використовуємо хімічне травлення: 3-4 % розчином азотної кислоти. Кислота викликає вибірне розчинення металевих або інших фаз, а також їх примежевих ділянок внаслідок відмінності фізико-хімічних властивостей. У результаті на поверхні мікрошліфа утворюється рельєф і при спостереженні під мікроскопом більш сильно розчинені ділянки через тіні або нижчий коефіцієнт відображення представляються темнішими, а не розчинені світлішими [31].

Метод вимірювання твердості металів по Брінеллю регламентує ГОСТ 9012-59. Суть методу полягає у вдавлюванні кульки (сталеві або з твердого сплаву) в зразок (виріб) під дією навантаження, прикладеного перпендикулярно до поверхні зразка протягом певного проміжку часу і вимірі діаметра відбитка після зняття навантаження [32].

При вимірі твердості по Брінеллю сталеву кульку діаметром  $D$  (1; 2; 2,5; 5 і 10 мм) вдавлюємо в випробуваний зразок (рис. 3.2) протягом 10 секунд навантаженням  $P$  3000 кгс, після зняття якого виміряємо діаметр відбитка  $d$ , що залишився на поверхні зразка, за допомогою лупи МПБ-2. Після визначення розміру відбитка знаходимо значення твердості по формулі або за табличними даними [32].

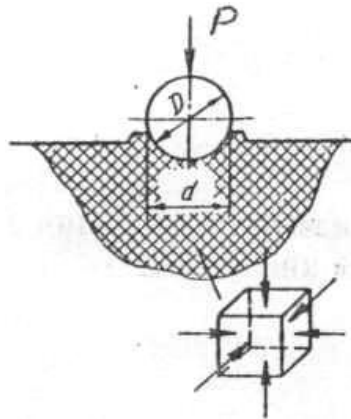


Рисунок 3.2 – Вимірювання твердості по Брінеллю [32]

Сутність методу вимірювання твердості металів по Роквеллу полягає у вдавлюванні алмазного конуса або сталеві кульки в зразок (виріб) під дією послідовно додаються попередньої ( $P_0$ ) і основний ( $P_1$ ) навантажень і вимірювання глибини вдавнення індентора ( $h$ ) після зняття основного навантаження. Попереднє навантаження додається для виключення впливу пружної деформації, шорсткості і локальних пошкоджень поверхні, а також складною конфігурації зразка. У методі Роквелла при зміні навантаження і використанні індентора одного типу зберігається подібність відбитків, а мірою твердості служить глибина проникнення індентора в досліджуваний матеріал,

значення якої безпосередньо зчитується зі стрілочного індикатора приладу вимірювання твердості навантажень [32].

При вимірі твердості по Роквеллу індентором є конус алмазний або з твердого сплаву з кутом при вершині  $120^\circ$ . Вдавлювання індентора в зразок проводиться під дією двох послідовно прикладених навантажень (рис. 3.3) [32]:

- попереднє  $P_0$ ;
- загальне  $P = P_0 + P_1$ , де  $P_1$  - основне навантаження.

Спочатку індентор вдавлюється в поверхню зразка під попереднім навантаженням  $P_0 = 100$  Н (10 кгс), яке не знімається до кінця випробування. Це виключає вплив вібрації і будови тонкого поверхневого шару на точність випробування. Потім на зразок подається основне навантаження  $P_1 = 150$  кгс і збільшується глибина вдавнення. Залишкова глибина вдавлювання ( $h$ ) після зняття основного навантаження  $P_1$  і визначає число твердості по Роквеллу (HRC).

$$\text{HRC} = 150 - l,$$

де  $l = (h - h_0) / 0,002$  (0,002 – ціна ділення індикатора твердоміра).

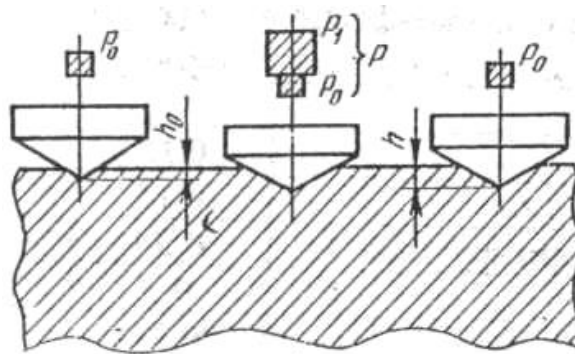


Рисунок 3.3 – Схема вимірювання твердості на приладі Роквелла навантажень [32]

## Висновки

При виборі матеріалу для виготовлення деталей за кресленнями замовника необхідно враховувати механічні характеристики після термічної обробки, ціну і дефіцитність легуючих добавок сталі і її загальну вартість.

Деталь «вал-шестерня» за базовим варіантом виготовляється зі сталі 20ХНЗА - сталь конструкційна низьколегована, високої якості, підвищеної міцності, в'язкості і глибокої прокалюваності застосовується в умовах зносу при терті. Дана сталь легована нікелем, який позитивно впливає на властивості сталі в серцевині виробу. Через дефіцитності нікелю і його вартість ці сталі замінюють іншими легованими сталями. Виходячи із цього будемо розглядати можливість заміни сталі 20ХНЗА на економнолеговану сталь 25ХГТ.

Сталь 25ХГТ – це економно-легована, конструкційна якісна сталь. Містить 0,25% вуглецю, 1,0% хрому, 1,0% марганцю, до 1,0% титану. Основними легуючими елементами сталі є хром, марганець і титан.

При дослідженні властивостей і характеристик обраного матеріалу для виготовлення деталі «вал-шестерня» застосуємо: для макроаналізу (дослідження макроструктури) – візуально чи лупа від 10 до 30 крат; мікроаналіз (дослідження мікроструктури) – мікроскоп МИМ-7; визначення твердості за методом Брінелля і Роквелла.



## РОЗДІЛ 4

### МАРШРУТНА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ДЕТАЛІ «ВАЛ-ШЕСТЕРНЯ»

#### 4.1 Розробка технологічного процесу отримання деталі

Технологічний процес виготовлення деталі – це частина виробничого процесу, пов'язана зі зміною форми, розмірів, шорсткості поверхні і властивостей заготовки з метою отримання готової деталі. Базовою вихідною інформацією служать : робочий креслення деталі; технічні вимоги, які регламентують точність, параметри шорсткості поверхні деталі і інші вимоги до якості. Все це поєднується з характеристиками типів і методів організації виробництва [33].

Розробка процесів виготовлення деталей починається з складання технологічного маршруту, який включає етапи: виробництво заготовки-вилівки , підготовка заготовки до механічній обробці (очищення, обрубка, правка, термічна обробка і т.д.), планування операцій механічної обробки, контроль розмірів і структури і т.д. Розробка технологічного маршруту складається з декількох стадій [33, 34]:

1 - й етап – отримання матеріалу для виготовлення заготовок. Матеріал для виготовлення заготовок деталей машин отримують за технологією, що залежить від його природи. Так, чорні метали отримують у металургійний спосіб, відновлюючи їх із залізних руд.

2 - й етап – виготовлення заготовок. Заготовка – це напівфабрикат, що за формою і розмірами близький до деталі. Заготовка більша від деталі на величину певного шару металу (припуску), щоб після механічної обробки набути потрібної точності та шорсткості поверхні. Способи отримання заготовки: лиття – отримання заготовок шляхом заливання розплавленого металу заданого хімічного складу в ливарну форму, порожнина якої має конфігурацію заготовки, обробка тиском – технологічні процеси, що базуються на пластичній формозмінності металу, зварювання – технологічний процес отримання нерознімних з'єднань із

металів і сплавів унаслідок утворення атомно-молекулярних зв'язків між частинками заготовок, що з'єднуються.

3 – й етап – обробка заготовок. Для обробки заготовок найчастіше застосовують механічну обробку різанням, обробку пластичним деформуванням, електрофізичні та електрохімічні способи обробки, за необхідності – термічну і хіміко-термічну обробку [33, 34].

Блок-схема маршрутної технології отримання вал–шестірні наведена на рисунку 4.1.

## **4.2 Технологія отримання деталі**

У технічних умовах для відповідальних, навантажених деталей, працюючих в умовах знакозмінних навантажень, спеціальних середовищах (вали, диски і лопатки турбін і компресорів, деталі зубчастих з'єднань) вказуються вимоги до якості матеріалів, до механічних, а іноді і до експлуатаційних властивостей. Для подібних деталей доцільно, як правило, застосовувати ковані або штамповані заготовки, які володіють підвищеними механічними властивостями.

Заготовкою для виготовлення вала-шестірні служить кування. Це заготовка, яку отримують куванням для подальшої механічної обробки. Кування є одним з економічних способів отримання заготовок. Куванням досягають дві основні мети: надають заготівці форму, що наближається до форми готового виробу; покращують механічні властивості матеріалу заготовки, внаслідок чого підвищується якість отриманого напівфабрикату або виробу [33, 34].

Кування – вид гарячої обробки металів тиском, при якому метал деформується за допомогою універсального інструменту. Нагріту заготовку укладають на нижній бойок і універсальним інструментом – верхнім бойком послідовно деформують на окремих ділянках заготовки. Метал вільно тече в сторони, не обмежені робочими поверхнями інструменту, в якості якого застосовують вирізні бойки, а також різний підкладний інструмент [33, 34].

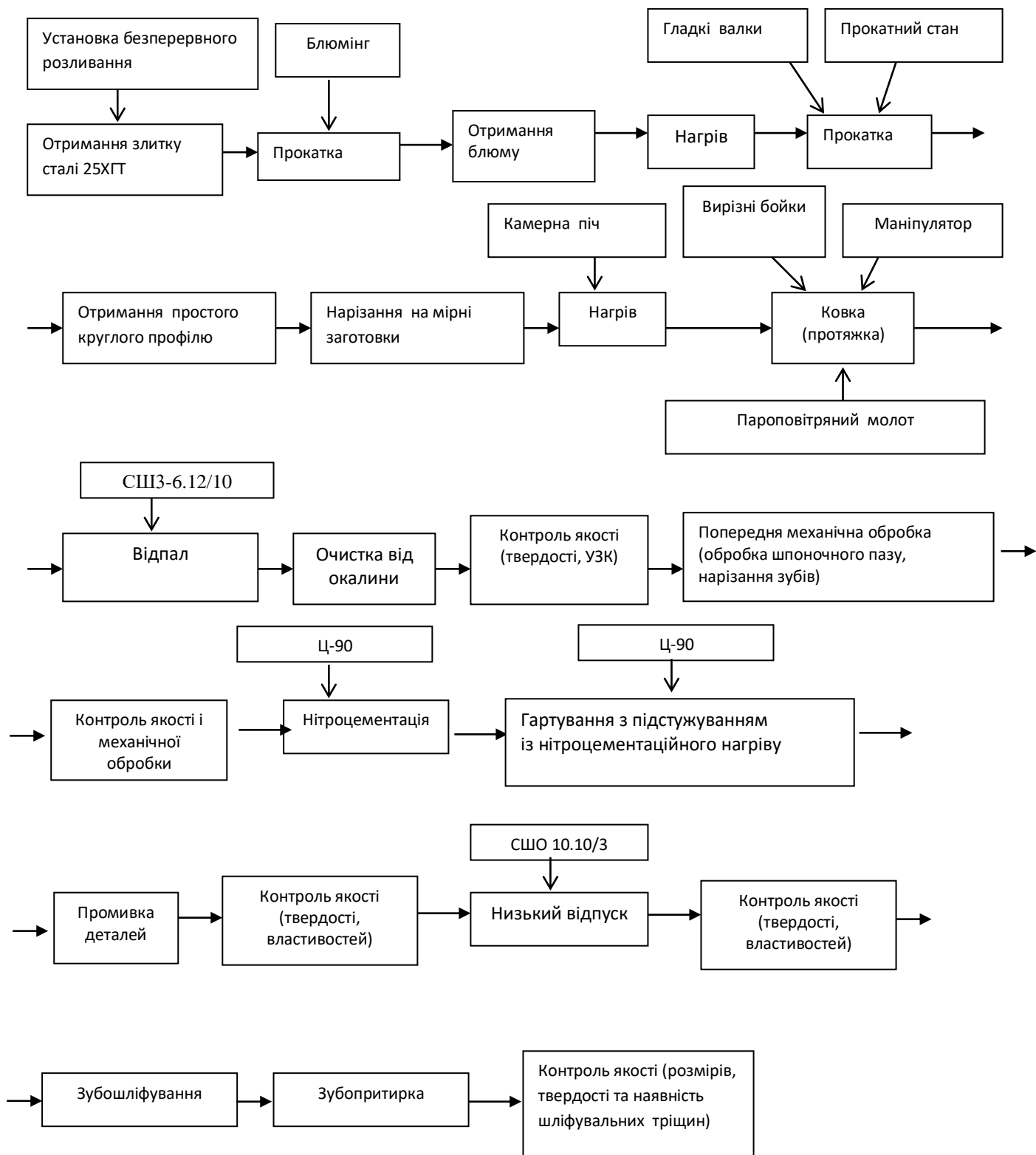


Рисунок 4.1 – Блок-схема маршрутної технології отримання вал–шестірни

Виготовлення деталей типу валів-шестірень починається з обробки торців і свердління центровочних отворів, які використовуються в якості технологічних баз. На перших операціях виготовлення зубчастих передач обробляються ті поверхні, які в подальшому будуть використані в якості технологічних баз.

Маршрут виготовлення валів-шестірень 5-6-й точності закінчується шліфуванням зубів (чорнове і чистове), встановленого на точне оправлення, а маршрут виготовлення валів-шестірень 7-8-го ступенів точності – шевінгуванням профілю зубів до термічної обробки, калібруванням отворів. Зубошліфування застосовують тільки для виправлення зубів при сильному викривленні їх під час термічної обробки [33, 34].

## **Висновки**

Сучасна промисловість має велику кількість способів виготовлення заготовок. Це дозволяє підвищити якість і експлуатаційні характеристики деталей, знизити матеріальні і трудові витрати на їх виготовлення.

При розробці технологічних процесів виробництв базовими вихідними даними є: креслення деталей, вузлів і машин; технічні умови й опис службового призначення деталі. При розробці технологічного процесу розроблюють маршрутну технологію виготовлення деталі.

У технічних умовах для відповідальних, навантажених деталей, працюючих в умовах знакозмінних навантажень, спеціальних середовищах (вали-шестерні, деталі зубчастих з'єднань) вказуються вимоги до якості матеріалів і до механічних, а іноді і до експлуатаційних властивостей.

Для подібних деталей доцільно, як правило, застосовувати ковані або штамповані заготовки, які володіють підвищеними механічними властивостями.

Кування є одним з економічних способів отримання заготовок. Куванням надають заготовці форму, що наближається до форми готового виробу; покращують механічні властивості матеріалу заготовки, внаслідок чого підвищується якість отриманого напівфабрикату або виробу.

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

#### 5.1 Призначення режиму термічної та хіміко–термічної обробки деталі

Для того, щоб вали-шестірні мали високу твердість і зносостійкість поверхневого шару, підвищену контактну витривалість, а також в'язку, м'яку серцевину для того, щоб сприймати (гасити) знакозмінні напруги, які діють на деталі, необхідно проводити таку термічну та хіміко–термічну обробку: нітроцементация + гартування + низький відпуск. Перед процесом нітроцементации, як і перед будь-яким технологічним процесом, важливу і основну роль грає попередня і правильна підготовка. Такою підготовкою є попередня термічна обробка сталей. Справа в тому, що сталь, що надходить на виробництво в стані поставки, не завжди відповідає всім необхідним вимогам. Попередню термічну обробку проводять для виправлення дефектів структури (велике зерно, цементитна сітка, пластинчастий перліт), зниження твердості (після кування, штампування, накатки різьби та ін.) і підготовки до остаточної обробки для підвищення зносостійкості. Режими попередньої термообробки залежать від марки сталі, вмісту вуглецю і наявності або відсутності легуючих елементів. Відпал – фазова перекристалізація, яка полягає в нагріванні вище  $A_{C3}$  з подальшим повільним охолодженням у печі. При нагріванні вище  $A_{C1}$ , але нижче  $A_{C3}$ , повна перекристалізація не відбудеться; така термічна обробка називається неповним відпалом. При відпалі стан сталі наближається до структурно рівноважного; структура сталі після відпалу є перліт + ферит, перліт або перліт + цементит [35, 36].

Для середньолегованих сталей типу 25ХГТ треба віддати перевагу повному відпалу, який дозволяє отримати дрібнозернисту рівноважну перліто-феритну структуру з доброю оброблюваністю.

Температуру нагрівання для деталей, виготовлених з вуглецевих сталей, визначають по діаграмі стану, а для легованих сталей по знаходженню їх критичної точки  $A_{C3}$ , наявної в довідкових таблицях. Час витримки при

температурі відпалу зазвичай складається з часу, необхідного для повного прогріву всієї маси деталей, і часу, потрібного для закінчення структурних перетворень. Після відпалу сталь повільно охолоджують разом з піччю. Деталі, виготовлені з вуглецевої сталі, охолоджують зі швидкістю 180-200 °С за годину, з низьколегованих сталей – зі швидкістю 90-100 °С за годину, з високолегованих – зі швидкістю приблизно 50 °С за годину [36, 37].

Отже, для сталі 25ХГТ рекомендується в якості попередньої термічної обробки проводити відпал. У разі відпалу сталь нагрівають на 30-50 °С вище точки  $A_{c3}$  ( $A_{c3} = 810$  °С) і охолоджують з піччю, структура після такої ТО (рис. 5.1), твердість складала 217-220 НВ.

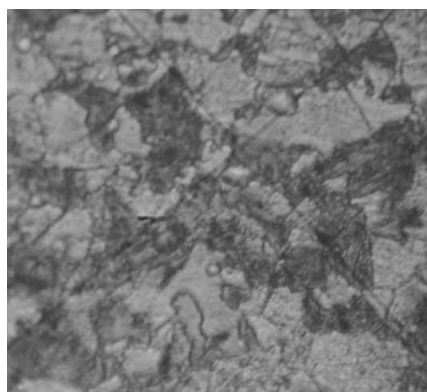


Рисунок 5.1 – Перліт і ферит після повного відпалу сталі 25ХГТ, x500

Далі для деталі «вал-шестерня» була обрана газова нітроцементация при температурі 860-880 °С з використанням рідкого ціанізатора – тріетаноламіна. Час витримки – 6 - 8 годин. Після нітроцементации йде гартування із підстужуванням при температурі 820 - 840 °С. Час витримки – 1,5 - 2,0 години. Далі відбувається охолодження в маслі.

Цей режим сприяє створенню високоякісного шару з великою твердістю. Безпосереднє гартування – процес, при якому відразу після нітроцементации, з цієї ж температури або з попереднім підстужуванням, відбувається гартування у відповідному середовищі, в маслі або воді. Цей спосіб простий і економічно вигідний, він дозволяє найбільш повно використовувати переваги газової нітроцементации [14, 15].

Гартування із підстужуванням має деякі переваги в порівнянні з безпосередньою гартуванням:

- викликає менше викривлення;
- подрібнюється зерно;
- зменшується кількість остаточного аустеніту і так далі.

Після безпосереднього гартування з підстужуванням деталі коробяться менше, ніж при більш складних процесах, викривлення є ще меншим, якщо застосовують режим, в якому температуру знижують від температури нітроцементації до температури в інтервалі між  $A_{C3}$  і  $A_{C1}$  для серцевини, після чого проводять гартування. Його застосовують для вуглецевих сталей і легованих сталей з спадково дрібним зерном (наприклад, 18ХГТ, 25ХГТ, 30ХГГ, 15ХНТА і ін.) [14, 15].

Велике значення має правильний вибір температури підстужування. Надмірне підстужування викликає виділення фериту в серцевині, а недостатнє - підвищує кількість залишкового аустеніту і знижує твердість нітроцементованного шару.

Структура сталі 25ХГТ після нітроцементації й гартування з підстужуванням наведена на рисунку 5.2.

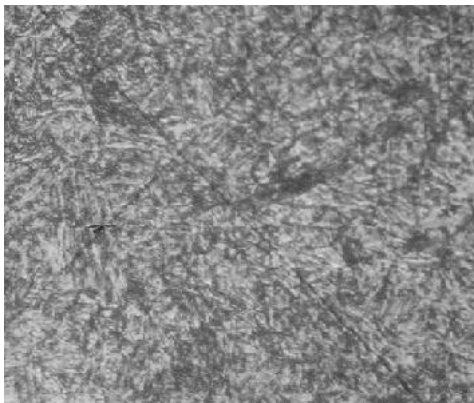


Рисунок 5.2 - Структура сталі 25ХГТ після нітроцементації й гартування з підстужуванням, х500

Нітроцементація - процес насичення поверхні металевих деталей одночасно вуглецем і азотом при 700-950 °С в газовому середовищі. Основне призначення нітроцементації – підвищення твердості, зносостійкості і межі витривалості сталевих деталей. Технологічна схема нітроцементації аналогічна схемі газової

цементациі. Але процес проводиться при більш низьких температурах (800-850 °C). Цементуючий газ розкладається в печі з виділенням атомарного вуглецю, а аміак – з виділенням атомарного азоту. тривалість процесу від 1 до 6 годин. Глибина нітроцементованого шару при цьому становить 0,4 - 0,6 мм. Глибина зміцненого шару залежить від температури і тривалості витримки. Після нітроцементациі деталі піддають гартуванню і низькому відпуску. Нітроцементация високотемпературна проводиться при температурі 830-950°C, для машинобудівних деталей з вуглецевих і низьколегованих сталей при підвищеному вмісті аміаку в газовому середовищі. Завершальною обробкою деталі, що пройшла високотемпературну нітроцементацию, обов'язково є термічна обробка – гартування при температурі нагріву 840-850 °C з охолодженням у воді або маслі, промиванні і низькому відпуску при температурі 150-200 °C. Твердість поверхневого шару досягає 56-62 HRC. Остаточна структура ціанованого шару складається з тонкого шару карбонітридів  $Fe_2(C, N)$ , а потім азотистого мартенситу, підповерхневого шару (в перехідній зоні) з мартенситу і троостита, в серцевині обробленої деталі знаходиться троостит або тростосорбіт [38, 39].

В даний час широкого поширення набули рідинне ціанування і газова нітроцементация. Газова нітроцементация внаслідок своїх переваг витісняє не тільки рідинне ціанування, але і газову цементацию.

Основні переваги газової нітроцементациі перед газовою цементациєю: більш висока зносостійкість шару внаслідок наявності в ньому азоту, велика швидкість процесу насичення шару (при однаковій температурі) через активуючу дію азоту, менша деформація деталей при безпосередньому гартуванню внаслідок більш низької температури процесу, значно менше зростання зерна через меншу тривалість і нижчу температуру процесу, більший термін служби обладнання, обумовлений роботою при більш низькій температурі, меншу сажоутворення, підвищення під дією азоту прогартованості нітроцементацийного шару в порівнянні з цементованим, менші витрати на обробку [38, 39].

Газова нітроцементация, в порівнянні з рідинним ціануванням, також має важливі переваги: усувається необхідність застосування отруйних солей, процес

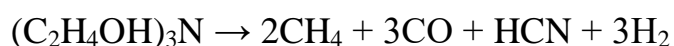


можна застосовувати для більш широкої номенклатури деталей, у тому числі середніх і навіть великих розмірів, насичення шару вуглецем і азотом можна регулювати шляхом зміни швидкості подачі карбюратора, можливість застосування високопродуктивного обладнання безперервної дії, менші витрати на обробку, легше здійснити повну механізацію та автоматизацію процесу [38, 39].

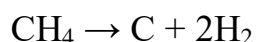
Процес газової нітроцементзації здійснюється в газовому середовищі, що містить активні атоми вуглецю і азоту.

Практичне застосування при нітроцементзації знайшов тільки один рідкий комплексний карбюратор – триетаноламін  $(C_2H_4OH)_3N$ , який відповідає за своєю будовою вимогам, що пред'являються до карбюраторів при насиченні вуглецем і азотом одночасно. Триетаноломін являє собою в'язку прозору рідину жовто–коричневого кольору. Він володіє високою ціануючою активністю. При вводиті його в робочій простір печі виходять одночасно активні атоми вуглецю та азоту. Важлива перевага триетаноломіна в умовах термічної дільниці – вибухобезпечність та нешкідливість [38, 39].

Технічний триетаноламін  $(C_2H_4OH)_3N$  є третинним аміноспиртом з домішкою вторинних і первинних аміноспиртів. Його склад (вага %): N - 9,4, O<sub>2</sub> - 32,4, C - 48,5, H - 10,0. Встановлено, що 1 см<sup>3</sup> триетаноломіну утворює 1,1 л газу без виділення сажі. При нагріванні вище 500 °C відбувається дисоціація триетаноломіну з утворенням метану, ціаністого водню, окису вуглецю і водню [14, 15]:



Метан і ціаністий водень (синильна кислота) розкладаються, утворюючи активний азот і вуглець [14, 15]:



Технологія застосування триетаноломіну досить проста, однак у порівнянні з іншими рідкими карбюраторами має деякі особливості, які виражаються в тому, що ця рідина досить густа і термічно не стійка. При температурі 200-300 °C

триетаноламін не випаровується, але розкладаючись, дає смолоподібні відкладення. Тому при подачі його в піч через звичайну крапельницю патрубков введення закоксується, порушуючи нормальний хід процесу. Щоб уникнути цього, подача здійснюється через крапельницю або насос через трубку, охолоджувану водою [14, 15].

Надлишкова частина вуглецю, що виникає при його розкладанні, зв'язується з киснем в окис вуглецю. Ця обставина вимагає ретельної герметизації робочого простору печі, так як навіть незначні нещільності у вигляді пористості стінок лишаються не закритими [14, 15].

При високотемпературній нітроцементації насичення вуглецем і азотом відбувається в області вище верхньої критичної точки  $A_{c3}$  на відміну від низькотемпературної, коли процес насичення відбувається при температурі нижче точки  $A_{c1}$ . Високотемпературну нітроцементацію застосовують для зміцнення деталей з конструкційних сталей. Перевага нітроцементації в тому, що за рахунок наявності в поверхневих шарах карбідонітридних фаз, зносостійкість їх збільшується в 1,5-2 рази. Після нітроцементації підстужуємо деталь до температури гартування (840-850 °C), після чого охолоджуємо в маслі.

Переваги триетаноламіну: є безсажистим карбюризатором; не токсичний; не горючий; не містить сірки; відносно дешевий; не дефіцитний; не вибухонебезпечний; не виділяє при зберіганні шкідливих парів.

Недоліки триетаноламіну: не можливість контролю вуглецевого і азотного потенціалу утворення газового середовища; триетаноламін слід підігрівати до певної температури, так як його в'язкість змінюється в залежності від температури навколишнього середовища [14, 15, 40].

В якості заключної операції (після закінчення всієї хіміко-термічної обробки) для сталі 25ХГТ проводиться низький відпуск нітроцементованих деталей при температурі 160-180 °C. Час витримки – 2,5-3 години із подальшим охолодженням на повітрі.

Велика структурна неоднорідність після гартування нітроцементованих деталей викликає значні напруги між шаром і серцевиною. Мартенсит,

утворений в шарі при гарту, є тетрагональним і займає обсяг майже на 4 % більше, ніж серцевина. Нестійкий тетрагональний мартенсит з часом або після поступового нагрівання переходить в кубічний, який має однакові властивості з тетрагонами, але менший обсяг (2 %), а тому і менші внутрішні напруги. Зниження напруги в мартенситі зменшує напруження між шаром і серцевиною, а це істотно знижує можливість появи тріщин при зубошліфуванні і зубопритирці [14, 15, 40].

Операція гартування з поверхневим насиченням розвиває в поверхневому шарі залишкові напруги стиску з деяким спадом їх до поверхні, приблизно на глибині 0,7 мм. Відпуск істотно змінює розподіл напружень і доводить залишкові напруги стиснення в поверхні до нульових значень або до напружень розтягу. Тому низький відпуск (160-200 °С) нітроцементованих деталей необхідний завжди як заключна операція термічної обробки.

В результаті низького відпуску сталь зберігає високу твердість; усувається гартівна крихкість. Перетворення мартенситу гартування в мартенсит відпуску сприяє стабілізації розмірів деталі.

Після низького відпуску отримаємо структуру – мартенсит відпуску та карбонітриди (рис. 5.3), а структура серцевини - зерна перліту і фериту.

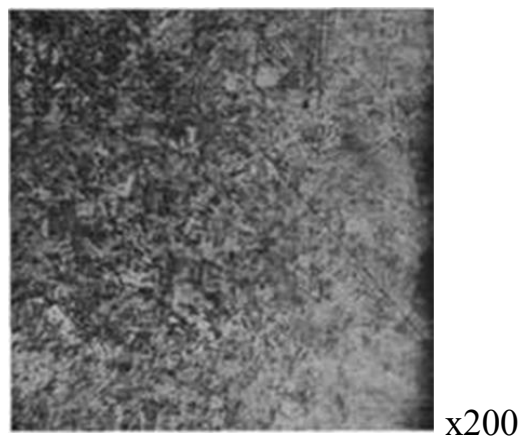


Рисунок 5.3 – Структура остаточно обробленого нітроцементованого зразка зі сталі 25ХГТ

Графік усієї ТО сталі 25ХГТ для деталі вал-шестерня приведено на рисунку 5.4.

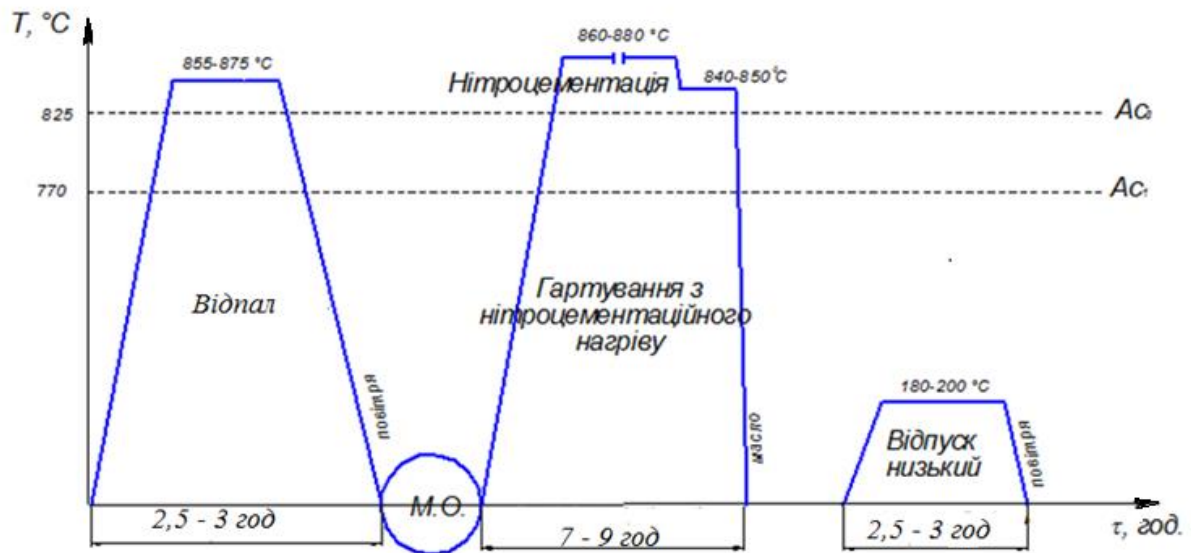


Рисунок 5.4 – Графік режиму термічної та хіміко-термічної обробки деталі вал-шестерня з пропонуваної сталі 25ХГТ

Отже, в результаті такої термічної обробки була отримана наступна структура, після нітроцементациї й гартування з підстужуванням і низького відпуску сталь 25ХГТ придбала наступну структуру: з поверхні представляє собою дрібногольчастий мартенсит з включеннями карбонітрідів і невеликою кількістю залишкового аустеніту. Евтектоїдний підшар має структуру відпущеного мартенситу, а структура серцевини - тростосорбіт. Твердість поверхні складає HRC 58-63, а серцевини – HRC 28-32.

У нітроцементованому шарі нерідко допускається підвищена кількість залишкового аустеніту, який забезпечує хорошу прірабативаемість нешліфований автомобільних шестерень, що забезпечує їх безшумну роботу. У сталі 25ХГТ кількість залишкового аустеніту становить 25-30%, а в сталях 25ХГМ і 25ХГМТ досягає 45-50%. У тих випадках, коли виріб після нітроцементациї проходить шліфування, велика кількість залишкового аустеніту небажана, так як він не тільки знижує механічні властивості, але і сприяє утворенню тріщин при шліфуванні. Після закінчення процесу низького відпуску проводимо остаточну механічну обробку. Після механічної обробки проводимо контроль товщини шару, твердості, механічних властивостей [14, 15].

## 5.2 Вибір основного та допоміжного обладнання

Основне обладнання застосовується для виконання основних технологічних операцій термообробки. До нього належать нагрівальні печі й установки, механізовані агрегати, обладнання для охолодження (гартівні баки і машини, установки для обробки металу холодом тощо). Додаткове обладнання містить устаткування для виправлення й очищення деталей (гідравлічні та механічні правильні преси, травильні установки, мийні машини, дробо- і гідропіскоструминні апарати та ін.). До допоміжного обладнання належать контрольновимірювальна апаратура, пристрої для охолодження гартівних рідин, підйимально-транспортне, санітарно-технічне обладнання, установки для приготування захисних атмосфер тощо [41].

До числа основного обладнання, що забезпечує проведення технологічного процесу термообробки відносяться: СШЗ-6.12/10; Ц-90; СШО-10.10/3.

Для проведення попередньої термічної обробки – відпалу вибираємо шахтну електричну піч типу СШЗ-6.12/10 (рис. 5.5). Характеристики печі наведено в таблиці (5.1) [41].

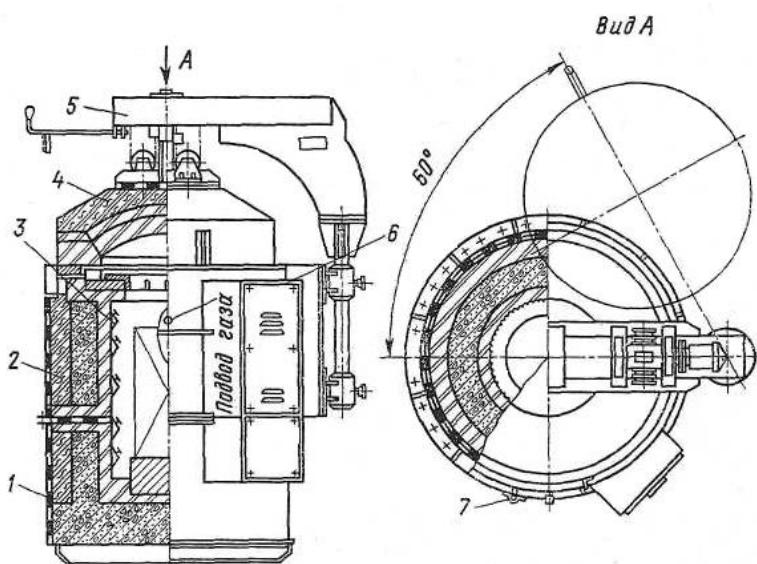


Рисунок 5.5 – Шахтна електрична піч з контрольованою атмосферою СШЗ-6.12/10: 1 - кожух; 2 - футеровка; 3 - нагрівальні елементи; 4 - кришка; 5 - механізм підйому кришки; 6 - підведення електроенергії до нагрівальних елементів; 7 - трубка для відводу газу

Таблиця 5.1

Технічні характеристики шахтної електричної печі типу СШЗ-6.12/10 [41]

Робочі розміри робочого простору	
Діаметр, м	0,6
Висота, м	1,2
Об'єм, м <sup>3</sup>	0,34
Габаритні розміри в печі	
Діаметр, м	1,8
Висота, м	2,7
Номінальна потужність, кВт	85
Максимальна температура, °С	1000
Продуктивність, кг/год	100

Для проведення процесу нітроцементатії деталей в газовому карбюризаторі із застосуванням триетаноламіну використовуємо шахтну муфельну електричну піч серії Ц-90 (рис. 5.6) [41].

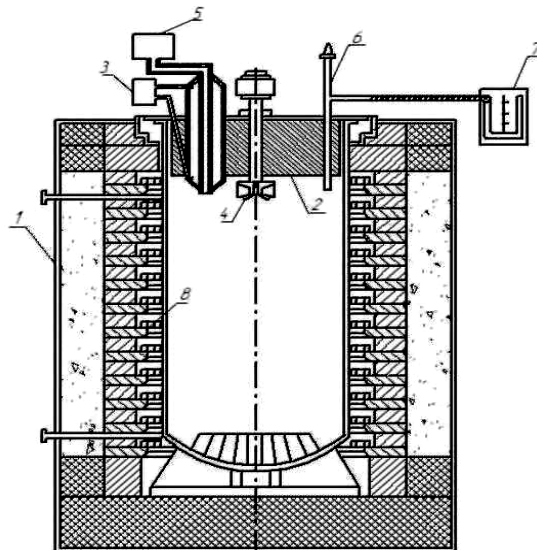


Рисунок 5.6 – Шахтна електрична піч Ц-90 для нітроцементатії [41] : 1 – металевий кожух печі; 2 – кришка люку, 3 – охолоджувана водою трубка для подачі триетаноламіну в піч; 4 – вентилятор; 5 – триетаноламін; 6 – трубка газів, що відходять з факелом; 7 – манометр, 8 – електронагрівачі

Також цю піч використовуємо для гартування з підстужуванням з нітроцементацийного нагріву. Такі печі мають задовільні технологічні характеристики і забезпечують досить рівномірну нітроцементацию виробів по всьому об'єму реторти [41]. Особливістю цих печей є муфель, іноді званий ретортою. Виготовляють його з хромонікелевих сталей X18H25C2, X25H20C2 і інші. Муфель роблять зварним або литим, циліндричної форми з товщиною стінок 16-20 мм. Зварний муфель виготовляють іноді з двох-трьох частин: днища, кільця і горловини, які зварюють спеціальними електродами герметичним швом. У верхній частині муфель має фланець з кільцевим поглибленням, в яке вкладають ущільнювальний пояс у вигляді плетеного азбестового шнура для забезпечення герметичності при закриванні кришки. Як ущільнювальної прокладки можна використовувати сальникове азбесто-дротяне набивання типу АПР [41].

Нагрівання здійснюється за допомогою електронагрівальних елементів опору (дротяних або стрічкових) зі сплавів X20H80 і X15H60. При експлуатації таких печей рекомендується максимальна робоча температура 950 °С. Підвищення температури до 980 °С допустимо, хоча і знижує довговічність нагрівачів [41]. Характеристики печі наведено в таблиці (5.2).

Таблиця 5.2

Технічні характеристики шахтної муфельній печі серії Ц-90 [41]

Робочі розміри муфеля в мм	
Діаметр	600
Глибина	900
Габаритні розміри в печі в мм	
Діаметр	1870
Висота	2700
Номінальна потужність в кВт	90
Максимальна температура, °С	950
Продуктивність, кг/год	30

Шахтна електрична відпускна піч типу СШО-10.10/3. Ця піч призначена для низького відпуску деталей. Піч з окислювальним атмосферою. Працює до температури 350 °С [41]. Характеристики печі наведено в таблиці (5.3).

Таблиця 5.3

Технічні характеристики шахтної електричної відпускної печі типу СШО-10.10/3 [41]

Діаметр робочого простору печі, мм	600
Висота робочого простору печі, мм	1200
Гранична температура, °С	300

Допоміжне обладнання. Робота печей неможлива без цілого комплексу додаткових комплектуючих установок. До числа основних комплектуючих установок, що безпосередньо забезпечують проведення технологічного процесу термообробки, відносяться: мийно-сушильні машини; маслоохолоджуючі установки або гартівні баки; транспортні механізми; прилади для вимірювання твердості. Мийно-сушильні машини представляють собою комплекс, що складається з трьох секцій: промивання, полоскання і сушіння. Секція – конструктивно завершений елемент, обладнаний насосною установкою, мийної системою і розводкою трубопроводів з теплообмінником. Здійснюється подача миючого розчину в зону обробки. Конструкція такої машини складається з герметичного каркаса, ємності для миючого розчину, системи сопел і насосів. У верхній частині каркаса розташований вентилятор і система відсмоктування. Для скорочення втрат миючого розчину на системі відсмоктування змонтований конденсатор. Камера промивання розташована над ємністю для миючого розчину. По боковим стінкам, над і під напрямними для розміщення садки промиваємих деталей розташовані трубопроводи і системи сопел. Подачу миючого розчину виробляємо насосом продуктивністю від 250 до 1000 л/хв під тиском від 2 до 12 атм. Тривалість часу роботи насоса регулюється установленням годинниковим механізмом. Нагрівання розчину в баку проводиться гострою парою або трубчастими нагрівачами, що обігріваються



газом або електроопору. Для контролю за ходом процесу на машинах є термометри і манометри, що реєструють робочий тиск насоса, і реле часу. Секція сушіння деталей представляє собою нагрівальну камеру з організованими спрямованими потоками повітря. Температура нагріву ( $\sim 120$  °C) забезпечується газовими або електричними нагрівачами. Досить висока герметичність забезпечує низьку витрату теплової енергії. Маслоохолоджуючі установки або гартівні баки. Звичайні охолоджувачі при термічній обробці – вода і масло знаходяться в гартівних баках. Для охолодження валів-шестірень використовуємо немеханізовані баки з охолодженням закалочної рідини [41].

До немеханізованих баків відносяться баки, які не мають спеціальних пристроїв для видачі охолоджених деталей на повітря. Ці баки виготовляють за допомогою зварювання прямокутної, квадратної або циліндричної форми з листової маловуглецевої сталі товщиною 4-6 мм. При шахтних гартівних печах встановлюємо циліндричні баки висотою, яка трохи перевищує висоту робочого простору печі. Висота такого бака над рівнем підлоги знаходиться у відповідності з висотою шахтної печі над рівнем підлоги [41].

Транспортні пристрої. Для переміщення і укладання деталей в піч на термічній ділянці встановлюємо монорельс з талью, конвеєр підвісний вантажопідйомністю  $Q = 2$  тонни [41].

## Висновки

Термічна обробка – найпоширеніший в сучасній техніці спосіб зміни властивостей металів і сплавів. Термічною обробкою називають процес обробки виробів з металів і сплавів шляхом теплового впливу з метою зміни їх структури і властивостей в заданому напрямленні. Цей вплив може поєднуватися також з хімічним, деформаційним, магнітним і іншими впливами.

Попередню термічну обробку застосовують для поліпшення оброблюваності металу для виготовлення виробів; підготовка структури металу для остаточної термічної обробки, тобто отримання однорідної дрібнозернистої структури; зняття наклепу, зниження рівня внутрішніх напружень; поліпшення комплексу механічних властивостей. Ми застосовуємо відпал.

Для того, щоб вали-шестірні мали високу твердість і зносостійкість поверхневого шару, підвищену контактну витривалість, а також в'язку, м'яку серцевину, щоб сприймати (гасити) знакозмінні напруги, які діють на деталі, необхідно проводити таку хіміко–термічну обробку: нітроцементация + гартування + низький відпуск.

В результаті такої термічної обробки після нітроцементации й гартування з підстужуванням і низького відпуску сталь 25ХГТ придбала наступну структуру: з поверхні вона представляє собою дрібногольчастий мартенсит з включеннями карбонітридів і невеликою кількістю залишкового аустеніту, евтектоїдний підшар має структуру відпущеного мартенситу, а структура серцевини - тростосорбіт. Твердість поверхні складає HRC 58-63, а серцевини – HRC 28-32.

До обладнання відносяться нагрівальні печі й установки, механізовані агрегати, обладнання для охолодження (гартівні баки і машини, установки для обробки металу холодом тощо).

## ВИСНОВКИ

1. В даній кваліфікаційній бакалаврській роботі було проаналізовано характеристики та умови роботи деталі «вал-шестерня», яка є складовою частиною редуктора зубчастого циліндричного двоступеневого горизонтального типу Ц2-750. Втрата виробом, таким як вал-шестерня, працездатності відбувається з поверхні в результаті зношування, ерозії, сколювання зубів і інших, а це може призвести до відмови роботи машини чи механізму в цілому.

2. При виборі матеріалів для валів-шестерень необхідно забезпечити опір контактної втоми поверхневих шарів зубів, міцність зубів на вигин, опір заїдання і зносу. Основними матеріалами є термічно або хіміко-термічно оброблювані сталі.

3. Деталь «вал-шестерня» за базовим варіантом виготовляється зі сталі 20ХН3А. Через дефіцитності нікелю і його вартість дану сталь було замінено на економнолеговану сталь 25ХГТ – конструкційну, якісну сталь, що містить порядку 0,25% вуглецю і основні легуючі елементи хром, марганець і титан. Сталь 25ХГТ використовується для виготовлення навантажених деталей з твердістю більше 59 HRC – зубчасті колеса, шестерні, вал-шестірні і інші вироби, до яких пред'являються вимоги високої міцності, пластичності, в'язкості серцевини і високої поверхневої твердості.

4. Було розроблено маршрутну технологію отримання деталі. Так як передбачено виготовлення заготовки куванням, і вона має припуски на механічну обробку, то для поліпшення оброблюваності різанням передбачена попередня термічна обробка – відпал.

5. В залежності від умов роботи вал-шестірні, покращення властивостей матеріалу досягається хіміко-термічною обробкою, частіше цементациєю або нітроцементациєю з послідуочим гартуванням та низьким відпуском, рідше азотуванням. Нітроцементациєю називається процес насичення поверхневих шарів вуглецем і азотом з наступним гартуванням, який забезпечує їм високу міцність, зносостійкість і опір заїданню.

6. Після нітроцементації й гартування з підстужуванням і низького відпуску сталь 25ХГТ придбала наступну структуру: з поверхні вона представляє собою дрібногольчастий мартенсит з включеннями карбонітридів і невеликою кількістю залішкового аустеніту, евтектоїдний підшар має структуру відпущеного мартенситу, а структура серцевини – тростосорбіт. Твердість поверхні складає HRC 58-63, а серцевини – HRC 28-32.

7. Було вибрано основне та допоміжне обладнання для проведення термічної та хіміко-термічної обробки деталі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин: учебное пособие. 5-е издание, доп. Москва: Машиностроение, 2006. 560 с.
2. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х томах. 9-е изд., перераб. и доп. / Под ред. И.Н. Жестковой. Москва : Машиностроение, 2006. Т2. 968 с.: ил.
3. Говорун Т.П., Сметанін Р.С., Сітало С.О., Коваленко Н.Г. Прогресивні методи поверхневого зміцнення валів-шестерен. *Системи розроблення та поставлення продукції на виробництво* : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції, м. Суми, 17-20 травня 2016 р. Ред.кол.: О.Г. Гусак, К.О. Дядюра. - Суми : СумДУ, 2016. С. 208-211.
4. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин: учебное пособие для студентов тех. спец. вузов. 8-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательский центр «Академия», 2004. – 496 с.
5. Пчелинцев В.А. Повреждаемость основных деталей машин: учебно-метод. пос. Сумы : СумГУ, 2008. 137 с.
6. Скойбеда А.Т., Кузьмин А.В., Макейчик Н.Н. Детали машин и основы конструирования : 2-е изд., перераб. / под общ.ред. Скойбеда А.Т. Москва : Высшая школа, 2006. 560 с.: ил.
7. Руденко Л. Ф., Говорун Т.П. Леговані сталі та сплави: навч. посібн. Суми: СумДУ, 2007. 180 с.
8. Карнаух С. Г., Таровик М. Г. Деталі машин : курс лекцій для студентів технічних спеціальностей. Краматорськ : ДДМА, 2017. 261 с.
9. Шейблинт А.Е. Курсовое проектирование деталей машин.М.: Высш. шк., 1991. 432 с.
10. Иванов М. Н. Детали машин: учебник / Под ред. В.А. Финогенова. 6-е изд., перераб. Москва : Высшая шк., 2004. 383 с.

11. Дунаев, П. Ф., Леликов О. П. Детали машин. Курсовое проектирование : учебное пособие для машиностроительных специальностей. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Машиностроение, 2002. 536 с.
12. Сталь для пари зубчастих коліс: пат. № 2333406; подача заявки: 2006-09-14, публікація патента: 10.09.2008.
13. Хільчевський В.В., Кондратюк С.Є., Степаненко В.О., Лопатько К.Г. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: навчальний посібник. Київ: Либідь, 2002. 328 с.
14. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов: учебное пособие для вузов. Москва: Металлургия, 1985. 256 с.
15. Петрова Л.Г. Прикладное применение химико-термической обработки для разработки процессов поверхностного упрочнения. *Вестник ХНАДУ*. 2010. Вып. 51. С. 26-34.
16. Анохин А.А. Некоторые прогрессивные технологии восстановления качества поверхности деталей. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков. 2003. № 5. С. 10-16.
17. Гадалов В. Н., Петренко В. Р., Скрипкина Ю. В., Розина Т. Н., Бобрышев Р. В., Болдырев Ю. В. Повышение работоспособности плунжерных пар из стали 17...20)ХГТ комбинированной нитроцементацией. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2012. № 8. С. 43-44.
18. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Starikov N.E., Provotorov D.A., Sergeyev N.N., Khonelidze D.M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 126-129.
19. Гадалов В.Н., Макарова И.А., Ляхов А.В., Ляхов В.И., Стародубцев В.В., Минаев И.В., Гвоздев А.Е., Кутепов С.Н., Калинин А.А. Перспективные процессы химико-термической обработки конструкционных сталей. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2018. Вып. 12 . С. 567-575.

20. Малькова Н.Ю. Недостатки процессов и перспективные способы химико-термической обработки. *Успехи современного естествознания*. 2007. № 12-1. С. 124-124.

21. Серода Б.П., Калініна Н. Є., Кругляк І. В. Поверхнєве зміцнення матеріалів: монографія. Запоріжжя : Видавництво ЗДІА, 2004. 230 с.

22. Коробка, О.О. Вибір матеріалу, маршрутної технології виготовлення заготовки і термічної обробки деталі «вал-шестерня редуктора»: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра; спец.: 6.050403 - інженерне матеріалознавство. О.О. Коробки; наук. керівник Т.П. Говорун - Суми: СумДУ, 2018. 71 с.

23. Колина Т.П., Тарасов А.Н., Брюханов В.В. Влияние состава, структуры и состояния поверхности на структуру и свойства диффузионных слоев при высокотемпературной нитроцементации сталей в активированных древесноугольных смесях. *Вестник ОГУ*. 2010. №10 (116). С. 148 - 152.

24. Склад для нитроцементації виробів з легованих сталей : пат. № RU 2314363 С1, клас (и) патенту: С23С8 / 76, номер заявки: 2006126472/02, дата подачі заявки: 20.07.2006, дата публікації: 20.07.2006.

25. Способ нитроцементации металов в пастах: пат. № 2254396, кл. С23С8/76, 2005, 2003128356/02, дата подачі заявки: 19.09.2003, дата публікації: 20.06.2005.

26. Костин Н. А., Трусова Е. В. Втомна міцність покращуваної сталі 30ХГТ після високо- і низькотемпературної нитроцементації». *Електронний научний журнал Курського державного університета*. 2016. № 4 (12).

27. Способ нитроцементации деталей из конструкционных и инструментальных сталей : пат. № 2592339: С1, заявл. 2015-03-06, опуб. 20.07.2016. Бюл. №20. 2016.

28. Кирик В.Г., Жарков П.Е., Тарельник В.Б., Коноплянченко Е.В., Волошин И.Е. Новый способ нитроцементации стальных деталей. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2017. №3 (49). С. 34 – 37.

29. Сорокин В.Г., Волосникова А.В, Вяткин С.А. Марочник сталей и сплавов / Под общей редакцией В.Г. Сорокина. Москва: Машиностроение. 1989. 640 с.

30. Лабораторний практикум з курсу «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство». Частина 2 «Матеріалознавство» / укладачі Т.П. Говорун, О.П. Гапонова, В.М. Раб, Н.А. Харченко. Суми: Сумський державний університет, 2011. 86 с.

31. Литовченко С.В., Доценко Е.А., Кочетова С.Ю. Приготовление образцов для металлографического исследования микроструктуры: Методические материалы. Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 2011. 14 с.

32. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із дисципліни «Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів» : у 2 частинах. Ч. 1. Випробування металів. Укладачі: А.І. Дегула, Т.П. Говорун. Суми : Сумський державний університет, 2015. 53 с.

33. Марченко С. В., Гапонова, О. П., Говорун Т. П. , Харченко Н. А. Технологія конструкційних матеріалів : навч. посіб. Суми : СумДУ, 2016. 146 с.

34. Марченко С. В., Будник А. Ф., Юскаєв В. Б. Основи виробництва матеріалів та формоутворення об'єктів технологій : навч. посіб. Суми : Сумський державний університет, 2013. 232 с.

35. Левин Е. А., Юршева Н. В. Влияние предварительной термической обработки на структуру низкоуглеродистых и легированных сталей перед цементацией : *Материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов-молодых ученых*. Екатеринбург, 21-23 ноября 2017. Екатеринбург : УрФУ, 2017. С. 2-6.

36. Мохорт А.В., Чумак М.Г. Термічна обробка металів : навч. посіб. Київ: Либідь, 2002. 512 с.

37. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Металлургия, 1986. 480 с.



38. Летова О. В., Летов С. С., Пивовар Н. А. Особенности насыщения стали азотом и углеродом при химико-термической обработке. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Сер. : Механізація та автоматизація виробничих процесів.* 2012. Вип. 6. С. 42-45.

39. Белевитин, В.А. Суворов А.В., Упрочнение и восстановление деталей машин : справочное пособие. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2015. 263 с.: ил.

40. Елагина О.Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин Учебное пособие. Университетская книга. Логос, 2009. 485 с.

41. Будник А. Ф. Типове обладнання термічних цехів та діляниць : навч. посіб. Суми: СумДУ, 2008. 212 с.