

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

(повне найменування факультету)

Композиційні матеріали, хімії та технологій
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЦЕМЕНТАЦІЇ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ
ДЕТАЛІ «ЗУБЧАСТЕ КОЛЕСО»
(назва теми)

Виконав: студент 2 курсу, групи БАД-212м

Спеціальності 132 Матеріалознавство
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма

Композиційні та порошкові матеріали, покриття

Кодинцева Ю.В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник Савченко В.О.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент Капустян О.Є.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

2023 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Будівництва, архітектури та дизайну
Кафедра Композиційних матеріалів, хімії та технологій
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність 132 Матеріалознавство
Освітня програма (спеціалізація) Композиційні та порошкові матеріали, покриття

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КМХТ Олександр МІТЯЄВ

Мітяєв
« 17 » травня 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

КОДИНЦЕВ Юрій Володимирович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1.Тема проекту (роботи) Дослідження впливу цементації на довговічність деталі «Зубчасте колесо».

Керівник проекту (роботи) Савченко Віра Олександрівна,
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

Затверджені наказом закладу вищої освіти від «17» 10 2023 року № 391

2.Строк подання студентом проекту(роботи)

3.Вихідні дані до проекту (роботи) технічне завдання

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Літературний огляд. 2. Опис деталі та методів дослідження. 3. Оптимізація довговічності деталі

5.Перелік графічного матеріалу (зточним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

| Розділ | ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|----------------|---|-------------------|---------------------------|
| | | завдання видав | прийняв виконане завдання |
| 1 | Савченко В.О | <i>С.Савченко</i> | <i>С.Савченко</i> |
| 2 | Савченко В.О | <i>С.Савченко</i> | <i>С.Савченко</i> |
| 3 | Савченко В.О | <i>С.Савченко</i> | <i>С.Савченко</i> |
| Нормо-контроль | Савченко В.О | <i>С.Савченко</i> | <i>С.Савченко</i> |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання « _ » _____ 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проекту (роботи) | Строк виконання етапів проекту (роботи) | Примітка |
|-------|--|---|-------------------|
| 1 | Літературний огляд | 01.11.2023 | <i>С.Савченко</i> |
| 2 | Підбір матеріалів та методик дослідження | 01.11.2023 | <i>С.Савченко</i> |
| 3 | Проведення експериментальних досліджень | 01.12.2023 | <i>С.Савченко</i> |
| 4 | Оформлення пояснювальної записки | 20.12.2023 | <i>С.Савченко</i> |
| 5 | Оформлення презентації роботи | 22.01.2024 | <i>С.Савченко</i> |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Студент(ка)

Ю.Кодинцев
(підпис)

Юрій КОДИНЦЕВ
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проекту (роботи)

В.Савченко
(підпис)

Віра САВЧЕНКО
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи магістра «Дослідження впливу цементації на довговічність деталі «Зубчасте колесо»»: 45 сторінок, 18 рисунків, 4 таблиці, 1 додаток, 16 джерел.

Предметом дослідження є технологічні процеси, які впливають на довговічність деталей після цементації.

Мета роботи – технологічний процес оброблення заготовки після цементації для підвищення довговічності зубчастого колеса.

Пояснювальна записка містить усі необхідні етапи дослідження структури та властивостей деталі зубчасте колесо для підвищення її довговічності після цементації.

В результаті роботи запропоновано технологічний процес хіміко-термічної та термоциклічної обробки деталі, які призвели до значного зменшення тривалості за часом обробки та підвищення показників довговічності.

ЦЕМЕНТАЦІЯ, ЗУБЧАСТЕ КОЛЕСО, ДОВГОВІЧНІСТЬ, СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ, ТЕРМОЦИКЛІЧНА ОБРОБКА.

ABSTRACT

Explanatory note to the master's diploma qualification work "Investigation of the effect of cementation on the durability of the "Gear wheel" part": 45 pages, 18 figures, 4 tables, 1 appendix, 16 sources.

The subject of research is technological processes that affect the durability of parts after cementation.

The purpose of the work is the technological process of processing the workpiece after cementation to increase the durability of the gear wheel.

The explanatory note contains all the necessary stages of studying the structure and properties of the gear part to increase its durability after cementation.

As a result of the work, a technological process of chemical-thermal and thermocyclic processing of the part was proposed, which led to a significant reduction in the duration of processing time and an increase in durability indicators.

**CEMENTATION, GEAR, DURABILITY, STRUCTURE, PROPERTIES,
THERMOCYCLIC TREATMENT.**

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Вступ..... | 8 |
| Розділ 1 Літературний огляд | 10 |
| 1.1 Види дефектів деталей типу зубчастого колеса..... | 11 |
| 1.1.1 Втомне руйнування | 13 |
| 1.1.2 Зношування зубів | 15 |
| 1.1.3 Заїдання зубів..... | 15 |
| 1.1.4 Поломка зуба..... | 16 |
| 1.2 Вплив хімічного складу на властивості деталей. | 17 |
| 1.2 Вплив термічного оброблення на властивості деталей..... | 19 |
| 1.3 Вплив хіміко-термічного оброблення на властивості деталей | 20 |
| 1.4 Цілі роботи..... | 22 |
| Розділ 2 Опис деталі та методів дослідження | 24 |
| 2.1 Завдання на розробку. | 24 |
| 2.2 Дослідження структури..... | 25 |
| 2.3 Дослідження властивостей | 25 |
| 2.4 Хімічний склад сталі, що досліджувалася | 26 |
| 2.5 Режими хіміко-термічного та термічного оброблення..... | 26 |
| Розділ 3 Оптимізація довговічності деталі..... | 28 |
| 3.1 Оптимізація матеріалу зубчастого колеса | 28 |
| 3.2 Оптимізація режимів зміцнення поверхневого шару деталі..... | 29 |
| 3.3 Розрахунок показників довговічності деталі..... | 35 |
| Висновки | 40 |
| Перелік джерел посилань | 41 |
| Додаток А..... | 43 |

ВСТУП

Підвищення терміну експлуатації зубчастих коліс є однією з основних завдань матеріалознавства на сьогодні. Довговічність таких деталей напряду залежать від вибору матеріалу, з якого їх виготовляють, а також від вибору режимів та видів термічного оброблення. Тривалість термічного оброблення це питання енергоефективності та енергозбереження в Україні і воно є досить актуальним та доцільним.

Зубчасте колесо – це основна деталь зубчастої передачі, які за допомогою зубчастого зачеплення передає або перетворює рух.

Терміни експлуатації таких деталей значною мірою залежать від довговічності деталей, які працюють в умовах тертя, адже найбільша кількість виходу з ладу (близько 80%) деталей машин може бути спричинено саме наявністю поверхневого руйнування, 30...40 % деталей знімаються з експлуатації через недостатньою міцністю поверхні, а отже і низьку зносостійкістю. Аналіз пошкоджень вузлів тертя в процесі експлуатації показує, що 60...70 % контактних пошкоджень та значна ступінь зношування окремих деталей спричинені саме недосконалістю технологічної підготовки робочих поверхонь деталі. Підвищення довговічності деталей за рахунок зниження показників зношування матеріалу є однією з основних задач.

Для виготовлення зубчастих коліс найчастіше використовуються чавуни та сталі, для яких розроблено режими термічного або хіміко-термічного оброблення, але в умовах сьогодення є необхідність покращувати ці режими з метою зменшення їх тривалості, використання нових методів та технологій для задоволення потреб в умовах жорстко режиму енергозбереження.

Саме тому розробка технології цементації деталі зубчате колесо, яка матиме досить високі показники довговічності та задовільнить виробників за енергозбереженням і збереже необхідні показники механічних властивостей є досить актуальною і на часі.

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Підвищення терміну експлуатації зубчастих коліс є однією з основних завдань матеріалознавства на сьогодні. Довговічність таких деталей напряму залежать від вибору матеріалу, з якого їх виготовляють, а також від вибору режимів та видів термічного оброблення. Тривалість термічного оброблення це питання енергоефективності та енергозбереження в Україні і воно є досить актуальним та доцільним.

Зубчасте колесо – це основна деталь зубчастої передачі, які за допомогою зубчастого зачеплення передає або перетворює рух. У машинобудуванні прийнято менше зубчасте колесо називати шестернею, а більше – колесом [1].

Терміни експлуатації таких деталей значною мірою залежать від довговічності деталей, які працюють в умовах тертя, адже найбільша кількість виходу з ладу (близько 80%) деталей машин може бути спричинено саме наявністю поверхневого руйнування, 30...40 % деталей знімаються з експлуатації через недостатньою міцністю поверхні, а отже і низьку зносостійкістю. Аналіз пошкоджень вузлів тертя в процесі експлуатації показує, що 60...70 % контактних пошкоджень та значна ступінь зношування окремих деталей спричинені саме недосконалістю технологічної підготовки робочих поверхонь деталі. Підвищення довговічності деталей за рахунок зниження показників зношування матеріалу є однією з основних задач [2].

У роботі І.А. Гуменюка [3] показано, що процеси деформування та зношування поверхневих шарів контактуючих твердих тіл деталей можна розглядати як самоузгодженими на мікро- та макромасштабних рівнях, на які впливає хімічний склад матеріалу деталей.

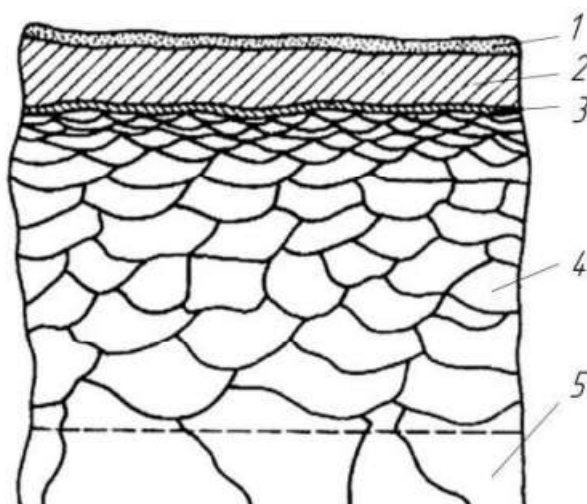
При цьому основну увагу приділяється саме описанню деформації поверхневого шару матеріалу та утворення нових часточок зносу дискретних розмірів, які утворюються в є результаті формування на поверхні деталі фрагментів структури, які й можуть призвести до утворення локальних мікротріщин та несучільної поверхні, що може завершитися відділенням на поверхні матеріалу часток зносу [3].

Також, одним із широко поширених способів підвищення зносостійкості деталей є методика підвищення твердості поверхні деталі за рахунок хіміко-термічної обробки (ХТО), яка може включати в себе операції хімічного та термічного оброблення готової деталі для змінення структури та властивостей поверхневого шару, за рахунок насичення поверхні деталі такими елементами як С, N, Al, Cr, Si з оточуючого середовища [4].

Для визначення критерію довговічності готової деталі найчастіше вивчають параметри, які можуть на неї впливати. За літературними даними на показники цього критерію досить значно впливають якість поверхневого шару готової деталі, тобто наявність на ній мікротріщин, короблення та інших дефектів, а також мікроструктура та, відповідно, хімічний склад матеріалу деталі.

1.1 Види дефектів деталей типу зубчастого колеса.

У деталей відповідального призначення поверхневий шар за своєю структурою, фазовим та хімічним складом може відрізнитися від основного матеріалу деталі та мати наступні основні зони, які представлено на рис. 1.1.



- 1 – зона молекул і атомів органічних і неорганічних речовин, які адсорбовані із навколишнього середовища (товщина – 1 ... 0,001 мкм);
- 2 – зона, оксидів які утворюються в результаті хімічної взаємодії металу з навколишнім середовищем (товщина – 10 ... 1 мкм);
- 3 – зона із товщиною в декілька міжатомних відстаней, яка має іншу кристалічну та електронну структуру;
- 4 – зона зі зміненими металом;
- 5 – основний метал.

Рисунок 1.1 - Схема поверхневого шару деталі [5].

Товщина даних зон поверхневого шару, в залежності від хімічного складу матеріалу, методу термічного обробки та умов експлуатації може змінюватися. Оцінюють даний стан за допомогою методів хімічного, фізичного та механічного аналізу. Різноманітність параметрів стану поверхневого складу й методів їх оцінки не дозволяє виділити єдиний параметр, який визначає якість поверхневого шару. Тому в науковій та інженерній практиці стан поверхневого шару оцінюють набором одиничних або комплексних параметрів.

До параметрів, які характеризують якість поверхневого шару, відносяться: наявність дефектів на поверхні деталі, хімічний склад, структура металу та механічні властивості.

Основними видами руйнувань поверхневого шару деталі, які можуть впливати на якість деталі та його властивості відносяться: втомне руйнування, зношування зубів, заїдання зубів, поломка зубів.

1.1.1 Втомне руйнування

Втомного руйнування зазнають деталі, які піддаються тривалій дії змінних за напрямком навантажень. Найчастіше, в такому випадку, тріщини розвиваються на поверхні деталі, а потім переходять у глибину шару.

Дрібні тріщини, що розвиваються по довжині, утворюють собою сітку на певних ділянках поверхневого шару деталі. З часом відбувається розкриття тріщини, а на наступному етапі прикладання навантаження тріщина може змінити свій напрямок, та продовжити поширення по стику між антифрикційним шаром і основою деталі, у результаті чого відбувається відокремлення окремої ділянки від решти поверхневого шару з подальшим викришуванням. Також на швидкість цього процесу може впливати мастильний матеріал, який, проникає в тріщину, ніби «підриває» метал над нею. Часом тріщина може не доходити до стику і тоді вона просувається на невеликій відстані від нього та паралельно йому. Викришування значних шматків шару може супроводжуватися утворенням на поверхні вибоїн.

Втомне руйнування можна поділити на чотири основні стадії [5]:

1. Інкубаційна. Цей процес супроводжується початком розвитку смуги ковзання в деяких зернах, після незначної кількості циклів навантаження, а в

локальних об'ємах, в цей же час, розпочинають накопичуватися викривлення кристалічних ґраток, що може призводити до підвищення мікротвердості поверхні.

2. Розпушення. В деяких зернах, які розташовані в зоні найбільш напружених об'ємів, у результаті зсувів утворюються широкі смуги ковзання починають зароджуватися мікропори та субмікроскупчення тріщин, які можуть розвиватися до мікроскопічних.

3. Поширення. Це процес ковзання за межами зерен та зростання мікротріщин, яке відбувається в результаті концентрації напружень до критичного розміру з утворенням макротріщин.

4. Остаточне руйнування. Цей процес відбувається у зразках малого розміру або виготовлених із крихких матеріалів в результаті довільного поширення макротріщин (рис. 1.2).

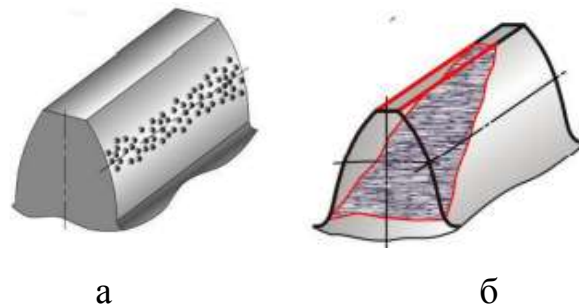


Рисунок 1.2 – Втомне викришування (а) та руйнування (б) зубів.

Втомне спрацьовування залежить від режиму експлуатації деталі, її конструкції, а також від властивостей матеріалу [5].

Заходи запобігання:

- необхідно обмежити число контактних напружень за допомогою розрахунків розмірів передач;
- провести операції підвищення твердості поверхонь зубів;

- застосувати методи підвищення точності виготовлення зубчастих коліс та монтажу.

1.1.2 Зношування зубів

В місцях контакту двох зубів спостерігається відносно ковзання, яке супроводжується стиранням бічних поверхонь зубів (рис. 1.3).

Заходи запобігання:

- збільшення твердості активних поверхонь;
- надійний захист від забруднення;
- використання мастил із відповідними властивостями

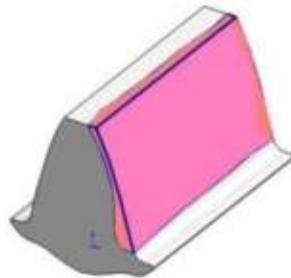


Рисунок 1.3 – Зношування зубів.

1.1.3 Заїдання зубів

Заїдання зубів зустрічається найчастіше у деталях, які піддаються високим навантаженням та працюють при високих швидкостях передач. При цьому у зоні контакту зубів відбувається значне підвищення температури, що призводить до розриву масляної плівки та відбувається безпосередній контакт металевих

зубів. Після чого з'являється зчеплення частинок металу та відбувається процес відриву їх від поверхні з меншою міцністю. Ці нерівності призводять до здирання робочих поверхонь зубів у напрямку ковзання (рис. 1.4).

Заходи запобігання:

- азотування, ціанування зубів;
- застосування мастильних речовин, що витримують високі температури;
- використання зубів із модифікацією профілю;
- охолодження мастила.

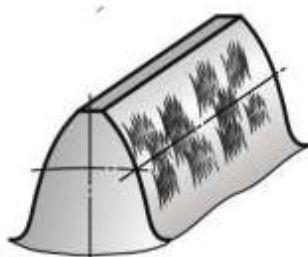


Рисунок 1.4 – Заїдання зубів.

1.1.4 Поломка зуба

Одним із найнебезпечніших процесів експлуатації зубчастих передач є поломка зубів. Довготривалі змінні напруження, що діють на зубці, спричиняють значну деформацію профілю зуба, що призводить до утворення мікротріщин у зоні переходу зубів у обід колеса. Потім відбувається процес розповсюдження цих тріщин в глибину зуба. Поломка зубів найчастіше зустрічається у чавунних та сталевих колесах дуже високу твердість зуба та низьку в'язкість серцевини. Для косозубих зубів така тріщина може виникати біля торцевої поверхні колеса в основі зубця і поширюватися похило до його вершини.

Заходи запобігання:

- збільшення модуля зубів;
- використання корегування;
- зміцнення поверхні зубів у зоні концентрації напружень;
- підвищення точності виготовлення та монтажу;
- захист передачі від перевантажень.

Зубчасті колеса, які виготовляють із матеріалів, що мають твердість більш 45 HRC спочатку нарізають, а потім піддають термообробленню. Кінцеві операції оброблення зубів виконують після термооброблення тому, що зубчасті передачі з твердими робочими поверхнями зубів погано проходять операції припрацювання.

1.2 Вплив хімічного складу на властивості деталей.

Для виготовлення зубчастих коліс найчастіше використовуються чавуни та сталі. Чавуни мають добру стійкість до заїдання у передачі та можуть працювати без змащувальних речовин, але використовуються такі деталі лише для передач з малими швидкостями обертання. Найчастіше використовують сірі чавуни марок СЧ25...СЧ45 та високоміцні чавуни [1]. Недоліком чавунних зубчастих коліс є те, що вони можуть використовуватися лише для виготовлення тихохідних, великогабаритних і відкритих передач, а також мають знижену міцність на згин, тому з них виготовляють великогабаритні колеса.

Сталеві зубчасті колеса можна виготовляти із вуглецевих та легованих сталей та різноманітного розмірного ряду. Від габаритів деталі залежить тип марки сталі яку необхідно для нього обирати, так як чим менше зубчасте колесо тим вищою повинна бути твердість робочої поверхні зубів. Від марки сталі

залежить різноманіття режимів термічної обробки, яку можна застосувати для покращення експлуатаційних властивостей зубчастого колеса. Наприклад, для середньо вуглецевих марок сталей, з низьким вмістом легувальних елементів, можна застосовувати декілька різноманітних видів термічного чи хіміко-термічного оброблення [1], наприклад, для великих за розмірами коліс використовують сталі 35Л...55Л, які проходять процес нормалізації. Основний ряд таких сталей та основні їх властивості наведено у Додатку А.

Проте, при виборі матеріалу зубчастого колеса необхідно враховувати, що значення твердості робочих поверхонь зубів, так як для досягнення більш високого числа твердості необхідно використовувати більш складну технологію виготовлення зубчастих коліс і малі розміри передачі, що може призвести до труднощів при конструктивній розробці вузла.

В роботі Пилипенко О.І [6] досліджувалися типи руйнувань зубчастого колеса зі сталі 12Х2Н4ВА які мали границю міцності і текучості матеріалу 1000 і 80 МПа відповідно при відносному звуженні 50...55% та відбувалася цементація на глибину 0,8...1,5 мм, при цьому твердість основного матеріалу не перевищувала 60 HRC одиниць.

А в роботі О.Є. Семеновського [7] показано, що від хімічного складу матеріалу зубчастого колеса також залежить і величина внутрішніх напружень після термічного оброблення (рис. 1.5). Автор стверджує, що комплексно-легована сталь має більш різке зниження рівня напружень, по мірі віддалення від поверхні, у порівнянні із серійною сталлю 12ХНЗА.

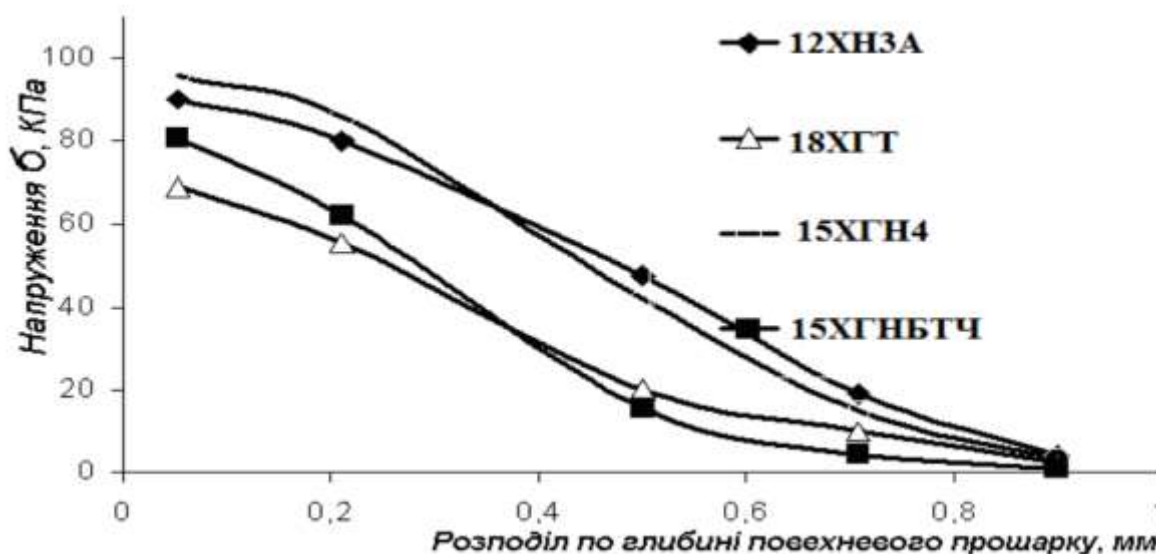


Рисунок 1.5 - Розподіл залишкових внутрішніх напружень у зміцненому шарі.

Вміст хрому, в сталях для зубчастих передач, забезпечує необхідні показники твердості, а додавання незначної кількості молібдену забезпечує однорідність твердості, ударну в'язкість, зносостійкість та високу міцність. У ході проведених досліджень було також встановлено, що кількість внутрішніх напружень напряму впливає на рівень жолоблення сталі в процесі подальшої ХТО та напряму залежить від хімічного складу та вихідної аустенітної структури матеріалу, що можна регулювати наявністю легувальних елементів у складі сталі. [7].

1.2 Вплив термічного оброблення на властивості деталей

Термічне оброблення застосовується для підвищення твердості поверхневого шару матеріалу зубів, адже відомо, що з підвищенням твердості

зростає і несуча здатність зубчастої передачі за контактною міцністю. Тому найчастіше використовують різноманітні види гартування [8]. Основними видами термічного оброблення для зубчастих коліс є:

- об'ємне гартування це найбільш простий спосіб термічного оброблення зубчастих коліс. До недоліків слід віднести високе значення товщини шару, яке піддається гартуванню, що зменшує опір втоми матеріалу при вигині зубів.

- поверхневе гартування це процес, який забезпечує отримання високої твердості поверхні зубів (HRC 45...53) при в'язкій серцевині. Нагрівання коліс при поверхневому гартуванню відбувається в індукторах струмами високої частоти (СВЧ) [8].

Для низьколегованих та вуглецевих сталей, для покращення властивостей піддають нормалізації та поліпшенню, що призводить до підвищення твердості поверхні до 300 ... 320 НВ [8].

1.3 Вплив хіміко-термічного оброблення на властивості деталей

Одним з напрямків підвищення зносостійкості деталей є створення на їх поверхнях шарів хімічних сполук, властивості яких відрізняються від властивостей основних металів. До таких методів слід віднести: цементацію, азотування, борування, хромування, металізацію і ряд інших, які в основному знаходять широке застосування при виготовленні деталей [9].

Цементація це технологічний процес насичення поверхневого шару зубчастої передачі вуглецем при температурі 900⁰С з подальшим гартуванням

деталі для забезпечення високої твердості поверхні зубів при наявності в'язкої серцевини. Для процесу цементації найчастіше використовують леговані сталі з низьким вмістом вуглецю: 20X, 12XН3А, 20XНМ, 15XФ тощо [8]. Після цементації із наступним гартуванням поверхневий шар зуба має твердість HRC 56...63.

Азотування це технологічний процес насичення поверхневого шару зубчастої передачі азотом із середовища аміаку при температурі 500⁰С для забезпечення високої твердості поверхні зубів. Перед азотуванням деталі піддаються гартуванню, високому відпуску (поліпшення) і чистовій обробці. Для азотування найчастіше використовують сталі типу: 38X2МЮА, 40XФА, 40ХНА тощо. Недоліком азотування є тривалість процесу (до 60 год.) та мала товщина зміцнювального шару до 0,5 мм [8]. Після азотування без наступного гартування поверхня зуба має твердість HRC 58...65.

В роботі [10] досліджувався сумісний вплив оброблення зубчастої передачі азотуванням з наступним відпалом на фазовий склад, товщину, структуру, мікротвердість сталі 12X28. Встановлено, що підвищення температури азотування від 550 °С до 950 °С призвело до зміни фазового складу покриття та зниження максимальних значень мікротвердості від 16,2 ГПа до 7,0 ГПа відповідно. Також в цій роботі показано, що в процесі відпалу змінюється принцип розподілу мікротвердості за товщиною азотованих шарів, а мікротвердість, відповідно, значно знижується при температурах відпалу вищих за 550 °С.

Нітроцементация це технологічний процес насичення поверхневого шару зубчастої передачі одночасно вуглецем та азотом при температурі 700...950 °С в газовому середовищі, що складається з навуглецьованого газу і аміаку. Після

нітроцементатії вироби піддаються гартуванню. Сталями для даного виду ХТО є 40Х, 18ХГТ і ін [8].

В роботі [11] досліджувалася аустенітна сталь 12Х18Н10Т після електролітно-плазмового нітроцементування та азотування. Було встановлено, що після нітроцементатії при температурі 850°C та азотуванні при температурі 750°C на поверхні сталі сформувалася модифікована структура, яка складалася з γ -фази і окремих частинки оксидів Fe_3O_4 та мартенситу.

Аналізуючи дані літературних джерел [9], виділимо основні експлуатаційні властивості деталей, набуті в результаті технологічних процесів модифікації поверхневого шару та зводимо їх до таблиці 1.1.

1.4 Цілі роботи.

З літературного огляду можна зробити висновки, що зі збільшенням твердості поверхневого шару зуба зростає і несуча спроможність зубчастих передач по контактній міцності. Для задоволення цієї вимоги необхідно використовувати сталі з низьким вмістом карбідоутворюючих елементів та обов'язковою наявністю у її складі хрому та молібдену. Наступним етапом підвищення твердості є поєднання цементатії з термоциклічною обробкою, що дасть змогу у декілька разів підвищити навантажувальну спроможність зубчастої передачі.

Тому в ході огляду літературних даних було поставлено наступні цілі дослідження:

1. Обрати матеріал для виготовлення деталі зубчасте колесо.
2. Оптимізувати процес цементатії деталі для підвищення довговічності.
3. Дослідити структуру та властивості деталі.

Таблиця 1.1 – Характеристика основних методів зміцнення поверхні.

| Метод | Азотування | Борування | Ін. методи ХТО | Поверхнево-пластичне деформування | Гальванічні покриття | Електроіскрове легування | Газотермічне напилювання | Вакуум-плазмові покриття | Лазерна термічна обробка | Іонне азотування |
|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------|
| | Хіміко – термічна обробка (ХТО) | | | | | | | | | |
| Властивості | | | | | | | | | | |
| Твердість, МПа | 1230 – 1640 HV | 1500 – 1700 HV | 7500 – 8500 | 4000– 6200 | 1100 | 500– 1000 | 6500– 11000 | 1100 0– 1600 0 | 7500– 15000 | 10500 – 10700 |
| Товщина, мм | 0,05– 0,15 | 0,12– 0,5 | 0,01– 0,25 | 0,35– 0,45 | 0,15– 0,7 | 0,2– 0,4 | 0,1–0,5 | 0,05 – 0,12 | 0,35–5 | 0,1– 0,3 |
| Температура процесу, °С | 900– 1100 | 900– 1200 | 750– 950 | 20–50 | 50– 450 | 300– 500 | 50–350 | 400– 600 | 1000– 1500 | 300– 900 |
| Тривалість процесу | 3– 100 год | 3–20 год | 2–50 год | 0,5–4 год | 0,5–3 год | 0,000 3 м2 /хв | 0,1–10 кг/год | 0,5– 1,5 год | 10–100 м/с | 0,5-10 год |
| Зносо- стійкість | ↑ в 2,5– 3,2 рази | ↑ в 8,0 разів | ↑ в 1,5– 3,0 рази | ↑ в 1,2– 2,0 рази | ↑ в 5,4 рази | ↑ в 1,6– 3,5 рази | ↑2,5– 3,1 рази | ↑ в 2,0– 4,0 рази | ↑1,5...3, 0 рази | ↑ 1,7– 3,1 рази |
| Корозійна стійкість | ↑ в 20 разів | в 35 разів | ↑ в 15 разів | ↑ в 2 рази | ↑ в 3 рази | - | ↑ в 5 разів | ↑ до 10 разів | ↑ на 15% | - |
| Ерозійна стійкість | ↑ в 2 рази | ↑ в 2 рази | ↑ в 2 рази | ↑ на 23% | ↓ до 5% | - | ↑ в 3 рази | ↑ в 7...1 0 разів | ↑ на 10% | - |

РОЗДІЛ 2

ОПИС ДЕТАЛІ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Завдання на розробку.

Завданням роботи є розробка технології підвищення довговічності деталі «Колесо зубчасте». Для розробки цієї технології було обрано не типову деталь (рис. 2.1) в якій є досить багато тонких стінок та переходів між товщинами. Також деталь має досить високу точність розмірів, яка не повинні погіршитися після термічного оброблення. Саме для цієї деталі і буде розроблятися технологія хіміко-термічної обробки для підвищення властивостей.

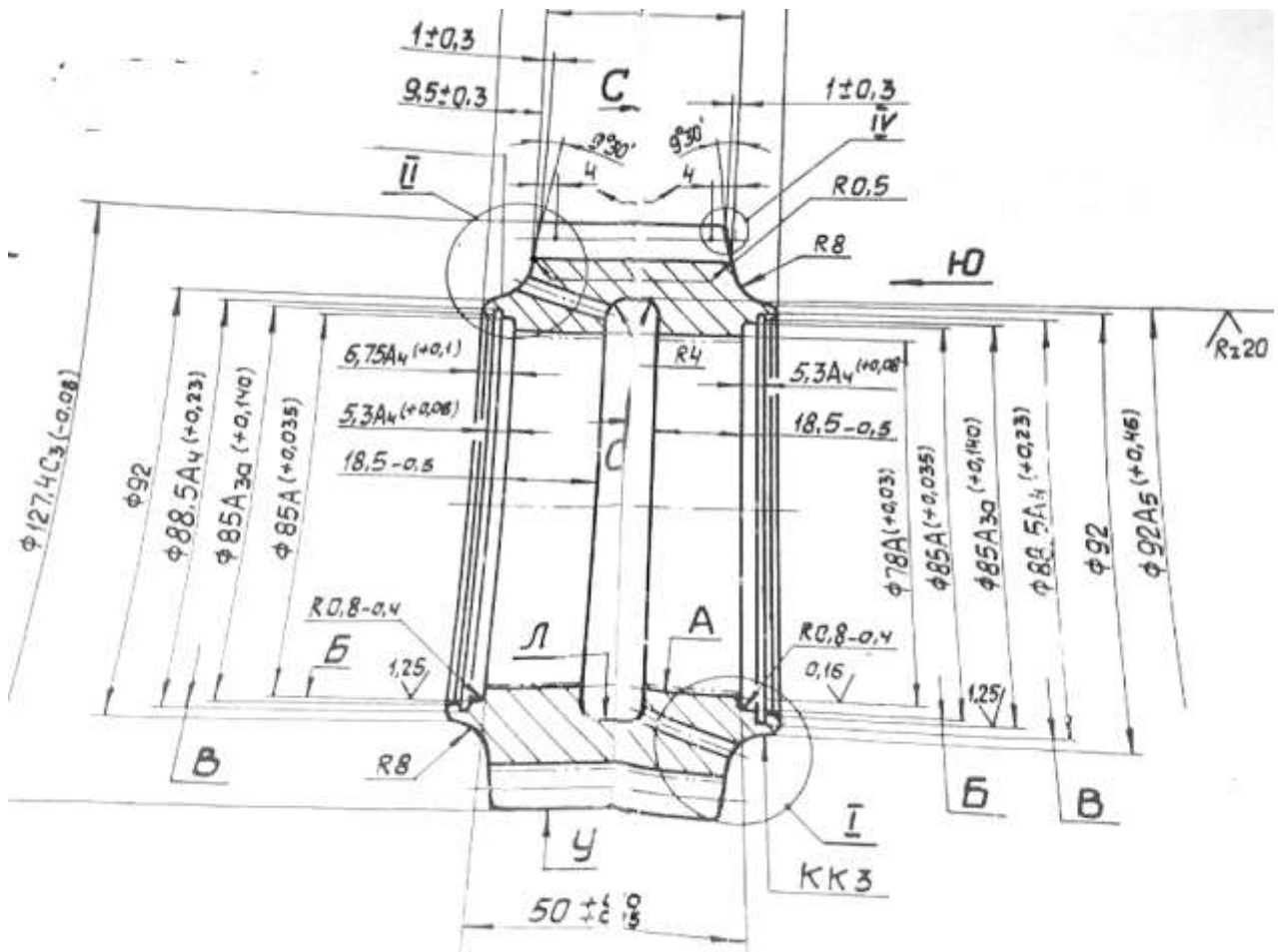


Рисунок 2.1 – Деталь «Колесо зубчасте»

2.2 Дослідження структури

Мікроструктуру мікрошліфів з деталі «Колесо зубчасте» після хіміко-термічного оброблення досліджували на оптичному мікроскопі Axioobserver D1M «Carl Zeiss».

Дослідні мікрошліфи виготовлялися на шліфувально-полірувальному верстаті (рис. 2.2)



Рисунок 2.2 – Верстат шліфувально-полірувальний Vainpol-VTD.

2.3 Дослідження властивостей

Твердість деталі після хіміко-термічного оброблення визначали за допомогою твердоміра Роквелла в центральній частині зразка та на периферії.

2.4 Хімічний склад сталі, що досліджувалася

В ході дослідження була використана високоякісна конструкційна легована сталь марки 14ГХСН2МА, хімічний склад якої приведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталі 14ГХСН2МА

| Хімічний елемент | Вміст у сталі, % |
|------------------|------------------|
| C | 0,11...0,16 |
| Mn | 0,7...1,0 |
| Cr | 1,2...1,6 |
| Si | 0,45...0,7 |
| Ni | 1,6...2,0 |
| Mo | 0,25...0,4 |
| V | 0,03...0,06 |
| S | Не більше 0,025 |
| Fe | основа |

2.5 Режими хіміко-термічного та термічного оброблення

В ході роботи досліджувався вплив на структуру деталі «Колесо зубчасте» наступних режимів хіміко-термічного та термічного оброблення:

1. Цементация при температурі $(920 \pm 20)^\circ\text{C}$, час витримки 10 годин.
2. Відпал при температурі $(630 \pm 20)^\circ\text{C}$, час витримки 4 годин.

3. Гартування при температурі $(840+20...10)^{\circ}\text{C}$, час витримки 1 год. Видача деталей у мастило.
4. Обробка холодом при температурі $(-90...-130)^{\circ}\text{C}$, час витримки 1 год.
5. Відпуск при температурі $(240+10...20)^{\circ}\text{C}$, час витримки 3 год.

РОЗДІЛ 3

ОПТИМІЗАЦІЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛІ

3.1 Оптимізація матеріалу зубчастого колеса

Обираючи матеріал для виготовлення зубчастого колеса необхідно враховувати хімічний склад, структуру та здатність матеріалу покращувати свої властивості в результаті термічного та хіміко-термічного оброблення.

При виборі матеріалу для виготовлення деталей типу зубчастого колеса також необхідно враховувати механічні характеристики після термічної обробки, економічну доцільність використання легувальних добавок та загальну собівартість готової деталі.

В якості легувальних елементів доцільно розглянути наступні: нікель, хром, молібден, титан. Основним елементом, що сприяє збереженню та утворенню нового аустеніту є нікель, також він не призводить до утворення карбідів та покращує здатність матеріалу до зміцнення та підвищенню в'язкості і втомної міцності. Наявність марганцю призводить до підвищення міцності та уповільнює процес відпуску мартенситу, що призводить до покращення властивостей. Кремній, так як і марганець, може бути як розкислювальним елементом, що слугує покращенню якості сталі так і легувальним, що залишається у твердому розчині та значно підвищує границю плинності. Хром є одним із карбідоутворюючих елементів, які зсувають точку евтектоїду в бік зменшення вуглецю, що призводить до утворення карбідної сітки після цементації та руйнуванню її після гартування [8].

Для додання зубцям більшої твердості і зносостійкості зубчасті колеса проходять етап зміцнення за допомогою ХТО або нанесення на їх поверхню зносостійких покриттів. Забезпечення необхідних властивостей поверхневого шару деталі визначається співвідношенням глибини зміцнення і структури та

властивостей цього шару. Опираючись на літературні дані з розділу 1 в якості матеріалу було обрано сталь 14ГХСН2МА, хімічний склад якої наведено у п.2.4 у розділі 2.

3.2 Оптимізація режимів зміцнення поверхневого шару деталі

В ході дослідження проводилися оброблення сталі 14ГХСН2МА для покращення її структури, механічних та експлуатаційних властивостей, які впливають на довговічність роботи зубчастого колеса. Згідно з кресленням деталі (див. розділ 2) процедурі зміцнення повинна піддаватися поверхня зубчастого вінця та доріжки кочення роликів з боку внутрішнього діаметру. При цьому, згідно з літературними даними, глибина зміцненого шару не повинна перевищувати 1,5 мм.

Основним етапом зміцнення поверхні зубчастого колеса є цементация. Вибір режимів цементации залежать від конфігурації деталі, хімічного складу матеріалу, мікроструктури та товщини шару, на який необхідно провести зміцнення.

Найбільш ефективною цементация є для низьковуглецевих легованих сталей, які вміщують карбідоутворюючі елементи. Зносостійкість після цементации є однаковою із зносостійкістю після гартування і низькотемпературного відпуску [3]. При цьому товщина цементованого шару складатиме 0,9...1,5 мм. При цьому оптимальною температурою цементации є значення в діапазоні 850...950⁰ С з подальшим відпалюванням при температурах 580...650⁰ С.

Але процеси хіміко-термічного оброблення (ХТО) також мають певні недоліки – досить значну за часом тривалість процесів дифузійного насичення, а також необхідність проведення додаткових операцій термічної обробки для

нівелювання наявності негативних показників властивостей та структури після попередньої обробки. Для вирішення цієї проблеми можна проводити поєднання ХТО та термоциклічної обробки (ХТЦО) [12, 13]. Це дасть можливість відразу після проведення цементації з відпалом зменшити відсоток жолоблення виробів, підвищити ударну в'язкість і втомну міцність сталі, істотно скоротити тривалість обробки деталі за часом. При сумісному використанні цих двох процесів можливо, без шкоди для властивостей готової деталі, збільшити температуру дифузійного насичення сталі вуглецем. Також підвищення температури ХТО дозволяє в 1,2 рази скоротити тривалість обробки і поліпшити якість поверхневого шару [14].

Зазвичай сталі з вмістом вуглецю 0,4% містять від 3% до 12% залишкового аустеніту. Обробка холодом призводить до перетворення залишкового аустеніту загартованої сталі на мартенсит. При цьому підвищується твердість на HRC 5...15. Після обробки холодом обов'язково проводиться низький відпуск [8].

Зазвичай для деталі «Зубчасте колесо» використовують режими термічного оброблення, які складаються з цементації при температурах не вище 950⁰ С протягом 13...15 годин, з послідуочим відпалом при температурі не вище 650⁰ С та витримкою протягом 7...10 годин, а також гартуванням при температурах не нижче 860⁰ С та витримкою 3...5 годин та відпуском при температурі 250⁰ С з витримкою 3...4 години. Отже, зазвичай тривалість покращення деталі з такої сталі складала 26...34 години.

Після механічного виготовлення деталі «Зубчасте колесо» зі сталі 14ГХСН2МА було проведено дослідження вихідної мікроструктури поблизу поверхні зубів (рис. 3.1), поблизу основи зуба (рис. 3.2) та в серцевині зуба (рис. 3.3), а також властивостей поверхневого шару деталі для контролю подальших змін у мікроструктурі та властивостях.



Рисунок 3.1 - Мікроструктура поблизу поверхні зубів, x200

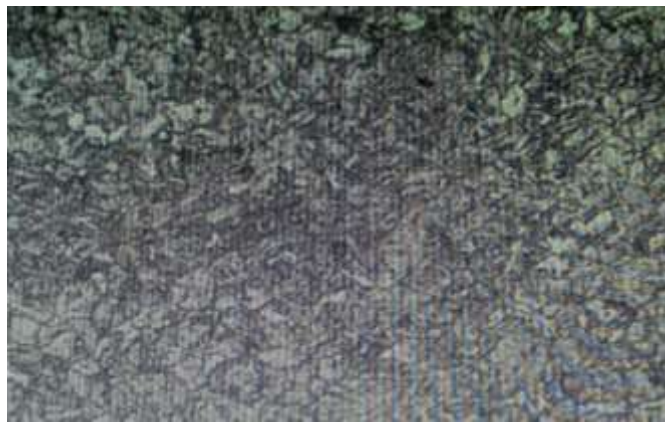


Рисунок 3.2 – Мікроструктура поблизу основи, x200



Рисунок 3.3 - Мікроструктура в серцевині зубів, x200

У результаті дослідження було встановлено, що мікроструктура у всіх трьох зонах перерізу, а саме поблизу поверхні зубів та основи, у серцевині зубів

та їх основи, представляє собою однорідну структуру та складається із сорбіту. Твердість деталі до ХТО складала 321 НВ або 35 HRC.

Обраний режим цементації та відпалу наведений у розділі 2, а саме було проведено на мінімальних часових проміжках, цементацію при температурі $(920\pm 20)^\circ\text{C}$, час витримки 10 годин та відпал при температурі $(630\pm 20)^\circ\text{C}$, час витримки 4 годин.

Макроскопічні дослідження зубчастого колеса показали, що на поверхні зубців в процесі ХТО утворився цементований шар, глибиною 1,2 мм (рис. 3.4).

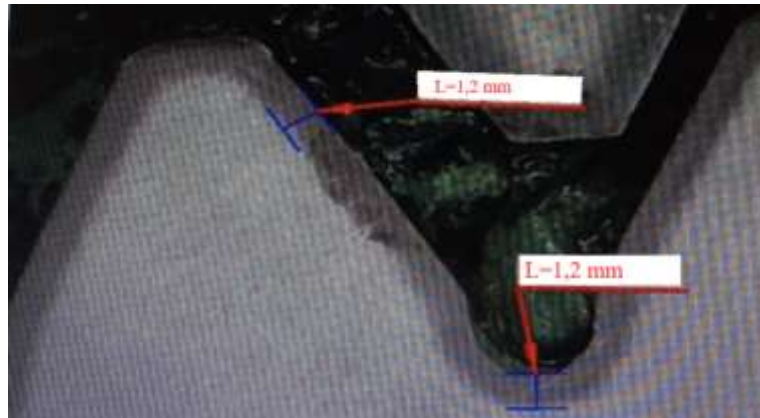


Рисунок 3.4. - Цементований шар на поверхні зубців деталі, x10.

Дослідження мікроструктури деталі після ХТО показали, що в цементованому шарі деталі окрім сорбіту було виявлено включення глобулярних надлишкових карбідів (рис. 3.5). Мікроструктура серцевини деталі представляла собою ферит та сорбіт, що є характерним для маловуглецевої сталі, що не піддавалася зміцнювальній термічній обробці – гартуванню (рис. 3.6). Твердість деталі після цементації та відпалу складає 25 HRC.



Рисунок 3.5 - Мікроструктура цементованого шару, x200

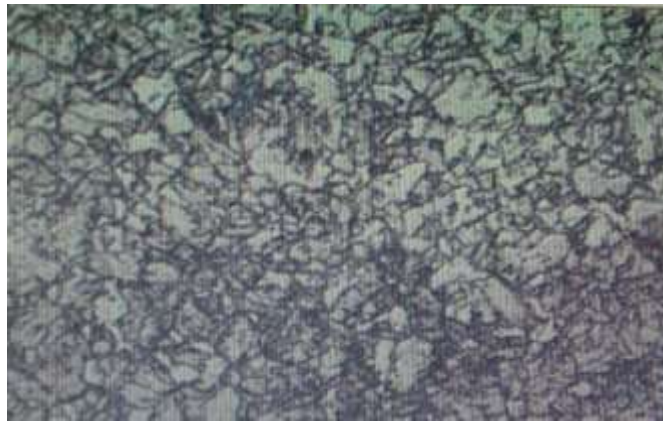
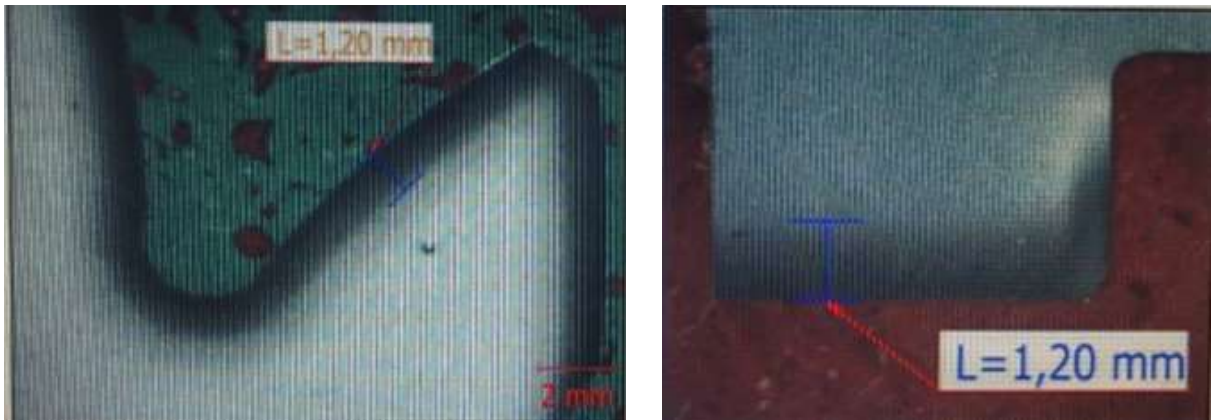


Рисунок 3.6 - Мікроструктура серцевини, x200.

Наступним етапом обробки деталі було застосування термоциклічної обробки, а саме гартування, обробка холодом та відпуску (див. розділ 2). Після проведення цього етапу також було досліджено макроструктуру зубів (рис. 3.7), мікроструктури поверхневого шару (рис. 3.8) та серцевини деталі (рис. 3.9).

Дослідження показали, що глибина цементованого шару, визначена під оптичним мікроскопом, складає 1,2 мм.



а

б

а – зубчатий вінець, б – доріжка кочення.

Рисунок 3.7 – Макроструктура поверхні зуба, x10



Рисунок 3.8 – Мікроструктура поверхневого шару, x200.



Рисунок 3.9 – Мікроструктура серцевини деталі, x200

Дослідження макроструктури показали, що мікроструктура цементованого шару після ТЦО складалася з дрібно голчастого мартенситу та дисперсних включень карбідів, а серцевина деталі мала структуру маловуглецевого

мартенситу. Твердість цементованого шару зуба складала 91HRN15, а серцевини деталі – 41HRC. Загальний вид деталі після оброблення наведено на рисунку 3.10.



Рисунок 3.10 – Деталь зубчасте колесо.

Можна зробити висновки, що запропонований режим цементації з наступною термоциклічною обробкою призводить до значного зниження тривалості оброки з 26...34 годин стандартної обробки до 19 годин за запропонованою технологією. При цьому властивості матеріалу дещо покращилися, а саме підвищилася твердість поверхні зуба при збереженні в'язкої серцевини.

3.3 Розрахунок показників довговічності деталі

Довговічність деталей устаткування залежить від матеріалу деталей, виду навантаження термічної обробки, правильності конструкції вузла, точності розрахунків і т.д. При розрахунках довговічності використовують статичні і динамічні показники матеріалів. До статичних показників відносяться: межа міцності матеріалу та твердість. Експериментальні дані статичних показників наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Статичні показники міцності матеріалу зубчастого колеса

| Статичні показники | Види обробки матеріалу | | | | | Стандартна обробка |
|--------------------|------------------------|---------------------|-------|----------------------------------|-------|--------------------|
| | Після мех.обр. | Цементация + відпал | | Гарт + обробка холодом + відпуск | | |
| | | поверхня | центр | поверхня | центр | поверхня |
| Межа міцності, МПА | 1095 | 924 | 850 | 2180 | 1260 | 1260 |
| Твердість, HRC | 35 | 30 | 25 | 58 | 41 | 41 |

До динамічних показників відносяться допустимі контактні напруження, напруження згину, контактна витривалість та витривалість при згинанні. Схема динамічних навантажень наведена на рисунку 3.11.

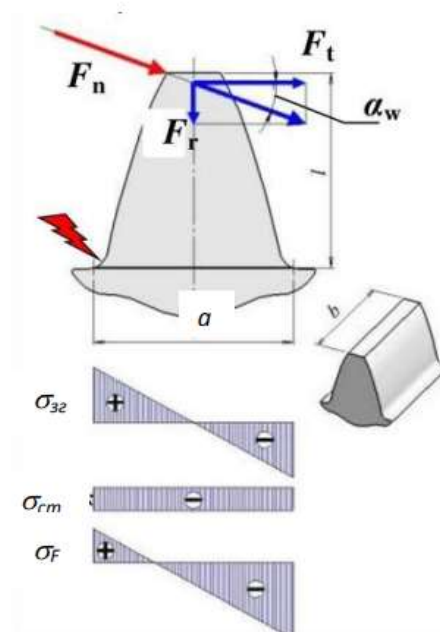


Рисунок 3. 11 – Схема до розрахунку зубів колеса на витривалість при згині [16].

Для прогнозування динамічних показників довговічності зубчастого колеса необхідно визначити наступні показники [15, 16], також використовуючи для розрахунків данні Додатку А:

1. Визначення допустимих контактних напружень:

$$(\sigma_H)_{зк} = \frac{\sigma_{H \text{ lim } зк}}{S_H}, \quad (3.1)$$

де $(\sigma_H)_{зк}$ – допустиме контактне напруження зубчастого колеса;

$\sigma_{H \text{ lim } зк}$ - границя контактної витривалості матеріалу;

S_H - допустимий запас міцності при розрахунку на контактну міцність.

2. Визначення допустимих напружень згину:

$$(\sigma_F)_{зк} = \frac{\sigma_{F \text{ lim } зк}}{S_F}, \quad (3.2)$$

де $(\sigma_F)_{зк}$ - допустимі напруження згину;

$\sigma_{F \text{ lim } зк}$ - межа міцності матеріалу на згинання;

S_F - запас міцності при розрахунках на згин;

3. Перевірка зубів передачі на контактну витривалість шляхом визначення дійсних контактних напружень у зачепленні зубчастої передачі:

$$\sigma_H = Z_H \cdot Z_M \cdot Z_\varepsilon \cdot (u + 1)/u \left(2 \cdot 10^3 \cdot T_2 \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\nu} \cdot (u + 1)/(2\varphi_\alpha \alpha_\omega^3) \right)^{1/2}, \quad (3.3)$$

де Z_H – коефіцієнт, що враховує кут нахилу зубів;

Z_M - коефіцієнт, що враховує матеріал зубчастих коліс;

Z_ε – коефіцієнт, що враховує перекриття зубів;

T_2 - крутний момент на колесі;

$K_{H\alpha}$ - коефіцієнт, що враховує розподіл навантаження між зубцями

$K_{H\beta}$ - коефіцієнт розподілу навантаження за шириною вінця, при твердості та симетричному розташуванні зубчастого колеса відносно опори;

K_{Hv} - коефіцієнт впливу динамічності навантаження;

φ_{α} - коефіцієнт ширини за міжосьовою відстанню;

α_{ω}^3 - розмір колеса з ряду стандартних розмірів.

4. Перевірка зубів передачі на витривалість при згинанні:

$$\sigma_F = Y_F \cdot Y_{\beta} \cdot Y_{\varepsilon} \cdot W_{FT} / m_n < (\sigma_F)_{зк}, \quad (3.4)$$

де Y_F – коефіцієнт форми зуба, визначається в залежності від коефіцієнта зміщення інструмента та від еквівалентного числа зубів;

Y_{β} - коефіцієнт, що враховує нахил зуба;

Y_{ε} – коефіцієнт міцності зубів;

W_{FT} - питома окружна розрахункова сила;

m_n - модуль зубчастої передачі.

Розраховані значення динамічних показників довговічності зубчастого колеса після стандартного оброблення, механічного оброблення, цементації з відпалом та термоциклічного оброблення зубчастого колеса наведені у табл. 3.2. При відсутності даних втомні характеристики деталей також можна визначити за формулою (3.5), а значення занести у табл. 3.2:

$$\sigma_{-1} \approx 0,43 \sigma_B, \quad (3.5)$$

де σ_{-1} - границя витривалості при симетричному циклі;

σ_B – границя міцності, МПа.

Таблиця 3.2 - Розраховані значення динамічних показників довговічності зубчастого колеса.

| Розраховані показники | Мех. Обр. | Цементация + відпал | | Гарт + обробка холодом + відпуск | | Стандартна обробка |
|-----------------------------|-----------|---------------------|-------|----------------------------------|-------|--------------------|
| | поверхня | поверхня | центр | поверхня | центр | поверхня |
| $\sigma_H \text{ lim}_{зк}$ | 782 | 690 | 575 | 1334 | 943 | 943 |
| $(\sigma_H)_{зк}$ | 711 | 627 | 523 | 1213 | 857 | 857 |
| $\sigma_F \text{ lim}_{зк}$ | 790 | 781 | 782 | 800 | 795 | 795 |
| $(\sigma_F)_{зк}$ | 465 | 459 | 460 | 471 | 468 | 468 |
| σ_H | 425 | 425 | 425 | 425 | 425 | 425 |
| σ_F | 459 | 460 | 471 | 465 | 468 | 468 |
| σ_{-1} | 455 | 397 | 358 | 877 | 551 | 551 |

Проведено розрахунки довговічності деталі «Зубчасте колесо», які показали, що обрана сталь та розроблені режими покращення поверхневого шару деталі призвели до збільшення показників довговічності з 551 МПа до 877 МПа.

ВИСНОВКИ

В процесі виконання роботи було розроблено технологічний процес хіміко-термічного оброблення деталі «Зубчасте колесо» для підвищення його довговічності:

1. Оптимізовано хімічний склад сталі для деталі «Зубчасте колесо», в результаті якого було обрано сталь – 14ГХСН2МА.

2. Оптимізовано режими цементації та термоциклічного оброблення деталі та досліджено його структуру, які показали, що сумісне застосування цементації та термоциклічного оброблення (гарт та обробка холодом з послідуєчим відпуском) дозволили значно скоротити стандартну обробку за часом деталі зубчасте колесо з 26...34 годин за стандартною обробкою до 19 годин за запропонованою.

3. Проведено розрахунки довговічності деталі «Зубчасте колесо», які показали, що обрана сталь та розроблені режими покращення поверхневого шару деталі призвели до збільшення показників довговічності з 551 МПа до 877 МПа.

4. Результати досліджень було випробувано на підприємстві та можна зробити висновок, що розроблена технологія повністю відповідає вимогам до деталі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Деталі машин [Текст]: підручник: затверджено МОН України/ А. В. Міняйло [та ін.]. – К.: Агроосвіта, 2013. – 448 с. – ISBN 978– 966– 2007– 28– 2.
2. Киричок П.О. Зміцнення поверхонь металевих деталей: навч. посіб. / П.О. Киричок, В.Г. Олійник, Т.Ю. Киричок // - К. : Преса України, 2004. - 240с.
3. Гуменюк І.А. Триботехнічні властивості сталі 12Х18Н10Т, поверхнево модифікованої комбінованими покриттями: Дис. ...канд. техн. наук.: 05.02.04. – К., 2018. – 201с.
4. Кіндрачук М.В. Трибологія покриттів матрично-наповненого типу. Проблеми тертя та зношування : наук.-техн. зб. / Нац. авіац. ун-т. 2007. Вип. 48. С. 127-141.
5. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин [Текст]: навч. посіб. / А.Г.Фесенко та [ін.] – Д.: РВВ ДНУ, 2015. – 104 с.
6. Пошкоджуваність і руйнування зубчастих передач редукторів вертольотів МИ-8 та його модифікацій / Пилипенко О.І. та інші // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки.- 2020. - Вип. № 3 – С.92-105.
7. Семеновський О.Є. Підвищення технологічності виготовлення складнопрофільних деталей / О.Є. Семеновський // Вісник ЖДТУ. -2017. -№ 2 (80). – С. 142-146.
8. Кузін О. А., Металознавство та термічна обробка металів / О. А. Кузін, Р. А. Яцюк. - Львів : Афіша, 2002. – 304 с.
9. Горбенко С.С. Вибір способу відновлення деталей за критеріями якості / С.С. Горбенко // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2020. – Вип. 1 (46). – С.

10. Хижняк В.Г. Будова та властивості азотованих шарів сталі 12Х28 / В.Г. Хижняк, О.В. Більченко // Металознавство та обробка металів - 2005.-2.- С. 20 -23.

11. Курбанбеков Ш. Р. Модификация структуры и механических свойств поверхностных слоев стали 12Х18Н10Т при электролитноплазменной обработке : дис. канд. техн. наук : 6D072300 / Курбанбеков Шерзод Рустамбекович – Усть-Каменогорск, Республіка Казахстан, 2014. – 120 с

12. Федюкин В. К. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин / В. К. Федюкин, М. Е. Смагоринский - Л: Машиностроение, 1989. -255 с.

13. Лисий М. В. Вплив термоциклічної обробки на субструктурне зміцнення композиційних матеріалів з алюмінієвою матрицею / М. В. Лисий, А. І. Білюк, А. Д. Слободяник // Проблеми трибології. - 2017. - № 1. - С. 63-67.

14. Пчелінцев В. О. Термоциклічна обробка вала зі сталі 40Х відцентрового насоса типу НКВ / В. О. Пчелінцев, Т. П. Говорун, В. М. Раб, Х. В. Берладір // Вісник Сумського державного університету, серія: Технічні науки. – Суми: СумДУ, 2012. –№4. – С. 123-132.

15. Інженерна механіка (Деталі машин): посібник-практикум (Частина 1) /[Дережа О.О та інші] Мелітополь: ВЦП «Люкс». – 2020. – 143с.

16. Якімов О.В. Технологія машино- та приладобудування: [Навчальне видання] / Якімов О.В., Марчук В.І. та ін. Луцьк, 2005- 710с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Механічні характеристики сталей

| Марка сталі | Діаметр заготовки | Термообробка | Границя міцності σв, МПа | Границя текучості σт, МПа | Твердість, НВ (HRC) [HV] | |
|-------------|------------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------|
| | | | | | серцевини | поверхні |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| Сталь 45 | до 100 100-300 300-500 | Нормалізація | 590 570 550 | 300 290 280 | 187-217 | |
| | 60-90 90-120 160-260 | Поліпшення | 800 780 700 | 440 390 340 | 207-238 194-222 180-207 | |
| | - | Гартування об'ємне | 900 | 650 | (40-50) | |
| | - | Гартування СВЧ | 750 | 450 | 207-238 | (45-55) |
| Сталь 50 | до 100 100-300 300-500 | Нормалізація | 610 590 570 | 330 300 280 | 180-220 | |
| | до 200 | Поліпшення | 790 | 540 | 253-310 | |
| | - | Гартування об'ємне | 910 | 650 | (41-53) | |
| | любий | Гарт. СВЧ | 760 | 460 | 353-310 | (50-57) |
| Сталь 30ХГС | до 80 100-180 180-250 | Нормалізація | 980 900 780 | 740 690 640 | 215-229 | |
| | до 140 150-300 | Поліпшення | 1080 930 | 840 740 | 235-280 | |
| Сталь 35Х | до 80 80-100 100-200 | Нормалізація | 940 740 690 | 740 490 440 | 190-241 | |
| | до 200 | Поліпшення | 740 | 490 | 220-260 | |
| | - | Ціанування | 820 | 790 | 220-250 | (48-66) |

Кінець таблиці А.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------------------------|---------------|-----------------|---------|---------|-----------|-----------|
| Сталь 40Х | до 60 | Нормалізація | 980 | 790 | 200-230 | |
| | 100-200 | | 760 | 490 | | |
| | 200-300 | | 740 | 490 | | |
| | до 120 | Поліпшення | 930 | 690 | 257-285 | |
| | 120-150 | | 880 | 590 | 243-271 | |
| | 180-250 | | 780 | 490 | 215-248 | |
| | - | Гарт. об'ємне | 980 | 830 | (45-50) | (50-55) |
| - | Гарт. СВЧ | 740 | 490 | 257-285 | (48-66) | |
| - | Ціанування | 880 | 640 | 257-285 | (48-66) | |
| - | Азотування | 840 | 700 | (30-35) | [550-750] | |
| Сталь 40ХН | до 60 | Нормалізація | 980 | 790 | 220-250 | |
| | 60-100 | | 840 | 590 | | |
| | 100-300 | | 790 | 570 | | |
| | до 150 | Поліпшення | 930 | 690 | 265-295 | |
| | 150-180 | | 880 | 590 | 250-280 | |
| | 180-250 | | 840 | 540 | 235-265 | |
| - | Гарт. об'ємне | 980 | 830 | (45-50) | | |
| - | Гарт. СВЧ | 790 | 540 | 250-280 | (51-62) | |
| - | Ціанування | 905 | 690 | 250-280 | (50-64) | |
| Сталь 50Г | до 150 | Нормалізація | 840 | 400 | 190-229 | |
| | 150-400 | | 800 | 370 | | |
| 20Г, 12ХН2, 18Х, 18ХГТ, 20Х | до 100 | Поліпшення | 890 | 600 | 241-285 | |
| | 100-200 | | 830 | 560 | | |
| | - | Цементация | 410 | 240 | (30-35) | (58-63) |
| | - | | 450 | 270 | | (58-63) |
| | - | | 780 | 590 | | (53-58) |
| | - | | 690 | 490 | | (58-63) |
| | - | | 980 | 830 | | (58-60) |
| - | 780 | | 640 | (54-62) | | |
| - | 790 | 590 | (54-62) | | | |
| А 40ХФ | - | Азотування | 880 | 740 | (30-35) | [700-950] |
| | - | | 840 | 700 | | [550-750] |
| 25ХГМ 30ХГТ | - | Нітроцементация | 860 | 690 | (30-35) | (56-63) |
| | - | | 870 | 680 | | |

Таблиця А.2 – Механічні характеристики відливок з вуглецевої сталі

| Марка сталі | Термообробка | Границя міцності σ_B , МПа | Границя текучості σ_T , МПа | Твердість, НВ |
|-------------|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------|
| 35Л | Нормалізація | 490 | 270 | 145-155 |
| 40Л | | 520 | 290 | 147-156 |
| 45Л | | 540 | 310 | 155-170 |
| 50Л | | 570 | 330 | 175-186 |
| 55Л | | 590 | 340 | 156-217 |
| 35ГЛ | Поліпшення | 590 | 340 | 174-217 |
| 35ХГСЛ | | 790 | 590 | 202-220 |
| 35ХНЛ | | 690 | 490 | 219-269 |
| 40Г2Л | | 630 | 320 | 190-225 |

Таблиця А.3 – Визначення базової границі витривалості сталі

| Спосіб термічної або хіміко-термічної обробки | Твердість зубів | | σ_{Hlim} | σ_{Flim} | $[\sigma]_{Hmax}$ | $[\sigma]_{Fmax}$ |
|---|-----------------|------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| | серцевини | поверхні | | | | |
| Нормалізація, поліпшення | ≤ 350 | | 2НВ+70 | НВ+260 | 2,8 σ_T | 2,7НВ |
| Гартування об'ємне | 38-50HRC | | 18HRC+ +150 | 500-550 | | 1400 |
| Гартування поверхневе | 27-35 HRC | 40-50 HRC | 17HRC | 600-700 | 40HRC** | 1260 |
| Цементация | 30-45 HRC | 57-62 HRC | 23HRC | 750-800 | | 1200 |
| Азотування | 24-40 HRC | 550-750 HV | 1.5HV | 12HRC *+43 | | 1000 |

Примітки: * твердість серцевини зуба

** твердість поверхні зуба

Середнє значення твердості при визначенні базових границь витривалості обчислюється по формулі:

$$H = 0,227 H_{max} + 0,773 H_{min}$$

Таблиця А.4 – Рекомендації щодо вибору варіантів матеріалів для шестірні та колеса

| Варіант | Шестірня | | | Колесо | | |
|---------|------------------|--------------------------------------|--------------|------------------|------------------------------|--------------|
| | Марка сталі | Термообробка | Твердість | Марка сталі | Термообробка | Твердість |
| 1 | 40Х, 45, 40ХН | Поліпшення | 269...302 НВ | 40Х, 45, 40ХН | Поліпшення | 235...262 НВ |
| 2 | 40Х, 40ХН, 35ХМА | Поліпшення та гартування СВЧ | 40...53 HRC | 40Х, 40ХН, 35ХМА | Поліпшення | 269...302 НВ |
| 3 | 40Х, 40ХН, 35ХМ | Поліпшення та гартування СВЧ | 45...53 HRC | 40Х, 40ХН, 35ХМ | Поліпшення та гартування СВЧ | 45...53 HRC |
| 4 | 20Х, 20ХНМ | Поліпшення, цементация та гартування | 57...63 HRC | 40Х, 40ХН, 35ХМ | Поліпшення та гартування СВЧ | 45...53 HRC |
| 5 | 20Х, 20ХНМ | Поліпшення, цементация та гартування | 57...63 HRC | 20Х, 20ХНМ | Поліпшення та гартування СВЧ | 56...63 HRC |