

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 НІТРОЦЕМЕНТАЦІЇ НА  
ДОВГОВІЧНІСТЬ ДЕТАЛІ «ШЕСТЕРНЯ»  
(назва теми)

---

Виконав: студент 2 курсу, групи БАД-222м

Спеціальності 132 Матеріалознавство  
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма

Композиційні та порошкові матеріали, покриття

Анциферової М. В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник МІТЯЄВ О. А.

(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

*Олександр Митяєв*  
« 17 » *травня* 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)**

АНЦИФЕРОВА Маргарита Вадимівна

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1.Тема проєкту (роботи) Дослідження впливу нітроцементациї на довговічність та витривалість деталі «Шестерня.

Керівник проєкту (роботи) Мітяєв Олександр Анатолійович

(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

Затверджені наказом закладу вищої освіти від «*12*» *10* 2023 року № *391*

2.Строк подання студентом проєкту(роботи)

3.Вихідні дані до проєкту (роботи) технічне завдання

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

1.Літературний огляд. 2. Методика та матеріали досліджень. 3. Оптимізація довговічності деталі

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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	Мітяєв О. А.	<i>Мітяєв</i>	<i>Мітяєв</i>
2	Мітяєв О. А.	<i>Мітяєв</i>	<i>Мітяєв</i>
3	Мітяєв О. А.	<i>Мітяєв</i>	<i>Мітяєв</i>
Нормо-контроль	Савченко В.О.	<i>Савченко</i>	<i>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>Мітяєв</i>
2	Підбір матеріалів та методик дослідження	01.11.2023	<i>Мітяєв</i>
3	Проведення експериментальних досліджень	01.12.2023	<i>Мітяєв</i>
4	Оформлення пояснювальної записки	20.12.2023	<i>Мітяєв</i>
5	Оформлення презентації роботи	22.01.2024	<i>Мітяєв</i>

Студент(ка) *Мітяєв* Маргарита АНЦИФЕРОВА  
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проекту (роботи) *Мітяєв* Олександр МІТЯЄВ  
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи магістра «Дослідження впливу нітроцементациї на довговічність деталі «Шестерня» 45 сторінок, 21 рисуноків, 2 таблиці, 1 додаток, 12 джерел.

Предметом дослідження є режими для хіміко-термічної обробки, які мають вплив на довговічність деталей після нітроцементациї.

Мета роботи – вдосконалення технологічного процесу нітроцементациї для підвищення довговічності шестерні.

Пояснювальна записка містить усі необхідні етапи дослідження структури та властивостей деталі шестерні для підвищення її довговічності після нітроцементациї.

В результаті роботи запропоновано технологічний процес, який поєднує нітроцементацию та термоциклічну обробку деталі, які призвели до підвищення показників довговічності

**НІТРОЦЕМЕНТАЦІЯ, ШЕСТЕРНЯ, ДОВГОВІЧНІСТЬ, СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ, ТЕРМОЦИКЛІЧНА ОБРОБКА.**

## ABSTRACT

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

The subject of research is the regimes for chemical and thermal treatment, which have an effect on the durability of parts after nitrocementation.

The purpose of the work is the technology of manufacturing the part after nitrocementation to increase the durability of the gear.

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

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

NITROCEMENTATION, GEAR, DURABILITY, STRUCTURE, PROPERTIES, THERMOCYCLIC TREATMENT.

## ЗМІСТ

Вступ.....	6
Розділ 1 Літературний огляд .....	7
1.1 Особливості виготовлення деталі «Шестерня» .....	7
1.2 Хіміко-термічна обробка .....	8
1.2.1 Особливості нітроцементзації .....	10
1.3 Структура та властивості нітроцементованого шару .....	15
Розділ 2 Методика та матеріали досліджень .....	19
2.1 Характеристика та умови використання деталі «Шестерня» .....	19
2.2 Матеріал деталі «Шестерня» .....	20
2.3 Металографічні дослідження .....	22
2.4 Випробування металу на твердість .....	25
2.5 Хіміко-термічна обробка деталі шестерня .....	26
Розділ 3 Дослідження та оптимізація довговічності деталі .....	29
3.1 Результати дослідження структури та властивостей деталі .....	29
3.2 Оптимізація режимів зміцнення поверхневого шару деталі .....	35
3.1 Розрахунок показників довговічності деталі .....	35
Висновки .....	39
Перелік джерел посилань .....	40
Додаток А .....	42

## ВСТУП

Для сучасного машинобудування характерно підвищення довговічності та ресурсу роботи деталей машин. Проблема підвищення терміну експлуатації таких деталей як шестерня вирішується шляхом підбору відповідних матеріалів та підвищення їх фізико-механічних властивостей додатковим легуванням, новими методами термічної та хіміко-термічної обробки.

Шестерня – це основна деталь зубчастої передачі у вигляді диска із зубцями на циліндричній або конічній поверхні, що входять в зачеплення з зубцями іншого зубчастого елемента і призначена для передавання руху до цього зубчастого елемента або отримання руху від нього.

Деталь працює у досить складних умовах, зуби відчувають тертя і знос, змінні за величиною контактні тиску, статичні і циклічні напруги при вигині, динамічні навантаження.

Вихід з ладу деталей типу шестерня пов'язаний з контактним втомним руйнуванням, заїданням, а також з поломкою зуба через втому або короткочасних перевантажень. Однією з основних задач є підвищення довговічності деталей за рахунок зниження показників зношування.

Для виготовлення таких деталей як шестерні найчастіше застосовують сталі, що піддаються поверхневому зміцненню, тобто цементації або нітроцементації, але режими термічної обробки потрібно постійно покращувати з метою зменшення їх тривалості, що задовільнить виробників за енергозбереженням та підвищення показників довговічності.

І саме тому розробка та оптимізація технологічного процесу нітроцементації деталі шестерня, що покращить показники довговічності та зменшить тривалість технологічного процесу є досить актуальним питанням на сьогоднішній час.

## РОЗДІЛ 1

### ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

#### 1.1 Особливості виготовлення деталі «Шестерня»

Зубчаста передача – це механізм який складається із декількох зубчастих колес, що використовуються для зміни швидкості руху та напрямку руху ведучої частини, які відбуваються при змінах обертового моменту. При цьому, у будь-який момент часу, повинно бути точне співвідношення швидкостей ведучого і веденого валу. Зубчаста передача складається досить часто складається з одного або декількох ведучих зубчастих коліс, які називаються шестернею, і одного або декількох ведених зубчастих коліс.

Шестерня - це одна з основних деталей зубчастої передачі та складється з диска на циліндричній або конічній поверхні якого розташовані зуби, що входять в зачеплення з зубами іншого елемента та призначаються для передавання обертального руху до цього елемента або отримання обертального руху від нього.

Шестерня є відповідальною деталлю, що сприймає великі навантаження, тому досить важливим показником є доовготривалість її роботи, так як короткий термін експлуатації деталі призводить до значних економічних втрат через необхідність проведення ремонтних робіт та технічного обслуговування.

Деталь шестерня працює у надскладних умовах, так як на зуби діють змінні за величиною контактні напруження, статичні, циклічні, динамічні напруження під час експлуатації, сили тертя, що можуть призвести до зношення деталі.

Основні навантаження зосередженні на зубцях. На них діє обертальний момент, який створює навантаження, що розподілені по їх контактних лініях. Найбільш частою причиною з ладу шестерен є руйнування поверхні зубців внаслідок контактної втоми. Також у шестерен спостерігається торцевий знос,



а довготривалі навантаження призводять до втомного руйнування зубців у небезпечному перерізі. Іноді їх руйнування відбувається і від одноразового навантаження (перевантаження). Серцевина деталі піддається динамічним напруженням згину[1]

У зв'язку з вищеперелікованим можна сформулювати наступні вимоги до деталі шестерня. Серцевина повинна мати високу в'язкість для сприйняття напружень згину. Зубці повинні мати високу твердість, зносостійкість та контактну витривалість для запобігання викришуванню та контактній втомі. Досягнути цих властивостей можна шляхом проведення хіміко-термічної обробки.

## **1.2 Хіміко-термічна обробка**

Поверхнєве зміцнення металевих виробів широко використовується в сучасному машинобудуванні, оскільки дозволяє отримати унікальне поєднання високої міцності, зносостійкості, корозійної стійкості на поверхні та високої в'язкості та пластичності в серцевині деталей. При цьому досягнення необхідних характеристик поверхневого шару досягається як за рахунок зміни його хімічного складу, так і за рахунок зміни фазового та структурного стану порівняно з серцевиною.

Хіміко-термічне оброблення (ХТО) це процес, який поєднує в собі термічний та хімічний процеси, що впливають на хімічний склад, структуру та властивості поверхневого шару деталі. Після проведення ХТО відбувається інтенсивне насичення поверхні деталі неметалами або металами при певній температурі в активно насиченому середовищі за рахунок дифузії хімічних елементів [2].

Такі деталі як шестерня більшу частину терміну експлуатації працюють в умовах зносу, циклічних навантажень, корозії та дії високих і низьких

температурах. Це призводить до утворення концентраторів напруження в поверхневих шарах металу. Хіміко-термічна обробка (ХТО), окрім підвищення механічних та експлуатаційних властивостей може призвести до утворення на поверхні деталі сприятливих залишкових напруг стиснення, що позитивно впливають на загальну надійність та довговічність машин.

Основні технологічні параметри ХТО, за допомогою яких можна змінити механічні та експлуатаційні властивості є температура а також тривалість процесу насичення. Основні процеси, які відбуваються у поверхневому шарі деталі це дисоціація, адсорбція, дифузія [3].

Дисоціація – це процес розпадання молекул середовища в якому проходить ХТО та утворення нових, активних атомів дифузанта.

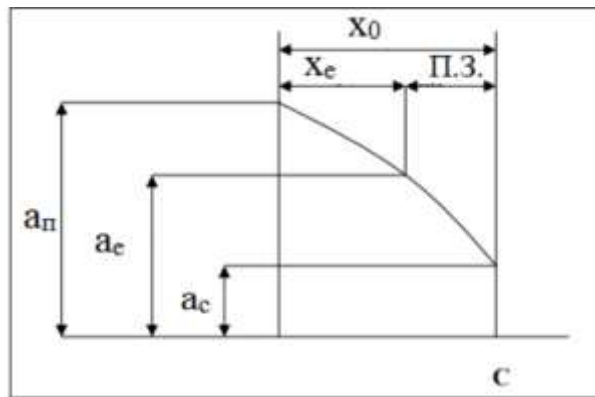
Адсорбція (сорбція) це складний та досить нестабільний процес поглинання поверхневим шаром деталі активних атомів насичувального елемента. При збільшенні тиску насичувального середовища зростає і кількість адсорбованих атомів. Дифузія це технологічний процес, який супроводжується проникнення насичуючого елемента вглиб металу деталі.

З плином часу відбувається процес розвинення дифузії, що призводить до утворення дифузійного шару, під яким розуміють шар матеріалу деталі у поверхні насичення. Цей шар деталі значно відрізняється за своїм хімічним складом, структурою і властивостями від вихідного матеріалу деталі (рис. 1.1). Матеріал деталі, який не зазнав процесу дифузії та не зазнавав впливу активного середовища на нього називають серцевиною деталі[4].

Перехідною зоною дифузійного шару називають частину дифузійного шару, яка прилягає до серцевини та протяжність якої визначається різницею загальної та ефективної товщини (рис. 1.1) [4].

Товщина дифузійного шару визначається найкоротшою відстанню від поверхні насичення деталі до її серцевини. При проведенні процесу обробки поверхні деталі хіміко-термічними методами визначають ефективну товщину дифузійного шару, яка характеризується граничним номінальним значенням базового параметру та визначається як найкоротша відстань від поверхні

насичення до ділянки оброблення. Параметр дифузійного шару визначається параметрами матеріалу, та є критерієм, який відповідає за змінення якості дифузії, в залежності від відстані до поверхні насичення. За базовий параметр, найчастіше, приймають концентрацію дифундуючого елементу, його властивості або показники структури.



П.З. – перехідна зона; С – серцевина;  $x_0$  – загальна товщина дифузійного шару;  $x_e$  – ефективна товщина дифузійного шару;  $a_n$  – значення базового параметру у поверхні;

$a_e$  – граничне значення базового параметра, встановлене для ефективного товщини;  $a_c$  – значення базового параметра для серцевини.

Рисунок 1.1 - Схема дифузійного шару [4].

### 1.2.1 Особливості нітроцементациї

Поверхнєве насичення сталі одночасно вуглецем і азотом в газовому середовищі називається нітроцементациєю.

Процес нітроцементациї відбувається при температурі 820...950 °С для деталей, які виготовляються із конструкційних низько- та середньовуглецевих сталей як легованих, так і не легованих, а також із нержавіючих сталей. Це

призводить до підвищення таких властивостей як твердість поверхневого шару, зносостійкість та межа витривалості. Зазвичай температурний режим для середньовуглецевих (легованих і нелегованих) сталей складає 570...600°C («м'яке азотування»), а для шкідкорізальних сталей 550...560 ° [5].

При змінні температурного режиму у бік більших температур оброблення відбувається зменшення вмісту азоту в дифузійному шарі, при цьому вміст вуглецю може як збільшуватися безперервно до певної температури так і почати знижуватися потім. Таким чином, в залежності від властивості середовища насичувати поверхневий шар вуглецем максимальне його насичення може досягатися при різних значеннях температур.

Процес сумісної дифузії азот з вуглецем в поверхневий шар деталі може суттєво впливати на швидкість процесу насичення поверхневого шару вуглецем, а також на глибину проникнення вуглецю. Це можна пояснити тим, що наявність у середовищі азоту сприяє інтенсивному вуглецюванню сталі зі зниженням температурної області існування  $\gamma$ -заліза і цей процес відбувається при більш низьких температурах, ніж температура цементації. При надмірному насиченні сталі азотом і в поверхневому шарі можуть утворюватися карбонітридні фази азоту, що призводить до ускладнення дифузії вуглецю в сталь.

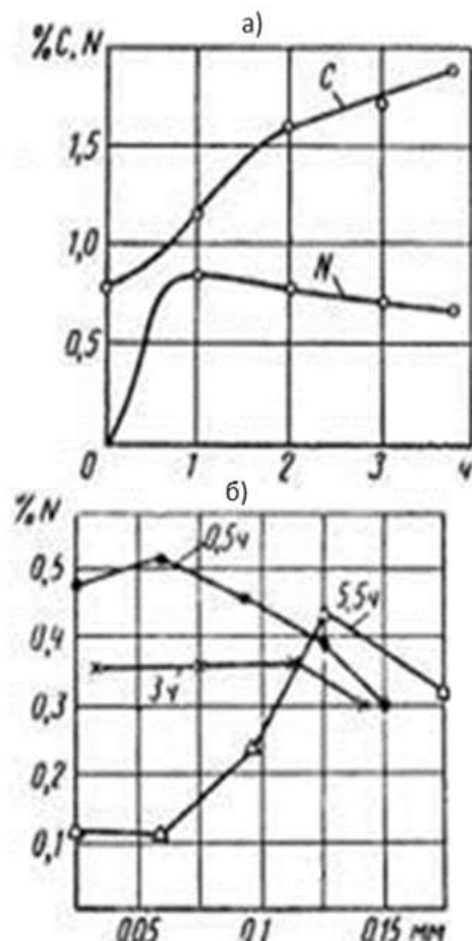
При нітроцементації процес насичення відбувається у дві стадії, які відрізняються одна від одної за кінетикою. На першій стадії, яка має тривалість 1...3 год., поверхневий шар деталі насичується вуглецем і азотом одночасно. Під час другої стадії продовжується процес насичення вуглецем та додаються процеси десорбції азоту, а також поступовий перехід з поверхні металу в газове середовище частини вже абсорбованих атомів азоту (рис. 1.2). Авторами доведено, що процес десорбції азоту є результатом кінетичної взаємодії атомів азоту і вуглецю в сталі, а не наслідком зміни хімічного складу газової фази, яка повинна підтримуватися постійною [4].

З підвищенням температури нітроцементації в тонкій стрічці поверхні та у поверхневій зоні дифузійного шару може відбуватися процес збільшення

вмісту вуглецю і зменшення вмісту азоту, при цьому співвідношення елементів буде мати лінійний характер (див.рис. 1.2) [4].

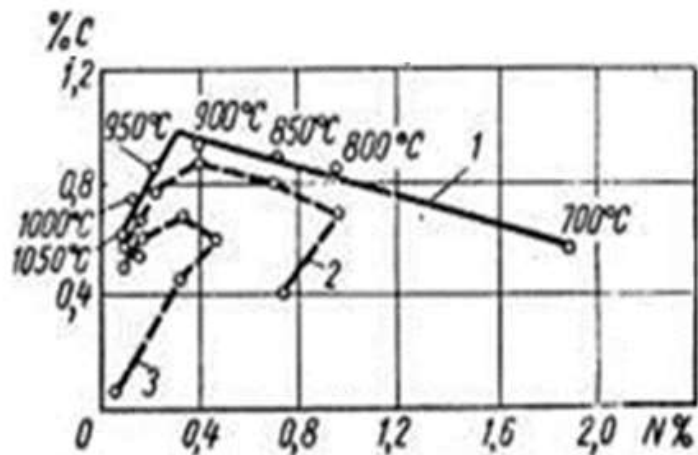
Зі збільшенням товщини дифузійного шару ця залежність може порушуватися (рис. 1.3). Також вона змінюється і при підвищенні температури, що також підтверджується закономірністю впливу температури нітроцементатації на вміст карбону в дифузійному шарі. [5].

Таким чином, механізм взаємодії вуглецю і азоту при нітроцементатації можна пояснити їх спільною дифузією у поверхневий шар деталі, що призводить до зниження швидкості проникнення одного елемента та майже повного гальмування процесу проникнення іншого елемента.



а – вуглецю і азоту; б – азоту в поверхневому шарі.

Рисунок 1.2 - Вплив часу нітроцементатації на вміст елементів у поверхневому шарі [4].



вміст вуглецю на глибині: 1- 0,15 мм; 2 - 0,3 мм; 3 – 0,6 мм.

Рисунок 1.3 - Залежність вмісту вуглецю та азоту в поверхневому шарі від температури нітроцементатації [5].

Нітроцементатація має наступні переваги перед газовою цементатацією:

- Нижче температура протікання процесу (850...870°C замість 900...930 °C);
- Швидкість протікання процесу не змінюється або збільшується;
- На поверхні нітроцементованих деталей та робочих частинах печі та нагрівача не виділяється сажа;
- Підвищується зносостійкість деталей за рахунок насичення поверхні азотом;
- Менше викривлення деталей за рахунок нижчої температури.

В якості середовища при нітроцементатації можуть застосовуватися гази та рідини. В якості газового середовища використовують суміш яка складається з 2...10% аміаку і 90...98% вуглецевих газів. У робочу зону муфельної печі вуглецевий газ і аміак подають окремо. Найчастіше цей процес відбувається при температурах 850...870°C після чого деталі піддаються обробленню загартуванням та низьким відпусканням [5].

Від вибору типу середовища досить сильно залежить результат мікротвердості після нітроцементатації, що показано у вигляді схеми на рис. 1.4.

Найефективнішим для показників твердості буде використання в якості середовища: повітря, газу та каталізатору.

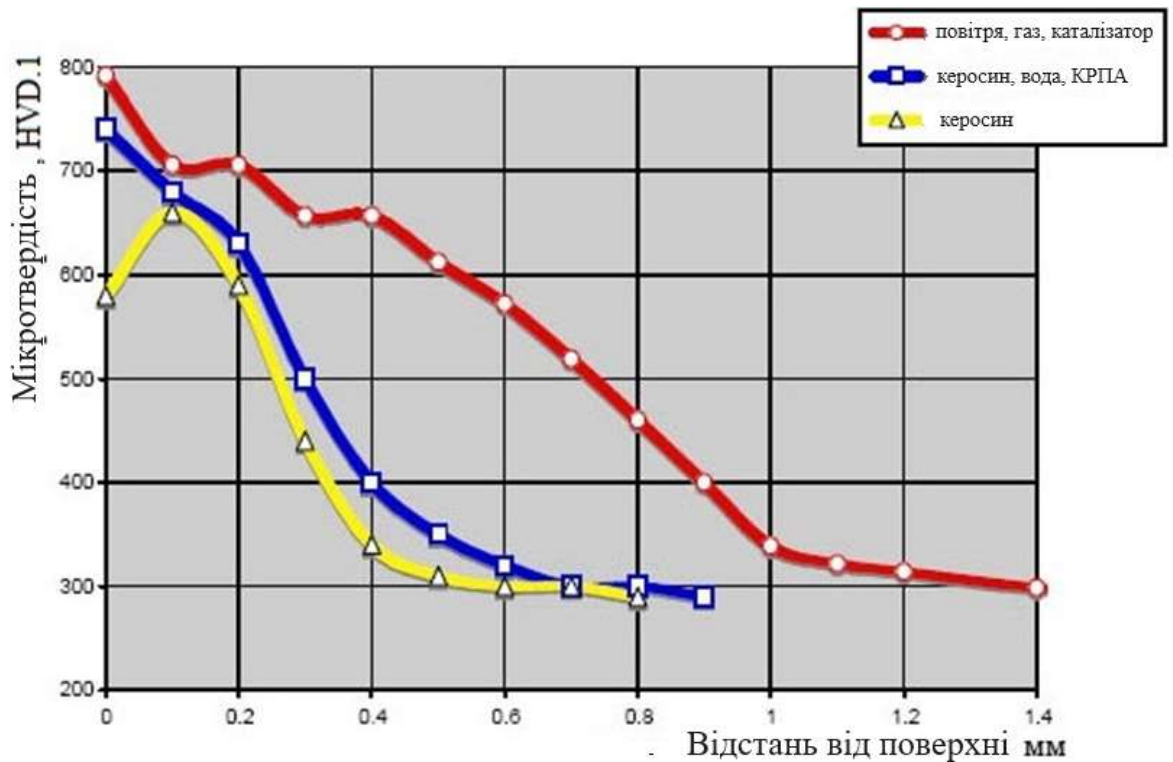


Рисунок 1.4 – Залежність мікротвердості від типу середовища при нітроцементациї [6]

При нітроцементациї потрібно суворо контролювати ступінь поверхневого насичення. Лише при оптимальному сумарному вмісті в нітроцементованому шарі вуглецю і азоту забезпечується отримання у сталі оптимальних механічних властивостей [7]. При перенасиченні азотом в шарі з'являється темна складова (видима тільки на нетравлених шліфах), різко знижує властивості сталі. Оптимального вмісту вуглецю і азоту в шарі неприпустимо досягати шляхом обезвуглецювання і дозування в кінці процесу або при нагріванні під загартування, так як міцність при цьому буде істотно знижуватися аналогічно тому, як це відбувається при цементациї.

Зазвичай після нітроцементациї мікроструктура поверхневого шару деталі складається з дрібногочатого мартенситу та включень карбонітридів, які рівномірно розподіляються за площиною, а також залишкового аустиніту

у кількості 25...30%. При цьому показники твердості поверхневого шару деталі після послідуєчих операцій гарту та низького відпуску можуть мати значення 58...60HRC.

Нітроцементацию найчастіше проводять для таких деталей як шестерні або зубчасті колеса зі складною формою поверхнів.

### **1.3 Структура та властивості нітроцементованого шару**

При оптимальних умовах насичення структура нітроцементованого шару має складатися з мартенситу, невеликої кількості карбонітридів та деякої кількості залишкового аустеніту; структура серцевини з троостосорбіту, бейніту або маловуглецевого мартенситу. У нітроцементованому шарі таких деталей як автомобільні шестерні, для забезпечення безшумної роботи та високої прироблюваності допускається наявність у структурі значної кількості залишкового аустеніту.

У випадку, якщо після нітроцементации виріб буде проходити шліфування, наявність великої кількості залишкового аустеніту небажана, так як він не тільки знижує механічні властивості, але й сприяє виникненню тріщин при шліфуванні.

В американській практиці вважається допустимим вміст в нітроцементованому шарі залишкового аустеніту у кількості, при якій твердість після загартування не нижче 60 HRC. Частіше твердість шару складає 58...64 HRC. Розподіл твердості за товщиною нітроцементованого шару показано на рис. 1.5. Знижена твердість на поверхні пов'язана з високим вмістом залишкового аустеніту до 40...50%.



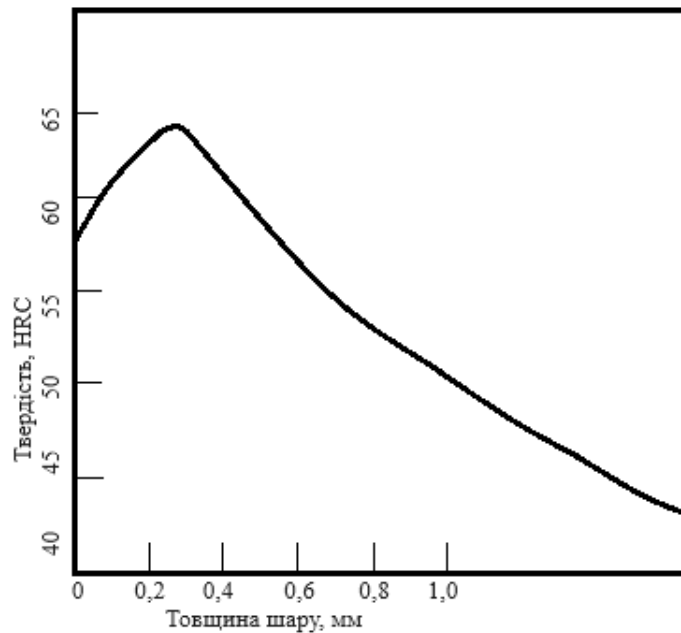


Рисунок 1.5 - Розподіл твердості за глибиною нітроцементованого шару.

Нітроцементация сильно підвищує межу витривалості при згинанні  $\sigma_{-1}$ . Максимальна величина межі витривалості після нітроцементации досягається при меншій товщині шару в порівнянні з цементацией. З підвищенням міцності серцевини до  $\sigma_b=1400\dots1500$  МПа межа витривалості зростає, а далі знижується.

Контактна міцність після нітроцементации тим вища, чим більша товщина шару та вище твердість серцевини.

Зносостійкість нітроцементованої сталі на 40...60% вище цементованої. Зі збільшенням кількості залишкового аустеніту зносостійкість нітроцементованої сталі зменшується.

При мартенситно-аустенітній структурі механічні властивості великою мірою залежать від величини зерна. При зменшенні величини зерна з 2 на 14 балів зернистості межа втоми нітроцементованих зразків зростає у два рази, а міцність при згинанні в 1,7 разів. Всі методи подрібнення зерна сприяють підвищенню конструктивної міцності нітроцементованих виробів.

Максимальні показники міцності досягаються тільки при оптимальному вмісті на поверхні нітроцементованого шару вуглецю та азоту. Оптимальний

вміст вуглецю для низьколегованих сталей складає 0,7...0,9%. При більш низькій концентрації вуглецю, внаслідок утворення нітридів, відбувається збідення азотом та легуючими елементами аустеніту. Після загартування такий аустеніт зазнає частковий розпад з утворенням двооститної сітки на всю протяжність зони маловуглецевого мартенситу. У такому випадку твердість нітроцементованого шару буде знижена.

При високому вмісті азоту в сталі, яка містить у собі також хром, манган та титан, може відбуватися процес утворення карбонітридів, які у вигляді суцільної або розірваної сітки можуть розташовуватися по межах зерен. Цей процес може призвести до різкого зниження стійкості аустеніту та призвести до утворення трооститу. Утворення сітки карбонітридів та трооститу призводить до зниження показників витривалості, пластичності та в'язкості сталі.

Для отримання оптимальних механічних властивостей при нітроцементзації необхідно регулювати не тільки вміст вуглецю, але і азоту, якого у поверхневому шарі деталі повинно бути саме така кількість, яка призведе до усунення шкідливих наслідків внутрішнього окислення. Оптимальна кількість азоту в нітроцементованому шарі складає 0,3...0,35% [5].

#### **1.4 Деформація шестерен при різних режимах хіміко-термічної обробки**

Для редукторів та приводів у авіаційній промисловості застосовуються шестерні з високою точністю. При звичайних режимах хіміко-термічної обробки вони схильні до значної деформації та жолоблення. Тому завершальною операцією їх виготовлення є малопродуктивне шліфування

профілю, при якому виникають припали робочих поверхонь та розтягуюча напруг, що значно знижує працездатність шестерен.

При виготовленні точних шестерен жолоблення може виникати не тільки в період дифузійного насичення та гартування, а також і в період нагріву деталей, якщо під час механічної обробки вони отримали великий наклеп. Дослідження впливу різних режимів хіміко-термічної обробки виконувалось після відпрацювання режимів різання та інструменту. Найменший наклеп отримували при виготовленні шестерен гострим інструментом.

Для порівняння розмірів деформації, шестерні піддавалися дифузійному насиченню з різною глибиною нітроцементациї. Досліджувався вплив температури насичення, кількість нагрівів та спосіб гартування. Найменше жолоблення шестерні отримували під час нітроцементациї з температурою насичення  $850^{\circ}\text{C}$  та застосування безпосереднього гартування у гаряче мастило з температурою  $(170\pm 5)^{\circ}\text{C}$  з витримкою 10 хвилин та перенесенням у холодне мастило (ступінчасте загартування). Таке загартування сприяє вирівнюванню напруг, що виникли у період структурного перетворення у серцевині. При охолодженні у холодному мастилі перетворення відбуваються тільки в шарі та напруги, що виникли при цьому діють вже на загартовану серцевину.

Шестерні, що обробленні за таким режимом, отримали деформацію у межах  $0,02\dots 0,03$  мм, тобто у межах допуску на їх виготовлення.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ТА МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для даної роботи об'єктом дослідження обрано деталь «Шестерня» з високоякісної конструкційної сталі 14ХГСН2МА-Ш (рис. 2.1).

Нітроцементації підлягають тільки поверхні зубців, на інших поверхнях не передбачено зміцнення.



Рисунок 2.1 – Фото деталі «Шестерня»

#### 2.1 Характеристика та умови використання деталі «Шестерня»

Шестерня відноситься до основних деталей зубчастої передачі, яка має вигляд диска із зубами на циліндричній або конічній поверхні. Ці зуби входять

в зачеплення з зубами іншого елемента зубчастої передачі та мають призначення передавати руху між елементами зубчастого механізму.

Основні навантаження зосереджені на зубцях. На них діє обертальний момент, який створює навантаження, що розподілені по їх контактних лініях. Деталь шестерня працює у складних умовах, під дією тертя та знакозмінних статичних, циклічних, динамічних навантажень.

Найбільш частою причиною з ладу шестерен є руйнування поверхні зубців внаслідок контактної втоми. Також у шестерен спостерігається торцевий знос, а довготривалі навантаження призводять до втомного руйнування зубців у небезпечному перерізі. Іноді їх руйнування відбувається і від одноразового навантаження (перевантаження). Серцевина деталі піддається динамічним напруженням згину.

У зв'язку з вищеперелікованим можна сформулювати наступні вимоги до деталі шестерня. Серцевина повинна мати високу в'язкість для сприйняття напружень згину. Зубці повинні мати високу твердість, зносостійкість та контактну витривалість для запобігання викришуванню та контактній втомі. Досягнути цих властивостей можна шляхом проведення хіміко-термічної обробки.

## **2.2 Матеріал деталі «Шестерня»**

Деталь «Шестерня» виготовляється за сталі 14ХГСН2МА-Ш. Сталь марки 14ХГСН2МА-Ш: високоякісна, конструкційна, легована сталь, отримана методом шлакового переплаву. Містить 0,14 % вуглецю, 1,0 % хрому, 1,0 % марганцю, 1,0 % кремнію, 2,0% нікелю, 1,0 % молібдену, а також фосфор та сірку, але у зниженому вмісті, які впливають на властивості сталі.

Введенням легуючих елементів в сталь можна досить чітко впливати на рівень механічних властивостей, які забезпечують високу ймовірність

отримання якісного виробу та, відповідно, збільшують тривалість експлуатації деталей та механізму в цілому.

Легуючими елементами сталі 14ХГСН2МА-Ш є хром, марганець, кремній, нікель та молібден.

Хром – це хімічний елемент, наявність якого у сталях може призвести до значного підвищення рівня механічних та фізичних властивостей за раунок розчинення його у фериті з утворенням включень у вигляді карбідів, які мають високу твердість. Інший механізм впливу хрому на підвищення показників твердості та міцності сталі можна пояснити зміною дисперсності мікроструктури та коагуляцію її структурних складових.

Також наявність хрому може призвести до зміни фізичних властивостей сталей, а саме до зниження питомої ваги та теплопровідності. Одним із позитивних факторів наявності хрому у хімічному складі є підвищення стійкості сталі до корозійної на повітрі та при дії деяких кислот при кімнатній та підвищених температурах [8].

Хром також призводить до підвищення критичних температур нагрівання сталі під час таких операцій термічного оброблення як відпалта гартування і зменшує показники швидкості охолодження при гартуванні за рахунок підвищення здатності аустеніту до переохолодження. Зі зростанням температури гартування відбувається процес зниження твердості після гарту за рахунок зростання кількості залишкового аустеніту.

Марганець підвищує ударну в'язкість серцевини сталевих деталей, а спільно з хромом ще й сприяє підвищенню тощини шару при гартуванні. Також марганець може сприяти зростанню зерна і підвищенню температури хладноламкості сталі на величину 40...60°C.

Кремній також підвищує ударну в'язкість і покращує температурний запас в'язкості.

Нікель знижує критичну швидкість охолодження сталі. Він досить сильно знижує схильність металу до крихкого руйнування після гартування та відпускання. При цьому спостерігається підвищення опіру сталі до

окисленню при нагріванні та зростають показники міцності при високих температурах, що спричиняє одержання високої платичності матеріалу та ударної в'язкості.

Молібден це хімічний елемент, введення якого до складу сталі призводить до утворення дрібнозернистої структури, що, відповідно, призводить до підвищення величини гартування деталі, а також перешкоджає утворенню крихких структур, які можуть виникати при повільному охолодженні в процесі відпалювання.

Сірка є досить шкідливою домішкою для сталевих деталей і тому необхідно регламентувати її вміст, який повинен бути на рівні значень 0,035...0,06 % [9]

Фосфор є шкідливою домішкою і його вміст в залежності від якості сталі допускається не більше 0,025...0,045 %. [9]

### **2.3 Металографічні дослідження**

Металографія – це наука про внутрішню будову поверхневого шару та серцевини деталі, які впливають на показники фізичних властивостей матеріалів. За допомогою вивчення макро- та мікроструктур можна дослідити закономірності їх утворення, а також пояснити причину зміни показників властивостей металу заготовки.

Завданням металографічного дослідження є встановлення взаємозв'язку між якісними і кількісними характеристиками структури, фізичними, механічними, хімічними, технологічними та експлуатаційними властивостями матеріалів.

Метою металографічного аналізу є визначення мікроструктури і фазового складу сталей, оцінка їх кількісних показників, а також співвідношення між розмірами та формою часточок у структурі та розподілу

різних фаз за площиною зразка. Цей аналіз дозволяє також встановити зв'язок між хімічним складом матеріалу деталі, технологічними процесами її виробництва, подальшої обробки та структурою і властивостями готової деталі.

Для визначення мікроструктури та хімічного складу шестерні дослідження проводили за допомогою оптичного мікроскопу Axioobserver D1M «Carl Zeiss» (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Фото металографічного мікроскопу Axioobserver D1M.

Металографічний мікроскоп дозволяє спостерігати непрозорі об'єкти у відбитому світлі. У цьому основна відмінність від біологічної мікроскопії. Для проведення металографічного аналізу необхідно приготувати металографічний шліф. Поверхня шліфу має відповідати наступним вимогам:

- мати ідеально плоску поверхню (без «застрягань»), що дасть змогу вивчати структуру при великому збільшенні;



- мати максимально можливу відбивну здатність поверхні без наявності на ній подряпин чи отворів;

- відбивати світло можуть різні ділянки поверхні по-різному.

Для виготовлення металографічних шліфів необхідно виконати наступні операції:

- вирізати зразки для дослідження;
- підготування поверхню зразка;
- провести шліфування поверхні ;
- провести полірування поверхні;
- за необхідності, провести травлення.

Всі операції підготовки зразка до дослідження необхідно виконати так, щоб на його поверхні залишився мінімальний шар деформованого металу, а також були відсутні подряпини, різноманітні риски, ямки та забруднення.

У даній роботі зразки були маленьких розмірів, так як вирізалися з самої деталі, яка має не надто великі розміри, саме тому після вирізання зразки було залито пластмасою (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Фото зразків залитих у пластмасову форму

Шліфування виконувалося на шліфувально-полірувальному верстаті з горизонтально розташованим обертальним колом.

Отримані шліфи піддавали хімічному травленню 7-ми % спиртовим розчином азотної кислоти.

## 2.4 Випробування металу на твердість

Твердість металевого поверхневого шару деталі значно впливає на довговічність роботи деталей. Від показників твердості металу залежить також і міцність деталі та стійкість її поверхні до стирання.

Для визначення твердості досліджуваної сталі було застосовано метод Роквела.

Метод вимірювання твердості за Роквелом регламентований ДСТУ ISO 6508-1:2013 [3].

Для визначення твердості за цим методом було використано твердомір прилад типу ТК-2 (рис. 2.4).



Рисунок 2.4– Твердомір для металів ТК-2.

Твердість по методу Роквела визначалася шляхом втискання індентора в поверхневий шар деталі.

## 2.5 Хіміко-термічна обробка деталі шестерня

Для того щоб шестерня мала високий рівень механічних (твердість) та експлуатаційних властивостей (зносостійкість, довговічність) вона повинна мати тверху поверхню та в'язку серцевину. Для досягнення цієї задачі необхідно провести термічну та/ або хіміко-термічну обробку.

Перед процесом хіміко-термічної обробки, необхідно провести попередню підготовку деталі. Такою підготовкою є механічне оброблення та операції термічного оброблення шестерні.

Одним із таких методів термічного оброблення можна вважати відпал, так як після нього відбувається значне змінення структури (подрібнюється зерно, зникає цементитна сітка та інші), що призводить до значного зниження твердості шестерні, яке може утворитися після проходження операцій обробки металів тиском та різанням. Отже відпал це технологічний процес обробки, який призводить до фазової перекристалізації металу, яка відбувається при нагріванні сталі вище  $A_{c3}$  з подальшим повільним охолодженням у печі. При цьому структурна деталі за своєю будовою наближається до рівноважної.

Деталь перед операцією нітроцементатія має відповідати наступним умовам:

- шорсткість поверхней, що підлягають нітроцементатії мають бути не більше  $2.25\sqrt{}$ ;
- відсутність гострих крайок;
- відсутність подрізів;
- відсутність корозії;

- відсутність окалини;
- відсутність слідів від мастила.

Досліджування деталей шестерня має поверхні, що не підлягають нітроцементації. Такі поверхні слід захистити від насичення вуглецем та азотом. Існує декілька варіантів захисту поверхонь, що не підлягають нітроцементації.

1. Одним з методів є захист за допомогою припусків, тобто при проектуванні збільшується товщина деталі на поверхнях, що не підлягають нітроцементації на подальшу механічну обробку. Тобто деталь проходить нітроцементації кругом, після чого механічно оброблюються поверхні, що не мають бути нітроцементованими.

2. Захист за допомогою гальванічних покриттів.

3. Використання захисних фарб.

Захист за допомогою припусків не є доцільним у зв'язку з високою трудомісткістю процесу так як дана деталь має складну конфігурацію.

При нанесенні на складні поверхні мідних покриттів може з'явитися дефект за рівномірністю його товщини. А також вплив високоактивного газового карбюратора на стан покриття, наслідком є велика кількість пор після нітроцементації та сліди пробиття у таких порях.

У нашому випадку було використано комплексний метод захисту поверхонь, що включає нанесення гальванічного покриття та захист фарбами (рис. 2.5).

Нітроцементацію деталі здійснювали при температурі 850°C протягом 8 год 30 хв у шахтній печі у газовому середовищі. Шестерня під час процесу була поміщена у спеціальне оснащення з технологічними прорізами для вільної циркуляції газу.

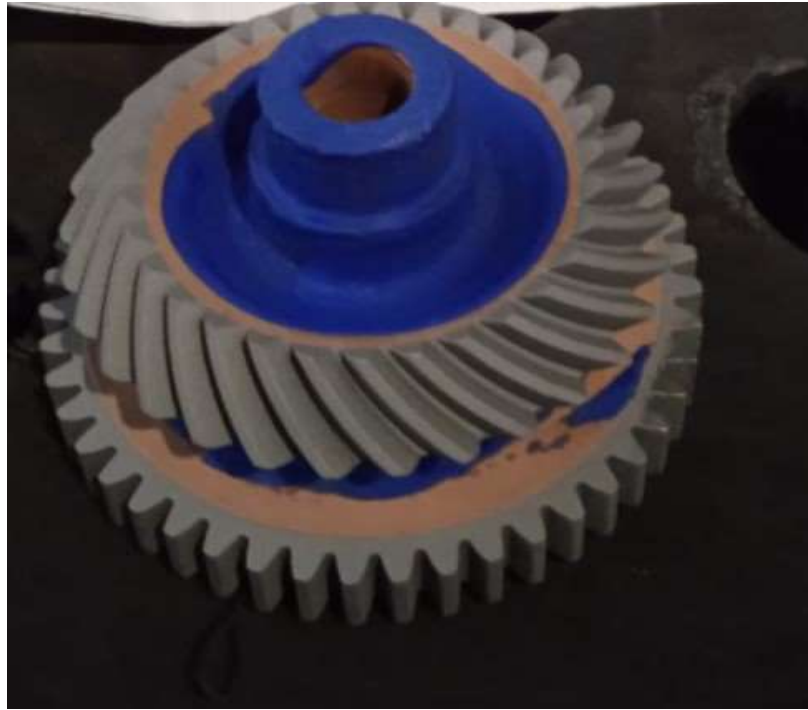


Рисунок 2.5 – Фото шестерні з нанесеним гальванічним покриттям та захисною фарбою.

Після нітроцементації виконано операцію відпал при температурі  $630^{\circ}\text{C}$  протягом 3 годин.

Для виправлення перегрітої при нітроцементації структури та отримання необхідної поверхневої твердості після нітроцементації необхідна додаткова термічна обробка.

Гартування шестерні. Витримка при температурі  $850^{\circ}\text{C}$  протягом 1 години 30 хвилин з подальшою видачою у масло. Операція виконується з метою зміцнення поверхні зубців шестерні.

Для зменшення кількості залишкового аустеніту у шарі, що значно знижує контактну міцність, було виконано операцію обробка холодом при температурі  $-60^{\circ}\text{C}$  протягом 1 години.

Заключною операцією термічної обробки шестерні є низький відпуск при температурі  $230^{\circ}\text{C}$  протягом 3 годин, що знімає напруги і поліпшує механічні властивості.

## РОЗДІЛ 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛІ

#### 3.1 Результати дослідження структури та властивостей деталі

Деталь після попередньої термообробки та механічного оброблення досліджується для покращення її структури та властивостей, що на пряму впливає на термін її експлуатації.

Досліджували мікроструктуру різних зон деталі, а саме– поблизу поверхні зубців (рис. 3.1) та основи деталі (рис. 3.2), у серцевині зубців (рис. 3.3) та їх основи (рис. 3.4)



Рисунок 3.1 – Мікроструктура поблизу поверхні зубців; x500.

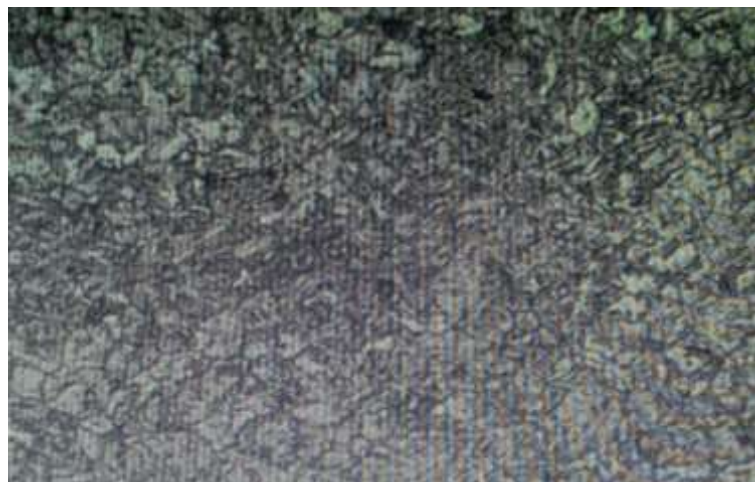


Рисунок 3.2 – Мікроструктура поблизу основи деталі; x500.

Мікроструктура деталі всіх досліджуваних поверхонь однорідна, представляє собою сорбіт, так як сталь ще не піддавалася нітроцементації з подальшим термоциклічним обробленням, особливих відмінностей не має.

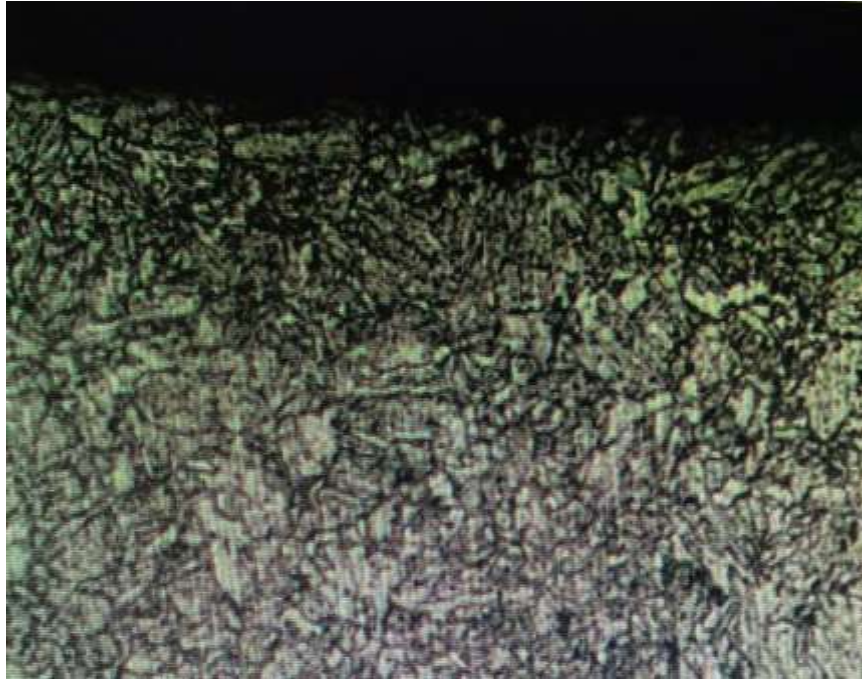


Рисунок 3.3 – Мікроструктура у серцевині зубців; x500.

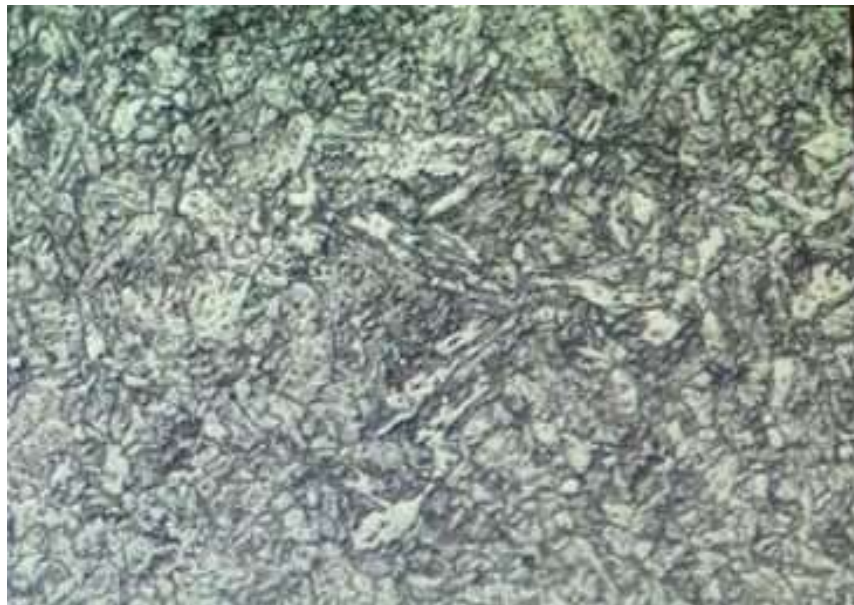


Рисунок 3.4 – Мікроструктура у серцевині деталі; x500.

Після цього досліджувану деталь шестерня піддали нітроцементації при температурі 850°C з послідуочим відпалом при температурі 630°C.

Проміжковий відпал після нітроцементації сприяє покращенню зносостійкості нітроцементованого шару. Це зумовлено особливістю будови мікроструктури нітроцементованого шару, яка характеризується наявністю дрібногольчатого азотистого мартенситу з рівномірно розподіленим залишковим аустенітом з включенням мікроскопічних карбонітрідів глобулярної форми.

Мікроструктурним дослідженням встановлено, що на поверхні зубчатого вінця присутній нітроцементований шар глибиною 0,8 мм (рис. 3.5).

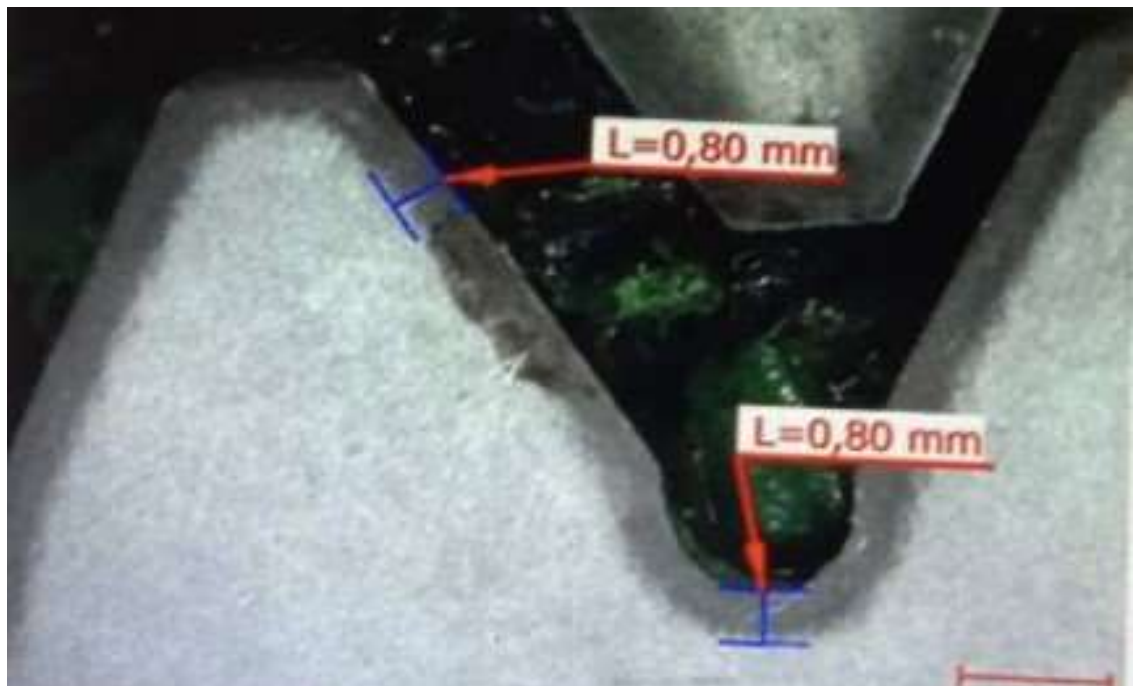


Рисунок 3.5 – Поверхня зубчатого вінця; х6,5.

Мікроструктура нітроцементованого шару представляє собою сорбіт з наявністю глобулярних надлишкових карбонітрідів, що залягають на глибину 0,105 мм від поверхні (рис. 3.6).





Рисунок 3.6 – Мікроструктура нітроцементованого шару з наявними карбонітридами; x200

Кисень відноситься до поверхнево активного елементу в аустеніті та сприяє утворенню глобулярних карбонітрідів. Мікроструктура нітроцементованого шару глибше 0,105 мм представляє собою сорбіт, а надлишкові карбонітриди фактично відсутні (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Мікроструктура нітроцементованого шару; x500

Мікроструктура серцевини представляє собою ферит та сорбіт, що характерно для маловуглецевої сталі, що не піддавалася зміцнюючий термічній обробці – гартуванню, холоду та відпуску (рис. 3.8).

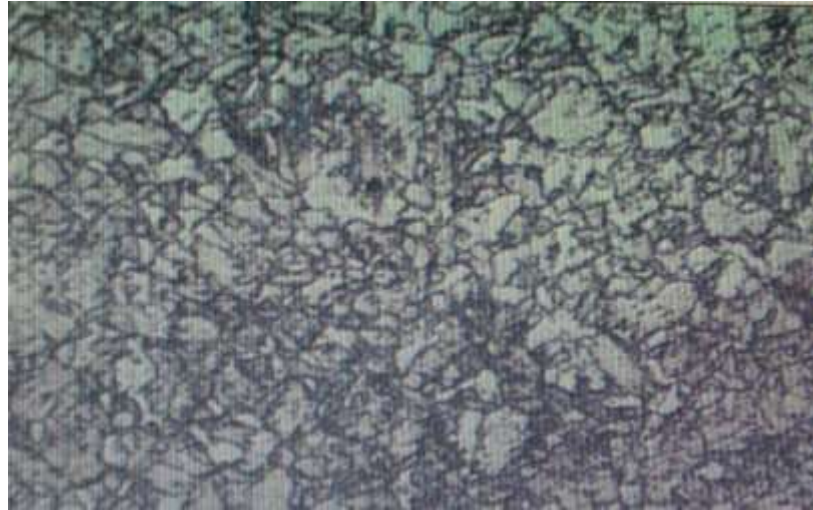


Рисунок 3. 8 – Мікроструктура серцевини; x500.

Після цього деталь пройшла наступні операції: гартування, обробка холодом та низький відпуск.

Проведення обробки холодом та відпуск знижує кількість залишкового аустеніту у нітроцементованому шарі та сприяє появі продуктів низькотемпературного розпаду мартенситу у вигляді пластинчатих виділень, що добре видимі при великому збільшенні.

Мікроструктурним дослідженням встановлено наявність нітроцементованого шару глибиною 0,71 мм на поверхні зубів зубчастого вінця, що характерно для тривалості часу витримки деталі при нітроцементатії 8 годин 30 хвилин.

Мікроструктура нітроцементованого шару на зубцях представляє собою дрібноголчастий мартенсит і дисперсні карбонітриди (рис. 3. 9).

У поверхневій зоні при великих збільшеннях видно голки мартенситу, що розташовані за направленням скупчення дрібнодисперсних карбонітридів.

Їх утворення йде по лініях скупчення карбонітридів, які об'єднують аустеніт легуючими та дифундуючими елементами. Так як дрібних карбонітридів у цих зонах багато, мартенсит виходить дрібногольчастий.



Рисунок 3. 9 – Мікроструктура нітроцементованого шару; x500.

Мікроструктура серцевини деталі представляє собою маловуглецевий мартенсит (рис. 3. 10), що повністю відповідає вимогам структури сталі після нітроцементациї.

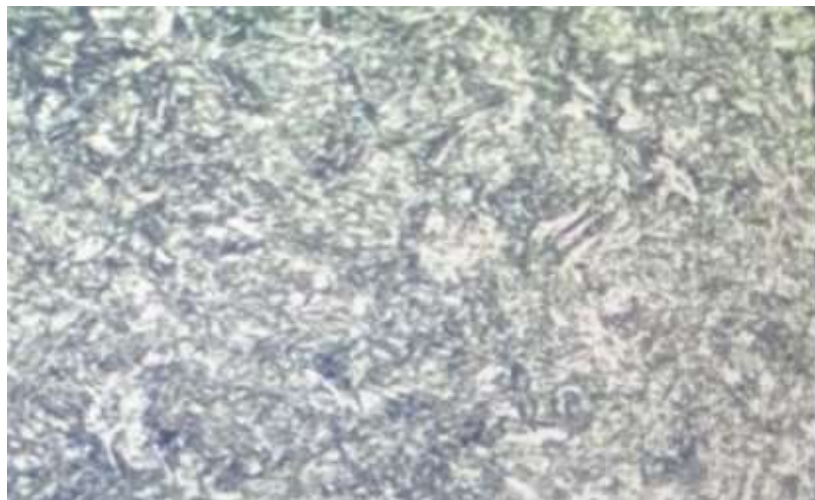


Рисунок 3. 10 – Мікроструктура серцевини; x500

### 3.2 Оптимізація режимів зміцнення поверхневого шару деталі

Основною операцією зміцнення поверхні шестерні є нітроцементація. Вибір режимів нітроцементації залежать від багатьох факторів: хімічного складу матеріалу, мікроструктури, товщини шару, на який необхідно провести зміцнення.

Зазвичай процес нітроцементації виконують, як це описано у розділі 1. Нітроцементація з температурою насичення  $850^{\circ}\text{C}$  та застосування безпосереднього гартування у гаряче масло і після цього низький відпуск. Тобто відпал у цьому випадку не застосовується та обробка холодом відсутня, така хіміко-термічна обробка не є доцільно. Операції відпал та обробка холодом забезпечують мінімальну кількість залишкового аустеніту у нітроцементованому шарі, що значно впливає на термін експлуатації деталі шестерня.

Пропоную виконувати після звичайної нітроцементації додаткову термоциклічну обробку, що полягає у проміжному відпалі, гартуванні, обробці холодом та низькому відпуску.

### 3.3 Розрахунок показників довговічності деталі

Термін експлуатації деталі шестерня залежить від матеріалу, виду навантаження, режимів при термічній обробці, правильності конструкції вузла, точності розрахунків. 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. 3.11.

Таблиця 3.1. Статичні показники міцності матеріалу шестерні

Статичні показники	Види обробки матеріалу					Стандартна обробка
	Після мех.обр.	Нітроцементация + відпал		Гарт + обробка холодом + відпуск		поверхня
		поверхня	центр	поверхня	центр	
Межа міцності, МПа	970	920	920	2160	1220	1260
Твердість, HRC	31	29	29	60	40	41

До динамічних показників відносяться допустимі контактні напруження, напруження згину, контактна витривалість та витривалість при згинанні (рис.3.11).

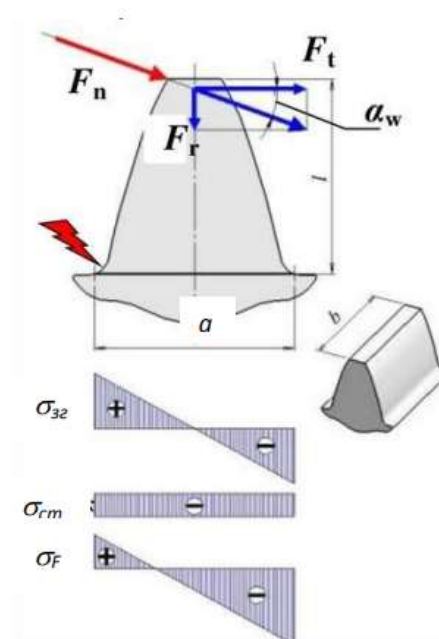


Рисунок 3. 11 – Схема до розрахунку зубів колеса на витривалість при згині [16].

Для прогнозування динамічних показників довговічності зубчастого колеса необхідно визначити наступні показники [11, 12], також використовуючи для розрахунків дані 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 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;

$Y_\beta$  - коефіцієнт, що враховує нахил зуба;

$Y_\varepsilon$  – 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, нітроцементзації з відпалом та термоциклічного оброблення шестерні наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Розраховані значення динамічних показників довговічності деталі шестерня.

Розраховані показники	Стандартна обробка	Мех. Обр.	Нітроцементация + відпал		Гарт + обробка холодом + відпуск	
		поверхня	поверхня	центр	поверхня	центр
$\sigma_H \text{ lim}_{зк}$	603	465	441	441	1045	588
$(\sigma_H)_{зк}$	548	423	401	401	950	534
$\sigma_F \text{ lim}_{зк}$	535	415	391	391	763	523
$(\sigma_F)_{зк}$	315	244	230	230	449	308
$\sigma_F$	195	195	195	195	195	195

Аналіз проведених розрахунків на довговічність деталі «Шестерня» показав, що обрана сталь та розроблені режими покращення поверхневого шару деталі призвели до збільшення показників довговічності.

## ВИСНОВКИ

В процесі виконання роботи було розроблено ефективний технологічний процес нітроцементації деталі «Шестерня» для підвищення її довговічності:

1. Проведено оптимізацію хімічного складу сталі для деталі «Шестерня» в результаті якого було обрано сталь – 14ГХСН2МА-Ш.
2. Проведено оптимізацію режимів нітроцементації та термоциклічного оброблення деталі та досліджено його структуру, які показали, що комплексне застосування нітроцементації та термоциклічного оброблення (гартування та обробка холодом з послідуєчим відпуском) значно краще впливають на показники довговічності деталі.
3. Проведено розрахунки довговічності деталі «Шестерня», які показали, що обрана сталь та розроблені режими покращення поверхневого шару деталі призвели до збільшення показників довговічності.
4. Результати досліджень було випробувано на підприємстві та можна зробити висновок, що розроблена технологія повністю відповідає вимогам до деталі.



## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Бондаренко С.І., Карпенко В.О., Нестеренко О.А., Пірогова Л.В. Характер і причини руйнування шестерень дорожньо-будівельних і сільськогосподарських машин. Вестник ХНАДУ. - Вип. 54. - 2011.
2. Погребна Н. Е., Куцова В. З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро:НМетАУ, 2021. – 89 с.
3. Мак-Мак Н. Є. Дисертація створення матестабільних станів та зміцнення конструкційних сталей способами термічної та хіміко-термічної обробки. Маріуполь, 2019. 235 с.
4. Основи матеріалознавства: Навчальний посібник. / Уклад.: Іваненко І. М. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 190 с.
5. Костик К. О., Костик В. О., Долженко А. С., Нікіфорова С. В. Швидкісний метод нітроцементациї легованої сталі: Вісник НТУ «ХПІ» №14 2015. – 41 с.
6. Ціанування і нітроцементация сталі: технологія та призначення [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://vseznayko.com.ua/cianuvannja-i-nitrocementacija-stali-t.html>
7. Хижняк В. Г., Курило Н. А., Більченко О. В. Вплив ступеня дисоціації аміаку на структуру та властивості неіржавіючих азотованих сталей, 2009. – 34 с.
8. Сушко О. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: Навчальний посібникю – Мелітополь: ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2010. -232 с.
9. Руденко Л.Ф. Леговані сталі та сплави: навч. Посібник. / Л.Ф. Руденко, Т.П. Говорун. Суми : Сумський державний університет, 2012. 171 с.]
10. ДСТУ ISO 6508-1:2013 Металеві матеріали. Визначення твердості за Роквеллом. Частина 1. Метод випробування (шкали А, В, С, D, E, F, G, H, K, N, T) (ISO 6508-1:2005, IDT). Діючий. Введений в дію 01.07.2014

11. Інженерна механіка (Деталі машин): посібник-практикум (Частина 1) /[Дереза О.О та інші] Мелітополь: ВЦП «Люкс». – 2020. – 143с.
12. 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 σ <sub>в</sub> , МПа	Границя текучості σ <sub>т</sub> , МПа	Твердість, НВ (HRC) [HV]	
					серцевини	поверхні
1	2	3	4	5	6	
Сталь 45	до 100	Нормалізація	590	300	187-217	
	100-300		570	290		
	300-500		550	280		
	60-90	Поліпшення	800	440	207-238	
90-120	780		390	194-222		
160-260	700		340	180-207		
-	Гартування об'ємне	900	650	(40-50)		
-	Гартування СВЧ	750	450	207-238	(45-55)	
Сталь 50	до 100	Нормалізація	610	330	180-220	
	100-300		590	300		
	300-500		570	280		
	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	Нормалізація	980	740	215-229	
	100-180		900	690		
180-250	780		640			
до 140	Поліпшення	1080	840	235-280		
150-300		930	740			
Сталь 35Х	до 80	Нормалізація	940	740	190-241	
	80-100		740	490		
	100-200		690	440		
	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 60 100-200 200-300	Нормалізація	980	790	200-230	
	до 120 120-150 180-250		760	490		
	740		490			
	до 120 120-150 180-250	Поліпшення	930	690	257-285	
	880		590	243-271		
	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 60-100 100-300	Нормалізація	980	790	220-250	
	840		590			
	790		570			
	до 150 150-180 180-250	Поліпшення	930	690	265-295	
	880		590	250-280		
	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 150 150-400	Нормалізація	840	400	190-229	
	800		370			
до 100 100-200	Поліпшення	890	600	241-285		
830		560				
20Г, 12ХН2, 18Х, 18ХГТ, 20Х	-	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 $\sigma_B$ , МПа	Границя текучості $\sigma_T$ , 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		$\sigma_{Hlim}$	$\sigma_{Flim}$	$[\sigma]_{Hmax}$	$[\sigma]_{Fmax}$
	серцевини	поверхні				
Нормалізація, поліпшення	$\leq 350$		2HB+70	HB+260	$2,8\sigma_T$	2,7HB
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:

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