

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет  
(повне найменування факультету)

Фізичне матеріалознавство  
(повне найменування кафедри)

**Пояснювальна записка**

до дипломного проєкту (роботи)

бакалавр

(ступінь вищої освіти)

на тему Вибір оптимальних параметрів хіміко-термічної обробки зубчастих колес  
(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи ІФ-210

Спеціальності 132 Матеріалознавство

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

ЗАЦЕПІНА.В

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник

КЛИМОВ О.В

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**

Факультет Інженерно – фізичний

Кафедра Фізичне матеріалознавство

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 132 Матеріалознавство

(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство

(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ року

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

ЗАЦЕПІН Артемій Володимирович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Вибір оптимальних параметрів хіміко-термічної обробки зубчастих колес

керівник проєкту (роботи) доцент, к.т.н. Климов Олександр Володимирович

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від « » року №

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) ескіз зубчастого колеса, марка сталі 12X2H4A

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) характеристика та умови експлуатації виробу, вимоги до матеріалу, номенклатура виробів та маршрутна технологія їх виготовлення, характеристика матеріалів виробів, розробка режимів та технології термічної обробки, технічний контроль попередження та виявлення дефектів, технічний контроль попередження та виявлення дефектів, спеціальна частина

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

Ескіз зубчастого колеса, номенклатура, хімічний склад та властивості, Вплив температури азотування на структуру, твердість та глибину поверхневого шару, графік термічної обробки зубчастого колеса, види дефектів виробів із цементованих сталей при проведенні то та їх усунення

## 6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	КЛИМОВ О.В, доцент, к.т.н		
2	КЛИМОВ О.В, доцент, к.т.н		
3	КЛИМОВ О.В, доцент, к.т.н		
4	КЛИМОВ О.В, доцент, к.т.н		
5	КЛИМОВ О.В, доцент, к.т.н		
6	НЕСТЕРОВ О.В, доцент, к.т.н		
7	КЛИМОВ О.В, доцент, к.т.н		
	ДЖУС А.В, асистент		

7. Дата видачі завдання «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_20\_\_ року.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Характеристика та умови експлуатації виробу. Вимоги до матеріалу	18.04.2024	
2	Номенклатура виробів та маршрутна технологія їх виготовлення	25.04.2024	
3	Характеристика матеріалів виробів	05.05.2024	
4	Розробка режимів та технології термічної обробки	09.05.2024	
5	Технічний контроль попередження та виявлення дефектів	16.05.2024	
6	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	25.05.2024	
7	Спеціальна частина	05.06.2024	

**Студент(ка)**

( підпис )

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

**Керівник проєкту (роботи)**

( підпис )

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до бакалаврської роботи: 62с., 10 табл., 8 рис., 1 дод., 20 джерел.

### ЗУБЧАСТЕ КОЛЕСО, ВЛАСТИВОСТІ, ГАРТУВАННЯ, ВІДПУСК, МАРТЕНСИТ, ЦЕМЕНТАЦІЯ, МАРШРУТНА ТЕХНОЛОГІЯ

Об'єкт розробки – зубчасті колеса зі сталі 12Х2Н4А.

Метою дипломної роботи є розробка оптимального процесу хіміко-термічної обробки для зубчастих коліс зі сталі 12Х2Н4А з урахуванням умов експлуатації.

Для досягнення необхідних властивостей зубчастих коліс забезпечується раціональним підбором режиму термічної та хіміко-термічної обробки. Попередньо розроблено маршрутну технологію виготовлення деталі, яка включає попередню, основну та додаткову обробку, що виконуються з урахуванням вимог до механічних властивостей та структури сталі 12Х2Н4А.

Застосування післяопераційного контролю властивостей та мікроструктури на різних етапах термічної обробки дозволило виявити можливі дефекти та забезпечити високу якість виготовлених зубчастих коліс.

## ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Характеристика та умови експлуатації виробів,.....	8
вимоги до матеріалів.....	8
2 Номенклатура виробів та маршрутна технологія їх виготовлення.....	11
3 Характеристика обраного матеріалу.....	14
4 розробка РЕЖИМІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ.....	20
4.1 Розрахунок часу нагрівання та витримки.....	28
4.2 Основне обладнання.....	31
4.3 Додаткове обладнання.....	31
5 Методи контролю. Дефекти та способи їх усунення.....	34
6 Охорона праці.....	38
6.1 Фактори небезпеки.....	38
6.2 Заходи по забезпеченню безпеки.....	40
6.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці.....	42
6.4 Заходи з пожежної безпеки.....	45
7 Спеціальна частина.....	47
Висновки.....	53
Перелік джерел посилань.....	55

## ВСТУП

Зубчасті колеса є критично важливими компонентами в багатьох галузях промисловості, включаючи машинобудування, автомобілебудування, авіацію та енергетику. Вони забезпечують передачу крутного моменту і потужності між різними частинами механізмів, що робить їх надійність і довговічність надзвичайно важливими. Одним із ключових аспектів забезпечення високих експлуатаційних характеристик зубчастих коліс є правильний вибір матеріалу та оптимальних параметрів хіміко-термічної обробки.

Хіміко-термічна обробка, зокрема цементація та азотування, дозволяє значно підвищити поверхневу твердість та зносостійкість зубчастих коліс, при цьому зберігаючи їхню ударну в'язкість і міцність. Ці процеси сприяють формуванню зносостійкого поверхневого шару, який здатний витримувати високі контактні навантаження і зменшувати ризик утворення тріщин та інших дефектів.

Метою даної дипломної роботи є вибір оптимальних параметрів хіміко-термічної обробки зубчастих коліс для забезпечення їхньої максимальної довговічності та надійності в умовах експлуатації. Для досягнення цієї мети буде проведено аналіз існуючих методів хіміко-термічної обробки, дослідження їх впливу на властивості матеріалу, а також експериментальні дослідження з визначення оптимальних режимів обробки для сталі марки 12Х2Н4А.

У першому розділі роботи буде розглянуто теоретичні основи хіміко-термічної обробки та її значення для зубчастих коліс. Другий розділ присвячено аналізу матеріалів, використовуваних для виготовлення зубчастих коліс, та їхніх властивостей. У третьому розділі буде описано методику проведення експериментальних досліджень, а також представлені

результати та їх аналіз. Четвертий розділ міститиме рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів хіміко-термічної обробки та пропозиції щодо впровадження отриманих результатів у виробництво.

Очікується, що результати даної роботи сприятимуть підвищенню ефективності та надійності зубчастих коліс, зменшенню витрат на їх обслуговування та ремонт, а також покращенню загальної продуктивності механізмів, у яких вони застосовуються.

## 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИРОБІВ, ВИМОГИ ДО МАТЕРІАЛІВ

Шестерня - менше зубчасте колесо сполученої зубчастої пари. Зубчасті колеса широко застосовуються в різних машинах, механізмах у різних галузях машинобудування. Основним елементом зубчастого колеса є зуб, від міцності та зносостійкості якого і залежить надійна робота колеса[1]. Ескіз шестерні коробки передач наведено на рис. 1.1

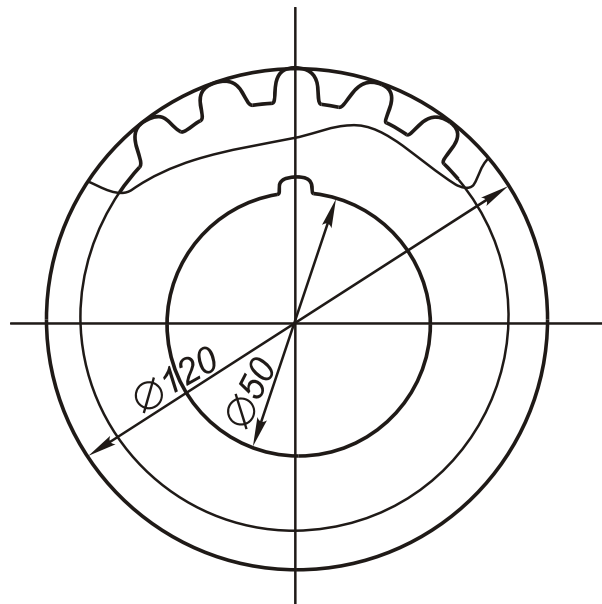


Рисунок 1.1 - Ескізшестерні коробки передач

Умови роботи шестерень визначаються їхньою швидкістю, рівнем контактних і згинальних навантажень.

В процесі експлуатації зуби шестерень піддаються:

а) вигину при максимальному одноразовому навантаженні (при різкому гальмуванні, заклинюванні, при застосуванні максимального крутного моменту);

б) вигину за багаторазових циклічних навантажень, унаслідок чого в корені зуба розвиваються найбільші напруження і може відбуватися втомне руйнування;

в) контактному напруженню на бічних робочих поверхнях зубів, що призводить до утворення контактної-втомної викришування (піттингу). Рівень контактних напружень визначає під час проектування вибір розміру шестерень [2];

г) зносу бічних поверхонь (через потрапляння абразивних частинок, бруду, пилу в зону контакту) або торцевих поверхонь зубів (під час перемикання передач у коробках передач). При відносному ковзанні в умовах недостатнього змащення або без змащення на робочих поверхнях зубів може відбуватися "схоплювання" і утворення грубих задирів, що призводять до катастрофічно швидкого (протягом декількох годин) зношування шестерень. Матеріал для виготовлення зубчастих коліс вибирають залежно від призначення та умов експлуатації коліс, переданих ними навантажень, швидкостей обертання тощо. Під час вибору марки сталі необхідно враховувати такі вимоги: низьку вартість матеріалу, добру оброблюваність різанням, мінімальне викривлення під час загартовування та три основні експлуатаційні показники - високу міцність, довговічність роботи та підвищену стійкість до зношування [3].

Для більшості зубчастих передач автомобілів, що передають великі навантаження, лімітуючими факторами є: міцність зубів - опір на вигин, стійкість поверхні профілю зубів проти втомного руйнування (піттинга) і зношування зубів.

Руйнування зубчастих коліс розглядається як явище поверхневої втоми. Опір втоми зубів значною мірою залежить від геометрії зубів, марки сталі, термічної обробки, шорсткості поверхні. Зношування зазвичай має місце, коли поверхня на зубах оброблена грубо, а швидкості і навантаження високі. Задир може виникнути у передачах, що несуть великі навантаження або працюють на високих швидкостях в умовах обмеженої масляної плівки [4].

Для виробництва зубчастих коліс найширше застосовують такі сталі: вуглецеві - 40, 45, 50; вуглецеві з пониженою прожарюваністю - 55ПП; хромисті - 20Х, 35Х, 40Х, 50Х; хромонікелеві - 12ХН3А, 12Х2Н4А, 20ХН, 40ХН; хромомарганцеві - 18ХГ, 18ХГТ, 25ХГТ, 30ХГТ; хромомо-лібденові - 20ХМ, хромоалюмінієві з молібденом - 38ХМЮА, 38Х2МЮА, хромонікель-молібденові - 18Х2Н4МА, хромонікельмолібденові з титаном - 25ХГНМТ[5].

Вуглецеві сталі не знайшли широкого застосування для виготовлення зубчастих коліс через велике викривлення в процесі термообробки і порівняно низьку міцність.

Для підвищення міцності та зносостійкості в сталі додають один або кілька легуючих елементів. Хром є одним із найуніверсальніших і найбільш широко застосовуваних легувальних елементів. Хром посилює дію вуглецю, підвищує твердість, стійкість до зношування, розширює границя пружності, збільшує міцність на розрив і прогартованість. Нікель збільшує ударну міцність, границя пружності та міцність сталі на розрив. Міцна і в'язка поверхня нікелевих сталей забезпечує високу стійкість до втоми і зносу. Нікелеві сталі добре піддаються цементації, нікель зменшує деформацію і забезпечує хороші властивості серцевини. Молібден збільшує прогартованість сталей і чинить значний вплив на зменшення твердості сталей при температурах відпуску. Титан подрібнює зерно [6].

Леговані сталі із вмістом хрому, нікелю, молібдену, марганцю застосовують для виготовлення високонавантажених зубчастих коліс.

Найкращі властивості в готовому зубчастому колесі отримують після цементації. Вміст вуглецю в цементованих сталях зазвичай коливається від 0,10 до 0,25 %. Сталі з низьким вмістом вуглецю дають максимальну в'язкість зубів, а з високим вмістом вуглецю - максимальну міцність серцевини. Після термічної обробки зубчасті колеса з цих сталей мають тверду поверхню, що добре чинить опір зносу, хорошу внутрішню структуру, високу ударну в'язкість і високі показники опору втоми металу [7].

## 2 НОМЕНКЛАТУРА ВИРОБІВ ТА МАРШРУТНА ТЕХНОЛОГІЯ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

Номенклатура – це перелік виробів, що оброблюються у виробничому підрозділі. У термічному цеху проходять термічну обробку зубчасті колеса. Ескіз деталей наведено на рис. 1.1. У табл. 2.1 наведено номенклатуру оброблюваних деталей

Таблиця 2.1 – Номенклатура виробів, які зазнають термічного поліпшення

№ п/п	Назва виробу	Матеріал виробу	Маса виробу, кг	Разміри виробу, мм				Вимоги до матеріалу
				b	l	h	d	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Зубчасте колесо	12X2H4A	0,105	-	-	5	80	Серцевина 217...235HB Поверхня HRC 62
2	Зубчасте колесо	12X2H4A	0,120			6	95	Серцевина 217...235HB Поверхня HRC 62
3	Зубчасте колесо	12X2H4A	0,135			6	110	Серцевина 217...235HB Поверхня HRC 62

Маршрутна технологія - послідовність технологічних операцій, виконання яких дає змогу отримати якісний виріб із відповідними характеристиками та властивостями матеріалу.

Істотне значення має макроструктура зубчастого колеса. Найкраща структура отримується під час штампування шляхом осадження з торця циліндричної заготовки, коли напрямок волокон повторює зовнішні обриси поковки.

Технологічний процес виготовлення шестерні містить такі операції: перша операція - штампування; друга - додаткове термічне оброблення; третя - основне механічне оброблення; четверта - основне хіміко-термічне й термічне оброблення.

Таблиця 2.1 - Схема маршрутної технології виготовлення шестерні коробки передач

№ п/п	Назва операції (комплексу операцій)	Цех (дільниця) де виконується операція	Призначення операції
1	2	3	4
1	Вхідний контроль	Заготівельна дільниця ковальсько-штампового цеху	Контроль хімічного складу, металургійна якість, якість поверхні заготовки
2	Штампування	Ковальсько-штамповий цех	Отримання необхідної макроструктури та форми
3	Додаткова термічна обробка (нормалізація)	Термічна дільниця ковальсько-штампового цеху	Підготовка структури до подальшої механічної та термічної обробки
4	Основна механічна обробка	Інструментальний цех	Отримання необхідної форми та розмірів

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
5	Основна хіміко-термічна обробка	Термічний цех	Отримання структури, що забезпечує вимоги, які висуваються до матеріалу шестерні
6	Контроль	Дільниця контролю термічного цеху	Контроль мікроструктури, твердості, перевірка розмірів, геометрії
7	Додаткова механічна обробка	Дільниця інструментального цеху	Полірування, шліфування

### 3 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБРАНОГО МАТЕРІАЛУ

Основними вихідними даними при виборі матеріалу для шестерні є умови роботи і вимоги до матеріалів:

- має бути висока твердість і зносостійкість поверхневого шару;
- підвищені границі контактної витривалості та границі витривалості під час вигину і крутіння;
- серцевина повинна мати високу в'язкість;
- матеріал повинен мати високі показники загартовуваності та прогартовуваності.

У першому розділі було обрано групу низьковуглецевих сталей для цементації. Для отримання високої твердості (HRC 58-62), контактної витривалості та границі втомлюваності під час вигину після ХТО шар, що цементується, повинен мати високу прогартованість і загартовуваність. Після гартування поверхневий шар повинен мати М-А структуру без продуктів перлітного і проміжного перетворень переохолодженого аустеніту. Крім того, сталь не повинна бути схильною до внутрішнього окислення, формування залишкових карбідів під час насичення. Утворення в шарі немартенситних продуктів перетворення різко знижує границю витривалості[8].

Прогартованість серцевини повинна забезпечити високі механічні властивості, особливо підвищену границю плинності і твердість HRC 30-40. За циклічних навантажень опір деталей, що цементуються, до руйнування залежить від міцності серцевини. Підвищення міцності серцевини сприяє підвищенню контактної міцності [9].

Збільшення дійсного зерна в цементованому шарі після ХТО зменшує контактну витривалість, границю витривалості під час вигину і збільшує деформації в результаті ХТО. Для отримання високого опору крихкому

руйнуванню і можливості використання загартування після підстижування з температури цементації сталі мають бути спадково дрібнозернисті (бал 6-8).

Для забезпечення необхідної прогартованості серцевини сталі та мінімальної деформації під час загартування використовують леговані сталі, що загартовуються в олії, загартування у воді не застосовується [10].

Цементовані сталі повинні добре оброблятися різанням, тому попередня ТО повинна забезпечити оптимальну мікроструктуру. За незадовільної мікроструктури заготовок знижується якість робочої поверхні, а внутрішні напруження, які виникають у процесі різання, підвищують деформацію деталей під час подальшої ХТО [11].

Обрана для виготовлення деталі сталь 12Х2Н4А в рівноважному стані належить до доевтектоїдного структурного класу, а в нормалізованому стані - до мартенситного класу. За призначенням це - конструкційна маловуглецева легована сталь для цементації та нітроцементації. За складом сталь 12Х2Н4А - хромонікілева. Властивості сталі в стані поставки наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1- Механічні властивості прокату зі сталі 12Х2Н4А

Джерело	Стан постачання	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta$	$\psi$	КСУ Дж/см <sup>2</sup>	НВ
		МПа		%			
		не менше					
ДСТУ 7806:2015	Сортовий прокат	640	780	11	40	59	-

Хімічний склад сталі 12Х2Н4А наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 -Хімічний склад сталі 12Х2Н4А (ДСТУ 7806:2015)

C,%	Si %	Mn, %	Cr,%	P,%	S,%	Cu,%	Ni%
				Не більше			
0,09-0,16	0,17-0,37	0,30-0,60	1,70-2,00	0.035	0.035	0.30	4.00

Для сталі 12Х2Н4А можуть бути використані різні режими ТО. Вони по-різному впливають на механічні властивості шестерні. Для порівняння властивостей після різних режимів ТО існує порівняльна таблиця, до якої внесено також властивості сталі 12Х2Н4А в стані постачання. Для вибору оптимального варіанта ТО користуються таблицею 3.3.

Таблиця 3.3 -Властивості сталі 12Х2Н4А (ДСТУ 4737:2007)

Властивості у стані поставки					Типовий режим ТО	Властивості сталі після ТО			
$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>		$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	НВ	$\sigma_{-1}$ , МПа
					Нормалізація	295-395	450-590	143-179	235
640	80	11	40	59	Гартування + високий відпуск	490	690	217-235	295
					Цементация+ гартування+низкий відпуск	950	1200	62 (НRC) пов, 26-20НВ серд.	676

Основним легувальним елементом є Сг, який належить до карбідотворювальних елементів. Він змінює кінетику ізотермічного перетворення порівняно з вуглецевою сталлю. Завдяки легуванню хромом спостерігається два максимуми швидкості ізотермічного розпаду аустеніту, які розділені областю високої стійкості переохолоджувального аустеніту. Ізотермічний розпад аустеніту має два явно виражених інтервали перетворень - перетворення на пластівчасті (П перетворення) і перетворення на голчасті (Бн перетворення) структури [12].

Лінії перлітного перетворення на діаграмі зміщені вправо. Це пояснюється тим, що для протікання перлітного перетворення в сталі необхідна дифузія хрому для утворення легованого карбиду, окрім вуглецю,

тоді як у вуглецевій сталі для утворення цементиту ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) необхідна лише дифузія вуглецю.

Хром підвищує прогартованість сталі, тому що під час нагрівання під загартування карбіди хрому, які утворилися під час цементації, розчиняються, Cr переходить у твердий розчин - аустеніт, і збільшує прогартованість.

На бейнітне перетворення Cr не впливає, тому що воно не супроводжується перерозподілом легуючих елементів, відбувається лише перерозподіл вуглецю.

Хром зменшує схильність аустенітного зерна до зростання. Залишкові карбіди, які не розчинилися в аустеніті, затримують зростання аустенітного зерна. Тому сталь зберігає дрібнозернисту структуру за високих температур (є спадково дрібнозернистою).

Під час відпуску хром уповільнює процес розпаду мартенситу. Тому що процеси, що протікають під час відпуску, мають дифузійний характер, а хром уповільнює карбідне перетворення, особливо на стадії коагуляції. Тому порівняно з вуглецевою сталлю для сталі 12X2H4A необхідна триваліша витримка при температурі відпуску, через вплив хрому.

Під час цементації хром сприяє насиченню поверхневого шару вуглецем.

Час, необхідний для повного розпаду А, невеликий, тому після загартування в структурі сталі спостерігається невелика кількість залишкового аустеніту.

Хром - найсильніший зміцнювач сталі, тому що зміцнює феритну основу (зокрема й завдяки збереженню більшої щільності дефектів будови) і збільшує дисперсність карбідних частинок. Хром підвищує температури критичних точок сталі, що показано в таблиці 4.4

Таблиця 3.4 - Температури критичних точок сталі 12X2H4A ( $^{\circ}\text{C}$ )

$A_{c3}$	$A_{r3}$	$A_{c1}$	$A_{r1}$	Mn
----------	----------	----------	----------	----

800	765	745	625	438
-----	-----	-----	-----	-----

Легувальні елементи впливають на швидкість процесу цементації, глибину шару, що цементується, і концентрацію вуглецю в поверхневому шарі. Некарбідоутворювальні елементи: Ni, Si прискорюють дифузію вуглецю в аустеніті за 950°C. Водночас вони знижують розчинність вуглецю в аустеніті й цим зменшують максимальну концентрацію вуглецю в поверхневому шарі. Найсильніше прискорює дифузію вуглецю в аустеніті та зменшує концентрацію вуглецю в цементованому шарі Si.

Карбідоутворювальні елементи зменшують коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті. Спостерігається уповільнення дифузії вуглецю в разі легування Mn і Cr. Ці елементи збільшують максимальний вміст вуглецю в поверхневому шарі порівняно з вуглецевою нелегованою сталлю, що пов'язано з інтенсивним карбідоутворенням у поверхневому шарі. Зі збільшенням температури концентрація вуглецю в цементованому шарі легованих сталей зменшується.

Вплив легувальних елементів на глибину шару, що цементується, визначається їхнім впливом на коефіцієнт дифузії та концентрацію вуглецю в поверхневому шарі. У легованих сталях після цементації та загартування крім М і К присутній  $A_{\text{зал}}$ , кількість якого може бути значною. У невеликій кількості  $A_{\text{зал}}$  у цементованому шарі може бути навіть корисним, оскільки при цьому підвищується пластичність і особливо ударна витривалість, але при великому його вмісті істотно зменшується твердість сталі, тому для високолегованих цементованих сталей для зменшення кількості  $A_{\text{зал}}$  необхідно проводити обробку холодом після загартування, а це збільшує витрати на ТО. Під час легування цементованих конструкційних сталей часто використовують легування кількома елементами, але це підвищує їхню вартість, що не завжди є доцільним.

Оптимальний вміст вуглецю при цементації в поверхневому шарі 0,8-0,9%. Збільшення концентрації вуглецю до вищих значень сприяє виділенню

карбідів по границях зерен, що може призвести до утворення тріщин у цементованому шарі та зниження механічних властивостей [13].

Ni підвищує опір крихкому руйнуванню сталі, підвищує пластичність і в'язкість, зменшує чутливість до концентраторів напружень і знижує температуру границі холодноламкості.

Сталь 12X2H4A до відпускнуї крихкості й утворення флокенів не схильна. Малі добавки Si і  $M_n$  вводять для підвищення твердості та міцності і прожарюваності, а також вони затримують ріст зерна сталі.

На основі вище сказаного і вимог до шестерні коробки передач:

1) прогартуваність на твердість HRC 29-43, що забезпечується вмістом вуглецю менше 0,24%;

2) прогартуваність, що забезпечується отриманням необхідної структури серцевини;

3) спадкова дрібнозернистість, що дає змогу використовувати гартування після підстужування для зменшення тривалості ХТО;

4) хороша технологічність при механічній обробці (різанням і тиском);

5) технологічність під час насичення і подальшої ХТО, яка характеризується схильністю до насичення й утворення дефектів цементованого шару, а також можливість застосування найпростішої подальшої ХТО (гартування й охолодження в маслі); робиться висновок, що для виготовлення шестерні коробки передач з урахуванням вимог, що пред'являються, слід вибрати сталь 12X2H4A, яка є оптимальним варіантом при дотриманні параметрів технологічного процесу.

## 4 РОЗРОБКА РЕЖИМІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Попередня термічна обробка шестерні – нормалізація, різновид повного відпалу. Нагрівання проводять до температур, що лежать вище  $A_{с3}$  на  $30-50^{\circ}\text{C}$ :  $780+(60-80)=860^{\circ}\text{C}$ . Мета нормалізації: виправлення структури сталі після холодного штампування, поліпшення механічних властивостей і оброблюваності різанням, підготовка структури до подальшої термічної обробки.

Основна термічна обробка складається з цементації, гартування і низько-температурного відпуску.

Цементация - спосіб хіміко-термічної обробки сталевих деталей - поверхневе насичення вуглецем.

Процес цементації дає змогу створювати на робочій поверхні деталі шар, що має високу твердість після гартування, зносостійкість, ерозійну стійкість, контактну витривалість і втомну міцність під час вигину. Ці властивості забезпечуються при відносно м'якій і в'язкій серцевині, що надає необхідну конструктивну міцність оброблюваним виробам.

Ці властивості досягаються збагаченням поверхневого шару маловуглецевої, легованої сталі вуглецем до концентрації евтектоїдної або заевтектоїдної та подальшою термічною обробкою, яка надає поверхневому шару структуру мартенситу з тією чи іншою кількістю залишкового аустеніту і карбідів.

Дифузія вуглецю в залізо можлива тільки в атомарному стані. Атомарний вуглець, що утворився в насичувальній атмосфері, адсорбується поверхнею сталі і дифундує в глиб металу.

Коефіцієнт дифузії вуглецю в  $\alpha$ -залізі більш ніж на порядок вищий, ніж у  $\alpha$ -залізі, що має значно щільнішу щільноупаковану гратку (рис. 4.1).

Енергія активації  $Q$  вуглецю в  $\alpha$ -залізі значно нижча, ніж у  $\gamma$ -залізі, і становить відповідно 18100 і 31350 кал/моль, або 75839 і 131356 Дж/моль (рис. 4.1).

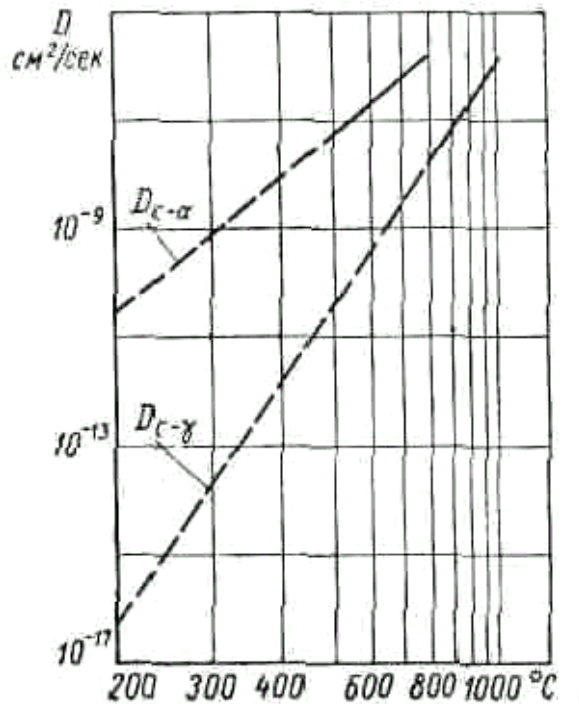


Рисунок 4.1 - Залежність коефіцієнта дифузії вуглецю у фериті й аустеніті від температури (Стенлі)

Цементация за температур існування  $\alpha$ -заліза не проводиться через незначну розчинність у цій фазі вуглецю (до 0,02%). Цементация проводиться за температур 920-950°C (вище  $A_{c3}$ ) і вище, за яких сталь перебуває в аустенітному стані.

На рис. 4.1 показано залежність коефіцієнта дифузії вуглецю у фериті й аустеніті від температури.

З наведених залежностей випливає, що коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті збільшується зі збільшенням температури.

Параметри дифузії вуглецю в аустеніті в інтервалі 950-1050°C такі:  $D_0=0,1\text{см/сек}$ ,  $Q=32400\text{кал/г-атом}$  (135756Дж/г-атом) [14].

Легувальні елементи суттєво впливають на дифузію вуглецю в аустеніті, що пов'язано зі спотворенням кристалічної решітки, зміною енергії міжатомного зв'язку в твердому розчині та термодинамічної активності вуглецю.

Вплив легувальних елементів на коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті за 1100°C наведено на рис. 4.2. Карбідоутворювальні елементи зазвичай уповільнюють, а некарбідоутворювальні прискорюють дифузію вуглецю.

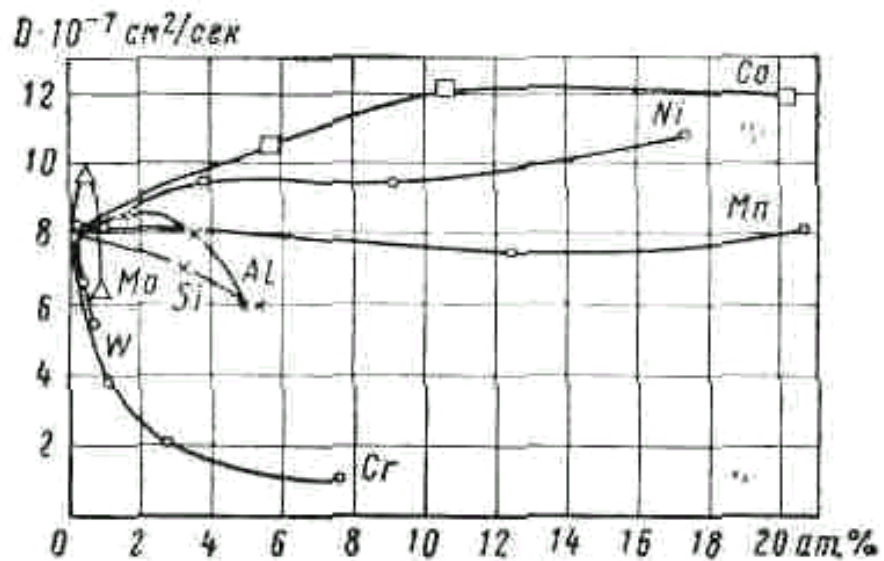


Рисунок 4.2 - Вплив вмісту легувальних елементів на коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті за 1100°C [15]

Найбільш різко збільшує вміст вуглецю в поверхневій зоні цементованого шару карбідоутворювальний елемент хром у зв'язку з інтенсивним карбідоутворенням (рис. 4.3).

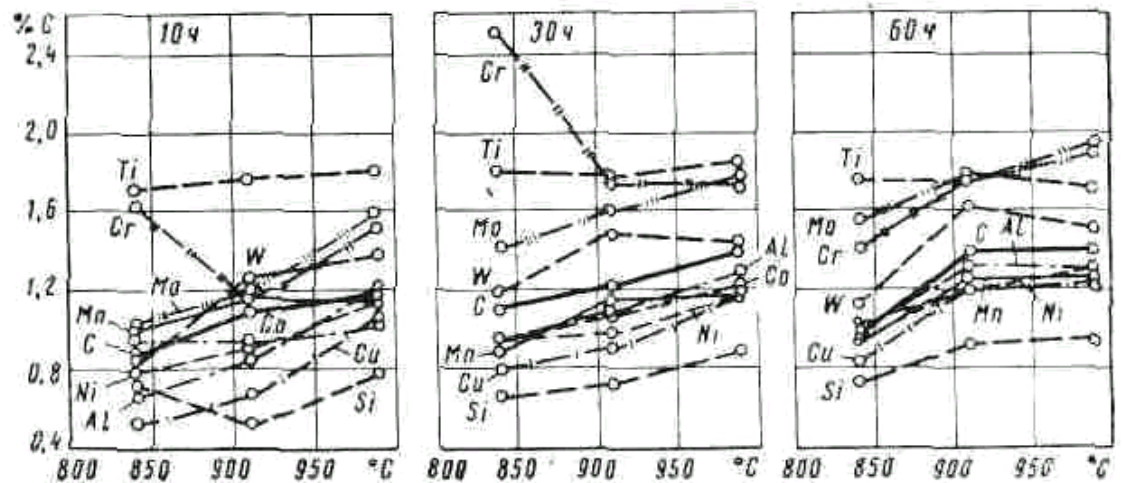


Рисунок 5.3 - Вплив температури на вміст вуглецю в поверхневому шарі сталі, що містить 0,20% С і 3% різних легувальних елементів; цементація у твердому карбюризаторі протягом 10, 30 і 60 год.

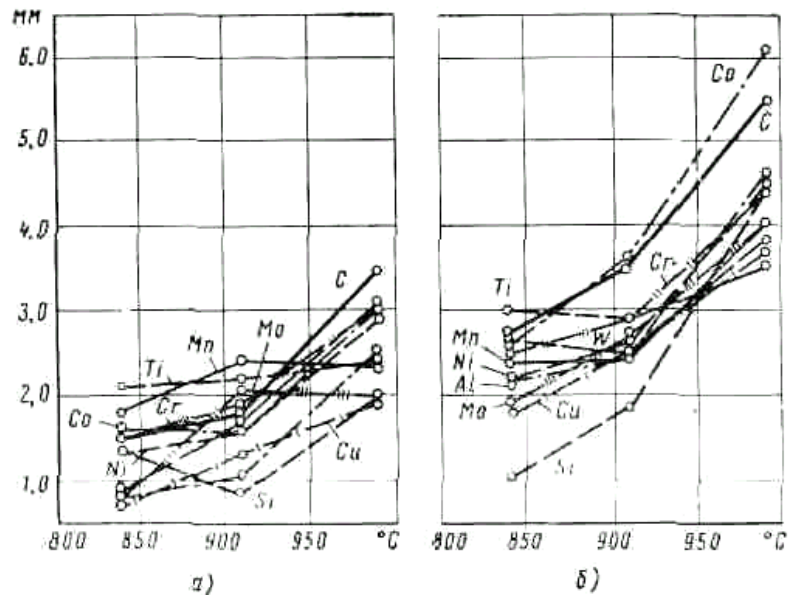
Некарбідоутворювальні елементи (кремній, нікель, мідь, сірка, фосфор) дещо зменшують вміст вуглецю в шарі, що пояснюється зниженням розтворюваності вуглецю в аустеніті під їхнім впливом [16].

У зв'язку з вище наведеними даними в цементованому шарі сталі, легованої хромом, нікелем (рис. 5.4), міститься значно більше вуглецю, ніж у відповідному шарі вуглецевої сталі. При цьому з підвищенням температури цементації вміст вуглецю в поверхневій зоні шару цих сталей знижується (рис. 4.4).

Вплив легувальних елементів на глибину цементованого шару зумовлений їхнім впливом на концентрацію вуглецю в поверхневій зоні цього шару і на коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті.

Нікель збільшує коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті, але дещо знижує глибину цементованого шару. Це пояснюється тим, що, зменшуючи розчинність вуглецю в аустеніті, нікель знижує концентрацію вуглецю в поверхневій зоні цементованого шару, що призводить до невеликого зменшення глибини шару; аналогічним чином, але різкіше, впливають на глибину шару кремній і мідь.

Хром знижує коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті, підвищує концентрацію вуглецю в поверхневому шарі, що призводить до невеликого збільшення глибини цементованого шару (рис.4.4,а).



а - витримка 10год; б - витримка 30год

Рисунок 4.4 - Вплив температури на глибину цементованого шару (цементация у твердому карбюризаторі) сталі, що містить 0,2% С і 3% різних легувальних елементів (С-нелегована сталь)

Цементацию проводять за температур, вищих за  $A_{c3}$ . У цьому випадку вуглець дифундує в решітку  $\gamma$ -заліза. За подальшого повільного охолодження аустеніт зазнає розпаду з утворенням ферито-цементитної структури.

Цементований шар має змінну концентрацію вуглецю за товщиною, що спадає від поверхні до серцевини деталі. У зв'язку з цим після повільного охолодження в структурі цементованого шару можна розрізнити (від поверхні до серцевини) три зони: позаевтектоїдну, що складається з перліту і вторинного цемент-тіта, що утворює сітку за колишнім зерном аустеніту; евтектоїдну, що складається з одного пластинчастого перліту, і доевтектоїдну - з перліту і фериту. Кількість фериту в цій зоні безперервно зростає в міру

наближення до серцевини. За високої концентрації вуглецю на поверхні шару (понад 1,2-1,3%) утворюється груба цементитна сітка або цементит виділяється у вигляді голок, що негативно позначається на міцності дифузійного шару [17].

Основні дефекти цементованого шару - аномальність структури, поява сітки цементиту, темна складова.

Темна складова з'являється в результаті внутрішнього окислення легуючих елементів, що володіють вищою спорідненістю до кисню, ніж залізо (в даній сталі таким елементом є хром). Внутрішнє окислення відбувається завдяки дифузії атомів кисню в залізі і зустрічній дифузії атомів елементів, що легують сталь. Хром, взаємодіючи з киснем, утворює дисперсні оксиди. Нікель же не окислюється.

Утворення оксидів призводить до збіднення аустеніту легуючими елементами, що зменшує його стійкість, а отже, прогартованість. Одночасно відбувається зниження вуглецю в твердому розчині. Самі оксиди, відіграючи роль готових зародків, також сприяють розпаду переохолодженого аустеніту й утворенню немартенситних продуктів його перетворення. Після гартування в зоні внутрішнього окислення утворюється характерна трооститна сітка («м'які плями»). Це призводить до зниження механічних властивостей (знижується границя витривалості і поверхнева твердість).

Внутрішнє окислення можна усунути підбором відповідних насичувальних середовищ. Наприкінці процесу цементації рекомендується додавати в робочий простір печі 5-10%  $\text{NH}_3$ . Азот підвищує стійкість переохолодженого аустеніту. Крім того, цей дефект може бути усунутий шліфуванням. Також до складу сталі доцільно вводити елементи, які не беруть участі в окисленні (наприклад, нікель). Поява трооститної сітки може також бути наслідком недостатнього насичення (знижений вміст вуглецю в шарі).

Аномальний вид структури заевтектоїдної зони цементованого шару виражений у наявності поряд зі структурно вільним цементитом структурно

вільного фериту у вигляді сітки, що оточує сітку цементиту, або у вигляді окремих включень. Цементитні виділення в подібній структурі бувають більшими внаслідок зменшення вмісту вуглецю в сусідніх ділянках структури. Сталь із такою структурою називається аномальною [18].

Чисте від кисню залізо, цементоване в карбюризаторі з незначною кількістю кисню, не дає аномальної структури. Аномальність чистого заліза і сталі з невеликим вмістом кисню завжди пов'язана з поглинанням кисню під час нагрівання перед цементацією в середовищі, що містить кисень, або під час цементації в карбюризаторі, що містить велику кількість кисню.

Аномальна структура може утворитися внаслідок дифузії вуглецю в напрямку до раніше виділеного заевтектоїдного цементиту, чому сприяє більш висока температура початку перлітного перетворення в цій сталі.

Аномальність структури сталі чітко виявляється тільки після цементації в твердому карбюризаторі. Під час газової цементації, яку виконують у середовищі, що містить вуглеводні, кількість кисню виявляється меншою, ніж під час цементації в твердому карбюризаторі, і, отже, можливість збільшення вмісту кисню в сталі зменшується.

Причому, між двома дефектами: аномальністю структури та внутрішнім окисленням існує залежність.

Імовірно, вплив легуючих елементів на схильність сталі до аномальності пов'язаний із впливом їх на схильність до утворення сітки і глобул оксидів на границяхзерен. Внаслідок виділення цих включень зменшується стійкість  $A$  і підвищується температура точки  $A_{r1}$ , що полегшує дифузю вуглецю в  $\alpha$ -залізі до ділянок цементиту. Дифузія вуглецю поблизу границьзерен прискорюється також унаслідок збіднення ділянок, прилеглих до границьзерен, елементами, що утворюють на границяхзерен оксиди (кремній, хром, марганець).

Аномальна сталь під час гартування схильна до утворення «м'яких плям». Для отримання рівномірної високої твердості сталь з аномальною

структурою слід гартовувати за вищою температурою або давати за нормального нагрівання під гартування.

Наявність у цементованому шарі структурно вільного цементиту є недоліком тільки за умови виділення його у вигляді сітки, що створює небезпеку випаровування шару під час роботи. Утворення сітки попереджається підтриманням необхідного вуглецевого потенціалу насичувальної атмосфери.

Таким чином, цементацію сталі 12Х2Н4А необхідно проводити за температур 920-950°C, коли стійкий А, що розчиняє у великій кількості вуглець. Підвищення температури цементації різко збільшує глибину шару.

Цементация в твердому карбюризаторі - досить тривалий процес, під час якого складно контролювати концентрацію вуглецю в поверхневому шарі. Така цементация може призводити до появи аномальної структури. З погляду економічної ефективності процес цементации в газовому карбюризаторі вигідний за одиничного і дрібносерійного виробництва.

Цементация спеціальними пастами також економічно не вигідна (доцільно застосовувати при дрібносерійному виробництві).

Крім того, газова цементация скорочує тривалість процесу науглецювання і вигідна за масового виробництва.

Таким чином, цементацию шестерні рекомендується проводити в газовому середовищі. Навуглецюване середовище - ендогаз+природний газ.

Структура поверхневого шару поле цементации: заевтектоїдна зона, евтектоїдна, доевтектоїдна.

Структура серцевини після цементации: Ф+П.

Термічна обробка після цементации. Остаточні властивості цементованих виробів досягаються в результаті термічної обробки після цементации. Цією обробкою можна отримати високу твердість у цементованому шарі та хороші механічні властивості серцевини. Для спадково дрібнозернистих сталей гартування проводять у маслі з цементацийного нагрівання після підстужування. Охолодження в олії

зменшує деформацію шестерні. Підстужування зменшує кількість аустеніту залишкового.

Заключною операцією термічної обробки цементованої деталі є відпуск. Причому відпуск необхідно проводити при температурі 190°C (низькотемпературний відпуск), оскільки підвищення температури призводить до зниження міцності властивостей поверхневого шару. Низькотемпературний відпуск переводить мартенсит гартування в мартенсит відпустки і знімає гартівні напруги.

Структура після термічної обробки:

Поверхневий шар - М дрібногочастий+Аост.+карбіди.

Серцевина - низьковуглецевий М (прогартованість сталі в табл.3.2)

Твердість: серцевини 290НВ, поверхні 59-62HRC.

#### 4.1 Розрахунок часу нагрівання та витримки

Загальний час нагрівання ( $\tau_{\text{заг.}}$ , хв) розраховується за формулою:

(4.1)

де,  $\tau_n$  – час нагрівання до заданої температури, хв

$\tau_0$  – час витримки при технологічній температурі, хв.

Час нагрівання розраховується за формулою:

$$\tau_n = S \cdot k \cdot f \cdot L_n \quad (4.2)$$

де,  $S$  – характерний розмір, мм

$k$  – коефіцієнт форми;

$f$  – коефіцієнт розположення изделий в нагріваючому пристрої;

$L_l$  – коефіцієнт легірування сталі.

Час витримки ( $\tau_v$ ) для легированих сталей приймають із розрахунку 1,5-2,0 хв на 1 мм.

Попередня термічна обробка. Нормалізація (860°C – нагрівання вище Ас<sub>3</sub>):  $S=35\text{мм}$ ;  $k=2$ ;  $f=1,4$ ;  $L_l=0,96$

$$\tau_n = 35 \cdot 2 \cdot 1,4 \cdot 0,96 = 94,08 \text{ хв}$$

$$\tau_g = 35 \cdot 1,5 = 52,5 \text{ хв}$$

$$\tau_{заг.} = 146,58 \text{ хв}$$

Основна термічна обробка (цементация, гартування, низький відпуск)

*Цементация (920-950°C)*

Нагрівання до температури цементации:  $S=35\text{ мм}$ ;  $k=2$ ;  $f=1,3$ ;  $L_l=0,96$

$$\tau_n = 35 \cdot 2 \cdot 1,3 \cdot 0,96 = 87,36 \text{ хв}$$

Час витримки при цементации береться з розрахунку

$$\tau_{в.ц.} = 0,2 \cdot \tau_n$$

$$\tau_{в.ц.} = 0,2 \cdot 87,36 = 14,42 \text{ хв}$$

Расчет технологического времени при цементации

(4.3)

$h$  – глибина цементованного слоя, мм (1,5мм)

$V_{\text{диф.нас.}}$  - швидкість дифузійного насичення, мм/год. (середня швидкість цементації при температурі 950°C і глибині шару 1,5 мм для вуглецевої сталі становить 0,20 мм/год., для легованої сталі в 1,5 разів менша: 0,20:1,5=0,133 мм/год.) [8].

$$\tau_{\text{техн}} = 1,5 / 0,133 = 11,28 \text{ год} = 676,8 \text{ хв}$$

Загальний час цементації розраховується за формулою

$$\tau_{\text{н}} + \tau_{\text{в.ц}} + \tau_{\text{техн}} = 87,36 + 14,42 + 676,8 = 778,58 \text{ мин} = 12 \text{ год } 97 \text{ хв}$$

Після цементації проводиться підстижування до температури 870°C на повітрі для зменшення кількості залишкового аустеніту в поверхневому шарі. Час підстижування  $(950-870)/7=11 \text{ хв}$ .

Гартування проводиться з цементаційного нагріву з охолодженням у маслі (легувальні елементи збільшують стійкість переохолодженого аустеніту і зменшують критичну швидкість гартування). Час охолодження

$$\tau_{\text{охл}} = (870-600)/130 = 2,07 \text{ с}, \quad \tau_{\text{охл}} = (600-200)/30 = 13,33$$

$$\tau_{\text{охл}} = 15,40 \text{ с}$$

*Низькотемпературний відпуск (190°C):*

$$S=35 \text{ мм}; k=2; f=1,7; L_{\text{л}}=2,15$$

$$\tau_{\text{н}} = 35 \cdot 2 \cdot 1,7 \cdot 2,15 = 233,92 \text{ хв}$$

$$\tau_{\text{в}} = 120 + 1 \cdot 35 = 155 \text{ хв}$$

$$\tau_{\text{н}} = 233,92 + 155 = 388,92 (6,482 \text{ год})$$

## 4.2 Основне обладнання

Нормалізація (860°C). Нагрівання здійснюється в печі СШЗ-6.12/10: діаметр печі - 0,6 м; висота 1,2 м; максимальна температура - 1000°C. Середовище нагріву захисне (ендогаз), для запобігання окисленню і зневуглецюванню. Охолодження на повітрі.

Цементация (920-950°C): СШЦМ-6.12/10 (діаметр печі 0,6 м, висота 1,2 м, максимальна температура 1000°C). Вуглероджувальне середовище - ендогаз+природний газ. Охолодження на повітрі.

Гартування (870°C) у маслі з температури цементации після підстужування на повітрі.

Низькотемпературний відпуск (190°C): СНОС-6.7.12/3 з окислювальною атмосферою. Охолодження після низького відпуску - на повітрі. При температурі відпуску зневуглецювання не відбувається. Розміри печі: ширина - 0,6 м; довжина - 0,7 м; висота - 1,2 м. Максимальна температура - 300°C.

## 4.3 Додаткове обладнання

Додаткові операції та обладнання для забезпечення технологічного процесу термічної обробки:

- підготовка деталі до термічної обробки: очищення від бруду, мастил та емульсії (після механічної обробки): промивання у воді в спеціальній ванні з електронагріванням при температурі 80-90°C, час  $\tau=30-60$ хв.

- промивка після гартування (охолоджувальне середовище - олія): у залізному баку, що розташовується поруч із гартівним баком, розчин у ньому підігрівається парою. Використовується гарячий (80-90°C) 10% водний розчин  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ :

- обладнання для створення захисної атмосфери - газові генератори;
- обладнання для створення науглецювального середовища;
- обладнання для охолодження масла в гартівному баку;
- обладнання для механізації операцій термічної обробки: кран-балка, візки, моно-рейки, садки;
- обладнання для контролю якості: мікроскоп твердомір;
- інструмент для контролю розмірів деталі: штангенциркуль, лінійка.

На рис. 4.5 наводиться графік термічної обробки деталі, а в табл. 4.1 - технологічна карта термічної обробки.

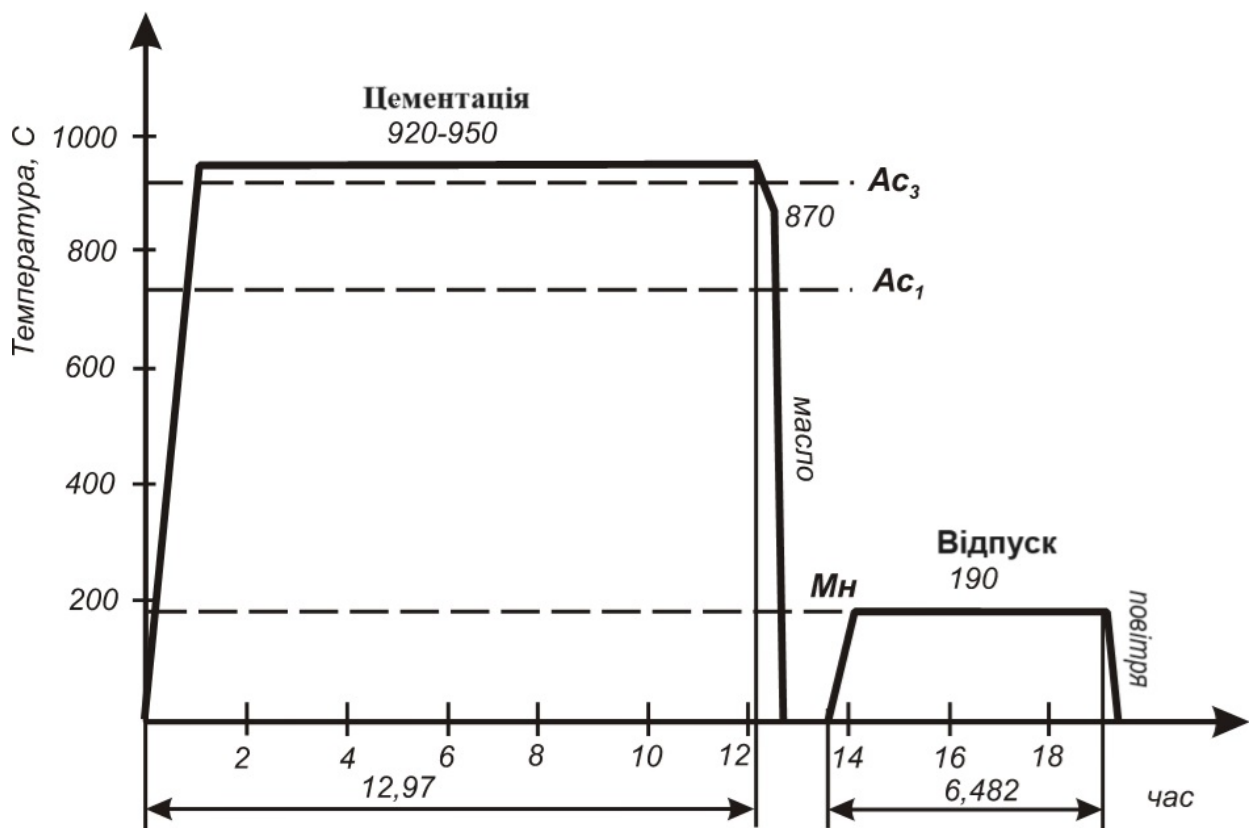
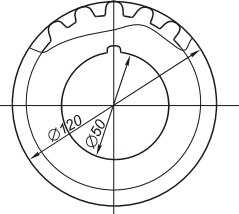


Рисунок 5.1 – Графік термічної обробки шестерні коробки передач

Таблиця 5.1 – Технологічна карта термічної обробки

Ескіз виробу			Технічні умови			
			Марка сталі 12X2H4A	Твердість поверхневого шару 60HRC, серцевини 32-36 HRC Глибина цементації 1,5 мм		Структура поверхневого шару М+Азал+ Структура серцевини М
№ операції	Назва операції	Обладнання	Режим нагріву: температура, °С; час, хв; витрата	Режим охолодження: середовище, склад температура,	Назва пристосування, кількість	Умови обробки контролю
1	2	3	4	5	6	7
1	Попередня термічна обробка (нормалізація)	СШЗ-6.12/10	$t=860^{\circ}\text{C}$ $\tau_{\text{н}}=146,58\text{хв}$	Ендогаз	Садка	Температура нагрівання і витрата захисна атмосфера
2	Контроль мікроструктури, твердості	Мікроскоп, твердомір	-	-	-	-
3	Промивка після механічної обробки перед основною термічною обробкою	Ванна з електронагріванням	$80-90^{\circ}\text{C}$ $\tau=30-60\text{хв}$ вода	-	корзина	-
4	Основна термічна обробка Цементация	СШЦМ-6.12/10	$t=920-950^{\circ}\text{C}$ $\tau_{\text{общ}}=12\text{час}97\text{мин}$ Науглероживающая среда: эндогаз+природный газ	Підстужування на повітрі	Садка	Температура, час нагрівання, витрата, температура витримки, середовище науглероживаючої атмосфери

Кінець таблиці 5.1

1	2	3	4	5	6	7
5	Гартування з цементацийного нагрівання	СШЗ-6.12/10	$t=870^{\circ}\text{C}$ $\tau_{\text{охл}}=15,40\text{с}$	Масло	Садка	Температура, печі, склад гартівного бака
6	Промивання	Ванна з електронагріванням	$t=80-90^{\circ}\text{C}$	-	Корзина	10% водний розчин $\text{Na}_2\text{CO}_3$
7	Контроль мікроструктури	МИМ-7	-	-	Столик	Поверхневий шар: М+Авід+К Серцевина: М
8	Контроль твердості поверхневого шару	ТК-2	-	-	Столик	60-62HRC
9	Низькотемпературний відпуск	СНОС-6.7.12/3	$t_{\text{н}}=190^{\circ}\text{C}$ $\tau_{\text{н}}=6,482$ год	повітря	Садка	Температура, час нагрівання і витримки
10	Контроль мікроструктури	МИМ-7	-	-	Столик	Структура поверхневого шару: Мвід+К+Азал
11	Контроль твердості поверхневого шару	ТК-2	-	-	Столик	60-62HRC

## 5 МЕТОДИ КОНТРОЛЮ. ДЕФЕКТИ ТА СПОСОБИ ЇХ УСУНЕННЯ

Методи контролю: вхідний, технологічний, на виході.

Вхідний контроль деталі: хімічний склад, форми і розмірів деталі, візуальний контроль зовнішнього стану штампованого виробу; перевірка відсутності внутрішніх дефектів (дефектоскопія); контроль мікроструктури.

Контроль технологічних параметрів термічної обробки: температура, склад захисної атмосфери, склад атмосфери для науглецювання, час нагрівання і витримки, склад гартівного середовища.

Поточний контроль термічної обробки: мікроструктура і твердість; концентрація вуглецю в поверхневому шарі, кількість залишкового аустеніту.

Контроль якості цементованих виробів:

Товщину шару визначають зазвичай на зразках-свідках, виготовлених із тієї самої сталі й підданих цементації та термічній обробці за тими самими режимами, що й деталі. Товщину шару оцінюють за твердістю або мікроструктурою.

Твердість поверхні та серцевини, а також розподіл твердості по шару. Вимірювання твердості в різних зонах поверхні (HRC, HV) проводять безпосередньо в потоці обробки деталей. Твердість за перерізом визначають у лабораторії на шліфах із цементованих деталей.

Мікроструктуру перевіряють у лабораторії на шліфах, приготованих із цементованих деталей або зразків-свідків. У цементованому шарі визначають дисперсність мартенситу, наявність і розташування карбідів, залишковий аустеніт і дефекти шару (сітка цементиту, надлишкові скупчення карбідів, наявність трооститу тощо).

Аналізують також структуру серцевини, при цьому основну увагу звертають на наявність фериту і його розподіл.

Вміст вуглецю визначають пошаровим хімічним аналізом.

Обсяг контролю якості деталей залежить від використовуваного обладнання, стабільності його роботи і надійності контролю технологічних параметрів процесу хіміко-термічного оброблення.

У разі масового виробництва необхідний контроль температури, тривалості процесу, витрати газів, складу атмосфери. Виконують 2 рази на

тиждень. Твердість і товщину цементованого шару перевіряють неруйнівними методами на одній-двох деталях через кожні 2-4 години роботи. Твердість і мікроструктуру шару і серцевини, концентрацію вуглецю в шарі контролюють 2 рази на тиждень у період перевірки технологічних параметрів печі.

Зовнішня зона дифузійного шару - зона, розташована безпосередньо біля поверхні насичення, зазвичай товщиною до кількох десятків мікрометрів.

Мікроструктура зовнішньої зони дифузійного шару, як і всього цементованого шару загартованої деталі, повинна являти собою безголчтий і середньог-овчаковий мартенсит і Аост (менше 30%). Причому особливо важливо отримати оптимальну структуру в зовнішній зоні шару, оскільки вона піддається найбільшим експлуатаційним навантаженням під час роботи деталі. Ця поверхня визначає опір деталі зношуванню.

Отримання оптимальної структури в зовнішній зоні пов'язане з великими труднощами через взаємодію різних компонентів контрольованих атмосфер з поверхнею деталі, що призводить часто до утворення в процесі насичення низки дефектів, притаманних тільки цій зоні: поверхневої плівки оксидів, оксидів, розташованих на кордонах зерен аустеніту, плівки цементиту та ін.

Дефекти спричиняють збіднення твердого розчину аустеніту легуючими елементами, зниження його стійкості в ділянці температур перетворення ( $A \rightarrow \Phi + \Psi$ ) переохолодженого аустеніту і, як наслідок, утворення продуктів немартенситного перетворення аустеніту під час гартування деталей.

На практиці використовують три способи оцінювання якості зовнішньої зони шару: за глибиною залягання троостита, за кількістю троостита на поверхні та за мікротвердістю поверхні.

На кількість трооститних виділень у шарі впливають численні чинники (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 - Фактори, що впливають на утворення трооститних виділень у зовнішній зоні цементованого шару

Фактор	Причини утворення трооститу
Підготовка деталей перед цементациєю	Невидалена окалина. Залишки солей мийних розчинів.
Властивості сталі	Недостатній вміст у сталі легувальних елементів, що не беруть участі у внутрішньому окисленні. Дуже дрібне зерно аустеніту
Атмосфера в печі під час цементациї	Високий вміст CO <sub>2</sub> у складі насичувальної атмосфери.
Режим цементациї	Тривалість цементациї
Стан печі для цементациї	Підсмоктування повітря. Поломки обладнання Щільність завантаження. Порушення вентиляції.
Умови гартування	Тип гартівного середовища. Швидкість. Циркуляції. Розмір деталі. Щільність завантаження. Маса садки.

Уникнення утворення трооститу в зовнішній зоні цементованого шару можливе шляхом комплексного підходу до підготовки деталей перед цементациєю, контролю свойств сталі, атмосферних умов печі, режиму цементациї, стану обладнання та умов закалки. Заходи включають видалення окаліни, збільшення вмісту легуючих елементів у сталі, контроль атмосферних умов та тривалості цементациї, попередження подсмоктування повітря, технічне обслуговування обладнання і вибір оптимального режиму гартування

У таблиці 5.2 наводиться перелік можливих дефектів, що виникають під час ХТО деталі, причини їхньої появи та способи усунення

Таблиця 5.2 - Види дефектів і методи їх усунення

Вид дефекту	Причина	Попередження	Спосіб усунення
-------------	---------	--------------	-----------------

Підвищена концентрація вуглецю в поверхневому шарі	Завищено час витримки при температурі цементації	Контроль часу витримки	Зневуглецювання в атмосфері зі знизеним вуглецевим потенціалом
Завищена глибина цементованого шару	Висока температура цементації. Завищено час витримки. Застосування активного карбюратора.	Необхідно контролювати, температуру цементації, час витримки, науглерожувальне середовище	Дефект не можна усунути
Недостатня глибина цементованого шару	Недостатня температура і час витримки. Недостатня активність науглерожувального середовища	Технологічний контроль, склад середовища	Повторити ХТО
Ефект «м'яких плям» - утворення трооститної структури	Внутрішнє окислення поверхнього шару	Внутрішнє окислення можна усунути підбором відповідних насичувальних середовищ. Наприкінці процесу цементації рекомендується додавати в робочий простір печі 5-10% NH <sub>3</sub> або підвищити температуру гартування. Недостатнє насичення вуглецем поверхнього шару	Механічна обробка (шліфування)  Повторна ХТО
Знижена твердість поверхнього шару після гартування	Знижена концентрація вуглецю в поверхневому шарі.  Немартенситні складові	Нагрівання під гартування проводилося в окислювальній атмосфері (контроль захисної атмосфери). Недостатня швидкість охолодження	Повторне навуглецювання  Повторна ТО

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 6.1 Фактори небезпеки

В цьому розділі наведені основні небезпечні фактори , які можуть виникнути при хімікотермічній обробці шестерен коробки передач

Цементация виконувалась в печі СШЦМ-6.12/10. Для дослідження зразків біли використані прилад для вимірювання твердості ТК-2, оптичний мікроскоп МИМ-8, а для оформлення дипломної роботи використовувався ноутбук. Робота на цьому обладнанні передбачає дотримання правил безпеки, тому до виконання робіт допускаються працівники які пройшли інструктажі з техніки безпеки та охорони праці.

При роботі з зазначеним обладнанням існує небезпека електричного впливу ( ураження електричним струмом внаслідок торкання оголених частин проводів, які з'єднуються з приладами, що знаходяться під напругою) та виникнення пожежі в результаті короткого замикання.

Під час роботи в металографічній лабораторії також існує небезпека механічного впливу (поранення абразивним інструментом, зразками при витягуванні із заливки та закладення зразків), хімічного впливу(хімічні опіки реактивами при травленні зразків), термічного впливу(опіки гарячими зразками), впливу навколишнього середовища(утворення пилу при сухому шліфуванні, роботі з дрібним абразивом і порошками).

При виконанні обробки зразків в печі СШЦМ-6.12/10 необхідно суворо дотримуватись правил роботи з піччю, бо існує небезпека вибуху. Визначимо основні заходи, використані для зменшення впливу вище наведених небезпечних факторів:

- можливість отримання механічних травм, що може бути пов'язано з порушенням правил з охорони праці при підготовці деталей до нітроцементации;
- надлишкова напруженість та інтенсивність праці;
- негативний вплив теплового випромінювання при завантаженні садки в піч, що може бути пов'язано з відсутністю індивідуальних засобів захисту;
- можливість отримання термічних опіків внаслідок виплесків гартувального мастила при гартуванні;

- можливість отримання механічних травм внаслідок порушень правил з охорони праці при підготовці зразків для випробування твердості;
- небезпеки, які пов'язані з використанням насичуваних в процесі нітроцементування, зокрема при підготовці насичуваної атмосфери;
- можливість ураження електричним струмом. Головними причинами можуть бути порушення правил електробезпеки, несправність енергоспоживаючого обладнання. Відсутність групових або індивідуальних засобів захисту;
- підвищена загазованість шкідливими речовинами в процесі нітроцементування, що є специфікою цього процесу та може призвести до отруєння;
- незадовільне освітлення, через вихід з ладу чи забрудненість приладів освітлення, що призводить до погіршення зору;
- можливість загорянь, причиною яких є порушення правил пожежної безпеки, що може призвести до пожеж.

## 6.2 Заходи по забезпеченню безпеки.

Для виключення механічних травм передбачено:

- Організаційні заходи дотримання чистоти і порядку на робочих місцях: використання індивідуальних засобів захисту, а саме брезентові захисні костюми, рукавиці брезентові, спеціальне взуття з металевим битком, на носку; при роботі з нагрітими матеріалами використовуються волочені костюми, азбестові фартухи і рукавиці згідно із ГОСТ 12.4.010-75 ССБТ «Средства индивидуальной защиты. Рукавицы специальные. Технические условия».

– Технічні: використання тільки справного інструменту та їх пристосувань. Пересування оброблювальних деталей по дільниці, як правило виконується за допомогою кран – балки, в зв'язку з цим існують вимоги, до зачеплення тари з деталями яке не повинно призвести до повороту цієї тари. Пересування повинно виконуватись тільки за схемою переміщення, одночасний рух в напрямках суворо забороняється. Перед початком роботи доцільно перевірити працездатність блокуючи кінцевих перемикачів та гальмівної системи.

– Для зменшення негативного впливу напруження та інтенсивної праці передбачено: оптимальний розподіл робочого часу (10 хв на 1 годину) та використання засобів автоматизації та механізації.

– Основним захистом від теплових потоків підвищеною інтенсивністю використовують спеціальний одяг, для захисту від підвищених температур (суконний одяг) згідно із ГОСТ 12.4.221-2002 ССБТ «Одежда специальная для защиты от повышенных температур теплового излучения», в тому числі з азбестовими накладками, на головних щитків згідно із ГОСТ 12.4.035-78 ССБТ «Щитки защитные лицевые. Технические условия».

– Для виключення можливості опіків при виплесках гартувального мастила при гартуванні використовують спеціальний одяг (суконний чи брезентовий) згідно із ГОСТ 12.4.221-2002 ССБТ «Одежда специальная для защиты от повышенных температур теплового излучения» та інструктажі по техніці безпеки при роботі із гартувальним мастилом.

– Для виключення механічних травм при підготовці зразків для випробування на твердість використовують тільки справне обладнання, а також не допускають працівників, які не пройшли інструктажі з правил безпеки. Перед установкою абразивного круга ретельно оглянути і перевірити токарно-шліфувальний верстат, та абразивний круг на відсутність тріщин легким постукуванням (в підвішеному стані) дерев'яним молотком масою

200-300 г. Справний круг при постукуванні дає чистий дзвінкий звук, несправний - глухий. При обробці абразивними кругами виробів, утримуваних в руках, застосовують підручники. Підручники повинні бути пересувними, які забезпечують можливість установки їх в необхідне положення по мірі обертання круга НПАОП 28.52-1.22-64 «Правила и нормы безопасной работы с абразивным инструментом.» Не приступати до роботи при відсутності захисного екрана або бічних стінок.

– Для виключення ураження електричним струмом в проекті передбачені основні заходи електробезпеки:

Організаційні. До роботи допускаються особи які пройшли навчання та перевірку знань з електробезпеки та отримали допуск до певної групи електробезпеки згідно ПУЕЗ 2017 або ПТБЕ. Ремонт обладнання повинен здійснювати тільки спеціально підготовлений персонал.

Технічні. розташування не ізолюваних струмопровідних ліній на недоступній висоті (до 1000 Вт, не менше 3,5 м, а вище 1000 Вт, не менше 6м), також передбачене заземлення. Спуски шинопроводів повинні бути надійно огороженні суцільним огороженням, відкриття якого можливе для спеціальних пристроїв. Кабельні мережі повинні мати надійну ізоляцію опір якої не менше 0,5 МОм. Усе технологічне обладнання надійно заземлене ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ «Защитное заземление, зануление». Обов'язковим є використання блокуючих і ізолюючих пристроїв.

### 6.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці.

Для виключення підвищеної загазованості шкідливими речовинами в процесі азотування над пічками потрібно розміщувати місцеву вентиляцію, яка буде всмоктувати шкідливі гази.

При освітленні виробничих приміщень використовують природне освітлення та штучне, здійснюване електричними лампами, і комбіноване, при якому в світлий час доби недостатнє за нормами природне освітлення доповнюється штучним. До складу системи штучного загального рівномірного освітлення рекомендовані дуго-розрядні лампи типу ДРЛ 250 – 400 Вт, які встановлені в світильники типу РСП по одній шт.

Виробничу будівлю проектуємо з урахуванням можливості максимального використання природного освітлення, що дозволить отримати значну економію електроенергії. Виробниче освітлення в проектуваному цеху передбачає як природне, через скло стін прольоту і на даху будівлі - крізь світлові вставки ліхтарі, так і штучне. Освітлення робочого місця виконана відповідно с ДНБ В.2.5-28-2006 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне та штучне освітлення».

Норма освітлення для цеху 200лк. При верхньому і боковому природному освітленні коефіцієнт природної освітленості буде не менше 2, а при верхньому і боковому буде не менше 1.2. Світильники місцевого освітлення оснащені відбивачами, виготовленими з матеріалу, що не просвічує та із захисним кутом не менше 30 градусів, а при розташуванні світильників нижче рівня очей працюючого - не менше 10 градусів. Крім робочого освітлення в цеху передбачено аварійне освітлення, яке необхідно для освітлення в випадку аварій і надзвичайних ситуацій.

Для приведення параметрів повітряного середовища до норм, вказаних в таблиці 4.1, на ділянці встановлюється система загальнозмінної вентиляції. Проект вентиляції виконується відповідно до СНіП 20485-86 «Опалювання, вентиляція і кондиціонування. Норми проектування». При проектуванні враховуються вимоги ГОСТу 121005-88 «Загальних санітарно-гігієнічних вимог до повітря робочої зони» і СН 245-71 «Санітарні норми проектування промислових підприємств». У холодний період використовується калорифер.

Розрахунок продуктивності природної вентиляції:

$$L=K \cdot V_n, \text{ м}^3/\text{год.} \quad (5.1)$$

де:  $K$  – кратність повітря обміну ( $K=2$ )

$V_n$  – об'єм приміщення

$$S = 850 \text{ м}^2 \text{ h}=7$$

$$L = K \cdot V_n = 2 \cdot (850 \cdot 7) = 11900 \text{ м}^2$$

Таблиця 6.1 – Оптимальні норми температури, відносній вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень

Сезон року	Температура, °C (оптимально- допустима)	Відносна вологість, % (оптимальна)	Швидкість руху, м/с (оптимальна)
Холодний період	16-19	40-60	<0,3
Теплий період	18-26	40-60	<0,4

Розрахунок продуктивності природної вентиляції:

$$L=K \cdot V_n, \text{ м}^3/\text{год.} \quad (6.2)$$

де:  $K$  – кратність повітря обміну ( $K=2$ )

$V_n$  – об'єм приміщення

$$S = 850 \text{ м}^2 \text{ h}=7$$

$$L = K \cdot V_n = 2 \cdot (850 \cdot 7) = 11900 \text{ м}^2$$

Розрахунок кількості зовнішнього повітря, необхідного для асиміляції надлишкового тепла у приміщенні:

$$L = \frac{Q}{c \cdot \gamma (t_{\text{вн.}} - t_{\text{зовн.}})} \text{ м}^3/\text{год} \quad (6.3)$$

де:  $Q$  – загальна кількість тепловиділення, кДж/год

$c$  – питома теплоємність повітря, що дорівнює 1 кДж/(кг °С)

$\gamma$  – густина зовнішнього повітря

$$Q = 38000 \text{ кДж/год}$$

$$t_{\text{вн.}} = 37, \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{зовн.}} = 27, \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\gamma = \frac{353}{273 + 27} = 1,17 \text{ кг/м}^3$$

$$L = 3247,8 \text{ м}^3/\text{год}$$

#### 6.4 Заходи з пожежної безпеки

Згідно із ДНБ В.1.1.7. - 2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» ступінь вогнестійкості будівельних конструкцій будівлі - II, тобто воно зібрано в основному з важко займистих матеріалів.

Основні причини пожеж в цеху:

- порушення технологічного режиму;

- несправність електрообладнання (коротке замикання, перевантаження)

- конструктивні недоліки обладнання;

- ремонт обладнання на ходу.

Заходи з пожежної профілактики поділяються на організаційні, технічні, режимні та експлуатаційні.

Організаційні заходи передбачають правильну експлуатацію машин і внутрішньозаводського транспорту, правильне утримання будівель, території, протипожежний інструктаж працівників, і тощо.

До технічних заходів належать, дотримання протипожежних правил, норм при проектуванні будинків, при влаштуванні електромереж і устаткування, опалення, вентиляції, освітлення, правильне освітлення обладнання.

Заходи режимного характеру - це заборона куріння в невстановлених місцях, виробництва зварювальних та інших вогневих робіт в пожежонебезпечних приміщеннях.

Кількість первинних засобів пожежогасіння визначаються відповідно до НАПБ 03.001 - 2004 «Типові норми належності вогнегасників». Площа цеху 1815 м<sup>2</sup>. Виходячи з цього обираємо 2 порошкових вогнегасника, ємністю по 5 кг кожен.

При проектуванні передбачені шляхи евакуації на випадок пожежі - по проходах, проїздах, аварійні виходи. Оскільки будівля одноповерхова, то евакуаційним вважається вихід, що веде з приміщень цеху назовні через коридор (вестибюль). Шляхи евакуацій розосереджені, і найбільша відстань від найвіддаленішого робочого місця до найближчого виходу не перевищує 50 м.

Пирина пожежних проїздів дорівнює 4 м. Ширина проходів, службовців для евакуації людей, 1 м, коридорів 1,4 м, дверей 2 м. Всі ворота і двері, службові для евакуації людей, відкриваються назовні.

Будівля забезпечена різним протипожежним інвентарем і вогнегасниками, є внутрішній пожежний водопровід.

## 7 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

Для підвищення працездатності зубчасті колеса піддаються комплексному зміцненню, що включає хіміко-термічну обробку (цементацию) і поверхневе пластичне деформування (після зубошліфування). Холодна пластична деформація істотно змінює будову фаз цементованого шару, що має визначальний вплив як на характеристики якості поверхневого шару, так і на найважливішу експлуатаційну властивість. на найважливішу експлуатаційну властивість зубчастих коліс - контактну витривалість.

Поверхневе пластичне деформування помітно змінює стан поверхневого шару зразків сталі 12Х2Н4А. Розподіл мікротвердості за товщиною шару залежить від енергії деформування  $E$  (рис.7.1)

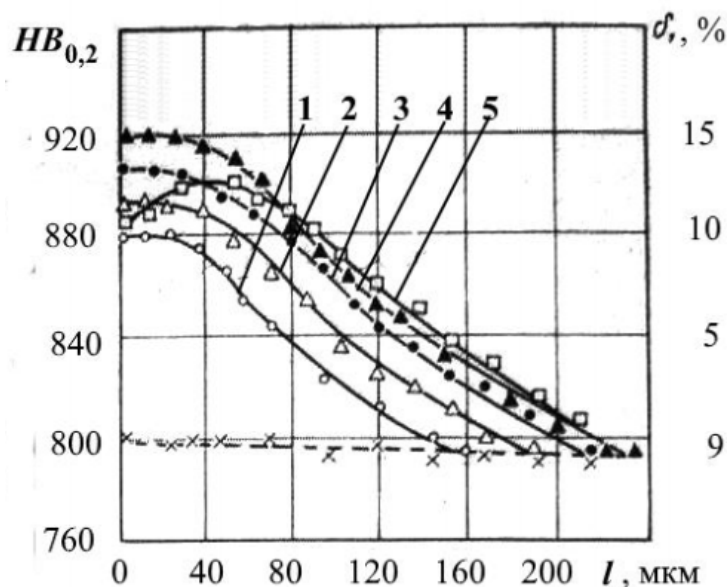
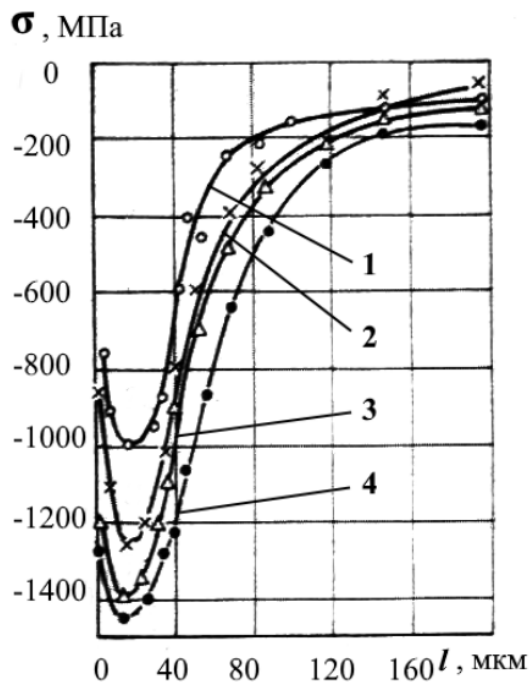


Рисунок 7.1 - Розподіл мікротвердості  $H$  за товщиною цементованого шару ( $l$  - відстань від поверхні) сталі 12Х2Н4А та ступінь його зміцнення  $\delta$  за різної енергії деформування  $E$ , кДж/м<sup>2</sup>: 1 - 20; 2 - 40; 3 - 60; 4 - 80; 5 - 100 (штрихова лінія - до зміцнення)

Ступінь зміцнення  $\delta = (\Delta H / H_{\text{вих}} 100) \%$ максимальний при  $E \approx 80$  кДж/м<sup>2</sup>. Цей режимзабезпечує також практично граничну товщину зміцненого шару (близько 230 мкм). Режими з енергією дробу понад 80 кДж/м<sup>2</sup>застосовувати недоцільно, оскільки при цьому твердість на поверхні зразків знижується;максимум твердості зміщується в підповерхневий шар (див. рис. 7.1).

Для зміцнених дробом роликівих зразків зі сталі 12Х2Н4А характерні високізначення залишкових напружень стиснення (рис.7.2).



1- 20; 2 - 40; 3 - 60; 4 - 80

Рисунок 7.2 - Епюри тангенціальних залишкових напружень  $\sigma$  (l - відстань від поверхні) у зразках зі сталі 12Х2Н4А за різної енергії деформування E, кДж/м<sup>2</sup>

Максимальні залишкові напруження і напруження біля поверхні зразків зростають зі збільшенням кінетичної енергії дробу, досягаючи найбільших значень також при  $E \approx 80$  кДж/м<sup>2</sup>.

Шорсткість поверхні зразків залежить від енергії деформування (часунаклепу), якості дробу та вихідної шорсткості. За низької похідної шорсткості, яку мали роликові зразки ( $R_a = 0,18 \dots 0,22$  мкм), і невисокої  $E = 20 \dots 40$  кДж/м<sup>2</sup> спостерігається погіршення мікрогеометрії поверхні ( $R_a 0,25 \dots 0,45$  мкм). При високих значеннях  $E \approx 160$  кДж/м<sup>2</sup> шорсткість поверхні дещо зменшується ( $R_a = 0,23 \dots 0,29$  мкм), але не досягає вихідного значення.

Наклеп дробом чинить неоднозначний вплив на контактну витривалість сталі 12Х2Н4А (рис. 7.3). Підвищення її в 1,5 рази порівняно з контактною витривалістю у вихідному (недеформованому) стані спостерігається лише при зміцненні з  $E \approx 40$  кДж/м<sup>2</sup>. Режим обробки з  $E \approx 80$  кДж/м<sup>2</sup>, в результаті якої досягаються найбільш високі твердість поверхні та залишкові напруження стиснення, призводить до зниження довговічності сталі 12Х2Н4А майже в 2 рази. Таким чином, вибір режимів деформування матеріалу за характеристиками якості поверхні може призвести до негативного ефекту.

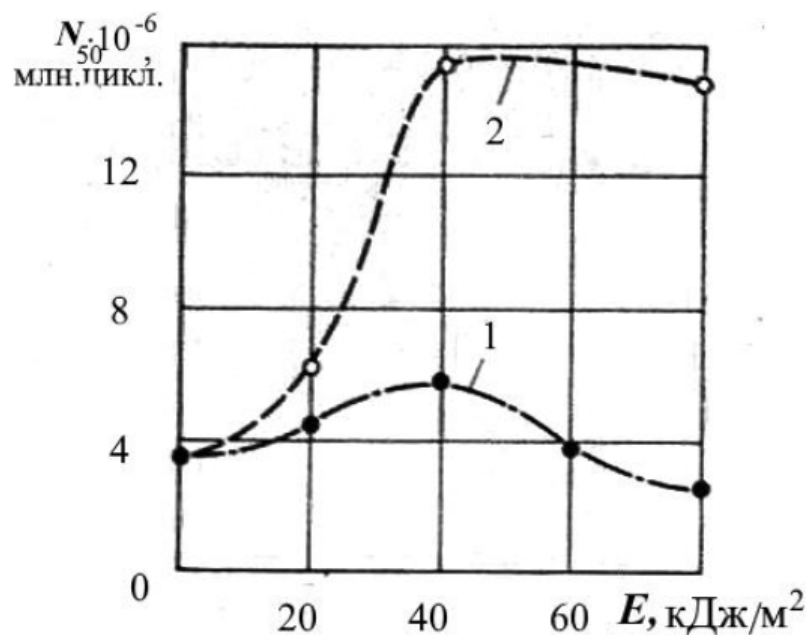


Рисунок 7.3 - Контактна витривалість N50 сталі 12Х2Н4А залежно від кінетичної енергії

дроби E: 1 - наклеп; 2 - наклеп, віброшліфування  
і відпуск при  $t = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$  2 год

Відсутність однозначного зв'язку міжконтактною витривалістю, мікротвердістю залишковими напруженнями стиснення зумовлена істотними змінами структури фаз цементованого шару сталі під час поверхневого пластичного деформування. Вирішальний вплив на ці зміни має взаємодія в процесі деформації трьох фаз - мартенситу відпуску, залишкового аустеніту і включень надлишкових карбідів.

У вихідному стані мартенсит цементованого шару сталі 12X2H4A характеризується неоднорідністю, високими мікроспотвореннями кристалічної ґратки. Залишковий аустеніт, кількість якого, за даними рентгеноструктурного аналізу, становить у сталі 12X2H4A до деформаційного зміцнення 10...17 %,

Важлива деталь структури цементованого шару сталі 12X2H4A – неоднорідно розподілені в мартенситній матриці глобули надлишкових карбідів. Мікродифракційний аналіз показує, що вони являють собою карбіди  $M_{23}C_6$  з ГЦК-ґраткою і параметром  $a = 1,062$  нм. За даними мікроспектрального енергодисперсійного аналізу, такі карбіди, що формуються в процесі тривалого (5...6 год) відпуску при  $t = 650...680\text{ }^{\circ}\text{C}$  і не розчиняються під час нагрівання під загартування, містять у середньому 5...7 % Cr; 0,9...1,6 % Ni; 0,8...1,0 % Mn; 90...92 % Fe.

Результати аналізу розмірів карбідних частинок наведено в таблиці 7.1. За геометричні параметри частинок карбідної фази прийнято їхній максимальний розмір за вертикалі (перпендикулярно поверхні зразка), а також еквівалентний діаметр, тобто діаметр кола, площа якого еквівалентна площі перерізу частинки.

У таблиці наведено розподіл частинок карбідної фази для зон шириною 20 мкм шарово через кожні 40 мкм по всій товщині заевтектної частини цементованого шару. Для кожної зони розподіл карбідних частинок

досліджували в розмірному діапазоні 0,5...6,5 мкм з розбивкою на 6 класів. Видно, що основна частина карбідів має розмір близько 1...3 мкм.

Таблиця 7.1 – Морфологія карбідної фази цементованого шару

Відстань від поверхні до центру зони, мкм	Середній діаметр частинки, мкм	Об'ємна доля карбідної фази, %	Загальне число частинок на площі $20 \times 10^3$ мкм <sup>2</sup>	Число частинок розміром, мкм					
				0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5
				...	...	...	...	...	...
10	2,64	7,63	345	112	115	82	29	4	3
50	2,95	6,33	263	75	88	74	19	7	0
90	2,01	3,14	259	174	62	21	9	2	1
130	1,25	1,81	348	302	43	2	0	1	0
170	1,16	1,07	236	208	26	2	0	0	0
210	1,08	1,06	265	239	25	1	0	0	0

Наявність досить розвиненої карбідної фази чинить несприятливий вплив на мартенситну матрицю в процесі її пластичної деформації. «Жорсткі» включення карбідів, що не деформуються, спричиняють локалізацію в мартенситі мікропластичної деформації і, як наслідок, формування високих локальних мікронапружень, що призводять до більш раннього зародження тріщин контактної втоми.

Підвищенню контактної витривалості зразків сталі 12Х2Н4А сприяє деформування зі строго дозованою кінетичною енергією дробу, при якому процес вирівнювання мікронапружень і закріплення дислокацій атомами вуглецю превалюють над процесами збільшення густини структурних недосконалостей і загальної напруженості структури. Однак формування більш стабільної дислокаційної структури відбувається при невеликому зміцненні поверхні, тому підвищення контактної витривалості

сталі 12Х2Н4А невелике (див. рис. 4.3). Наклеп з  $E \approx 80 \text{ кДж/м}^2$  створює вищий ступінь зміцнення, але викликає структурні зміни, що знижують локальний опір втоми. При цьому режимі зміцнення збільшується щільність дислокацій у мартенситі й інтенсивно розвивається деформація матриці біля включень. Активізуючи роботу джерел дислокацій і блокуючи їх переміщення, включення карбідів є місцем інтенсивного накопичення структурних недосконалостей [6]. Мікроосередки мартенситу поблизу карбідів стають «слабкими ланками» тонкої структури сталі 12Х2Н4А зі зниженим опором зародженню втомних тріщин.

Важливий резерв підвищення контактної витривалості сталі 12Х2Н4А – застосування після наклепу дробом низькотемпературного відпуску (див. рис. 3, крива 2). Відпуск при  $t = 130^\circ\text{C}$  2 год сприяє підвищенню довговічності сталі 12Х2Н4А приблизно в 3 рази порівняно з довговічністю у вихідному (після шліфування) стані. Його позитивний вплив пов'язаний зі зменшенням локальних мікронапружень поблизу структурних концентраторів напружень, а також зі збільшенням ступеня закріплення дислокацій атомами вуглецю. Значне підвищення довговічності в результаті деформаційного старіння сталі 12Х2Н4А певною мірою пов'язане зі збігом схем напруженого стану під час наклепу і в зоні контактного навантаження. Блокування дислокацій протікає більш інтенсивно в системі площин ковзання, близькій до напрямку пластичної течії металу під час контактного навантаження. Разом з тим, закріплення дислокацій посилює крихкість цементованого шару і, як наслідок, підвищується його чутливість до якості поверхні. З цієї причини ефективність відпуску максимальна в тому разі, якщо йому передують окрема операція – електрополірування для зменшення шорсткості поверхні.

## ВИСНОВКИ

В роботі проаналізовано умови експлуатації зубчастих колес, на основі яких висунуті вимоги до матеріалів. Пояснено, чому для виготовлення зубчастого колеса рекомендована сталь марки 12Х2Н4А.

Запропоновано маршрутну технологію виготовлення зубчастих колес, яка включає наступні операції: перша – штампування; друга – додаткова термічна обробка (відпал); третя – механічна обробка; четверта – зміцнювальна термічна обробка; п'ята – основна механічна обробка; шоста – основна термічна обробка; сьома – хіміко-термічна обробка; восьма – додаткова механічна обробка і остання операція – вихідний контроль.

Надана характеристика сталі 12Х2Н4А, а саме зазначено хімічний склад, температури критичних точок, вплив легувальних елементів на структуру та властивості матеріалу, ізотермічна діаграма розпаду переохолодженого аустеніту, за допомогою якої була розрахована критична швидкість охолодження. Розглянуто вплив хіміко-термічної обробки (цементация) на властивості матеріалу, показано діаграму стану Fe-C та зазначені фази, які виділяються при цементации сталі 12Х2Н4А.

В четвертому розділі наведене обґрунтування режимів термічної обробки, зроблені розрахунки маси садки, тривалості кожного етапу процесу термічної обробки. Було запропоновано обладнання для термічної та хіміко-термічної обробки. На основі чого була складена технологічна карта та графік термічної обробки зубчастих колес зі сталі 12Х2Н4А.

В п'ятому розділі проаналізовано можливості утворення дефектів на кожному етапі термічної обробки, запропоновано можливості їх усунення та методи контролю.

В шостому розділі запропоновано використовувати правила безпеки охорони праці та засоби індивідуального захисту при проведенні процесів термічної та хіміко-термічної обробки.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Ляшенко Б. А.  
Основные направления развития поверхностного упрочнения зубчатых колес./ Б. А. Ляшенко, Э. К. Посвятенко, С. А. Довжук // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. -2012-№ (24 (2)), -С. 8-12.
2. Evtiukov S., Method for multi-criteria evaluation of the complex safety characteristic of a road vehicle/ S. Evtiukov, M Karelina., A. A Terentyev // Transportation Research Procedia. Elsevier B.V., - 2018. - С. 149-156.
3. Rajan T.V. Heat treatment: principles and techniques / T.V Rajan, C. P. Sharma // PHI Learning Pvt. Ltd – 2011 – 611p.
4. Шелковой А.  
Обеспечение эксплуатационных свойств закаленных зубчатых колес/ А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, М. И. Гасанов // Вісник сучасних технологій - 2017 - № 4 - С 61-70.
5. Онишков Н. П. К оценке контактно-усталостной долговечности химико-термоупрочненных зубчатых колес/ Н. П. Онишков, В.И. Коротков // Advanced Engineering Research. – 2017. – Т. 17. – №. 3 (90). – С. 5-13.
6. George E. Totten. Steel Heat Treatment - Metallurgy And Technologies / G. E. Totten // CRC Press - 2006.- 1077 p.
7. Davis J. R. . ASM Speciality Handbook Stainless Steels (Asm Specialty Handbook) / J. R. Davis // ASM International – 1995 – 600 p.

8. Budinski K. G. Properties and Selection. Engineering Materials. Englewood Cliffs / K. G. Budinski, M. K. Budinski // New Jersey: Prentice-Hall – 1992 – 817 p.

9. Основи фізико-технічних та хіміко-термічних процесів для підвищення ресурсу виробів машинобудування. Навчальний посібник / Уклад. С.П. Гожій // Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 104 с.

10. Massalski T. V. Phase diagrams in materials science / T. V. Massalski // Metallurgical Transactions – A20 – 1989 – 1323p.

11. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної бакалаврської дипломної роботи для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» освітня програма (спеціалізація) «Прикладне матеріалознавство» усіх форм навчання. / Укл.: І.М. Лазечний, О.В. Климов, О.А. Глотка, Ю.І. Кононенко, О.В. Лисиця. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 57 с.

12. Катренко Л. А. Охорона праці. Курс лекцій. Практикум: навчальний посібник / Л. А. Катренко, Ю. В. Кіт, І. П. Піскун – 2-ге вид., стер. – Суми: ВТД «Університетська книга» - 2007. – 496 с.

13. Киричок П. О., Олійник В. Г., Киричок Т. Ю. Зміцнення поверхонь металевих деталей / П. О. Киричок., В. Г. Олійник., Т. Ю. Киричок // К.: Преса України – 2004 – 240 с.

14. Greenberg J. H. Industrial Thermal Processing Equipment Handbook / J. H. Greenberg // ASM International. 1994 - 400 p.

15. Dossett J.L., Totten E.G. Salt Bath Heat Treatment and Equipment / J. L. Dossett, G.E. Totten // ASM International – 2014 – 412 p.

16. Czerwinski F. Heat treatment: Conventional and novel Applications / F. Czerwinski // BoD – Books on Demand – 2012 – 46 p.

17. Муравьев, Д. В.. Анализ способов химико-термической обработки при упрочнении зубчатых колес / Д.В. Муравьев // Инновационные проекты и технологии машиностроительных производстве - 2019 - №7- С. 20-27.

18. Китаев Н. И. Исследование прочностных характеристик азотированного зубчатого колеса/ Н. И. Китаев, С. Я.Пичхидзе // Материаловедение. - 2021. - № 8 - С. 3-8.

19. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Обладнання процесів теплової обробки матеріалів та виробів» для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» усіх форм навчання / Укл.: І.М. Лазечний, В.Л. Грешта.– Запоріжжя, ЗНТУ, 2017. – 74с

20. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Наукові основи вибору матеріалів і технологій» для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» освітня програма (спеціалізація) «Прикладне матеріалознавство», «Термічна обробка» усіх форм навчання /Укл.: І.М. Лазечний, О.А. Глотка, Ю.І. Кононенко, Г.Г. Трикоз, О.В. Лисиця. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 104 с