

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет
(повне найменування факультету)

Кафедра «Фізичне матеріалознавство»
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

бакалавра

(ступінь вищої освіти)

на тему Вибір раціонального режиму хіміко-термічної обробки

(назва теми)

для валу-шестерні зі сталі 25ХГТ

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

Спеціальності 132 «Матеріалознавство»

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

НАЗАРЕНКО Максим Олександрович

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник КОНОНЕНКО Юлія Іванівна

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

2024

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 «Фізичне матеріалознавство»

Вадим ОЛЬШАНЕЦЬКИЙ

« _____ » _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

НАЗАРЕНКО Максим Олександрович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Вибір раціонального режиму хіміко-термічної обробки для валу-шестерні зі сталі 25ХГТ

керівник проєкту (роботи) ст. викладач КОНОНЕНКО Юлія Іванівна,

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від « _____ » _____ 20__ року № _____

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Креслення валу-шестерні, сталь 25ХГТ: властивості серцевини: $\sigma_B \geq 1400$ МПа; $KCU \geq 60$, $HRC_{серц} \geq 30$; властивості поверхні: $h = 0,8 \dots 1,0$ мм; $HRC_{пов} 57 \dots 63$.

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

1. Характеристика та умови експлуатації виробу, вимоги до матеріалу.

2. Номенклатура та маршрутна технологія виготовлення виробів.

3. Характеристика матеріалу виробу.

4. Розробка режимів і технологій хіміко-термічної обробки.

5. Технічний контроль, попередження та виправлення дефектів.

6. Охорона праці та безпека життєдіяльності

7. Спеціальна частина.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів) 4 слайди

Вал-шестерня та матеріал для його виготовлення.

Графік хіміко-термічної обробки валу-шестерні, виготовленого зі сталі 25ХГТ.

Дефекти, що можуть виникати при цементації валу-шестерні зі сталі 25ХГТ.

Вибір раціонального режиму хіміко-термічної обробки (ХТО) для валу-шесте
 6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-5, 7	КОНОНЕНКО Ю.І., ст. викладач		
6	НЕСТЕРОВ О.В, к.т.н., доцент		
н/к	ФАСОЛЬ Є.О., ст. викладач		

7. Дата видачі завдання « 25 » квітня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	При-мітка
1	Характеристика та умови експлуатації виробу, вимоги до матеріалу	03 травня 2024 р.	
2	Номенклатура та маршрутна технологія виготовлення виробів	08 травня 2024 р.	
3	Характеристика матеріалу виробу	13 травня 2024 р.	
4	Розробка режимів і технологій хіміко-термічної обробки	21 травня 2024 р.	
5	Технічний контроль, попередження та виправлення браку	28 травня 2024 р.	
6	Охорона праці та безпека життєдіяльності	31 травня 2024 р.	
7	Спеціальна частина	04 червня 2024 р.	

Студент(ка)

_____ Максим НАЗАРЕНКО
 (підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

_____ Юлія КОНОНЕНКО

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до бакалаврської роботи: 64 с., 5 табл., 10 рис.,
4 дод., 21 джерело.

ВАЛ-ШЕСТЕРНЯ, 25ХГТ, ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА,
ЦЕМЕНТАЦІЯ, МІКРОСТРУКТУРА, МАРТЕНСИТ, ШАХТНА ПІЧ, САДКА,
ТВЕРДІСТЬ

Об'єкт розробки – вал-шестерня зі сталі 25ХГТ.

Мета роботи – обрати раціональний режим хіміко-термічної обробки для валу-шестерні зі сталі 25ХГТ на основі аналізу умов експлуатації цієї деталі, впливу легувальних елементів сталі 25ХГТ на її експлуатаційні властивості. Для вирішення цієї проблеми необхідно провести аналіз літературних джерел, присвячених цій темі, зокрема приділити увагу умовам виходу з ладу валу-шестерні, основним етапам її виготовлення, особливостям хімічного складу, можливим варіантам хіміко-термічної обробки.

ЗМІСТ

	С.
Вступ	6
1 Характеристика та умови експлуатації виробу, вимоги до матеріалу	7
2 Номенклатура та маршрутна технологія виготовлення виробів	10
3 Характеристика матеріалу виробу	14
4 Розробка режимів і технологій хіміко-термічної обробки	20
5 Технічний контроль, попередження та виправлення браку	36
6 Охорона праці та безпека життєдіяльності	41
6.1 Аналіз потенційно небезпечних процесів	41
6.2 Заходи безпеки виробничих процесів	42
7 Спеціальна частина	48
Висновки	56
Перелік джерел посилань	58
Додаток А Вал-шестерня та матеріал для його виготовлення	61
Додаток Б Графік хіміко-термічної обробки валу-шестерні, виготовленого зі сталі 25ХГТ	62
Додаток В Дефекти, що можуть виникати при цементації валу- шестерні зі сталі 25ХГТ	63
Додаток Г Вибір раціонального режиму хіміко-термічної обробки (ХТО) для валу-шестерні	64

ВСТУП

Ускладнення систем різноманітних машин, підвищення вимог до їхньої експлуатації, конкурентність на ринку машинобудівної продукції невідкладно вимагають покращення якості деталей машин на усіх етапах їхнього виготовлення.

Вал-шестерня є основною конструктивною частиною різноманітних редукторів, від якості її виготовлення залежить працездатність усього вузла. Тому для машинобудівної галузі є дуже важливим обрати результативну та економічно обґрунтовану технологію обробки такої деталі.

В процесі експлуатації зубці валу-шестерні підлягають згину при максимальному одноразовому навантаженні, згину при багатократних циклічних навантаженнях, внаслідок чого в корені зубця розвиваються найбільші напруження і може відбуватися втомне руйнування, також в процесі експлуатації відбувається знос поверхневого шару. Матеріал деталі валу-шестерні у зв'язку такими складними умовами експлуатації повинен відповідно володіти високими міцністю та зносостійкістю поверхневого шару, високою границею витривалості при згині та дії контактних навантажень, зберігаючи в'язку серцевину. Також вал-шестерня працює в умовах вібрацій при від'ємних температурах, тому матеріал також повинен володіти достатньо високою ударною в'язкістю при від'ємних температурах. Вказаним вимогам добре відповідають сталі з групи конструкційних цементовних після проведення хіміко-термічної обробки. Вибір раціонального режиму хіміко-термічної обробки для валу-шестерні є актуальною задачею з точки зору отримання високих експлуатаційних властивостей виробу, економічної доцільності, а також безпечних умов праці.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИРОБУ, ВИМОГИ ДО МАТЕРІАЛУ

Характерними типовими деталями, що слугують для передавання обертального руху в машинобудуванні, є вали, осі, вальниці і тому подібне. Обертові частини приводів машин – зубчасті колеса, диски, муфти, шківни тощо у більшості випадків установлюють на валах і осях, які розташовуються горизонтально, вертикально або під кутом.

Вал є деталлю, яка обертається в вальницях і передає крутний момент. Конструктивно вали поділяють на прямі, колінчасті, шліцьові, вали-шестерні тощо. Для передачі сил вали сполучають з зубчастими колесами (або шестернями) і шківнами за допомогою шпонок, штифтів або шліцьовим з'єднанням. Вал сприймає радіальні та осьові сили (нормальні напруження) і передає до деталі обертаючий момент (дотичні напруження). Вали завжди обертаються, тобто напруження: згину – знакозмінні, напруження розтягання (стискання) – постійні, кручення – залежать від характеру моменту. Деякі вали не підтримують обертові деталі й працюють тільки на кручення.

Вал-шестерня являє собою тіло обертання і об'єднує в собі вал і шестерню. Шестерню при цьому нарізають в тілі валу, її діаметр може бути максимум в два рази більше основного діаметра валу, а у випадку, коли шестерню насаджують на прямий вал, її діаметр може бути набагато більший.

Вал-шестерня в такому монолітному виконанні має більше переваг перед розбірним варіантом, оскільки така конструкція є більш надійною, жорсткою і точною. До переваг розбірної конструкції можна віднести можливість виконати шестерню та вал з різних матеріалів. Іноді роздільне з'єднання є бажаним з точки зору практичності, оскільки при заміні зламаних деталей не потрібно замінювати обидві складові або з точки зору економії – наприклад, використання пластикової шестерні на сталевому валу в малонавантажених механізмах.

Вали-шестерні знайшли широке використання в різноманітних приводних механізмах та механічних редукторах. [1, 2]

На рис. 1.1 показано креслення валу-шестерні.

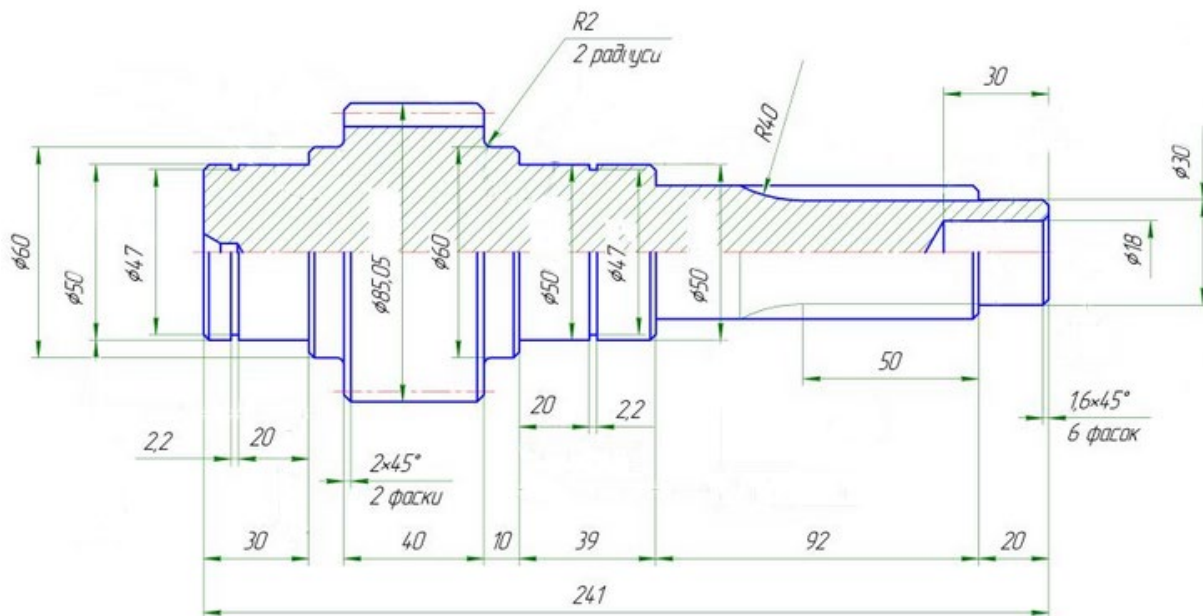


Рисунок 1.1 – Креслення валу-шестерні

Вали-шестерні, які підлягають значним всебічним навантаженням, дуже швидко зношуються та стають непридатними до подальшої експлуатації. Вал-шестерня працює в умовах дії радіального знакозмінного зосередженого навантаження, осевого навантаження та крутного моменту. Зубці зубчастого вінця підлягають згинальній силі, значним контактним тискам, тертю; під їхнім впливом відбувається нагрів та зношування зубців. Також під час роботи зубці валу-шестерні підлягають вигину при максимальному одноразовому навантаженні та вигину при багаторазових циклічних навантаженнях, унаслідок чого в корені зубця виникають максимальні напруження, які можуть призвести до втомного руйнування. Під час експлуатації виробу відбувається зношування поверхневого шару. Полумки валів-шестерень найчастіше мають втомний характер і виникають у зоні наявності концентраторів напружень. Вали-шестерні також можуть вийти з ладу внаслідок ушкодження зубців

(через втомні руйнування та контактні руйнування поверхонь, рідше – через зношування або заїдання).

Механізм втомного руйнування в великому ступені пов'язаний з неоднорідністю реальної структури матеріалів (наприклад, наявність різних вкраплень – шлаків, домішок; дефектів кристалічної ґратки, дефектів поверхні матеріалу – подряпин, корозійних уражень). З метою запобігання втомному руйнуванню відповідальної деталі необхідно:

- використовувати сталі зі зниженим вмістом сірки з метою зменшення кількості неметалевих сірчаних вкраплень, що є додатковими концентраторами напружень;
- проводити додаткове оброблення її поверхні для запобігання утворення концентраторів напружень у місцях поверхневих несутцільностей;
- використовувати методи поверхневого зміцнення з метою підвищення зносостійкості поверхні, надання їй корисних стискуючих напружень;
- дотримуватися номінального температурного режиму для запобігання мимовільного загартування матеріалу виробу. [3, 4]

Отже, якість цього вузла механізму має бути досить високою, щоб збільшити термін експлуатації деталі та уникнути простою обладнання.

Виходячи з умов експлуатації валу-шестерні та вимог до її матеріалу, можна зробити висновок про те, що раціональним матеріалом для її виготовлення є група конструкційних цементовних (нітроцементовних) легованих сталей. Такі сталі після відповідного поверхневого зміцнення з подальшою термічною обробкою володіють високою твердістю зміцнених ділянок та достатньо міцною і в'язкою серцевиною.

2 НОМЕНКЛАТУРА ТА МАРШРУТНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ

Номенклатура – це перелік виробів, які обробляються у виробничому підрозділі. В дипломній бакалаврській роботі в таблиці 2.1 наведені габаритні розміри, маса та вимоги до матеріалу валу-шестерні, яка оброблюється в термічному відділенні.

Таблиця 2.1 – Вал-шестерня, що оброблюється в термічному відділенні

Назва виробу	Матеріал виробу	Маса виробу, кг	Розміри виробу, мм		Вимоги до матеріалу
			D_{\max}	L	
Вал-шестерня	25ХГТ	2,45	85	241	Серцевина: $\sigma_B \geq 1400$ МПа; $KCU \geq 60$, $HRC_{\text{серц}} \geq 30$; поверхня: $h = 0,8 \dots 1,0$ мм; $HRC_{\text{пов}} 57 \dots 63$

Технологія виготовлення виробів на машинобудівних, інструментальних та спеціальних заготівельних підприємствах – це логічна послідовність технологічних операцій, виконання яких дозволяє отримати якісні вироби із відповідними характеристиками та властивостями матеріалу. Маршрутна технологія уявляє собою рух заготовок по цехам та відділенням підприємства, в ній зазначаються виконувані операції, які можуть повторюватися, але мати різне призначення, режими та забезпечувати зміну форми, розмірів, шорсткості поверхні, мікроструктури та властивостей.

В таблиці 2.2 наведена схема маршрутної технології виготовлення валу-шестерні зі сталі 25ХГТ.

Таблиця 2.2 – Маршрутна технологія виготовлення валу-шестерні зі сталі 25ХГТ

№ п/п	Назва операції	Цех(дільниця)	Призначення
1	2	3	4
1	Вхідний контроль	Заготівельний цех	Контроль хімічного складу, розмірів, макроструктури, відсутності інших дефектів прокату
2	Заготівельна (порізка прокату на мірні заготовки)	Заготівельний цех	Отримання заготовок із прокату для подальшого штампування
3	Штампування	Ковальський цех	Надання необхідної форми, розмірів, та створення сприятливої макроструктури
4	Попередня термічна обробка	Термічне відділення ковальського цеху	Структурна перекристалізація з метою усунення перегрівання, поліпшення оброблення різанням, підготовка мікроструктури до наступної термічної обробки (нормалізація)
5	Механічне оброблення (попереднє)	Механічний цех	Надання виробу необхідних форм та розмірів (обробка різанням)
6	Міднення	Гальванічне відділення термічного цеху	Створення на неробочих поверхнях виробу захисного (від цементациї) мідного покриття
7	Основна хіміко-термічна обробка	Термічний цех	Отримання заданих робочим кресленням глибини шару, твердості поверхонь та серцевини, виконання вимог щодо геометричних характеристик (цементация + гартування + низькотемпературний відпуск)
8	Знеміднення	Гальванічне відділення термічного цеху	Вилучення захисного мідного покриття із поверхні виробів

Кінець таблиці 2.2

1	2	3	4
9	Остаточна механічна обробка	Механічний цех	Надання виробу остаточних розмірів, геометрії, шорсткості у відповідності із робочим кресленням
10	Додаткова термічна обробка	Термічна дільниця механічного цеху	Зменшення рівня залишкових напружень, наведених шліфуванням (низькотемпературне відпускання)
11	Контрольні операції	Механічний цех	Завершальний контроль відповідності властивостей виробу, які висувалися до нього

Згідно з вищенаведеною табл. 2.1 виготовлення валу-шестерні зі сталі 25ХТ буде складатися з таких операцій [5]:

1. Вхідний контроль проводиться з метою виявити дефекти в металі, їхній характер, попередити постачання дефектного металевого матеріалу у виробничі підрозділи. Проводять візуальний аналіз, вимірюють лінійні розміри, аналіз мікро- та макроструктури, хімічного складу.

2. Заготівельна операція, що полягає в порізці прокату на мірні заготовки, дозволяє отримувати заготовки необхідного розміру.

3. Заготовками для деталей типу вал або вал-шестерня зазвичай слугує штамповка, оскільки найкраща макроструктура зубчастої частини виробу отримується шляхом штампування, коли розташування волокон відповідає її конфігурації, оскільки в цьому випадку міцність на згин підвищується.

4. Після штампування заготовки виробів піддають попередній термічній обробці – нормалізації, що полягає в нагріванні вище критичної точки A_{C3} на 40...50 °С та подальшому рівномірному охолодженню на повітрі. Бажано нагрів штампованих заготовок проводити у підвішеному стані у вертикальному положенні. Завдяки нормалізації відбувається подрібнення зерна сталі.

5. Механічне оброблення на металорізальних станках проводиться для надання деталі необхідних форм та розмірів.

6. Міднення. Оскільки цементації піддають лише зубці валу-шестерні, то решту частину виробу треба захистити від проникнення цементуючого газу. Найкращий захист надає електролітичне покриття міддю.

7. Основна хіміко-термічна обробка включає в себе цементацію з нагріванням вище критичної точки A_{C3} , гартування після підстужування з цементаційного нагріву та низькотемпературний відпуск. Така обробка формує необхідні властивості поверхні зубців та виробу в цілому.

8. Знеміднення проводять з метою усунення захисного покриття.

9. Остаточне механічне оброблення дозволяє отримати необхідні розміри та стан поверхні.

10. Додаткова термічна обробка (низькотемпературний відпуск) дозволяє зменшити рівень залишкових напружень, які створені механічною обробкою.

11. Контрольні операції забезпечують повний контроль властивостей виробу у відповідності з робочим кресленням.

3 ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛУ ВИРОБУ

У дипломній бакалаврській роботі розглядається деталь – вал-шестерня, яка виготовляється з конструкційної цементовної сталі 25ХГТ. Ця сталь призначена в основному для виготовлення навантажених зубчастих коліс та інших деталей, твердість яких більше 59 HRC.

Для забезпечення високих експлуатаційних характеристик валів-шестерень виключно важливою є правильно обрана марка сталі. Вибором марки сталі визначається увесь виробничий процес виготовлення таких деталей (штамбування, режими механічної та хіміко-термічної обробок). Сталь також повинна забезпечити найвищі значення експлуатаційних характеристик, високу технологічність та економічну доцільність. Вибір легованої сталі дозволяє отримати вищі механічні властивості після термічної (або хіміко-термічної) обробки, ніж у випадку використання вуглецевої сталі. Застосування легованої сталі дозволяє використовувати більш м'які середовища при здійсненні гартування (наприклад, олію замість води), що приводить до зниження імовірності виникнення короблення виробів або появи в них тріщин при охолодженні. Вибір введення того чи іншого легувального елемента до складу цементовної сталі повинен також здійснюватися із урахуванням його впливу на швидкість процесу цементації, глибину цементованого шару та концентрацію вуглецю в поверхневій зоні. [6]

На сьогодні для деталей, які піддають цементації, застосовують сталі з вмістом вуглецю 0,12...0,25%, представником яких є сталь 25ХГТ. Після цементації, гартування та низькотемпературного відпуску в поверхневому шарі виробу зі сталі 25ХГТ утворюється структура, що складається з мартенситу, деякої кількості залишкового аустеніту та дуже дрібних карбідів з твердістю, що перевищує 58 HRC. Тому всі характеристики (втомна та контактна витривалість, зносостійкість, ударна в'язкість, статична міцність) виробів, виготовлених з цієї сталі, мають високі значення.

На міцність та довговічність зубчастих коліс значний вплив має якість сталей, які використовують для їхнього виготовлення, і перш за все вміст таких домішок, як сірка, фосфор, миш'як, кисень, азот, водень, а також однорідність хімічного складу та структури. Для підвищення якості сталей широко застосовують позапічну обробку рідкого металу (вакуумування, обробку синтетичними шлаками, продувку інертними газами тощо), мікролегування та преплавлення зливок (вакуумний, електрошлаковий, електронно-проміневий). Все це забезпечує значне зниження вмісту шлакових включень, сполук сірки, газів.

Стабільність механічних властивостей зубчастих коліс та їхня геометрична точність в значній мірі залежать від стабільності марочного хімічного складу. Коливання вмісту хімічних елементів в сталі призводять до зміни технологічних та експлуатаційних властивостей. Наприклад, прогартовуваність сталі є дуже важливою характеристикою сталі, оскільки від неї суттєво залежать твердість серцевини зубчастих коліс, товщина зміцненого шару та деформація виробів.

В табл. 3.1 наведений хімічний склад сталі 25ХГТ. Сталь 25ХГТ – якісна, містить низький вміст таких шкідливих домішок, як сірка та фосфор.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталі 25ХГТ, ДСТУ 7806:2015 [7]

Матеріал	Масова частка елементів, %								
	C	Cr	Mn	Ti	Si	P	S	Cu	Ni
						не більше			
25ХГТ	0,22- 0,25	1,00- 1,30	0,80- 1,10	0,03- 0,09	0,17- 0,37	0,035	0,035	0,30	0,30

Критичні точки сталі 25ХГТ становлять: $A_{C1} = 735^{\circ}\text{C}$, $A_{C3} = 820^{\circ}\text{C}$, $M_{\Pi} = 360^{\circ}\text{C}$.

Механічні властивості сталі 25ХГТ після різних видів термічної обробки наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Механічні властивості сталі 25ХГТ після термічної обробки

Режим термообробки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	HRC
Нормалізація 880-950°C, повітря. Гартування 850°C, олія. Відпуск 200°C, вода, олія або повітря	980	1270	10	50	69	-
Цементация 920-950°C, підстужування. Гартування 840-860°C, олія. Відпуск 190- 210°C, повітря	1100	1500	9	-	60	Поверхня 57-63

Сталь 25ХГТ у відпаленому (рівноважному) стані відноситься до доевтектоїдного структурного класу, а в нормалізованому – до перлітного.

Сталь 25ХГТ є низьколегованою, вона у своєму складі містить такі легувальні елементи: хром (Cr) в кількості 1,00...1,30%, марганець (Mn) – 0,80...1,10% та титан (Ti) – 0,03...0,09%.

Хром є найбільш розповсюдженим легувальним елементом та порівняно дешевим. Розчиняючись в твердому розчині, він викривлює його кристалічну ґратку, збільшуючи міцнісні характеристики сталі. Хром в кількості, в якій він присутній в сталі 25ХГТ, підвищує її в'язкість та не знижує пластичність. Хром збільшує прогартуваність сталі. Хром є карбідоутворювальним елементом, тому він частково розчиняється і в цементиті.

Вплив марганцю (0,80...1,10%) на властивості сталі 25ХГТ є аналогічним впливу хрому. Він також розчиняється в твердому розчині, що приводить до його деякого зміцнення, в зазначених кількостях підвищує ударну в'язкість сталі та не знижує пластичність. Дещо збільшує прогартуваність сталі. В невеликій кількості розчиняється в ґратці цементиту.

Мікролегування сталі 25ХГТ титаном приводить до утворення важкорозчинних в аустеніті карбідів TiC . Такі карбіди подрібнюють зерно, що знижує поріг холодноламкості сталі, підвищує роботу розповсюдження тріщини та зменшує чутливість до концентраторів напружень. Спадководрібнозерниста сталь 25ХГТ стає нечутливою до перегрівання, що дозволяє проводити її гартування з цементаційного нагріву.

Треба відмітити вплив легувальних елементів на процеси, що проходять при цементації сталі. Карбідоутворювальні елементи, до яких і відносяться легувальні елементи сталі 25ХГТ, тобто хром, марганець та титан, знижують коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті. Вони підвищують максимальну концентрацію вуглецю в поверхневому шарі в порівнянні з вуглецевою нелегованою сталлю, що пов'язано з інтенсивним карбідоутворенням в поверхневому шарі. [8]

В сталі 25ХГТ присутня корисна домішка – кремній кількість якого становить 0,17...0,37%. Кремній розкислює сталь, у вигляді окислів переходять в шлак, а в зазначеній кількості залишається в сталі і сильно підвищує границю плинності.

До шкідливих домішок відносять сірку та фосфор, вміст яких суворо контролюють.

Сірка із залізом утворює хімічну сполуку FeS , яка утворює з залізом легкоплавку евтектику з температурою плавлення $988^{\circ}C$, і при гарячій обробці тиском розплавлення цієї евтектики призводить до виникнення червоноламкості.

Фосфор при розчиненні в фериті сильно спотворює його кристалічну ґратку і підвищує границі міцності і плинності сталі, але зменшує її пластичність та в'язкість. Фосфор значно підвищує поріг холодноламкості сталі і зменшує роботу розвитку тріщини. Також він має велику схильність до ліквідації. [9]

На рис. 3.1 показана діаграма ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту сталі 25ХГТ. Наявність в сталі карбідоутворювальних елементів

суттєво змінює вид діаграми ізотермічного розпаду аустеніту. Такі елементи приводять до появи на діаграмі двох мінімумів стійкості переохолодженого аустеніту, які відповідають перлітному (дифузійному) та бейнітному (проміжному) перетворенням. Обидва перетворення розділені областю відносної стійкості аустеніту. Оскільки сталь 25ХГТ є доєвтектоїдною, то то також на діаграмі присутня додаткова лінія, яка відповідає початку виділення надлишкового легованого фериту.

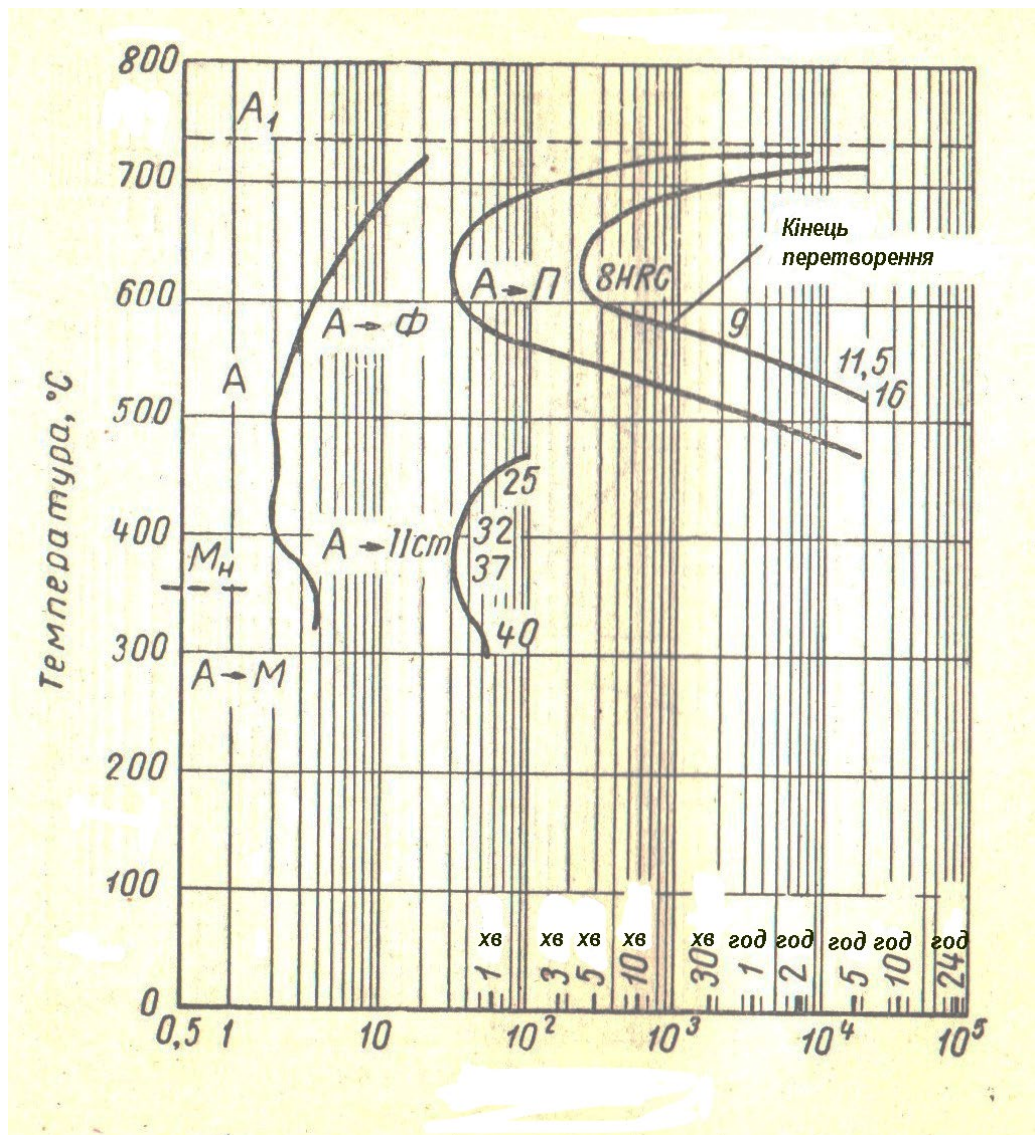


Рисунок 3.1 – Діаграма ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту сталі 25ХГТ

Розрахуємо критичну швидкість охолодження $V_{кр}$ за допомогою діаграми ізотермічного перетворення переохолодженого аустеніту сталі 25ХГТ (рис. 3.1):

$$V_{кр} = (t_n - t_{мін.ст.А.})/1,5 \cdot \tau_{мін.ст.А.},$$

де t_n – температура нагрівання; $t_n = 900^\circ\text{C}$;

$t_{мін.ст.А.}$ – температура мінімальної стійкості аустеніту; $t_{мін.ст.А.} = 630^\circ\text{C}$;

$\tau_{мін.ст.А.}$ – час до мінімальної стійкості аустеніту. $\tau_{мін.ст.А.} = 12$ с.

$$V_{кр} = (900 - 630)/1,5 \cdot 12 = 15 \text{ }^\circ\text{C/с.}$$

4 РОЗРОБКА РЕЖИМІВ І ТЕХНОЛОГІЙ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Технологія термічної (або хіміко-термічної) обробки є найважливішою складовою технологічного процесу виготовлення металевого виробу, на цій стадії вирішуються дві основні задачі: формування експлуатаційних властивостей та забезпечення необхідної розмірної точності деталей. Основна трудність в вирішенні таких задач полягає в високій дисперсії властивостей виробів, які виготовляються. У зв'язку із тим, що хіміко-термічна обробка пов'язана з нагріванням, дифузійним насиченням та охолодженням деталей, в них завжди відбуваються структурні та фазові перетворення, які призводять до об'ємних змін та формування залишкових напружень. Важливим завданням при цьому є розумне використання цих явищ для забезпечення однакових умов для усіх оброблюваних деталей.

Створення таких умов на машинобудівних заводах є утрудненим. Перш за все це пов'язано з груповим обробленням деталей, коли на піддоні в печі розміщується від декількох штук до декількох десятків та навіть сотен деталей. Такий характер обробки створює умови для неоднаковості в швидкості нагріву окремих деталей, нерівномірності насичення вуглецем, а також нерівномірності охолодження як окремих деталей, так і їхніх частин. Позитивним є характер руху насичуючої атмосфери в пічному просторі, використання приладів автоматичного керування насичуючою здатністю пічної атмосфери. Оптимізація завантаження деталей на піддон, створення раціональних умов охолодження деталей при гартуванні. [10]

Рекомендований режим хіміко-термічної обробки валу-шестерні зі сталі 25ХГТ наведено в табл.3.2. Основними операціями є цементація при 920...950°C, далі – підстужуння, гартування при 840...860°C з охолодженням в олії та низькотемпературний відпуск при 190...210°C, охолодження на

повітрі. Допоміжними операціями є промивання виробу від олії, контрольні операції.

На рис.4.1 показано графік хіміко-термічної обробки валу-шестерні зі сталі 25ХГТ; тут M_{Π} , A_{C1} та A_{C3} – критичні точки сталі 25ХГТ до хіміко-термічної обробки (тобто актуальні для незміцненої серцевини), а M'_{Π} , A'_{C1} та A'_{C3} – критичні точки сталі 25ХГТ після хіміко-термічної обробки (притаманні зміцненому поверхневому шару).

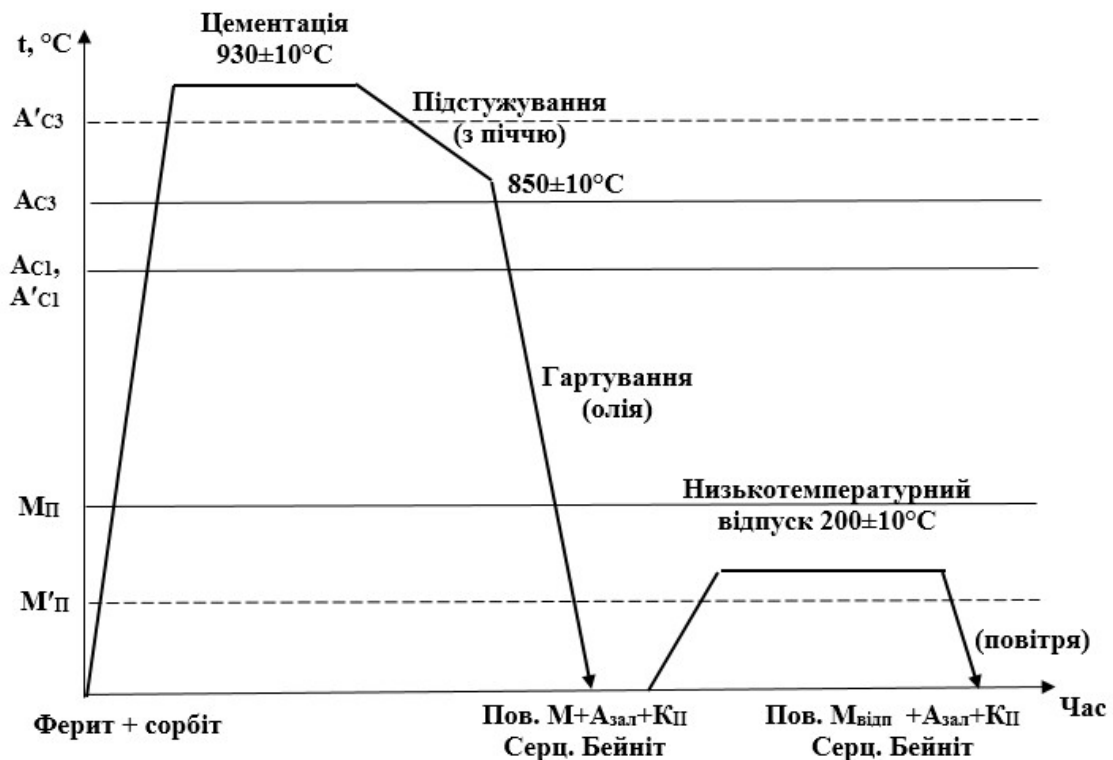


Рисунок 4.1 – Графік хіміко-термічної обробки валу-шестерні зі сталі 25ХГТ

Після попередньої термічної обробки – нормалізації, структура сталі 25ХГТ – пластинчаста ферито-сорбітна структура.

Цементация при $920 \dots 950^{\circ}\text{C}$. При нагріванні до $t_{A_{C1}}$ (735°C) змін в структурі сталі не спостерігається; при деякому перевищенні температури $t_{A_{C1}}$ відбувається перетворення перліту на аустеніт. В інтервалі температур

між t_{Ac1} (735°C) та t_{Ac3} (820°C) проходить поліморфне перетворення фериту в аустеніт. При температурах $920\dots950^{\circ}\text{C}$ здійснюється процес дифузійного насичення поверхні зубчастого вінця валу-шестерні вуглецем до концентрації $0,8\dots1,0\%$, тобто цементация. Цементацию ведуть в аустенітному стані, оскільки розчинність вуглецю в аустеніті значно більша, ніж у фериті.

Цементацию обираємо газову, яка має низку переваг в порівнянні з цементацией в твердому карбюризаторі: можна достатньо точно отримати задану концентрацію вуглецю в шарі, зменшується тривалість процесу, оскільки немає необхідності прогрівання ящиків, які наповнені низькотеплопровідним карбюризатором, забезпечується можливість повної механізації та автоматизації процесів, а також значно спрощується подальша термічна обробка деталей, оскільки гартування можна проводити безпосередньо з цементациейної печі. Основним різновидом газової цементация є цементация в контрольованих атмосферах з регулюванням складу та насичуючої активності середовища. Основа такої атмосфери – ендогаз. Однак через його низький вуглецевий потенціал при проведенні процесу цементация в робочий простір печі додають природний газ в кількості $2\dots5\%$, що дозволяє регулювати вуглецевий потенціал в необхідних межах.

Швидкість цементация залежить від температури, товщини шару та хімічного складу сталі. Вона збільшується зі зростанням температури та зі зменшенням глибини шару. Однак підвищення температури цементация приводить до зниження вмісту вуглецю в цементованому шарі. Легувальні елементи впливають на глибину цементованого шару (рис.4.2) шляхом їхнього впливу на коефіцієнт дифузії та концентрацію вуглецю в поверхневому шарі, а саме – елементи-карбідоутворювачі підвищують максимальну концентрацію вуглецю в поверхневому шарі в порівнянні з вуглецевою нелегованою сталлю, що пояснюється інтенсивним карбідоутворенням в поверхневому шарі (рис. 4.3). Всі легувальні елементи сталі 25ХГТ – хром, марганець, титан, є карбідоутворювальними елементами, тобто є такими, що підвищують вміст вуглецю в зміцненому шарі. [8]

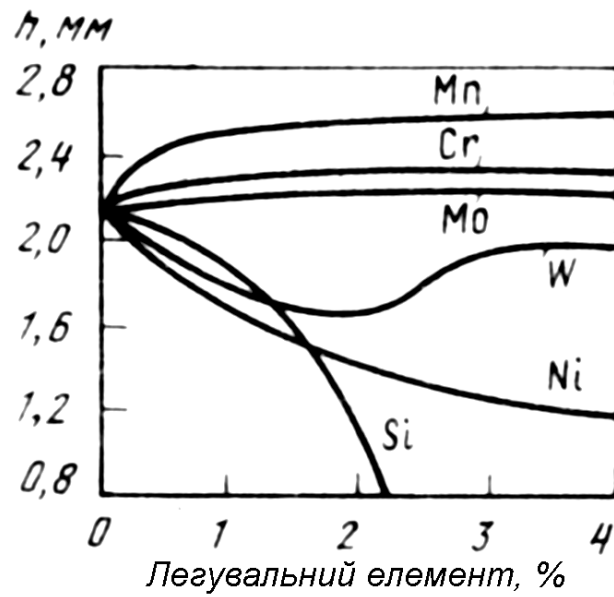


Рисунок 4.2 – Вплив легувальних елементів на глибину цементованого шару h після цементації при 925°C

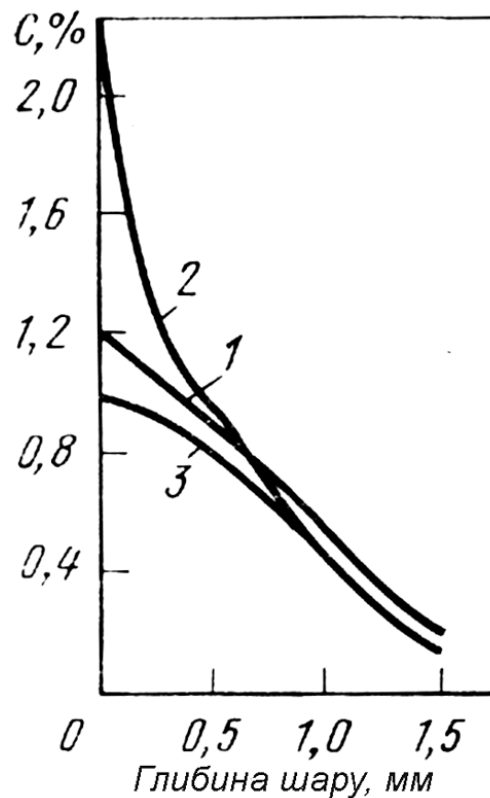


Рисунок 4.3 – Розподіл вуглецю за глибиною цементованого шару сталі: 1 – нелегованої; 2 – легованої карбїдоутворювачами; 3 – легованої некарбїдоутворювачами

Після проведення цементації в поверхневому шарі виробу концентрація вуглецю становить 0,8...1,0%, тобто структура поверхневого шару стає евтектоїдною або заевтектоїдною. Оскільки сталь 25ХГТ є спадководрібнозернистою, то нове нагрівання під гартування не проводять, а здійснюють його після підстужування (повільного охолодження з піччю) до температур 840...860°C, які є оптимальними температурами гартування для евтектоїдної або заевтектоїдної легованої сталі. Охолодження при гартуванні проводять в олії, яка забезпечує охолодження зі швидкістю вище критичної. При досягненні точки початку мартенситного перетворення $M_{\text{П}}$ аустеніт в поверхневому шарі бездифузійним шляхом перетворюється на мартенсит. В серцевині виробу утворюється структура бейніту. Завдяки застосуванню такого гартування з підстужуванням після цементації в поверхневому шарі зменшується кількість аустеніту залишкового та короблення виробів.

Кінцевою операцією хіміко-термічної обробки є низькотемпературний відпуск при температурах 190...210°C, завдяки якому зменшується рівень залишкових напружень в матеріалі виробу, мартенсит гартування переводиться в мартенсит відпуску, дещо підвищується в'язкість матеріалу.

Отже, після розглянутого режиму хіміко-термічної обробки структура зміцненого шару – високовуглецевий мартенсит з карбідами та залишковим аустенітом; структура серцевини – бейніт.

Для здійснення основних операцій хіміко-термічної обробки були обрані шахтні печі. Зазвичай такі печі використовують для термічної та хіміко-термічної обробки довгомірних, великогабаритних або невеликих деталей (зубчастих коліс, валів тощо). Розташування довговимірних деталей у печі в підвішеному стані забезпечує їм мінімальну деформацію.

Шахтна піч уявляє собою футеровану шахту циліндричного або квадратного перерізу. Каркас печі виконаний з листової сталі; робочий простір печі перекривається кришкою, що може мати різного виду приводи. Для зручності обслуговування шахтні печі будують у прямку на цегляному або

бетонному фундаменті. Схема шахтної електричної печі з контрольованою атмосферою показана на рис. 4.4.

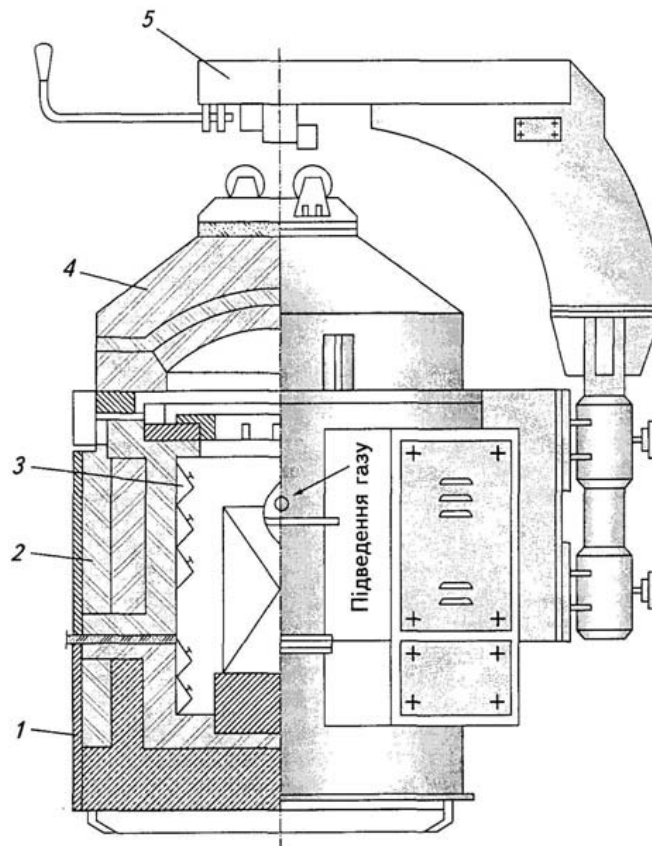


Рисунок 4.4 – Електрична шахтна піч з контрольованою атмосферою

[11]

Піч складається зі зварного кожуха 1, всередині якого є футерівка 2. На стінах камери розміщені металеві нагрівальні елементи 3. Піднімання та опускання кришки 4 виконується механізмом 5, герметизація здійснюється піщаним затвором. Контрольована атмосфера підводиться у верхню частину камери, а відведення газів проводиться через трубку в нижній частині печі.

Процес цементації здійснюється в герметичній реторті з жароміцної сталі, яка розміщується в робочій камері печі. Атмосфера, що науглецьовує, створюється випаровуванням та розкладанням рідкого карбюризатора (гасу, синтину, триетаноламіну), що подається в реторту через крапельницю в кришці печі. Відпрацьований газ відводиться через трубку і спалюється. Для

створення вихрових потоків газу та вирівнювання складу газової суміші в реторті встановлено вентилятор. [11]

Для здійснення операції цементації з подальшим підстужуванням та гартуванням обираємо шахтну піч СШЦ-6.6/10, для проведення низькотемпературного відпуску – шахтну піч СШО-6.6/7 (позначення: «С» – піч опору, «Ш» – шахтна, «Ц» – цементаційна атмосфера, «О» – окисне середовище; діаметр робочого простору таких печей становить 600 мм, висота (глибина) – 600 мм, а максимальні температури експлуатації 1000°C та 700°C відповідно.

Вали-шестерні в процесі хіміко-термічної обробки можуть підлягати деформаціям, що призводить до погіршення геометрії виробу, зниження точності зачеплення зубчастого вінця, що веде до зниження довговічності виробу або робить його непридатним до експлуатації взагалі. Одним з найважливіших способів запобігання деформації валів-шестерень є їхнє правильне розміщення в пристосуваннях. Вали-шестерні розміщують вертикально у спеціальних підвісках.

Охолодження при гартуванні здійснюється в немеханізованому гартівному баку з олією. Немеханізований гартівний бак уявляє собою коробчасту зварну посудину, виготовлену з листової сталі. Ємність таких баків визначається розмірами деталей, що гартуються, та температурою гартування. При цьому використовують таке співвідношення: 10-20 л олії на 1 кг деталей, що гартуються протягом 1 год, при температурі гартування 800...1000°C, оскільки при недостатній кількості рідини можливе її перегрівання, що призводить до зміни охолоджувальної здатності охолоджувача і появи браку.

Промивання валів-шестерень проводять з метою для вилучення олії та інших забруднень, його здійснюють у мийному розчині (CaCO_3 4...6% у воді) при температурі 60...90°C впродовж 25...35 хвилин. Промивання деталей ведуть в промивному баку.

Промивний бак оснащений змішувачем для підігрівання розчину. Щоб краще перемішувався розчин, у бак подають стиснене повітря. Суміш мийного розчину, олії і забруднювачів, що утворюється при промиванні деталей, перекачується в олієвіддільник і через фільтр повертається на повторне використання. Масло зливається у відстійник. Після промивання деталі сушать на повітрі.

Також при хіміко-термічній обробці необхідно використовувати установки для створення контрольованої атмосфери (а саме для проведення цементації).

В термічних цехах для завантаження і розвантаження печей, переміщення піддонів та деталей від одного до іншого агрегату використовують різне підйомно-транспортне обладнання: талі, крани, конвеєри та ін.

Точний технологічний режим і висока якість термообробки виробів забезпечуються неперервним контролюванням та регулюванням параметрів технологічного процесу, які здійснюються за допомогою контрольних-вимірювальних регулювальних і реєструвальних приладів (різноманітні термометри, манометри, потенціометри тощо).

Дотримання високої якості термообробки виробів у сучасних термічних цехах забезпечується автоматизацією контролювання і регулювання параметрів технологічних процесів, а також автоматизацією керування механізмами та транспортними засобами термічного обладнання. Системи автоматичного контролювання, регулювання і керування в термічних цехах складаються з вимірювальних та регулювальних приладів, а також виконавчих механізмів. [11]

Знайдемо кількість виробів, які можна розташувати в шахтній печі, що має такі розміри робочого простору: діаметр $D = 600$ мм, висоту $H = 600$ мм.

Розрахуємо кількість виробів, яку можна розташувати в одному ярусі, враховуючи, що максимальний діаметр валу-шестерні складає $d = 85$ мм. Спочатку знайдемо, скільки виробів n можна розташувати на одному діаметрі

робочого простору печі з урахуванням, що відстань між виробами буде дорівнювати $d/4$:

$$n = \frac{D}{d + d/4} = \frac{600}{85 + 85/4} = 5,66 \approx 5.$$

Замість виробу, який може розташуватися в центрі, буде знаходитися вісь підвіски. Тобто, вироби в одному ярусі можна розташувати в 2 кола.

Розрахуємо кількість виробів в першому колі, довжина якого складає

$$l_1 = 2\pi r_1, \quad (4.1)$$

де r_1 – радіус першого кола, який дорівнює $(d/2 + d/4 + d/2 = 5d/4)$.

Отже, маємо

$$l_1 = 2 \cdot \pi \cdot (5d/4) = 2,5\pi d = 2,5 \cdot 3,14 \cdot 85 = 667,25 \text{ мм.}$$

Тоді кількість виробів, яку можна розташувати в першому колі, дорівнює

$$n_1 = \frac{l_1}{d + d/4} = \frac{667,25}{85 + 85/4} = 6,29 \approx 6 \text{ шт.}$$

Аналогічно знаходимо кількість виробів в другому колі, довжина якого складає

$$l_2 = 2\pi r_2, \quad (4.2)$$

де r_2 – радіус другого кола, який дорівнює $(d/2 + d/4 + d + d/4 + d/2 = 2,5d)$.

Отже, маємо

$$l_1 = 2 \cdot \pi \cdot 2,5d = 5\pi d = 5 \cdot 3,14 \cdot 85 = 1334,5 \text{ мм.}$$

Тоді кількість виробів, яку можна розташувати в другому колі, дорівнює

$$n_2 = \frac{l_1}{d + d/4} = \frac{1334,5}{85 + 85/4} = 12,59 \approx 12 \text{ шт.}$$

Отже, в одному ярусі можна розмістити таку кількість виробів

$$n = n_1 + n_2 = 6 + 12 = 18 \text{ шт.}$$

На рис.4.5 схематично показано розташування валів-шестерень в одному ярусі робочого простору шахтної печі СШЦ-6.6/10 або СШО-6.6/7.

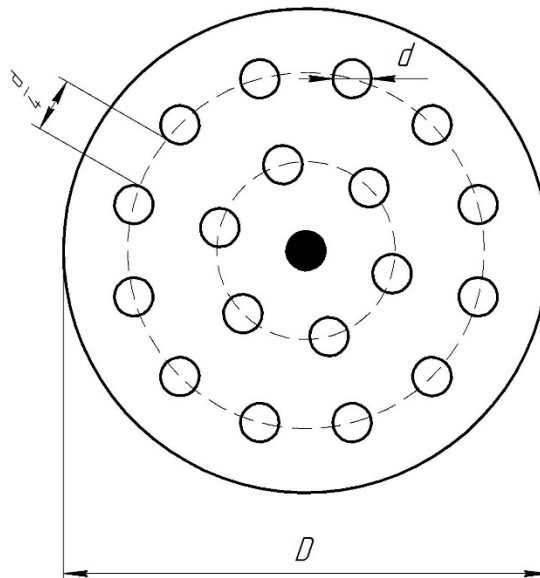


Рисунок 4.5 – Схема розташування валів-шестерень в одному ярусі робочого простору шахтної печі СШЦ-6.6/10 або СШО-6.6/7

Знайдемо кількість ярусів, в яку можливо розташувати вали-шестерні в обраних шахтних печах. Висота робочого простору печі складає $H = 600$ мм, довжина виробу дорівнює $h = 241$ мм, тому знаходимо кількість ярусів таким чином:

$$n_{\text{яр}} = \frac{H}{h + h/4} = \frac{600}{241 + 241/4} \approx 2.$$

Тобто, вали-шестерні розміщуємо в 2 яруси.

Кількість виробів в печі N буде складати

$$N = n \cdot n_{\text{яр}} = 18 \cdot 2 = 36 \text{ шт.}$$

Маса садки M_C відповідно становить

$$M_C = m \cdot N = 2,45 \cdot 36 = 88,2 \text{ кг.}$$

Розрахуємо час кожної операції хіміко-термічної обробки згідно [12].

Загальна тривалість кожної операції розраховується згідно такої формули:

$$\tau_{\text{заг}} = \tau_n + \tau_{\text{в}}(\tau_{\text{техн}}) + \tau_{\text{ох}}, \quad (4.3)$$

де τ_n – час нагріву до потрібної температури, хвилини;

$\tau_{\text{в}}(\tau_{\text{техн}})$ – час витримки для вирівнювання температури за перерізом та для завершення фазових перетворень (або технологічний час для протікання заданих процесів (насичення, виділення фаз, гомогенізації, розчинення фаз, тощо)), хвилини;

τ_{ox} – час охолодження виробів, хвилини.

Оскільки для спадководрібнозернистих сталей цементация поєднана із гартуванням, то відповідно об'єднаємо тривалість цих двох операцій:

$$\tau_{заг} = \tau_n + \tau_{техн} + \tau_{відст} + \tau_{ox}, \quad (4.4)$$

Час нагрівання τ_n можна визначити за методикою наближеного розрахунку [10], згідно якої вважають, що садка складається з простих за формою виробів (куля, циліндр, призма тощо) при досить простій схемі їхнього розташуванні в один або декілька шарів з певними відстанями між ними. Тоді тривалість нагрівання визначається таким чином:

$$\tau_n = S \cdot k \cdot f \cdot L_n, \quad (4.5)$$

де S – характеристичний розмір виробу, мм (діаметр кулі, циліндра, найменша сторона призми тощо);

k – коефіцієнт форми;

f – коефіцієнт розташування виробів в нагрівальному пристрої, що впливає на час нагрівання, хвилин;

L_n – коефіцієнт легування сталі, хв/мм.

Час нагріву до температури цементации з урахуванням, що $S=40$ мм, $k=1$, $f=1,7$, $L_n=0,96$ хв/мм, складає:

$$\tau_n = 40 \cdot 1 \cdot 1,7 \cdot 0,96 \approx 65 \text{ хвилин.}$$

Тривалість технологічної витримки при цементации $\tau_{техн}$ визначимо таким чином:

$$\tau_{техн} = \frac{h}{v_{дн}}, \quad (4.6)$$

де h – глибина шару, мм ($h = 0,9$ мм);

$v_{дн}$ – швидкість дифузійного насичення, мм/годину ($v_{дн} = 0,22$ мм/годину).

Тоді

$$\tau_{техн} = \frac{0,9}{0,22} \approx 4,1 \text{ години або } 246 \text{ хвилин.}$$

Знайдемо тривалість підстужування при охолодженні з піччю:

$$\tau_{(підст)ох} = \frac{t_n - t_k}{v_{ох}}, \quad (4.7)$$

де t_n – температура початку охолодження, °С ($t_n = 930^\circ\text{C}$);

t_k – температура кінця охолодження, °С, $t_k = 850^\circ\text{C}$;

$v_{ох}$ – швидкість охолодження із піччю, °С/с, $v_{ох} = 50^\circ\text{C/годину}$.

Отже, час підстужування становить

$$\tau_{підст} = \frac{930 - 850}{50} = 1,6 \text{ години або } 96 \text{ хвилин.}$$

Далі – гартування в олії від 850°C (t_n) до 20°C (t_k) зі швидкістю охолодження $v_{ох} 50^\circ\text{C/с}$, згідно (4.7)

$$\tau_{ох} = \frac{850 - 20}{50} = 16,6 \text{ с або } 0,28 \text{ хвилини.}$$

Отже, тривалість цементації разом з гартуванням становить

$$\tau_{заг} = 65 + 246 + 96 + 0,28 = 407,28 \text{ хвилини.}$$

Загальну тривалість низькотемпературного відпуску розрахуємо за вищерозглянутою формулою (4.3).

Час нагрівання τ_n визначимо згідно (4.2). Як і раніше, $S = 40$ мм, $k = 1$, $f = 1,7$, але коефіцієнт легування буде іншим через нижчу температуру відпуску, а саме $L_n = 2,15$ хв/мм. [12] Отже, маємо

$$\tau_n = 40 \cdot 1 \cdot 1,7 \cdot 2,15 \approx 146 \text{ хвилини.}$$

Час витримки при низькотемпературному відпуску складає 120 хвилини + 1,5 хвилини на 1 мм умовної товщини [12], тобто

$$\tau_e = 120 + 1,5 \cdot 40 \approx 180 \text{ хвилини.}$$

Час охолодження при низькотемпературному відпуску знайдемо згідно (4.7), з урахуванням, що $t_n = 200^\circ\text{C}$, $t_k = \text{до } 20^\circ\text{C}$, $v_{ox} = 5^\circ\text{C}/\text{с}$:

$$\tau_{ox} = \frac{200 - 20}{5} = 36 \text{ с або } 0,6 \text{ хвилини.}$$

Таким чином, тривалість низькотемпературного відпуску становить

$$\tau_{заг} = 146 + 180 + 0,6 = 326,6 \text{ хвилини.}$$

В табл. 4.1 представлена карта технологічного процесу хіміко-термічної обробки валу-шестерні зі сталі 25ХГТ.

Таблиця 4.1 – Карта технологічного процесу хіміко-термічної обробки валу-шестерні зі сталі 25ХГТ

Ескіз виробу			Технічні вимоги			
			Марка сталі	Властивості		Структура
			25ХГТ	Структура поверхні – мартенсит карбідами залишковим аустенітом; структура серцевини – бейніт		Серцевина: $\sigma_B \geq 1400$ МПа; $KCU \geq 60$, $HRC_{серц} \geq 30$; поверхня: $h = 0,8 \dots 1,0$ мм; $HRC_{пов} 57 \dots 63$
№ п/п	Операція	Обладнання (прилади)	Умови нагрівання	Умови охолодження	Пристосування, кількість виробів	Умови обробки та контролю
1	2	3	4	5	6	7
1.	Контроль вхідний	Стилоскоп, мікроскоп, лінійка, штангенциркуль, твердомір типу ТШ				Хімічний склад, мікроструктура, стан поверхні, розміри, геометрія, твердість
2.	Цементація					
2.1	Нагрівання	СШЦ 6.6/10	$t_n = 20$ °C $t_k = 930 \pm 10$ °C $\tau_n = 65$ хв. ендогаз + CH_4		Підвіска, 36 шт., 88,2 кг	Контроль температури і часу нагріву, витрат середовища та його склад, садка
2.2	Витримка	СШЦ 6.6/10	$t_B = 930 \pm 10$ °C $\tau_{B(техн)} = 246$ хв. ендогаз + CH_4		Підвіска, 36 шт., 88,2 кг	Контроль садки, температури, часу нагріву, витрат середовища та його складу
2.3	Підстужування	СШЦ 6.6/10		$t_n = 930$ °C $t_k = 850$ °C, $\tau_{ох} = 96$ хв. ендогаз	Підвіска, 36 шт., 88,2 кг	Контроль садки, температури, часу нагріву, витрат середовища та його складу
3	Гартування					
3.1	Охолодження	Гартівний бак		$t_n = 850$ °C $t_k = 20$ °C, $\tau_{ох} = 0,28$ хв. олія	Підвіска, 36 шт., 88,2 кг	Час охолодження, температура середовища

Кінець таблиці 4.1

4	Промивання	Промивний бак			Підвіска	Мийний розчин (CaCO ₃ 4...6% у воді) t = 60-90°C τ = 25-35 хв.
5	Контроль поточний	Металографічний мікроскоп МІМ-7, рентгенівська установка, твердомір типу ТК				Контроль глибини шару, балу зерна, кількості аустеніту зал. на зразках-свідках, твердості та геометрії
6	Низькотемпературний відпуск					
6.1	Нагрівання	СШО-6.6/7	t _п = 20 °C t _к =200±10 °C τ _н = 146 хв.		Підвіска, 36 шт., 88,2 кг	Контроль температури, часу нагріву, садка
6.2	Витримка	СШО-6.6/7	t _в =200±10°C τ _в =180 хв.		Підвіска, 36 шт., 88,2 кг	Контроль температури, часу нагріву, садка
6.3	Охолодження	Стіл		Повітря t≤25 °C τ _{ох} =0,6 хв.		Контроль тривалості охолодження
7	Контроль	Мікроскоп, твердомір типу ТК, прилади для випробування механічних властивостей				Контроль мікроструктури, твердості та інших механічних властивостей на зразках-свідках, зовнішній вигляд, геометрія

5 ТЕХНІЧНИЙ КОНТРОЛЬ, ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТА ВИПРАВЛЕННЯ БРАКУ

Завдяки поєднанню високих значень границь витривалості на згин й при контактному навантаженні та зносостійкості цементованих виробів, відповідні процеси хіміко-термічної обробки є часто єдино можливими технічними засобами підвищення працездатності важконавантажених деталей. Звісно, що основні технічні характеристики деталей (міцність, надійність та довговічність) залежать й від механічних властивостей матеріалу, й від багатьох конструкторських та технологічних факторів. Однак найважливішим фактором, що дозволяє досягти необхідного комплексу механічних властивостей, є формування оптимальної структури готового виробу в результаті термічної або хіміко-термічної обробки.

Для отримання необхідних експлуатаційних властивостей виробу необхідно здійснювати різноманітні контрольні операції в процесі його виготовлення. Технічний контроль – це перевірка відповідності процесів, від яких залежить якість продукції, та їхніх результатів встановленим технічним вимогам. На виробництві контроль здійснюють в таких основних формах: вхідний контроль для перевірки якості сировини та напівфабрикатів (метал, заготовки, поковки тощо); технологічний (або проміжний) контроль для перевірки якості продукції та технологічного процесу на окремих стадіях виробництва (наприклад, перевірка температури в робочому просторі печі, контроль хімічного складу контрольованих атмосфер; перевірка структури та властивостей виробів після виконання операцій термічної обробки тощо); вихідний (завершальний) контроль для перевірки якості готових виробів.

В цьому розділі дипломної бакалаврської роботи розглядаються дефекти, що можуть виникнути при хіміко-термічній обробці валу-шестерні зі сталі 25ХГТ, а також причини їхньої появи, заходи по запобіганню та усуненню.

Надійність та довговічність деталей визначається глибиною та структурою цементованого шару, ступенем насичення, розподілом вуглецю в шарі, а також структурою та міцністю серцевини. Зокрема, показники міцності цементованої сталі залежать перш за все від вмісту вуглецю в шарі. Оптимальний вміст вуглецю в поверхневому цементованому шарі складає 0,8...1,0%. Менший вміст вуглецю не забезпечує отримання високої твердості та зносостійкості в шарі; більший вміст вуглецю збільшує зносостійкість, але суттєво знижує границю міцності на згин, границю витривалості, ударну в'язкість та опір крихкому руйнуванню. Також зростання вмісту вуглецю збільшує кількість аустеніту залишкового в цементованому шарі.

Після цементациї та подальшої термічної обробки структура цементованого шару – це дрібноголчастий мартенсит із включеннями дисперсних карбідів (рис.5.1).

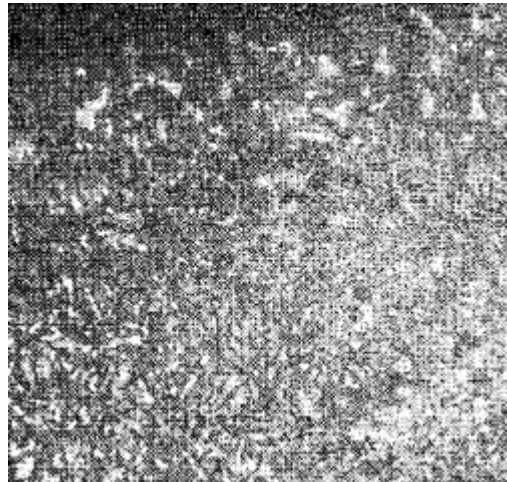


Рисунок 5.1 – Мікроструктура поверхні цементованої та загартованої сталі ($\times 400$)

Товщина цементованого шару визначається розмірами деталі, умовами її роботи, вмістом вуглецю та легувальних елементів в сталі.

Нерівномірна глибина цементованого шару є результатом нерівномірності температури в робочому просторі печі, поганої циркуляції

пічної атмосфери, наявності забруднень та сажі на поверхні деталей, які цементують.

Недостатня глибина цементованого шару отримується при порушенні режиму подачі карбюризатора, зниженні температури цементації, недостатньої витримки, при надлишковій кількості деталей в печі, забрудненні робочого простору печі сажею, при поганій герметичності робочого простору печі. Все це призводить також і до зниження концентрації вуглецю в цементованому шарі.

Занадто висока глибина цементованого шару та підвищена концентрація вуглецю в шарі з утворенням грубих карбідних включень або сітки є результатом високої температури процесу, тривалої витримки, використання активного карбюризатора та високої швидкості його подачі.

Відшаровування загартованого цементованого шару відбувається при різкому переході цементованого шару до серцевини або наявності карбідної сітки через високу активність та високої швидкості подачі карбюризатора.

Плямиста цементація отримується при забрудненні деталей, неправильному укладанні деталей тощо.

Дефектами насиченого шару є наявність фаз або структурних складових, які відрізняються розмірами, об'ємною часткою або складом від оптимальних, які рекомендовані для даного конкретного випадку. При наявності дефектів відбувається погіршення механічних властивостей шару як через їхній власний вплив, так і в результаті непрямого впливу, який викликаний наслідками їхнього утворення в структурі шару.

Наявність в мартенситно-аустенітній структурі шару карбідних включень розміром менше 1 мкм суттєво підвищує зносостійкість шару без пониження в'язкості руйнування, опору втомі. Наявність більш крупних карбідів призводить до зниження довговічності та контактної міцності деталей до 30%. Особливо небезпечним є виділення карбідів по межах зерен у вигляді сітки, яка призводить до крихкості.

При роботі деталі при високих знакозмінних тисках в структурі цементованого шару неприпустима наявність великої кількості залишкового аустеніту, котрий перетворюється у невідпущений мартенсит, що має високу твердість. Присутність великої кількості залишкового аустеніту (більше 10...15%) призводить до втомного руйнування шару.

Негативним явищем також є утворення на поверхні цементованих виробів насиченого шару суцільної зони, яка складається з карбідів типу $(Fe,Me)_3C$ товщиною від часток міліметрів до декількох сотих міліметра. Така зона може утворитися при цементації на етапі підстужування деталей перед гартуванням в однокамерних агрегатах безперервної дії, коли зниження температури відбувається без зміни складу атмосфери. Також поява такого дефекта можлива і на етапі насичення, особливо для сходинкових режимів насичення, через значне збільшення вуглецевого потенціалу атмосфери у порівнянні з рекомендованими рівноважними значеннями. В такому випадку відбувається 30% зниження опору втомі перш за все через низьку пластичність карбідної зони, а також через утворення зони трьохосних напружень на межі карбідної зони з мартенситною структурою іншої частини шару.

При взаємодії насичуючих атмосфер зі сталлю можливе утворення в шарі різних сполук (оксидів, карбідів, нітридів тощо), до складу яких переходить з твердого розчину значна кількість легувальних елементів. Це призводить до зниження стійкості аустеніту, що призводить до формування ферито-цементитних структур в шарі та до зниження механічних властивостей деталей. Негативний вплив таких структур підсилюється ще й тим, що вони виділяються головним чином по межах зерен, значно їх послаблюючи.

Збіднення аустеніту на легувальні елементи поверхневого шару глибиною до 50 мкм пов'язане з внутрішнім окисленням: взаємодія металу з ендотермічною атмосферою призводить до утворення поверхневої плівки оксидів товщиною 1...2 мкм зі структурою типу шпінелі $nFeOMe_2O_3$ (тут Me – марганець або хром) та оксидів кремнію, які розташовані дещо глибше по межах зерен у вигляді тонкої розірваної сітки товщиною 0,1...0,2 мкм.

Дуже небезпечним є збіднення твердого розчину на хром та марганець – основних легувальних елементів більшості цементовних сталей, що суттєво знижує опір втомі матеріалу.

Зневуглецювання поверхні цементованого шару відбувається при підстужуванні на повітрі та при відсутності автоматичного регулювання вуглецевого потенціалу в другому періоді насичення.

Важливим показником якості виробу, що піддавався поверхневому зміцненню, є структура та властивості його серцевини. Оптимальною мікроструктурою є низьковуглецевий мартенсит або нижній бейніт. Наявність включень фериту в структурі серцевини знижує опір втомі. Оптимальним значенням міцності та структури серцевини при гартуванні деталей в маслі відповідає вміст вуглецю в сталі 0,1...0,3%. Збільшення ступеню легування сталі зсуває оптимальний вміст вуглецю в бік його меншоо вмісту.

При цементациї та подальшому гартуванні на мартенсит змінюються розміри та форма виробів під впливом різних напружень: залишкових (від попередньої обробки); термічних (тих, що утворилися при нагріві та охолодженні); структурних (таких, що виникають в результаті фазових та структурних перетворень) та зовнішніх (під впливом власної ваги деталей). З метою зменшення короблення та стабілізації розмірів деталей необхідно вживати таких заходів: підготовка структури та зняття наклепу після попередньої обробки; правильне укладання, фіксація та транспортування деталей на пристосуваннях; стабілізація усіх технологічних параметрів хіміко-термічної обробки; правильний вибір обладнання, підвищення рівномірності нагріву (охолодження), а також насичення (примусова циркуляція пічної атмосфери, регулювання вуглецевого потенціалу); гартування деталей в оправках або в штампах; обробка холодом цементованих деталей високої точності після гартування на мартенсит тощо. [13, 14]

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

Процеси термічної та хіміко-термічної обробки металевих сплавів супроводжуються небезпечними та шкідливими факторами (наприклад, використання хімічних речовин, коротке замикання тощо); які можуть бути причинами нещасних випадків або професійних захворювань, підвищеним ризиком виникнення пожеж.

6.1 Аналіз потенційно небезпечних процесів

Розглянемо небезпечні фактори, що можуть виникнути при проведенні термічної та хіміко-термічної обробки:

а) можливість ураження електричним струмом. Його причинами можуть бути невиконання правил електробезпеки, несправність обладнання, що споживає електроенергії (поява напруги на неструмоведучих частинах обладнання, відсутність захисного заземлення або занулення). Все це може призвести до електричних травм або навіть легального наслідку;

б) раптовий вихід з ладу ємностей для зберігання робочих газів під тиском через використання їх з вичерпаним строком придатності, необережного поводження з балонами, недотримання правил експлуатації балонів, що знаходяться під тиском; це може призвести до масштабних руйнувань приміщень, важких механічних травм, летального наслідку;

в) можливість вибуху газоповітряної суміші при виконанні операцій цементації та нітроцементації. Це може статися з таких причин: подача робочих газів (наприклад, ендогазу, природного газу, синтину тощо) у реторту з залишками повітря; подача робочих газів у реторту при температурі менше

760°C; примусове зняття полум'яної завіси на термічних печах; припинення подачі насичуючого газу без примусової подачі захисного газу;

г) шкідливий вплив теплового випромінювання при здійсненні технологічних процесів. Наприклад, теплове випромінювання від зовнішніх поверхонь термічного обладнання, від деталей при їх завантаженні або розвантаженні;

г) отруєння робочими газами захисних атмосфер (наприклад, отруєння аміаком, хімічними сполуками тощо). Причинами цього можуть бути втрата герметичності магістральних трубопроводів; незадовільна робота місцевої витяжної вентиляції; прогари зовнішнього корпусу термічних печей;

д) незадовільні параметри повітряного середовища в робочій зоні, через незадовільну роботу систем опалення та повітрообміну, що може призвести до зниження комфортності праці та виникнення різноманітних захворювань;

е) недостатнє освітлення робочої зони через вихід з ладу освітлювальних приладів або надмірної їх забрудненості. Це може призвести до порушення зору, а внаслідок цього і до травмування;

є) можливість загорянь та виникнення пожежі внаслідок порушення правил пожежної безпеки, витоків горючих робочих тазів, короткого замикання;

ж) невірні дії персоналу в умовах надзвичайних ситуацій різного характеру через невідповідність персоналу до дій в умовах надзвичайних ситуацій, низька ефективність управління в цих умовах, що може призвести до тяжких травм або летального наслідку.

6.2 Заходи безпеки виробничих процесів

Під час проведення процесів термічної та хіміко-термічної обробки треба звернути увагу на такі заходи безпеки:

а) електробезпека. До виконання робіт допускаються особи віком не молодше 18 років, що пройшли навчання та перевірку знань з електробезпеки згідно ДНАОП 1.1.10 – 1.01-2000 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» та отримали допуск з електробезпеки відповідної групи. Для кожного електроспоживаючого обладнання повинні бути складені експлуатаційні схеми нормальної і аварійної роботи.

Всі неізольовані струмопровідні елементи електрообладнання повинні бути надійно обмежено суцільними огороженнями, зняття або відкриття можливе тільки за допомогою спеціальних пристроїв.

Розташування струмоведучих частин повинно бути на недоступній висоті.. Висота розташування визначається значенням напруги: при напрузі до 1000В – не менше 3,5 м, при напрузі більше за 1000В – не менше 6м.

Електричне блокування здійснює розрив ланцюга спеціальними контактами згідно ГОСТ 12.4.155–85 ССБТ «Пристрої захисного відключення. Класифікація. Загальні технічні вимоги». Наприклад, завантаження та розвантаження садки з термічної печі виконується тільки при автоматичному відключенні струму блокуючими пристроями.

Захисне заземлення або занулення. Принцип дії захисного заземлення або занулення полягає у зниженні до безпечних значень напруги дотику, яка обумовлена замиканням на корпус. Електрообладнання необхідно заземлювати або занулювати у відповідності з ПУЕ «Правила улаштування електроустановок».

При роботах, що пов'язані з можливістю ураження електричним струмом необхідно використовувати індивідуальні засоби захисту в відповідності з НПАОП 40.1-1.21-98.97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

Для захисту від ураження електричним струмом необхідно використовувати сухі брезентові рукавиці, або використовувати більш складні технічні способи захисту;

б) заходи безпеки щодо посудин для зберігання робочих газів під тиском. Основними ємностями для зберігання робочих газів в термічних цехах є балони зі стисненими до 30-90 атмосфер робочими газами. Балони повинні зберігатися в спеціальних приміщеннях, на відкритому повітрі під спеціальним навісом від дії прямих сонячних променів, і опадів. Наповнені балони повинні зберігатися в вертикальному положенні. Їх укріплюють спеціальними хомутами. В приміщенні для зберігання балонів підлога повинна бути рівною, неслизькою, виконаною з матеріалів, які виключають іскроутворення. Переміщення балонів допускається тільки за допомогою спеціальних візків, транспортування вручну суворо забороняється, через можливість падіння, механічних ушкоджень. Транспортування балонів повинно здійснюватися тільки при наявності запобіжного клапану на горловині балонів. Такі міри безпеки посилюються в період холодів, коли знижується пластичність матеріалів, з яких виготовлений балон.

Особливу увагу слід приділити маркуванню балонів: на верхній сферичній частині горловини проставлені номер балону, ємність, завод-виробник, дата виготовлення, вага балону, робочий та випробувальний тиск, строк наступного випробування. Експлуатувати балони с простроченим строком випробування категорично забороняється.

Важливим є також колір цих балонів. Колір забарвлення балонів: аміачного – жовтий з написом чорною фарбою «аміак», аргонного — сірий, азотного – чорний, пропан-бутану – червоний. Експлуатація балонів в зимовий час потребує попередньої витримки в теплому приміщенні. Відкриття вентиля повинно бути плавним, а тиск на манометрі редуктора не повинен перевищувати технологічний. Витік газів по з'єднанням не припустимий.

Для виключення руйнування слід слідкувати за нагрівом балонів (температура не повинна перевищувати 40°C). На горловині балону встановлюється редуктор. При експлуатації редуктора можуть виникати несправності, які можуть привести до випадкового травматизму: Наприклад, зрив редуктора призводить до моментального викиду великих об'ємів газу, що

призводить до механічного травмування, опіків. Причиною може бути спрацьованість різьби на штуцері або накидній ганці. Використовувати такі редуктори забороняється;

в) заходи з безпеки для виключення можливості вибухів газоповітряної суміші при виконанні операцій цементації, нітроцементації та азотування.

При хіміко-термічній обробці важливим є витиснення повітря з робочого об'єму печі перед подачею насичувальних газів. Перед початком виконання операцій хіміко-термічної обробки передбачена продувка реторти печі азотом для видалення повітря протягом не менше 1 години. Кількість азоту подається із розрахунку з кратного газообміну, при надлишковому тиску в реторті 0,5 атм. В період продувки реторти азотом необхідно виконати випробування герметичності методом омилування усіх місць з'єднання та зварних швів.

Подача робочих тазів у реторту можлива тільки при температурі не менше за 760°C (поріг безпеки). Для виконання цієї умови технологічне обладнання повинно бути оснащене автоматичними пристроями, які блокують подачу робочих тазів при невиконанні цієї умови;

г) захист від теплового випромінювання.

Основними заходами захисту є використання індивідуальних засобів захисту:

- спеціального одягу згідно ГОСТ 12.4.045-87 «Система стандартів безпеки праці. Костюми чоловічі для захисту від підвищених температур. Технічні умови»;

- рукавиць згідно ГОСТ 12.4.010-75 «Система стандартів безпеки праці. Средства индивидуальной защиты. Рукавицы специальные. Технические условия»;

- групові засоби захисту: повітряні завіси між джерелами теплового випромінювання та зонами, де знаходяться робітники.

У деяких випадках, наприклад, при гартуванні деталей з високолегованих сплавів при температурах більш 1100°C використовують азбестові фартухи та рукавиці;

г) засоби захисту від отруєння робочими газами. Для виключення випадків отруєння передбачено:

- один раз на добу перевірка герметичності з'єднань магістральних трубопроводів омилуванням;

- огляд стану технологічного обладнання один раз на доб;

- використання індивідуальних засобів захисту – респіратори, напівмаски згідно ДСТУ ГОСТ 12.4.041:2006 «Система стандартів безпеки труда. Средства индивидуальной защиты органов дыхания фильтрующие. Общие технические требования»;

д) забезпечення оптимальних параметрів повітряного середовища.

Для нормалізації параметрів повітряного середовища необхідно, щоби устрій технічних систем, які повинні забезпечувати параметри повітряного середовища відповідав нормам, які вказані згідно СНиП 23-01-99.

В холодний період року для забезпечення оптимальної температури виробничого приміщення слід використовували систему водяного опалення та подавати зовнішнє повітря через калорифери.

В теплий період року для зниження температури повітря в робочому просторі необхідно використовувати природну вентиляцію, або загально обмінну – приточно-витяжну вентиляцію згідно ГОСТ 12.4.021-75 «ССБТ. Системы вентиляционные. Общие требования»;

е) організація оптимального освітлення робочої зони.

Для забезпечення необхідного рівня виробничого освітлення слід дотримуватися вимог ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» з урахуванням характеру зорової роботи;

є) заходи з пожежної безпеки.

Визначаються відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» [15]. Категорію виробництва за пожежною

небезпекою (А, Б, В, Г, Д) споруд (приміщень) цеху (ділянки, підстанції) визначають на основі аналізу речовин і матеріалів, що використовуються у виробництві, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною безпекою» та СНиП 2.09.02-85* «Строительные нормы и правила производственные здания». Відповідно до категорії виробництва з пожежної безпеки та вимогами ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», визначають ступінь вогнестійкості приміщення цеху (дільниці, підстанції). Шляхи евакуації працівників на випадок пожежі (переходи, евакуаційні виходи) передбачаються згідно вимог ДБН В. 1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги». Максимальну відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу визначають згідно СНиП 2.09.02-85* «Строительные нормы и правила производственные здания». Відповідність обладнання, силових і освітлювальних мереж вимогам пожежної безпеки в першу чергу залежить від відповідності ступеня захисту їх оболонки (ІР) класу пожежонебезпечної зони (П-1, П-П, П-Па і П-І) визначених згідно НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок»;

ж) дії персоналу в умовах надзвичайних ситуацій.

Забезпечення безпеки персоналу досягається:

- підвищенням стійкості промислового об'єкту в умовах надзвичайних ситуацій; організацією рятувальних та відновлювальних робіт на промисловому об'єкті, наявністю технічних ресурсів для більш швидкої евакуації персоналу із зони ураження;

- ефективною організацією евакуації та проведенням рятувальних робіт.

Правила охорони праці при термічній обробці регламентуються НПАОП 28.5-1.02-07 «Правила охорони праці при термічній обробці металів» [16].

7 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

Як вже вказано вище, вал-шестерня уявляє собою вал, що має зубчастий вінець, який відповідно є елементом зубчастої передачі.

Зубчасті передачі є деталями приводної техніки, які піддаються значним циклічним навантаженням. В умовах високих окружних швидкостей і потужностей, що передаються, зубчасті передачі повинні володіти відповідними міцносними властивостями. Об'єктивним критерієм оцінки міцності є згинальна та контактна витривалість зубців.

Для забезпечення високих експлуатаційних властивостей шестерні (або зубчасті колеса) піддають хіміко-термічній обробці (ХТО). Хіміко-термічна обробка – це сукупність процесів теплового та хімічного впливів, спрямованих на зміну хімічного складу та структури поверхневого шару зубчастих коліс. Вона характеризується введенням у поверхневий шар металу завдяки хімічній реакції різних елементів із зовнішнього середовища: вуглецю, азоту, кисню, кремнію тощо. При цьому на поверхні зубчастих коліс утворюється твердий дифузійний шар, котрий по мірі поглиблення характеризується зниженням концентрації елементів, які дифундують, та мікротвердості. Для ефективного зміцнення поверхні зубчастих коліс часто застосовують цементацію та нітроцементацію, рідше азотування. [8]

Контактна витривалість зубців характеризується опором типовим відмовам робочих поверхонь зубців – пітингу (викришуванню поверхонь зубців у вигляді ямок) та мікротріщинам, а також зносу під впливом контактних напружень. При цьому велике значення має рівномірне зношування по всій поверхні зубця, яке досягається за рахунок модифікацій по профілю і довжині зубця. Так звана «пляма контакту» – площа контакту на поверхні зубців при зачепленні повинна займати максимальну площу, але не виходити на кромки зубців навіть при максимальних навантаженнях.

Підвищенню опору зносу поверхонь зубців під дією контактних напружень сприяє також наявність у поверхневих шарах зубців залишкових внутрішніх напружень стиснення глибиною до 0,02 мм. Поряд з високою контактною міцністю зубчасті колеса з легованих сталей після цементації або нітроцементації з подальшою термічною обробкою мають також високі показники згинальної витривалості. Згинальна витривалість зубців характеризується опором зубчастого зачеплення втомним поломкам, які виникають в основанні зубця. Зазвичай зубчасті колеса після цементації мають більш високі показники згинальної витривалості в порівнянні з зубчастими колесами після азотування. [17, 18].

Порівняємо переваги таких методів поверхневого зміцнення, як цементація, нітроцементація та азотування.

Основні переваги процесів цементації (нітроцементації) в порівнянні з азотуванням:

- широкий діапазон регулювання товщини зміцненого шару;
- можливість проведення хіміко-термічної обробки зубчастих коліс з економнолегованих сталей (низько- та середньолегованих);
- висока продуктивність хіміко-термічної обробки зубчастих коліс з можливістю проведення гартування після підстужування або безпосередньо з температури дифузійного підстужування;
- високі показники згинальної та контактної витривалості зубців.

Перевагами азотування перед цементацією та нітроцементацією є такі:

- малі деформації та короблення виробів через відсутність фазових перетворень та низькі температури процесу (500...600°C);
- більш висока твердість зміцненого шару;
- висока стійкість до зношування;
- високий опір захопленню;
- теплостійкість зміцненого шару зберігається до 500...600°C;
- корозійна стійкість поверхневого шару.

Розглядаєма в дипломній бакалаврській роботі деталь – вал-шестерня виготовлена зі сталі 25ХГТ. Для поверхневого зміцнення її зубчастого вінця доцільно обрати такі види хіміко-термічної обробки як цементация або нітроцементация, а не азотування. Зазначенні види хіміко-термічної обробки дозволяють отримати найкраще поєднання втомної та контактної витривалості, статичної міцності на згин, зносостійкості, в'язкості та надійності при випадкових пікових навантаженнях при експлуатації деталі із заданого матеріалу (сталь 25ХГТ), а також можливість використання дешевих, недефіцитних та технологічних насичуючих середовищ, що містять вуглець та азот. Використання азотування є небажаним, оскільки воно володіє такими недоліками: дуже висока тривалість процесу та крихкість поверхневого шару. Також азотуванню піддають сталі з дещо більшим вмістом вуглецю, оскільки виріб повинен мати достатньо міцну серцевину, щоби не було продавлювання поверхневого шару. [19]

Тепер здійснимо вибір конкретного методу поверхневого зміцнення (цементации або нітроцементации). Від вибору методу в значному ступені залежать якість зміцнених деталей, техніко-економічні показники термічного виробництва та умов праці.

Найбільш розповсюдженими методами дифузійного насичення поверхневих шарів виробів вуглецем та азотом є газова цементация та нітроцементация, які здійснюють в шахтних, камерних та барабанних печах, камерних та прохідних безмуфельних агрегатах. Також використовують тверду цементацию, цементацию та нітроцементацию із застосуванням рідких органічних сполук (гас, синтин тощо) та природного газу. Є перспективними технологічні процеси високотемпературної газової цементации, вакуумної та іонної цементации та нітроцементации, процесів з використанням азотних атмосфер та киплячого шару.

В даний час найбільш широко використовуються методи газової цементации та нітроцементации в контрольованих ендотермічних атмосферах. Такі технологічні процеси мають низку характерних особливостей:

- по-перше, широко використовують економнолеговані сталі (наприклад, сталь 25ХГТ), котрі дозволяють використовувати просту та найбільш економічну схему хіміко-термічної обробки з безпосереднім гартуванням з температури підстижування при цементації або з температури насичення при нітроцементації;

- по-друге, широко використовують контрольовані газові атмосфери (на основі ендотермічних), котрі виготовляють шляхом конверсії природного газу (метану) або пропану з повітрям в спеціальних генераторах. Такі атмосфери максимально відповідають усім основним вимогам, які висувають до карбюризаторів: для їхнього виготовлення не потрібні дорогі та дефіцитні гази; такі гази легко транспортуються, підлягають точному дозуванню; склади атмосфер легко регулюються за допомогою приладів за точкою роси, за вмістом діоксиду вуглецю або за кисневим потенціалом. Все це створює добрі умови для стабільного отримання необхідного вмісту вуглецю в деталях, що, в свою чергу, сприяє стабілізації мікроструктури та фазового складу зміцненого шару та його товщини;

- по-третє на сьогодні цементацію та нітроцементацію в більшості випадків здійснюють в автоматизованих прохідних та камерних агрегатах, які володіють високою продуктивністю та забезпечують проведення усього циклу хіміко-термічної обробки.. Об'єм деталей, котрі проходять обробку в шахтних печах, коли гартування здійснюється у відкритих баках, незначний та постійно зменшується;

- по-четверте, використання контрольованих газових атмосфер та сучасного обладнання дозволило використовувати на практиці різні режими насичення вуглецем та азотом в умовах автоматичного регулювання складу пічних атмосфер за вуглецевим потенціалом (рис. 7.1). При здійсненні цементації сталевих деталей вуглецевий потенціал атмосфери підтримують постійним на рівні оптимального значення для даної сталі або змінюють сходинково: на першій стадії його значення максимально (1,2...1,3%). На другій – знижується до необхідного (0,8...0,9%).

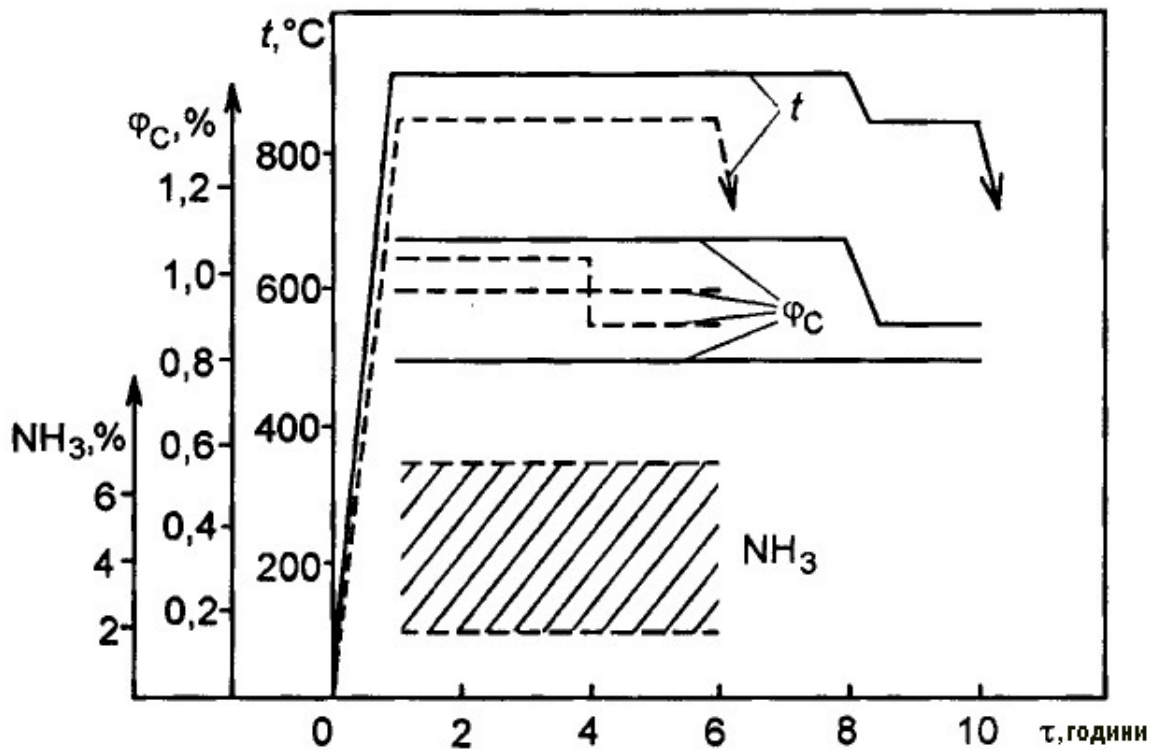


Рисунок 7.1 – Зміни температури, вуглецевого потенціалу та добавки аміаку при традиційних режимах цементації (суцільні лінії) та нітроцементції (штрихові лінії)

Нітроцементацію здійснюють з такими витратами ендотермічної атмосфери та природного газу, щоби впродовж усього процесу насичення вуглецевий потенціал атмосфери був постійним. Вміст аміаку при цьому змінюють в залежності від тривалості процесу в границях 1...7%: чим більша товщина поверхневого шару, тим менша добавка.

Область використання нітроцементції постійно розширюється; її використання пояснюється низкою переваг перед цементацією: більш низька температура процесу насичення, менша його тривалість, більш висока міцність деталей тощо. Все це забезпечує зниження витрат електроенергії та природного газу, підвищення строку експлуатації технологічного оснащення та нагрівачів, збільшення довговічності та надійності деталей машин. Однак є недоліки нітроцементції. Основний – неможливість використання нітроцементції при товщинах поверхневого шару більше 1 мм через

інтенсивний розвиток в такому випадку дефектів мікроструктури поверхневих шарів та значного розкиду значень міцності та довговічності оброблених деталей. [20]

В дипломній бакалаврській роботі методом поверхневого зміцнення зубчастого вінця валу-шестерні зі сталі 25ХГТ була обрана цементація. Сталь 25ХГТ є спадково дрібнозернистою, технологічна схема її обробки – цементація, гартування після підстужування та низькотемпературний відпуск, - дуже схожа на ту, що використовується у випадку використання нітроцементациї – тобто нітроцементация, гартування з температури нітроцементациї та низькотемпературний відпуск. При проведенні цементациї не треба використовувати аміак.

Цементация при постійному вуглецевому потенціалі впродовж усього процесу забезпечує досягнення границі втоми 700...850 МПа, границі міцності на згин 1500...2000 МПа та ударної в'язкості 0,15...0,43 МДж/м². Сходинковий режим (зі зниженням вуглецевого потенціалу наприкінці насичення) призводить до зниження границі втоми (600...750 МПа) та ударної в'язкості (0,1...0,32 МДж/м²); однак зміна режиму насичення практично не впливає на границю міцності на згин (1550...2100 МПа).

Актуальним є використання режимів цементациї з програмованим збільшенням вуглецевого потенціалу під час дифузійного насичення сталевих деталей. Використання таких режимів насичення забезпечує оптимальний вміст вуглецю в поверхневому шарі та формування мартенситно-аустенітної структури без дефектів, що дозволяє досягти максимальних для газової цементациї значень міцності та довговічності оброблених деталей: границя втоми складає 820...940 МПа, границя міцності на згин – 1850...2000 МПа, ударна в'язкість – 0,25...0,36 МДж/м².

Зубчасті колеса з низько-та середньолегованих сталей після цементациї та гартування отримують твердість поверхні HRC 55...63 при концентрації вуглецю 0,8...1,1%, а серцевина зберігає в'язку структуру з твердістю HRC 33...45, стійку до ударних навантажень. Для коліс, що працюють при високих

контактних навантаженнях, концентрацію вуглецю в поверхневих шарах зубців збільшують до 1,1...1,4% без підвищення твердості. Товщина цементованого шару 1 (відстань 2 від бічної поверхні зуба до шарів металу з твердістю HRC 51) залежить головним чином від модуля зубчастого колеса і в середньому становить 0,1...2,0 мм і більше, рис. 7.2. При необхідності, наприклад, з метою підвищення властивостей міцності зубчастих коліс або збільшення припуску на чистову обробку після хіміко-термічної обробки, товщина цементованого шару може бути збільшена.

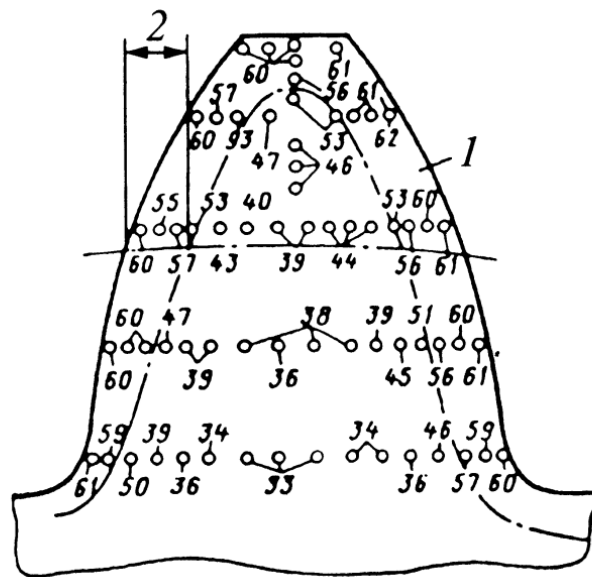


Рисунок 7.2 – Твердість зубця (в HRC) в поперечному перерізі після цементації та гартування [21]

Встановлення природи дефектів поверхневих шарів цементованих деталей, уточнення ролі вуглецю, азоту, кисню та водню в процесі їхнього насичення дозволили розробити більш прогресивні режими газової цементації, які забезпечують потрібну мікробудову поверхневих шарів зубчастих коліс, включаючи й зовнішню зону, де при використанні звичайних режимів насичення утворювалися різні дефекти. Забезпечити необхідну бездефектну будову мікроструктури поверхневих шарів можна, якщо в процесі дифузійного насичення деталей при нагріванні та ізотермічній витримці, по-перше, збільшити прогартуваність зовнішньої зони

поверхневих шарів деталей шляхом підвищення вмісту вуглецю в твердому розчині (аустеніті) та, по-друге, запобігти або загальмувати процеси утворення фаз. Стисло розглянемо один з таких процесів газової цементації.

При такому режимі усувається негативний вплив технологічної спадковості у вигляді карбідоутворення та внутрішнього окислення, реалізується здатність вуглецю підвищувати прогартовуваність сталі. Оскільки при тривалій витримці при температурі цементації утворення та подальше окислення карбідів призводить до збіднення твердого розчину на вуглець та легувальні елементи і, отже, до зниження прогартовуваності, то можливістю підвищити прогартовуваність тонкого поверхневого шару в процесі цементації залишається збільшення концентрації вуглецю в твердому розчині. Це досягається підвищенням вуглецевого потенціалу до 0,9...1,1% впродовж останніх 20...40 хв періоду підстижування. При такому веденні процесу насичення вмісту вуглецю в твердому розчині зростає, тобто поповнюється зменшення вуглецю з аустеніту у зв'язку з його виходом в карбіди або карбонітриди, що приводить до підвищення прогартовуваності цієї зони поверхневого шару та формування структури з високою твердістю. Після обробки за таким режимом в поверхневому цементованому шарі утворюється мартенситна структура, а трооститні ділянки по межах зерен практично відсутні. Такий спосіб цементації усуває зневуглецювання твердого розчину, що приводить до збільшення загартовуваності поверхневої зони, і у підсумку – до підвищення міцності.

ВИСНОВКИ

Було розглянуто призначення, особливості роботи та причини виходу з ладу дуже важливої деталі – валу-шестерні. З'ясовано, що вал-шестерня працює в умовах дії суттєвих радіального знакозмінного зосередженого навантаження, осьового навантаження та крутного моменту; його зубці піддаються згинальній силі, контактним тискам, тертю, що може призвести до їхнього нагрівання та зношування; основною причиною виходу з ладу цієї деталі є втомне руйнування.

Отже, матеріал, з якого виготовляється вал-шестерня, повинен мати високотверду поверхню (≥ 58 HRC) та в'язку, але достатньо міцну серцевину (≥ 30 HRC). Раціональним матеріалом для виготовлення такого типу деталей є група конструкційних цементовних (нітроцементовних) легованих сталей після проведення поверхневої хіміко-термічної обробки, представником яких є спадково дрібнозерниста сталь 25ХГТ.

В дипломній бакалаврській роботі була наведена спрощена маршрутна технологію виготовлення валу-шестерні зі сталі 25ХГТ.

Проведений аналіз особливостей хімічного складу сталі 25ХГТ, призначення її легувальних елементів: хрому, марганцю та титану.

Ретельно розглянуто фазові перетворення, які відбуваються при такому рекомендованому режимі хіміко-термічної обробки: цементация при $920...950^{\circ}\text{C}$, далі – підстужування до оптимальної температури гартування при $840...860^{\circ}\text{C}$ з охолодженням в олії та низькотемпературний відпуск при $190...210^{\circ}\text{C}$ з охолодженням на повітрі. Зазначено, що допоміжними операціями є промивання виробу від олії, контрольні операції. Для проведення основних операцій хіміко-термічної обробки були обрані електричні шахтні печі. Розроблена схема садки в обраних печах, проведені розрахунки часу обробки.

Розглянуто, які дефекти можуть виникати при здійсненні запропонованої хіміко-термічної обробки.

В розділі, присвяченому охороні праці та безпеці життєдіяльності розглянуті небезпечні та шкідливі фактори, якими супроводжуються процеси хіміко-термічної обробки, а також заходи забезпечення пожежної безпеки та персоналу в умовах надзвичайної ситуації.

В спеціальній частині бакалаврської дипломної роботи проведений аналіз варіантів хіміко-термічної обробки, що широко застосовуються для поверхневого зміцнення зубчастих елементів, таких як азотування, нітроцементация та цементация. З'ясовано, що раціональним поверхневим зміцненням такої деталі, як вал-шестерня, що виготовлена зі спадково дрібнозернистої сталі 25ХТ, є цементация із подальшими гартуванням та низькотемпературним відпуском.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Карнаух, С.Г. Деталі машин: курс лекцій для студентів технічних спеціальностей / С. Г. Карнаух, М. Г. Таровик. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – 261 с
2. Рудь, Ю.С. Основи конструювання машин: Підручник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. 2-е вид., переробл. - Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2015. – 492 с.
3. Носко, О.А. Фрактографічне дослідження руйнування вала-шестерні зі сталі 34ХН1М / О.А. Носко, Н.Е. Погребна, А.В. Гребенєва, Т.А. Аюпова, А.А. Аюпов // Харків: Вісник ХНАДУ, вип. 103, 2023. – С.109-116.
4. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія / Є.А. Фролов та ін. Полтава: ПолтНТУ, 2019. 204 с.
5. Пижов, І.М. Розробка технологічного процесу на прикладі виготовлення ступінчастого вала редуктора: Навчально-методичний посібник для виконання конструкторсько-технологічних розділів дипломного проекту бакалавра студентами спеціальності «Прикладна механіка» (спеціалізація «Інтегровані технології машинобудування») денної, заочної та дистанційної форм навчання / І.М. Пижов. – Х.: НТУ «ХП», 2018. – 91 с.
6. Методичні вказівки до виконання самостійної роботи з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» для студентів усіх форм навчання / Укл.: Трофименко В.В., Овчаренко В.І. – Д.: ДВНЗ УДХТУ, 2016. – 40 с.
7. ДСТУ 7806:2015 Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови – [Чинний від 2016-04-01]. – Київ, 2016. – 50 с.
8. Методичні вказівки та завдання до лабораторних робіт та контрольної роботи з дисципліни «Машинобудівні матеріали» для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» денної та заочної форми навчання / Укл.: О.В.

Климов, Ю.І. Кононенко. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 110 с.

9. Куцова, В.З. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями. Підручник / В.З. Куцова, М.А. Ковзель, О.А. Носко. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. – 348 с.

10. Технологія машинобудівних підприємств: підручник / В.Л. Дикань, Ю. Є. Калабухін, Н. Є. Каличева та ін., за заг. ред. В.Л. Диканя. – Харків: УкрДУЗТ, 2020. – 386 с.

11. Будник А.Ф. Типове обладнання термічних цехів та дільниць [Текст]: Навчальний посібник. / А.Ф. Будник – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 212 с.

12. Лазечний І.М. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної бакалаврської дипломної роботи для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» / І.М. Лазечний, О.В. Климов, О.А. Глотка, Ю.І. Кононенко, О.В. Лисиця. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 57 с.

13. Федоров, Г.Є. Контроль якості продукції в машинобудуванні: навч. посібник / Г.Є. Федоров, М.М. Ямшинський, А.М. Фесенко, М.А. Фесенко. – К.: ІВЦ видавництво «Політехніка», 2008. – 352 с.

14. Stoicanescu M. Study on potential causes of defects following heat and thermochemical (carburising) treatments of linear bearings / M. Stoicanescu // Acta Marisiensis. Seria Technologica/ – 2022. – Vol. 19 (XXXVI) no. 2. – P. 1-5 – Mode of access: <https://doi.org/10.2478/amset-2022-0010> (date of access: 29.05.2024). – Title from screen.

15. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. – Вид. офіц. – [Чинний від 2016-04-01]. – Київ, 2015. – 120 с.

16. НПАОП 28.5-1.02-07. Правила охорони праці при термічній обробці металів. – Вид. офіц. – [Чинний від 2008-02-09]. – Київ, 2008. – 121 с.

17. Пилипенко, О.І. Пошкоджуваність і руйнування зубчастих передач редукторів вертольотів МІ-8 та його модифікацій / О.І. Пилипенко, Д.М. Колесник, А.М. Березняк А.М., В.М. Шоха // Збірник наукових праць

державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, вип. 103, 2020. – С.92-105.

18. Васильєва, О.Е. Аналіз методів покращення роботи зубчастих передач редукторів загального призначення / О.Е. Васильєва, Д.О. Чалий, О.В. Придатко // Матеріали III всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Сучасність. наука, час. Взаємодія та взаємовплив». – Київ, 22-24 листопада 2007. – С. 64-67.

19. Бостан, И.А. Повышение нагрузочной способности зубчатых колес технологической комбинированной обработкой / И.А. Бостан, С.Г. Мазуру, Е.К. Переу // Сборник трудов XIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 11-16 сентября 2006 г. «Машиностроение и техносфера XXI века». – Донецк: ДонНТУ, 2006. Т1. – С. 156-160.

20. Говорун, Т.П. Прогресивні методи поверхневого зміцнення валів-шестерен / Т.П. Говорун, Р.С. Сметанін, С.О. Сітало, Н.Г. Коваленко // Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції «Системи розроблення та поставлення продукції на виробництво». – м. Суми, 17-20 травня 2016. – С. 208-211.

21. Bausch, T. Innovative Zahnradfertigung / T. Bausch // Expert verlag GmbH, D 71262, Reningen, Germany, 2006, 778 s.

ДОДАТОК А

ВАЛ-ШЕСТЕРНЯ ТА МАТЕРІАЛ ДЛЯ ЙОГО ВИГОТОВЛЕННЯ

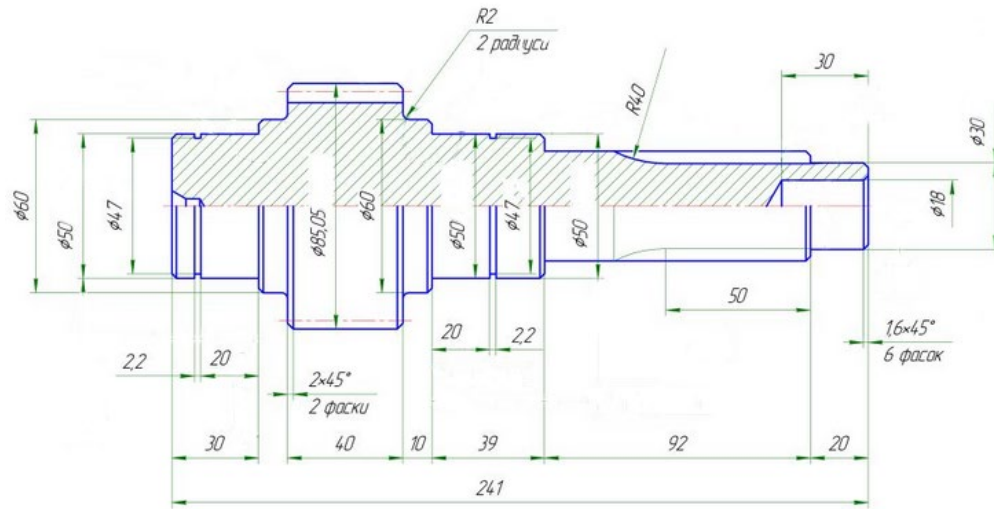


Рисунок А1 – Креслення валу-шестерні

Таблиця А1 – Характеристика вал-шестерні, що оброблюється в термічному відділенні

Назва виробу	Матеріал виробу	Маса виробу, кг	Розміри виробу, мм		Вимоги до матеріалу
			D _{max}	L	
Вал-шестерня	25ХГТ	2,45	85	241	Серцевина: $\sigma_B \geq 1400$ МПа; KCU ≥ 60 , HRC _{серц} ≥ 30 ; поверхня: h = 0,8...1,0 мм; HRC _{пов} 57...63

Таблиця А2 – Хімічний склад сталі 25ХГТ, ДСТУ 7806:2015

Матеріал	Масова частка елементів, %								
	C	Cr	Mn	Ti	Si	P	S	Cu	Ni
						не більше			
25ХГТ	0,22-0,25	1,00-1,30	0,80-1,10	0,03-0,09	0,17-0,37	0,035	0,035	0,30	0,30

Таблиця А3 – Критичні точки сталі 25ХГТ

A _{c1} , °C	A _{c3} , °C	M _p , °C
735	820	360

ДОДАТОК Б

ГРАФІК ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ВАЛУ-ШЕСТЕРНІ, ВИГОТОВЛЕНОГО ЗІ СТАЛІ 25ХГТ

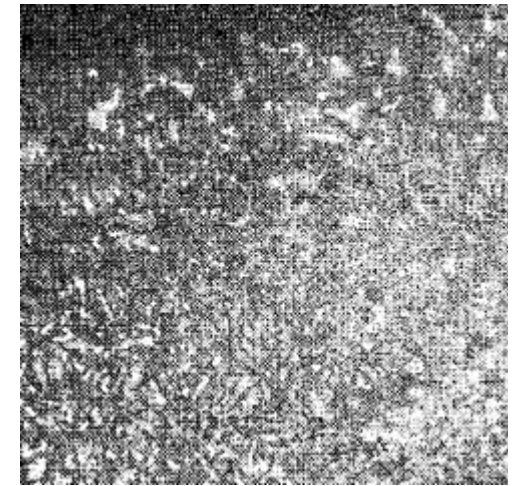
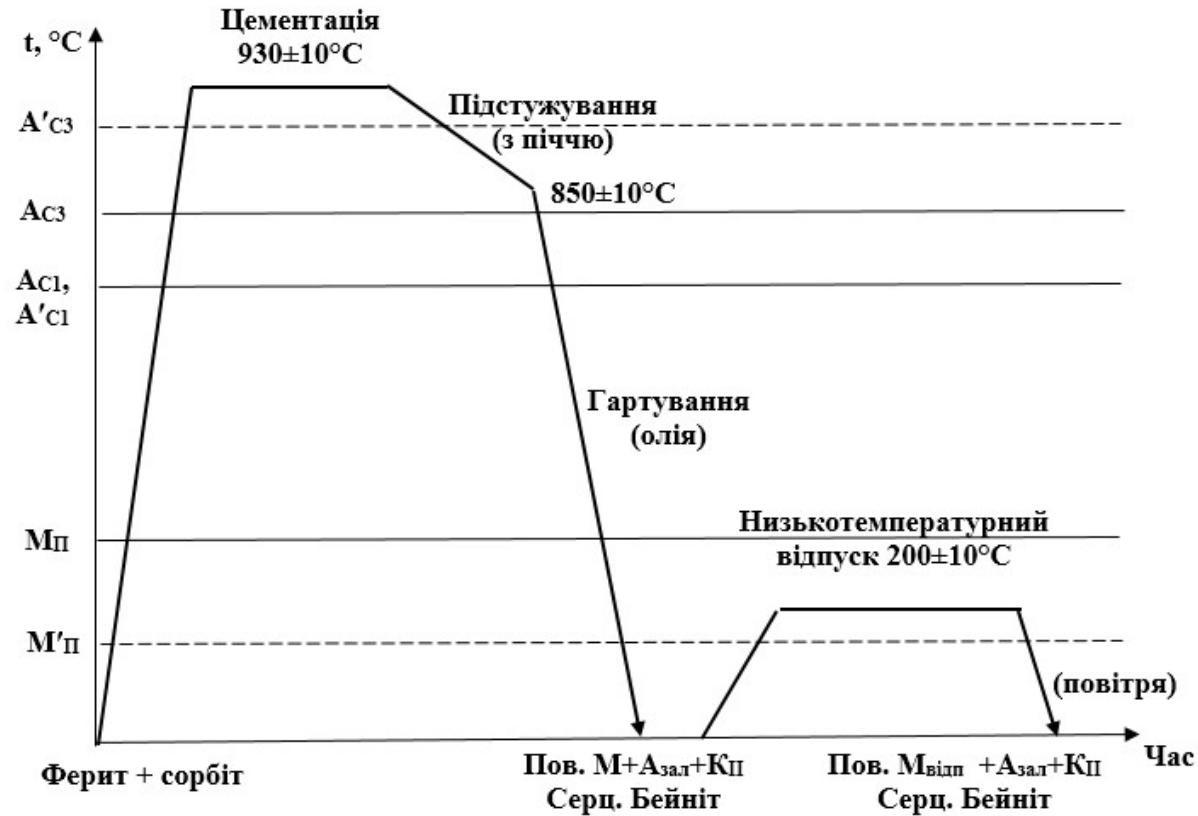


Рисунок Б2 – Мікроструктура поверхні цементованої та загартованої сталі 25ХГТ ($\times 400$)

Рисунок Б1 – Графік хіміко-термічної обробки валу-шестерні зі сталі 25ХГТ

ДОДАТОК В

ДЕФЕКТИ, ЩО МОЖУТЬ ВИНΙΚАТИ ПРИ ЦЕМЕНТАЦІЇ ВАЛУ-ШЕСТЕРНІ ЗІ СТАЛІ 25ХГТ

Оптимальна структура поверхневого шару (він містить 0,8...1,0% С) товщиною 0,8...1,0 мм – *дрібноголчастий мартенсит з карбідами вторинними* та деякою кількістю *залишкового аустеніту*.

1. **НЕРІВНОМІРНА ГЛИБИНА ЦЕМЕНТОВАНОГО ШАРУ.**
2. **НЕДОСТАТНЯ ГЛИБИНА ЦЕМЕНТОВАНОГО ШАРУ.**
3. **ЗАНАДТО ВИСОКА ГЛИБИНА ЦЕМЕНТОВАНОГО ШАРУ.**
4. **ПІДВИЩЕНА КОНЦЕНТРАЦІЯ ВУГЛЕЦЮ В ШАРІ З УТВОРЕННЯМ ГРУБИХ КАРБІДНИХ ВКЛЮЧЕНЬ АБО СІТКИ.**
5. **ВІДШАРОВУВАННЯ ЗАГАРТОВАНОГО ЦЕМЕНТОВАНОГО ШАРУ.**
6. **ПЛЯМИСТА ЦЕМЕНТАЦІЯ.**
7. **ЗАНАДТО ВИСОКА КІЛЬКІСТЬ АУСТЕНІТУ ЗАЛИШКОВОГО.**
8. **УТВОРЕННЯ В ШАРІ РІЗНИХ СПОЛУК (ОКСИДІВ, КАРБІДІВ, НІТРИДІВ ТОЩО).**
9. **ЗНЕВУГЛЕЦЮВАННЯ ПОВЕРХНІ ЦЕМЕНТОВАНОГО ШАРУ.**

ДОДАТОК Г

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО РЕЖИМУ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ (ХТО) ДЛЯ ВАЛУ-ШЕСТЕРНІ

Переваги цементації в порівнянні з азотуванням:

- широкий діапазон регулювання товщини зміцненого шару;
- можливість проведення ХТО зубчастих коліс з економнолегованих сталей;
- висока продуктивність з можливістю проведення гартування після підстужування;
- високі показники згинальної та контактної витривалості зубців.
- менша тривалість процесу;
- менша крихкість поверхневого шару;
- сталі, у яких $\leq 0,3\% \text{ C}$, мають недостатньо міцну серцевину, тому може відбуватися продавлювання азотованого шару.

Переваги цементації в порівнянні з нітроцементациєю:

- не потрібно застосовувати аміак;
- в поверхневому шарі менша кількість аустеніту залишкового;
- нітроцементацию при товщинах поверхневого шару більше 1 мм не використовують через появу дефектів мікроструктури та значного розкиду значень міцності та довговічності оброблених деталей.

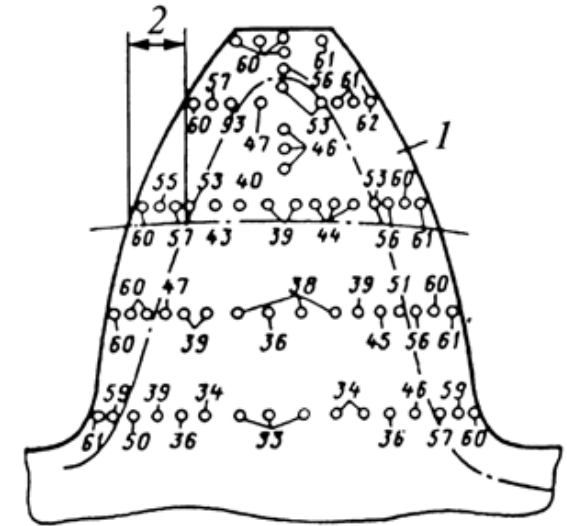


Рисунок Г1 – Твердість зубця (в HRC) в поперечному перерізі після цементації та гартування