

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 Дослідження умов експлуатації зубчатого колеса зі сталі 38Х2МЮА з метою вибору технології азотування
(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) ІV курсу, групи ІФз 210сп

Спеціальності 132 Матеріалознавство

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

КРУЧІНІНА І.В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ЛИСИЦЯ 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)

КРУЧІНІНА Ірина Володимирівна

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Дослідження умов експлуатації зубчатого колеса зі сталі 38Х2МЮА з метою вибору технології азотування

керівник проєкту (роботи) ст. викладач ЛИСИЦЯ Олена Володимирівна

(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) ескіз зубчастого колеса, марка сталі 38Х2МЮА

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 азотованих сталей при проведенні то та їх усунення

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	ЛИСИЦЯ О.В, ст.викладач		
2	ЛИСИЦЯ О.В, ст.викладач		
3	ЛИСИЦЯ О.В, ст.викладач		
4	ЛИСИЦЯ О.В, ст.викладач		
5	ЛИСИЦЯ О.В, ст.викладач		
6	ЛИСИЦЯ О.В, ст.викладач		
7	ЛИСИЦЯ О.В, ст.викладач		
8	ТКАЧ Д.В, доцент, к.т.н		

7. Дата видачі завдання «_____» _____ 20__ року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент(ка)

(підпис)

_____ (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

_____ (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до бакалаврської роботи: 70с., 10 табл., 8 рис., 4 дод., 19 джерел.

ЗУБЧАСТЕ КОЛЕСО, ВЛАСТИВОСТІ, ГАРТУВАННЯ, ВИСОКОТЕМПЕРАТІРНИЙ ВІДПУСК, СОРБИТ, АЗОТУВАННЯ, НІТРИДИ, МАРШРУТНА ТЕХНОЛОГІЯ

Об'єкт розробки – зубчасті колеса зі сталі 38Х2МЮА

Метою дипломної роботи є розробка оптимального процесу хіміко-термічної обробки для зубчастих коліс зі сталі 38ХМЮА враховуючи умови 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, які виконуються з урахуванням вимог до механічних властивостей та структури сталі 38Х2МЮА.

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

ЗМІСТ

	С.
Скорочення та умовні позначки	6
Вступ.....	7
1 Характеристика та умови експлуатації виробів, вимоги до матеріалів	8
2 Номенклатура виробів та маршрутна технологія їх виготовлення.....	13
3 Характеристика матеріалу виробів.....	17
4 Розробка режимів та технологій термічної обробки	24
4.1 Основне та додаткове обладнання для термічної обробки.....	30
4.2 Розрахунок часу нагріву та витримки.....	31
5 Технічний контроль, попередження та виправлення браку.....	40
6 Охорона праці та безпека життєдіяльності	46
7 Спеціальна частина	48
7.1 Розрахунок кількості печей для газового та іонного азотування.....	52
Висновки	56
Перелік джерел посилань	58
ДОДАТОК А Ескіз зубчастого колеса, номенклатура, хімічний склад та властивості	61
ДОДАТОК Б Вплив температури азотування на структуру, твердість та глибину поверхневого шару.....	63
ДОДАТОК В Графік термічної обробки зубчастого колеса	65
ДОДАТОК Г Види дефектів виробів із азотованих сталей при проведенні то та їх усунення	68

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧКИ

HV – твердість за Вікерсом;

HB – твердість за Брінелем;

σ_T – границя плинності;

σ_B – границя міцності;

δ_5 – відносне видовження;

ψ – відносне звуження;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

A_3, A_4 – температури поліморфного перетворення заліза;

л.е. – легувальні елементи;

ТО – термічна обробка;

Азал. – Аустеніт залишковий;

М – мартенсит.

ВСТУП

У сучасному виробництві механічних систем, зокрема в галузі автомобілебудування, машинобудування та аерокосмічної техніки, велике значення має підвищення якості та витривалості зубчастих коліс. Зубчасті колеса є ключовими компонентами в передачах, які забезпечують передачу руху та обертання в механічних системах. Проте, вони піддаються значному зношенню та навантаженням, що може призводити до втрати точності, зниження міцності та скорочення терміну служби. З метою покращення механічних властивостей зубчастих коліс та подовження їхнього терміну служби застосовують різні методи обробки поверхні

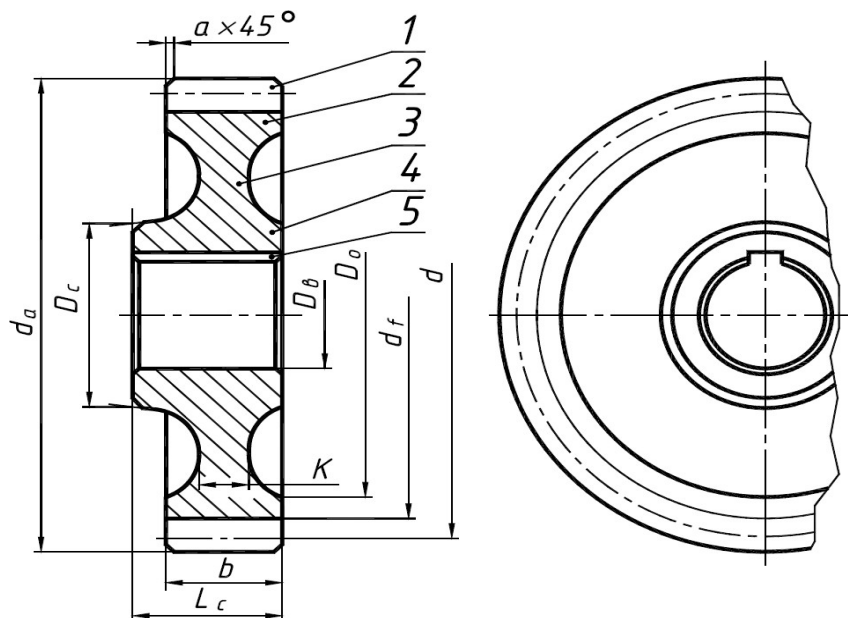
Хіміко-термічна обробка, зокрема азотування, є важливим процесом для підвищення механічних та експлуатаційних властивостей зубчастих коліс. Цей процес включає комбінацію термічної обробки з введенням азоту у поверхневий шар матеріалу зубчастих коліс.

Азотування використовують для формування азотних сполук на поверхні зубчастих коліс з метою покращення їх міцності, зносостійкості та тривалості експлуатації. У процесі азотування зубчасті колеса піддаються нагріванню у контрольованій атмосфері азоту протягом певного часу. Азот взаємодіє з поверхнею матеріалу, утворюючи тверді азотні сполуки, які покращують міцність та зносостійкість поверхневого шару.

Враховуючи хіміко-термічну обробку (азотування), зубчасті колеса можуть піддаватися процесу нагрівання у контрольованій атмосфері азоту, утримання при певній температурі та насичення поверхневого шару азотом. Це змінює мікроструктуру та хімічний склад поверхні зубчастих коліс, покращуючи їх механічні властивості та забезпечуючи оптимальну продуктивність та довговічність системи, в якій вони використовуються.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИРОБІВ, ВИМОГИ ДО МАТЕРІАЛІВ

Зубчасте колесо – головна деталь однойменної передачі, має вигляд диска з розташованими на циліндричній або конічній поверхні зуб'ями. За допомогою цих зуб'єв у процесі обертання відбувається зачеплення колес між собою, що дозволяє реалізувати перенесення обертального моменту від одного валу, на якому розташоване колесо, до іншого. Зуб зубчастого колеса при обертанні штовхає зуб іншого, пов'язаного з ним, колеса, яке внаслідок цього теж починає здійснювати обертальний рух [1]. На рисунку 1.1 наведений ескіз зубчастого колеса з позначенням основних розмірів (d_a –зовнішній діаметр; d –ділильний діаметр; d_f –діаметр впадин; D_o –діаметр ободка; D_c –діаметр колонки; D_v –діаметр валу; K –товщина диску; b –ширина зубчастого вінця; L_c –довжина колонки; a –фаски зубців).



1–зубчастий вінець;2–обід;3–диск;4–колонка;5–шпоночний паз;.

Рисунок 1.1 – Ескіз зубчастого колеса

Зубчасті передачі набули широкого поширення завдяки своїй універсальності, високому ККД, можливості застосування у широкому діапазоні швидкостей та потужностей, компактності та надійності. Для забезпечення цих експлуатаційних можливостей висуваються високі вимоги до якості робочих поверхонь зубчастих колес [2]. Працездатність зубчастих колес значною мірою залежить від точності виготовлення і якості поверхневого шару зуб'єв. Робочі поверхні повинні в умовах дії великих контактних напружень, сил тертя і контактних температур протистояти пошкодженню і втомному руйнуванню. Експлуатаційні властивості залежать від впливу на поверхневий шар зуб'єв комплексу технологічних і металургійних факторів [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

При експлуатації під дією зовнішніх сил в деталі виникають напруження згину $\sigma_{зг}$, напруження стиснення $\sigma_{ст}$ та контактні напруження $\sigma_{н}$. Ці напруження мають циклічний характер. Вони змінюються із часом за відповідним переривчастим циклом. Час дії $\sigma_{зг}$ за один оберт колеса дорівнює тривалості зчеплення одного зуба. Контактні напруження $\sigma_{н}$ тривають ще менше [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Умови роботи зубчастого колеса визначаються їх швидкохідністю, рівнем контактних і згинальних навантажень.

У процесі експлуатації зуб'я зубчастого колеса зазнають дії [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

- згину при максимальному одноразовому навантаженні (при різкому гальмуванні, заклинюванні, при застосуванні максимального крутного моменту);
- згину за багаторазових циклічних навантажень, внаслідок чого в корені зуба розвиваються найбільші напруження і може відбуватися втомне руйнування;
- контактних напружень на бічних робочих поверхнях зубців, що призводить до утворення контактної втоми викришування (піттингу);
- зношення бічних поверхонь (через потрапляння абразивних частинок, бруду, пилу в зону контакту) або торцевих поверхонь зубців (під час перемикування

передач у коробках передач). При відносному ковзанні в умовах недостатнього мастила або без мастила на робочих поверхнях зубців може відбуватися «схоплювання» і утворення грубих задирих, що призводять до катастрофічно швидкого (протягом декількох годин) зношування шестерень.

Змінні напруження є основною причиною втомного руйнування зубців: поломки зуб'єв від напружень згину або викришування контактної поверхні напружень. Із контактними напруженнями та тертям пов'язані також і зношення, заїдання та інші види ушкоджень поверхні деталі.

В основному зубчасті колеса використовують в багатопарних зубчастих передачах. Такого роду передачі встановлюють в різних редукторах, двигунах, і інших механізмах, де є необхідність передачі великих крутних моментів із заданою зміною частоти обертання валів [3].

При роботі механізмів в машинобудуванні не уникнути впливу ударних та знакозмінних навантажень. При врахуванні перелічених факторів можна сформулювати вимоги до сталей[3]:

- висока границя міцності;
- висока границя текучості;
- висока ударна в'язкість серцевини;
- висока границя витривалості;
- висока твердість поверхні зуба;
- постійність форми і розмірів контактних поверхонь деталі.

Матеріал для виготовлення зубчастих колес обирають залежно від призначення та умов експлуатації колес, передаваних навантажень, швидкостей обертання тощо. При виборі марки сталі необхідно враховувати такі вимоги: низьку вартість матеріалу, добру оброблюваність різанням, мінімальне короблення при гартуванні та три основні експлуатаційні показники – високу міцність, довговічність роботи та підвищену стійкість до зношення.

Руйнування зубчастих колес розглядається як явище поверхневої втоми. Опір втоми зуб'єв значною мірою залежить від геометрії зуб'єв, марки сталі, термічної обробки, шорсткості поверхні. Зношення зазвичай має місце, коли

поверхня на зуб'ях оброблена грубо, а швидкості і навантаження високі. Задир може виникнути у передач, що несуть великі навантаження або працюють на високих швидкостях в умовах обмеженої масляної плівки.

Для виробництва зубчастих колес використовують сталі: вуглецеві – 40, 45, 50; вуглецеві із зниженою прогартовуваністю – 55ПП; хромисті – 20Х, 35Х, 40Х, 50Х; хромонікелеві – 12ХН3А, 12Х2Н4А, 20ХН, 40ХН; хромомарганцеві – 18ХГ, 18ХГТ, 25ХГТ, 30ХГТ; хромомолібденові – 20ХМ, хромоалюмінієві з молібденом – 38ХМЮА, 38Х2МЮА, хромонікельмолібденові – 18Х2Н4МА, хромонікельмолібденові з титаном – 25ХГНМТ.

Вуглецеві сталі не знайшли широкого застосування для виготовлення зубчастих колес через значне короблення в процесі термообробки і порівняно низьку міцність.

Леговані сталі що містять Cr, Ni, Mo, Mn, Al, Ti використовують для виготовлення важконавантажених зубчастих колес. Ці сталі піддають поверхневому зміцненню – хіміко-термічній обробці (цементациї та азотуванню). Вміст вуглецю в цементованих сталях зазвичай коливається від 0,15 до 0,25 %. Така концентрація вуглецю дає максимальну в'язкість зуб'єв. Після термічної обробки зубчасті колеса з цих сталей мають тверду поверхню, яка добре опирається зношенню, гарну внутрішню структуру, високу ударну в'язкість і високі показники опору втомі. Глибина цементованого шару зубчастих колес становить 1...2 мм.

Внаслідок азотування сталь набуває: високу твердість на поверхні (більшу, ніж після цементациї), що не змінюється під час нагрівання до 400...500°C; низьку схильність до задирів і високий опір зношенню; значну границю витривалості та кавітаційну стійкість; високу корозійну стійкість в атмосфері. В процесі азотування деталь зазнає незначних деформацій. Азотований шар добре піддається шліфуванню та поліруванню.

Основною перевагою азотування є можливість отримання високої зносостійкості та опору втомі виробів при мінімальному коробленні і деформації. За зносостійкістю азотована легована сталь в 1,5...4 рази перевершує

високовуглецеві загартовані та цементовані сталі. За невеликої товщини шару азотовані деталі характеризуються високим опором втомі і малою чутливістю до конструктивних і технологічних концентраторів напружень[5].

Азотовані деталі повинні мати високу міцність і в'язкість серцевини. Зважаючи на малу товщину азотованого шару, руйнування може початися під шаром, тому сталь у цій зоні повинна мати достатній опір втомі. Знеміцнення серцевини знижує межу витривалості. Тому азотуванню піддають сталі, що містять 0,3...0,5% С.

Отже, для виготовлення важконавантажених зубчастих колес рекомендовано обрати конструкційні поліпшувальні сталі, а саме 38Х2МЮА. Поліпшувальними сталями називають сталі, що використовують після гартування і високого відпуску (термічне поліпшення). Сталі містять 0,3...0,5%С та піддають гартуванню при 820...880°С в маслі (великі деталі охолоджують у воді) і високому відпуску при 550...680°С. Вони повинні мати високу границю плинності, малу чутливість до концентраторів напружень, а у виробках, що працюють при багаторазово доданих навантаженнях – високу границю витривалості та достатній запас в'язкості.

Для надання деталям високої зносостійкості поверхні використовують азотування. Азотування приводить до підвищення твердості, зносостійкості, втомної міцності, опору корозії [6].

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	38X2МЮА	0,105	-	-	5	80	Серцевина 285...321 НВПоверхня 950...1000HV
2	Зубчасте колесо	38X2МЮА	0,120			6	95	Серцевина 285...321 НВПоверхня 950...1000HV
3	Зубчасте колесо	38X2МЮА	0,135			6	110	Серцевина 285...321 НВПоверхня 950...1000HV
4	Зубчасте колесо	38X2МЮА	0,240			10	200	Серцевина 285...321 НВПоверхня

								950...1000HV
--	--	--	--	--	--	--	--	--------------

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

Виготовлення зубчастих колес – багатоопераційний технологічний процес, де операції гарячої пластичної деформації та механічної обробки поєднуються з операціями термічної обробки заготовок і хіміко-термічної обробки деталей. При їх виготовленні кількість операцій і переходів досягає двох десятків. Складна і ажурна конфігурація зубчастих колес, мінімальні припуски істотно ускладнюють процеси термічної та механічної обробки, вимагають ретельного їх виконання.

Металургійна якість і розташування волокон (макроструктура гаряче-деформованого металу) суттєво впливає на експлуатаційні властивості зубчастого колеса. Обидва ці чинники незмінюються під час технологічного процесу і успадковуються готовою деталлю. Для того, щоб зменшити ступінь їх впливу, для виготовлення зубчастих колес використовують комплексно леговані сталі з електрошлаковим переплавом, а технологію гарячого штампування розробляють таким чином, щоб унеможливити утворення несприятливо орієнтованої макроструктури. Зростає роль зміцнювальної та оздоблювальної обробок, під впливом яких характеристики якості поверхневого шару і показники точності зазнають найбільших змін.

Істотне значення має макроструктура зубчастого колеса. Найкращу структуру можна отримати штампування шляхом осідання з торця циліндричної заготовки, коли напрямок волокон повторює зовнішні обриси поковки.

Технологічний процес виготовлення шестерні на машинобудівному підприємстві складається з наступних операцій: 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.

Маршрутні технології виробництва виробів представлені в таблиці.2.2.

Таблиця 2.2 – Маршрутна технологія виготовлення зубчастих колес зі сталі 38Х2МЮА

№ п/п	Назва операції (комплексу операцій)	Цех (дільниця) де виконується операція	Призначення операції
1	2	3	4
1	Вхідний контроль	Заготівельний цех або заготівельна дільниця ковальсько-штампового цеху	Контроль хімічного складу, розмірів, макроструктури, відсутності дефектів гарячекатаного прокату
2	Заготівельна	Заготівельний цех або заготівельна дільниця ковальсько-штампового цеху	Отримання заготовок із прокату для наступного штампування
3	Штампування	Ковальсько-штамповий цех	Надання необхідної форми, розмірів та створення сприятливої макроструктури
4	Додаткова термічна обробка (нормалізація)	Термічна дільниця ковальсько-штампового цеху	Підготовка структури до подальшої механічної та основної термічної обробки
5	Механічна обробка	Механічний цех	Надання деталі необхідних форм та розмірів

6	Основна ТО	Термічний цех	Отримання необхідної структури та властивостей (гартування + відпуск)
---	------------	---------------	--

Кінець таблиці 2.2

1	2	3	4
7	Хіміко-термічна обробка (азотування)	Термічний цех	Отримання необхідної структури на поверхні виробу
8	Остаточна механічна обробка	Механічний цех	Надання виробу остаточних розмірів, геометрії, шорсткості у відповідності із робочим кресленням
9	Контроль	Контрольна ділянка механічного цеху	Контроль геометрії та якості поверхні

3 ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛУ ВИРОБІВ

Поліпшувальними називають сталі, які використовують після гартування і високого відпуску (поліпшення). Сталі містять 0,3...0,5%С, їх піддають гартуванню при 820...880°C (в залежності від складу) в олії (великі деталі охолоджують у воді) і високому відпуску при 550...680°C. Вони повинні мати високу границю плинності, малу чутливість до концентраторів напружень, а у виробках, що працюють при багаторазово доданих навантаженнях – високу границю витривалості та достатній запас в'язкості. Крім того, поліпшувальні сталі повинні мати гарну прогартуваність і малу чутливість до відпускнуї крихкості.

Сталь 38Х2МЮА відноситься до конструкційних легованих сталей, доевтектоїдна, перлітного класу. Сталь додатково легована алюмінієм та має високу поверхневу твердість після азотування.

Хімічний склад сталі представлений у табл.3.1, механічні властивості – у табл.3.2.

У конструкційній сталі ферит – це основна структурна складова (не менше 90% за об'ємом), що багато в чому визначає властивості. Легувальні елементи, розчиняючись у фериті, зміцнюють його. Найбільше підвищують твердість повільно охолодженого (нормалізованого) фериту (рис.3.1, а) кремній, марганець, нікель, тобто. елементи, що мають відмінну від α -Fe кристалічну ґратку. Слабше впливають молібден, вольфрам і хром, ізоморфні γ -Fe.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталі 38Х2МЮА, % мас (ДСТУ 7806:2015)

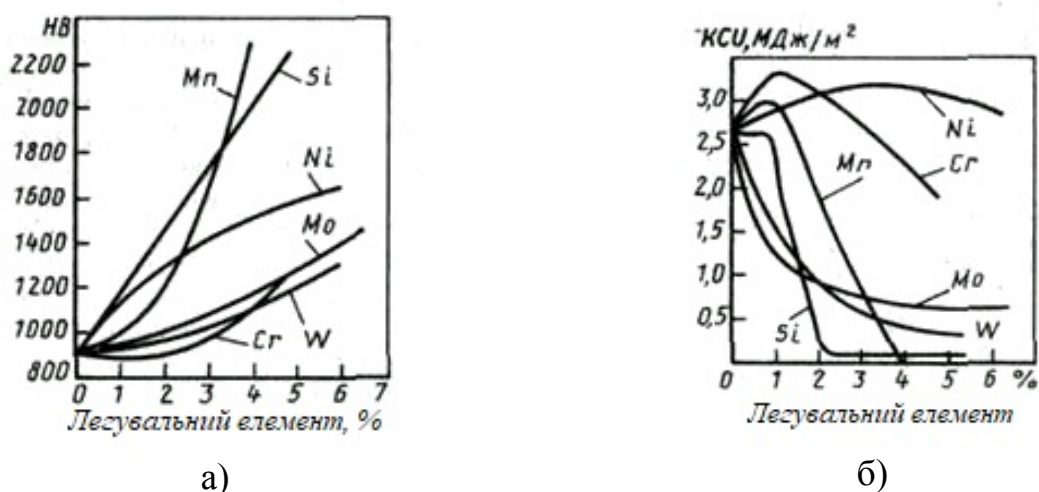
Марка сталі	С	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Al
				не більше					
38Х2МЮА	0,35	0,20	0,30	0,025	0,025	1,35	≤0,3	0,15	0,70...

	0,42	0,45	0,60			1,65		0,25	
--	------	------	------	--	--	------	--	------	--

Таблиця 3.2 – Механічні властивості сталі 38Х2МЮА[7]

Марка стали	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	НВ
38Х2МЮА	780...1030	590...880	10...18	45...52	59	250...300
Примітка. Термічна обробка сталі гартування 930...950°С, масло або вода та високотемпературний відпуск, 640...680°С, повітря.						

Більшість легувальних елементів знижують ударну в'язкість та зміцнюють ферит і мало впливають на пластичність, якщо їх концентрація вище 1% (рис. 3.1, б). Виняток становить нікель, який не знижує в'язкість. Марганець та хром при вмісті до 1% підвищують ударну в'язкість; при більшій концентрації вона знижується, досягаючи рівня нелегованого фериту, приблизно при 3% Cr та 1,5% Mn.



а – твердість; б – ударна в'язкість

Рисунок 3.1 – Вплив легувальних елементів на властивості фериту [Ошибка!]

Источник ссылки не найден.]

Елементи карбідоутворювачі та частково кремній затримують виділення та коагуляцію карбідів при відпусканні, при цьому збільшується дисперсність карбідної фази. Крім того, вони ускладнюють знеміцнення загартованої сталі і цим сповільнюють зниження міцності при відпусканні.

До найважливіших факторів, що сприяють підвищенню конструкційної міцності при легуванні – це зниження критичної швидкості гартування і збільшення прогартуваності. Найбільш ефективно підвищує прогартуваність введення кількох елементів: Cr+Mo, Cr+Ni, Cr+Ni+Mo тощо. Можливість менш різкого охолодження при гартуванні деталей зменшує в них внутрішні напруження та небезпеку утворення тріщин.

Більшість легувальних елементів подрібнює зерно, що сприяє підвищенню роботи розвитку тріщини та зниженню порога холодноламкості.

При однаковому розмірі зерна легувальні елементи індивідуально впливають на температуру переходу в крихкий стан і роботу розвитку тріщини. Найбільш сильно знижує поріг холодноламкості та збільшує опір поширенню тріщини нікель.

Хром дуже поширений, порівняно дешевий легувальний елемент, карбідоутворювач. Є феритостабілізатором, звужує область існування γ -заліза. В цій сталі хром знаходиться в невеликій кількості, самостійних карбідів не утворює, входить до складу твердого розчину (Ф) і в цементит $(Fe,Cr)_3C$, сприятливо впливає на механічні властивості сталі.

Крім того, Cr збільшує стійкість переохолодженого аустеніту, знижує критичну швидкість гартування і підвищує прогартуваність сталі.

Молібден – дорогий і гостродефіцитний елемент карбідоутворювач, який переважно розчиняється в цементиті. Основна мета введення 0,2...0,4% Mo – зменшення схильності до відпускнуї крихкості другого роду, покращення властивостей комплекснолегованої сталі внаслідок подрібнення зерна, підвищення стійкості до відпуску, збільшення прогартуваності.

Алюміній – знижує точку A_4 та підвищує точку A_3 , зменшує вміст вуглецю в евтектоїді. В сталі алюміній подрібнює зерно та зменшує схильність сталі до

старіння; знижує чутливість сталі до крихкого руйнування підвищує ударну в'язкість за низьких температур. Підвищує температуру мартенситного перетворення.

На рис. 3.2 представлена діаграма ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту сталі 38ХМЮ, близької за складом до сталі 38Х2МЮА, а в табл. 3.3 наведені критичні точки сталі.

Як видно з рис. 3.2, спостерігається два мінімуми стійкості аустеніту, що необхідно враховувати при термічній обробці (в даному випадку при охолодженні з температури гартування).

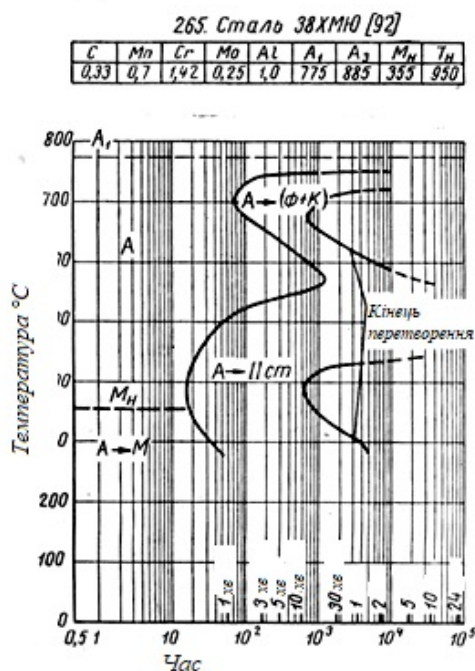


Рисунок 3.2 – Діаграма ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту сталі 38ХМЮ [8]

За допомогою діаграми ізотермічного перетворення можна розрахувати критичну швидкість охолодження (мінімальну швидкість охолодження для отримання структури мартенсит після гартування) за формулою 3.1 [6]:

$$, \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c} \quad (3.1)$$

$t_{\text{н}}$ – температура нагріву, $^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{н}} = 950^{\circ}\text{C}$ (рис.3.1);

t_{min} – температура мінімальної стійкості переохолодженого аустеніту, $^{\circ}\text{C}$,
 $t_{\text{min}} = 400^{\circ}\text{C}$ (рис.3.1);

τ_{min} – мінімальна стійкість переохолодженого аустеніту, с, $\tau_{\text{min}} = 18$ с (рис.3.1);

1,5 – коефіцієнт, що враховує похибку при розрахунку заізотермічною діаграмою.

Критична швидкість охолодження сталі 38X2МЮА розрахована за формулою 3.1:

Таким чином, для охолодження виробів зі сталі 38X2МЮА з температури гартування можна використовувати масло ($50 \dots 60^{\circ}\text{C}/\text{c}$).

Таблиця 3.3 – Критичні точки сталі 38X2МЮА [7]

Марка сталі	A_{c1}	A_{cm} (A_{c3})	A_{r1}	A_{rm} (A_{r3})
38X2МЮА	800	865	665	740

Поліпшувальна сталь, що розглянута в роботі, для забезпечення експлуатаційних властивостей повинна піддаватися азотуванню. Це забезпечує підвищення поверхневої твердості, зносостійкості, а також довговічності при збереженні досить високої міцності та пластичності серцевини. Крім того, азотовані деталі теплостійкі до температури $450 \dots 500^{\circ}\text{C}$. Підставою для правильних уявлень про процеси азотування є діаграма стану системи Fe-N, наведена на рис. 3.3.

В системі Fe-N можливе утворення наступних фаз [12]:

α -фаза – твердий розчин на основі α -Fe, азотистий ферит, максимальна концентрація азота 0,1% при 591°C, а при кімнатній температурі близько 0,01%;

γ -фаза – твердий розчин на основі γ -Fe, азотистий аустеніт, що існує як рівноважна фаза лише вище евтектоїдної температури (591°C);

γ' -фаза – проміжна фаза, твердий розчин на основі нітриду Fe_4N , фаза втілення, має ГЦК ґратку;

ε -фаза – проміжна фаза, твердий розчин на основі нітриду Fe_{2-3}N , з дуже широкою областю гомогенності, має гексагональну ґратку.

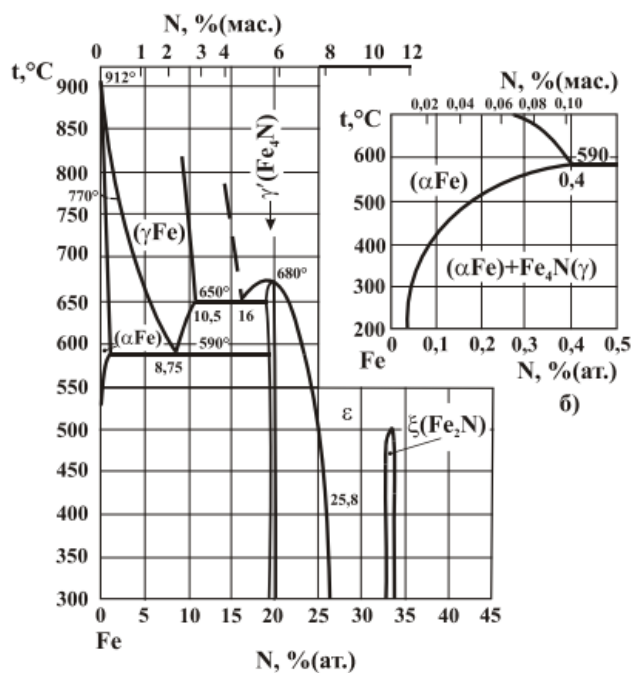


Рисунок 3.3 – Діаграма стану Fe-N [9]

З багатьма легувальними елементами азот утворює хімічні сполуки – нітриди (AlN , CrN , Cr_2N , MnN , TiN тощо).

Нітриди утворюють метали перехідних груп (залізо, хром, марганець, ванадій, вольфрам, молібден, титан). Висока твердість азотованого шару пояснюється великою дисперсністю нітридів, вона тим більша, чим більше їх термічна стійкість, остання ж тим сильніша, чим менше електронів в d-смузі металу і міцніше зв'язок між металом і азотом.

При азотуванні сталі ϵ - і γ -фази мають карбонітридний характер. Вуглець впливає на розчинність азоту в α -фазі. За інших рівних умов вуглець зменшує розчинність азоту в легованому фериті.

При азотуванні легувальні елементи сталі змінюють розчинність азоту в α -фазі, розчиняючись в α -, ϵ - і γ' -фазах, а також утворюють самостійні нітриди. Перехідні елементи молібден, хром, розчиняючись у фериті, підвищують розчинність азоту в α -фазі. Легування γ' -фази підвищує її твердість і опір зношенню.

Нітриди (Fe_4N) заліза мають низьку твердість ($\sim 450\text{HV}$), тому азотування піддають леговані сталі.

Високу твердість мають лише фази γ' і азотистий мартенсит α' . Всі легувальні елементи зменшують товщину азотованого шару, але різко підвищують твердість на поверхні та за перерізом дифузійного шару. Азотиста ϵ -фаза здебільшого має меншу твердість. Висока твердість зони внутрішнього азотування, що становить основну частину шару, пов'язана з утворенням твердого розчину та виділенням нітридів легувальних елементів, що спотворюють ґратку матриці та ускладнюють пластичну деформацію.

Висока твердість азотованого шару пояснюється не лише процесами передвиділення та утворенням нітридів у процесі азотування, але й значною розчинністю азоту у фериті, легованому перехідними елементами. Розчинений азот приводить до розвитку високих мікронапружень. Легування сталі декількома елементами приводить до досягнення більшої твердості азотованого шару порівняно з легуванням одним елементом.

Можливо, присутність алюмінію в сталі, крім нітридів перерахованих елементів, викликає утворення нітриду AlN , ковалентні зв'язки в якому зумовлюють дуже високу його термічну стійкість.

4 РОЗРОБКА РЕЖИМІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Розробка режимів основних та допоміжних операцій термічної обробки полягає у виборі температур нагрівання та розрахунку часу нагрівання, витримки та охолодження.

При правильному виборі основних параметрів режиму забезпечується отримання необхідної структури, властивостей і якості виробів при відповідній операції. Режим ТО складається з наступних параметрів: швидкість та температура нагрівання, час витримки та швидкість охолодження.

Заготовки після штампування недоцільно охолоджувати до 20 °С, а потім виконувати попередню ТО. Заготовки завантажують гарячими, тобто використовують тепло попередніх операцій, економлячи енергоресурси, скорочуючи цикл виготовлення виробів та зменшуючи ймовірність короблення та утворення тріщин.

Проміжні та кінцеві температури нагрівання залежать від операцій ТО, хімічного складу матеріалу, необхідних кінцевих структур та властивостей матеріалу виробу.

При розрахунках загальної тривалості перебування виробів у печі користуються формулою [11]:

$$\tau_{\text{заг}} = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{техн}} + \tau_{\text{ох}}, \quad (4.1)$$

$\tau_{\text{н}}$ – час нагрівання до заданої температури, хв.;

$\tau_{\text{в}}$ – час витримки для вирівнювання температури поперечного перерізу, хв.;

$\tau_{\text{техн}}$ – тривалість технологічної витримки для перебігу заданих процесів, хв.;

$\tau_{\text{ох}}$ – час охолодження виробів, хв.

Для забезпечення високих механічних властивостей деталі піддають

термічній обробці – поліпшенню, тобто гартуванню з високим відпуском. Режими поліпшення залежать від сталі, з якої виготовлені деталі.

Гартуванням бажано отримати структуру найвищої твердості, тобто мартенсит, наступне відпускання якого може знизити твердість і підвищити пластичність сталі. Структури, отримані при відпусканні мартенситу, мають кращі механічні властивості, ніж структури, отримані безпосередньо в результаті розпаду аустеніту. Це пояснюється отриманням більш дисперсної ферито-цементитної суміші, що має зернисту будову.

Оскільки сталь відноситься до доевтектоїдного структурного класу, то нагрівання під гартування проводиться до температури вище A_{c3} на $70...100^{\circ}\text{C}$ для легованої сталі. При цьому слід уникати перегріву, що може привести до росту зерна A та зниження механічних властивостей.

При нагріванні під гартування сталь набуває аустенітної структури, яка при подальшому охолодженні зі швидкістю вище критичної перетворюється на мартенсит.

Швидкість нагріву при термічній обробці легованої сталі має бути тим меншою, чим більший вміст легувальних елементів. Легування хромом, алюмінієм, молібденом погіршує теплопровідність сталі, а тому, щоб не відбувалось короблення деталі, не утворювались внутрішні тріщини та інші дефекти через значну різницю температур на поверхні та у серцевині, деталі з легованої сталі нагрівають повільніше і рівномірніше, ніж деталі з вуглецевої сталі.

Легувальні елементи підвищують стійкість переохолодженого аустеніту, прогартуваність сталі та зменшують критичну швидкість гартування. Тому в структурі сталі 38X2MЮА мартенсит присутній після охолодження з температури гартування в масло. Більш повільне охолодження зменшує гартівні напруження і ризик короблення деталі.

Відпуск легованої сталі необхідно проводити при температурах вищих, ніж для вуглецевої сталі, оскільки легувальні елементи зсувають процес знеміцнення під час нагрівання загартованої сталі в область вищих температур, тобто

підвищують стійкість проти відпуску.

Швидкість охолодження при відпусканні легованої сталі істотно впливає на механічні властивості, особливо на ударну в'язкість. У легованій сталі може спостерігатися зворотня відпускна крихкість II роду. Цей вид відпускної крихкості спостерігається в сталях, легованих хромом, при повільному охолодженні з температури відпуску. Причини цієї відпускної крихкості: виділення карбідів по межах зерен. Зменшити схильність до відпускної крихкості можна застосувавши швидке охолодження з температури відпуску (наприклад, у маслі) і додатковим легуванням сталі молібденом у кількості 0,5%. Молібден стримує виділення карбідів.

Високотемпературний відпуск створює найкраще співвідношення міцності та в'язкості сталі.

Враховуючи вище наведене гартування сталі 38X2МЮА: нагрівання до температури $940 \pm 10^\circ\text{C}$ (вище за A_{c3} , бо сталь належить до доевтектоїдного структурного класу в рівноважному стані), у процесі нагрівання відбувається повна фазова перекристалізація сталі; охолодження з температури гартування може проводитися в маслі. Структура сталі після гартування: М + Азал. Невелика кількість аустеніту залишкового в структурі загартованої сталі пояснюється впливом легувальних елементів на температурний інтервал мартенситного перетворення. У присутності легувальних елементів температури M_p і M_k знижуються і мартенситне перетворення при охолодженні до кімнатної температури проходить не до кінця.

Відпуск сталі проводять при температурі $620 \pm 10^\circ\text{C}$ з охолодженням на повітрі. Структура сталі після відпуску: сорбіт відпуску.

При термічній обробці деталей зі сталі 38X2МЮА необхідно враховувати такі особливості цієї сталі:

- значну схильність до знеуглецювання; на деталях перед їх термічною обробкою залишають припуск (до 3 мм) на обробку на металорізальних верстатах для видалення знеуглецьованого шару;

- алюміній затримує дифузійні процеси; для отримання більш однорідного

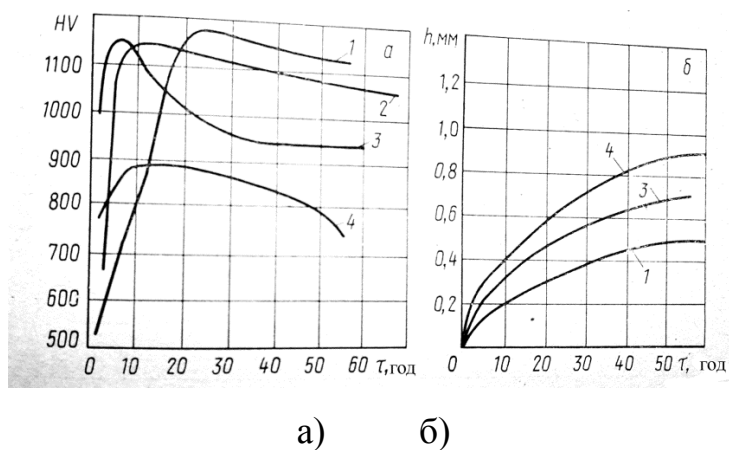
аустеніту необхідна триваліша витримка при нагріванні під гартування (приблизно в 1,5 рази більше, ніж зазвичай);

- схильність до росту зерна аустеніту при незначному перегріві під гартування; потрібен суворий контроль за температурою нагріву.

Після термічного поліпшення проводиться поверхнєве зміцнення зуб'єв зубчастого колеса – хіміко-термічна обробка азотування.

Азотування виробів із сталі 38Х2МЮА рекомендується виконувати при температурі 525...540°C. При низьких температурах азотування у α -твердому розчині утворюються сегрегації типу зон Гін'є-Престона. При більш високих температур виникають дисперсні нітриди легувальних елементів (Cr_2N , Mo_2N тощо). Підвищення температури азотування збільшує короблення та деформацію. Тривалість процесу залежить від необхідної товщини азотованого шару. Чим вище температура азотування, тим нижче твердість азотованого шару і більша товщина шару. Чим вище температура азотування, тим нижче твердість (рис. 4.1, а). Чим нижче температура, тим різкіше знижується твердість по товщині азотованого шару, тому для отримання заданої ефективної товщини шару при температурах 520...560°C потрібен тривалий час (рис. 4.1, б).

Для насичення використовують атомарний азот, що утворюється в момент розкладання сполук, які містять цей елемент. Найчастіше використовують аміак, дисоціація якого супроводжується виділенням азоту в атомарно активному стані, який, може переходити у молекулярний стан і втрачати свою активність. Тому азотування інтенсивно протікає лише в тому випадку, коли дисоціація аміаку відбувається в безпосередній близькості від азотованої поверхні. Ступінь дисоціації аміаку залежить від температури, тиску, швидкості протікання аміаку через піч і площі поверхні деталі, що азотується. При даній температурі в печі повинна підтримуватися певна ступінь дисоціації аміаку, від якої залежить кількість азоту, що поглинається сталлю.



- а – залежність твердості від температури;
 б – залежність товщини від часу азотування;
 1 – 500°C; 2 – 525°C; 3 – 550°C; 4 – 600°C

Рисунок 4.1 – Залежність твердості HV (а) та товщини (б) шару на сталі 38Х2МЮА від тривалості азотування при різних температурах [Ошибка!

Источник ссылки не найден.]

Вплив температури азотування на структуру азотованого шару наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Послідовність утворення фаз в поверхневому шарі та його будова в рівноважному стані після азотування при різних температур [Ошибка! **Источник ссылки не найден.]**

$t, ^\circ\text{C}$	Послідовність утворення фаз	Будова шару
400...590	$\alpha \rightarrow \alpha_N \rightarrow \gamma' \rightarrow \varepsilon$	$\varepsilon + \gamma' \rightarrow \gamma' \rightarrow \alpha_N + \gamma'_{\text{над}} \rightarrow \alpha$
590...680	$\alpha \rightarrow \alpha_N \rightarrow \gamma_N \rightarrow \gamma' \rightarrow \varepsilon$	$\varepsilon + \gamma' \rightarrow \gamma' \rightarrow \varepsilon \text{VT}(\alpha_N + \gamma') \rightarrow \alpha_N + \gamma'_{\text{над}} \rightarrow \alpha$
680...910	$\alpha \rightarrow \alpha_N \rightarrow \gamma_N \rightarrow \varepsilon$	$\varepsilon + \gamma' \rightarrow \varepsilon \text{VT}(\alpha_N + \gamma') \rightarrow \alpha_N + \gamma'_{\text{над}} \rightarrow \alpha$
≥ 910	$\gamma \rightarrow \gamma_N$	$\alpha + \gamma'$
Примітка: α_N – азотистий ферит; γ_N – азотистий аустеніт; при		

розпаді γ_N окрім евтектоїда утворюється надлишкові $\alpha_{N\text{над}}$ (в доевтектоїдній зоні) або $\gamma'_{\text{над}}$ (в заевтектоїдній зоні).

При азотуванні легованої сталі утворюються ті самі фази, що і заліза (табл. 4.1). Однак, легування змінює склад фаз і температурні границі їх утворення.

При температури азотування на легованому фериті нові фази можуть виникати не тільки шарами, а й утворювати багатозонні дифузійні шари. Легувальні елементи в процесі насичення азотом утворюють нітриди.

Легувальні елементи, розчинені у фериті, зменшують вміст азоту в ϵ -фазі порівняно з ϵ -фазою, отриманою на залізі. Товщина ϵ -фази зі збільшенням кількості легувальних елементів у фериті зменшується.

Післянітридної зони при азотуванні нижче евтектоїдної температури розташовується шар α -фази, що є основною частиною шару. Під час повільного охолодження з α -фази виділяються γ' -фаза (залізистий нітрид), а також нітриди легувальних елементів. Зі збільшенням легувальних елементів виділення залізистих нітридів загальмовується. Усі легувальні елементи більшою чи меншою мірою сприяють зменшенню коефіцієнта дифузії азоту в α -фазі і, отже, її глибини. Чим більше вміст легувальних елементів і триваліший процес, тим більше утворюється нітридів.

Структура шару формується не тільки при температури азотування, а й у процесі подальшого охолодження. При охолодженні відбувається розпад ϵ -, γ - і α -твердих розчинів (див. табл. 4.1).

Таким чином, властивості азотованого шару визначаються структурою, що сформувалася в процесі насичення сталі азотом і перетвореннями, що відбуваються у фериті під час охолодження.

Найбільша твердість азотованого шару відповідає температурам азотування, коли утворюються одношарові (за азотом) нітриди, повністю когерентні з α -фазою. Такі сегрегації мають більшу щільність в об'ємі твердого розчину, що і зумовлює високу твердість шару.

Мікроструктура сталі 38X2МЮА після азотування наведена на рисунку 4.2.

Дифузійний шар сталі типу 38Х2МЮА після азотування при температурах нижче евтектоїдної складається з дуже тонкої зони ϵ -фази, нижче якої розташовується зона γ' -фази та дифузійного підшару, що складається з α - і γ' -фаз, а також карбідів і нітридів типу M_2N та MN . За звичайних умов азотування нітрид алюмінію з гексагональною ґраткою не утворюється і твердість дифузійної зони (зони внутрішнього азотування) обумовлена лише утворенням нітридів CrN та Mo_2N .

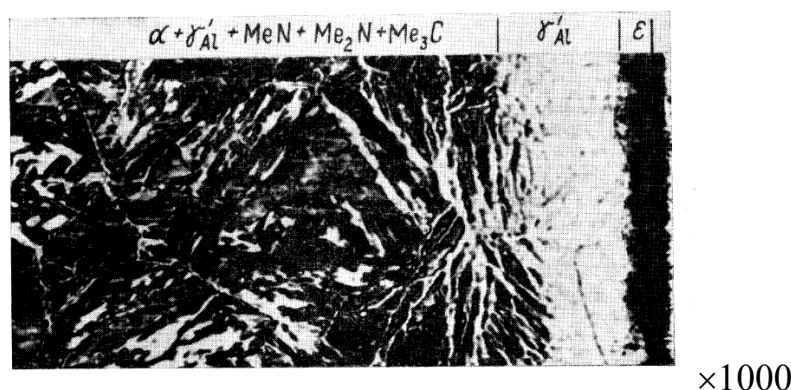


Рисунок 4.2 – Мікроструктура азотованого шару сталі 38Х2МЮА [6]

Проте алюміній різко підвищує твердість поверхневої зони, максимальна твердість при цьому спостерігається не на поверхні, а на певній глибині в зоні γ' -фази. Висока твердість поверхні обумовлена перерозподілом алюмінію в поверхневих шарах в процесі азотування та утворення легованої алюмінієм γ' -фази. Яка поширюється вглиб за межами зерен (блоків) та площинами ковзання.

4.1 Основне та додаткове обладнання для термічної обробки

Нагрівання під гартування ($940 \pm 10^\circ C$) здійснюється в печі СНЗ-5.10.3,2/10: ширина печі 0,5 м; ширина 1,0 м; висота 0,32 м; максимальна температура $1000^\circ C$ [13]. Середовище нагріву захисне (ендогаз), для запобігання окисленню і знеуглецюванню. Охолодження в маслі.

Високотемпературний відпуск ($620\pm 10^{\circ}\text{C}$) здійснюється в печі СНЗ-5.10.3,2/7 із захисною атмосферою[13]. Охолодження з температури відпуску на повітрі. Максимальна температура в печі 700°C .

Азотування ($530\pm 10^{\circ}\text{C}$) проводять в печі СНА-10.32.13/6М(ширина 1,0 м, довжина 3,2 м; висота 1,3 м, максимальна температура 600°C)[**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Середовище - аміак. Охолодження до 200°C з піччю в середовищі аміаку далі на повітрі.

Додаткові операції та обладнання для забезпечення технологічного процесу термічної обробки[13]

- підготовка деталі до термічної обробки: очищення від бруду, мастил та емульсії (після механічної обробки): промивання у воді в спеціальній ванні з електронагріванням при температурі $80\dots 90^{\circ}\text{C}$, впродовж $30\dots 60$ хв;

- промивка після гартування і відпуску (охолоджувальне середовище - масло): у залізному баку, який розташовується поруч із гартівним баком, розчин у ньому підігрівається парою. Використовується гарячий ($80\dots 90^{\circ}\text{C}$) 10% водний розчин Na_2CO_3 ;

- обладнання для створення захисної атмосфери – газові генератори;

- обладнання для охолодження масла в гартівному баку;

- обладнання для механізації операцій термічної обробки: кран-балка, візки, монорейки, садки;

- обладнання для контролю якості: мікроскоп, твердомір;

- інструмент для контролю розмірів деталі: штангенциркуль, лінійка.

4.2 Розрахунок часу нагріву та витримки

При розрахунку часу обробки необхідно враховувати, що вироби в нагрівальні пристрої завантажуються садками (в пристроях періодичної

дії). Розрахунок садки та часу на термічну обробку показано на прикладі зубчастого колеса

Визначимо за формулою 4.2 кількість виробів, яку можна розташувати по ширині робочого простору печі СНЗ-5.10.3,2/10:

$$n_{ш} = \frac{B - (2 \cdot \delta)}{b + b}, \text{ шт} \quad (4.2)$$

де B – ширина робочого простору печі, мм, $B = 500$ мм;

δ – мінімальна відстань від внутрішніх стінок печі, мм, $\delta = 5$ мм;

b – ширина виробу, в нашому випадку діаметр, мм, $d = 80$ мм.

Кількість виробів в ширину за формулою 4.2:

$$n_{ш} = \frac{500 - 2 \cdot 5}{80 + 80} = 3,06 \approx 3 \text{ шт}$$

Визначимо за формулою 4.3 кількість виробів яку можна розташувати по довжині робочого простору СНЗ-5.10.3,2/10:

$$n_{д} = \frac{L - (2 \cdot \delta)}{l + l}, \text{ шт} \quad (4.3)$$

де L – довжина робочого простору печі, мм, $L = 1000$ мм;

δ – мінімальна відстань від внутрішніх стінок печі, мм, $\delta = 5$ мм;

l – довжина виробу, в нашому випадку діаметр, мм, $d = 80$ мм.

Кількість виробів по ширині за формулою 4.3:

$$n_{д} = \frac{1000 - 2 \cdot 5}{80 + 80} = 6,18 \approx 6 \text{ шт}$$

Отже, в одному ярусі можна розташувати $n_{\text{яр}}=n_{\text{ш}} \times n_{\text{д}}=3 \times 6=18$ шт виробів.

Визначимо за формулою 4.4 кількість виробів, яку можна розташувати по висоті робочого простору печі СНЗ-5.10.3,2/10:

$$n_{\text{в}} = \frac{H - (2 \cdot \delta)}{h + h}, \text{ шт} \quad (4.4)$$

де H – висота робочого простору, мм, $H=300$ мм;

δ – мінімальна відстань від внутрішніх стінок печі, мм, $\delta = 5$ мм;

h – висота виробу, мм, $h=5$ мм.

Кількість виробів по висоті за формулою 4.4:

$$n_{\text{в}} = \frac{300 - (2 \cdot 5)}{5 + 5} = 29 \text{ шт}$$

Тобто, кількість виробів печі становитиме: $N=n_{\text{яр}} \times n_{\text{в}}=18 \times 29=522$ шт.

Маса садки розраховується по формулі 4.5 [11]:

$$M_{\text{с}}=N \times m, \text{ кг} \quad (4.5)$$

де m – маса одного виробу, $m=0,105$ кг.

N – кількість виробів в садці, шт.

Тобто, маса садки, розрахована по формулі 4.5, становитиме:

$$M_{\text{с}}=522 \times 0,105 = 54,81 \text{ кг.}$$

Час нагріву розраховується за формулою 4.6 [11]:

$$\tau_{\text{н}} = S \cdot k \cdot f \cdot L_{\text{л}}, \text{ хв} \quad (4.6)$$

де S – характеристичний розмір виробу, мм ($80/2 = 40$ мм);

k – коефіцієнт форми (додаток А, [11]);

f – коефіцієнт розташування виробів у нагрівальному пристрої, що впливає на час нагрівання (додаток Б, [11]);

L – коефіцієнт легування сталі, хв/мм(додаток В, [11]).

Час нагрівання до температури гартування розрахований за формулою 4.6:

$$\tau_H = 40 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0,96 = 76,8 \text{ хв}$$

Час витримки при гартуванні становить 1,5 хв на 1 мм товщини виробу[11]:

$$\tau_B = 40 \cdot 1,5 = 60 \text{ хв.}$$

Час завантаження – вивантаження приймаємо 10 хв[11].

Загальна тривалість перебування виробів в печі при гартуванні розрахована по формулі 4.1:

$$\tau_{\text{заг}} = 76,8 + 60 + 10 = 146,8 \text{ хв} = 2,48 \text{ год}$$

Час охолодження визначається за формулою 4.7 [11]:

$$\tau_{\text{ох}} = (t_H - t_K) / v_{\text{ох}}, \text{с} \quad (4.7)$$

де t_H – температура, від якої починається охолодження виробів;

t_K – кінцева температура охолодження;

$v_{\text{ох}}$ – задана для матеріалу виробів швидкість охолодження, °С/с.

Час охолодження з температури гартування розрахований за формулою 4.7:

$$\tau_{\text{ох}} = (940 - 20) / 50 = 18,4 \text{ с}$$

Час нагрівання до температури відпускання становить розрахований за формулою 4.6:

$$\tau_n = 40 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 2,15 = 172 \text{ хв}$$

Час витримки при температурі відпускання становить 10 хв + 1,5 хв на 1 мм товщини[11]: $\tau_b = 10 + 40 \cdot 1,5 = 70 \text{ хв}$.

Час завантаження – вивантаження приймаємо 10 хв[11].

Загальна тривалість перебування виробів в печі при відпусканні розрахована за формулою 4.1:

$$\tau_{\text{заг}} = 172 + 70 + 10 = 252 \text{ хв} = 4,2 \text{ год}$$

Азотування проводиться в печі СНА-10.32.13/6М.

Визначимо кількість виробів, яку можна розташувати по ширині робочого простору печі СНА-10.32.13/6М по формулі 4.2:

$$n_{\text{ш}} = \frac{1000 - 2 \times 5}{80 + 80} = 6,18 \approx 6 \text{ шт.}$$

Визначимо кількість виробів, яку можна розташувати по довжині робочого простору печі СНА-10.32.13/6М по формулі 4.3:

$$n_{\text{д}} = \frac{3200 - 2 \times 5}{80 + 80} = 24,5 \approx 24 \text{ шт.}$$

Отже, в одному ярусі можна розташувати таку кількість виробів: $n_{\text{яп}} = n_{\text{ш}} \times n_{\text{д}} = 24 \times 6 = 144 \text{ шт}$

Визначимо кількість виробів, яку виробів можна розташувати по висоті робочого простору печі по формулі 4.4:

$$n_{\text{в}} = \frac{1300 - (2 \times 5)}{5 + 5} = 129 \text{ шт}$$

Тобто, кількість виробів в печі становитиме: $N = n_{\text{яр}} \times n_{\text{в}} = 18576$ шт.

Маса садки згідно формулі 4.5 буде дорівнювати 1950,48 кг.

Час нагрівання до температури азотування за формулою 4.6 становить:

$$\tau_{\text{н}} = 40 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 2,15 = 172 \text{ хв (2,9 год)}$$

Час витримки при азотуванні для одержання шару 0,4...0,5 мм за довідковими даними становить 40 годин [12]. Час завантаження та вивантаження приймаємо 10 хв (0,17 год).

Час охолодження згідно формулі 4.7:

$$\tau_{\text{ох}} = (530 - 200) / 50 = 6,6 \text{ год}$$

Таким чином, повний цикл процесу, розрахований за формулою 4.1:

$$\tau_{\text{заг}} = 2,9 + 40 + 6,6 + 0,17 = 50,07 \text{ год}$$

Технологічна карта термічної обробки зубчастого колеса із сталі 38ХМЮА представлена в табл. 4.2, графік термічної обробки наведено на рис. 4.3

Таблиця 4.2 – Карта технологічного процесу термічної обробки зубчастого колеса із сталі 38Х2МЮА

Ескіз виробу		Технічні вимоги				
Див. рис.1.1		Матеріал 38Х2МЮА			Твердість серцев. 285...321 НВ Твердість азотованого шару 950...1000НV Глибина шару 0,4...0,5 мм	Мікроструктура: серцевина – сорбіт відпуску; поверхня - $\epsilon + \gamma' + (\alpha + \gamma' + \text{нітриди})$
№	Найменування операції	Обладнання	Режим нагрівання: температура, °С, тривалість середа	Режим охолодження: температура °С, тривалість середовище,	Найменування пристроїв, кількість пристроїв, кількість деталей на пристрої	Контроль
1	2	3	4	5	6	7
1	Вхідний контроль	Стилоскоп мікроскоп, твердомер ТШ-2 лінійка.				Хім. склад хутра. властивості, наявність поверхневих дефектів, структура
2	Гартування					
2.1	Нагрівання	СНЗ-5.10.3,2/10	$t_n = 940 \pm 10^\circ\text{C}$, $\tau_n = 76,8 \text{ хв}$, ендогаз		Піддон 522 шт	Контроль температури, час, середовище
2.2	Витримка		$t_b = 940 \pm 10^\circ\text{C}$, $\tau_b = 60 \text{ хв}$, ендогаз		Піддон 522 шт	

Кінець таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6	7
2.3	Охолодження	Гартівний бак ЗБК-400		Масло И-20А $\tau_{\text{охл}}=18,8\text{с}$		температура масла, циркуляція
3	Промивання	Мийна машина ММК-400		4...6% розчин Na_2CO_3		
4	Контроль	Твердомір ТК-2				НRC 1 шт від партії
5	Відпуск					
5.1	Нагрівання	СНЗ-5.10.3,2/7	$t_{\text{н}}=620\pm 10^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{н}}= 172\text{хв}$,ендогаз		Піддон 522 шт	Контроль температури, час, середовище
5.2	Витримка		$t_{\text{в}}=620\pm 10^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{в}} = 70\text{хв}$,ендогаз		Піддон 522 шт	
5.3	Охолодження			масло $\tau_{\text{охл}}=2,06$ мин		
6	Контроль	Твердомір ТК-2			Столик	100%
7	Азотування					
7.1	Нагрівання	СНА- 10.32.13/6М	$t_{\text{н}}=530\pm 10^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{н}}=172$ хв	25...35% дисоційований аміак	Піддон 18576шт	Контроль температури, час
7.2	Витримка		$t_{\text{в}}=530\pm 10^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{в}} =40$ год,		Піддон 18576шт	
7.3	Охолодження		$\tau_{\text{ох}} = 396$ хв	Із піччю до 200°C		
8	Контроль	Твердомір ТК-2			Столик	100%

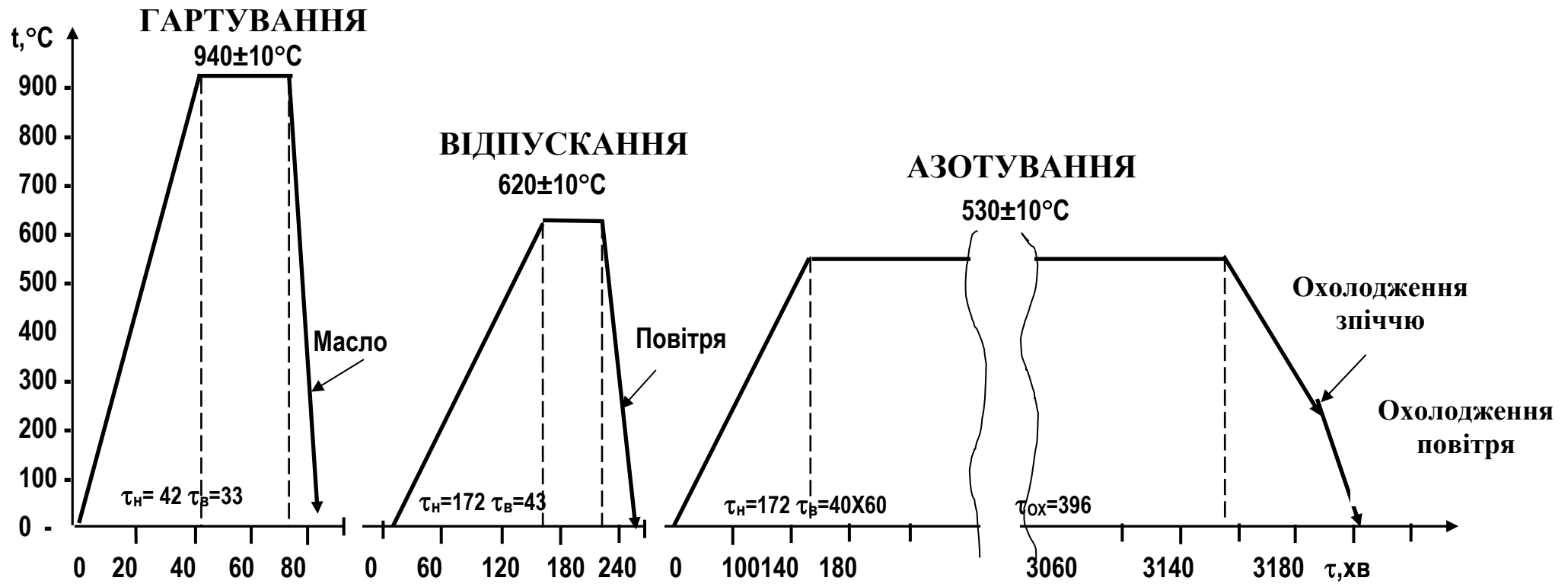


Рисунок 4.3 – Графік термічної обробки фланця зі сталі 38ХМЮА

5 ТЕХНІЧНИЙ КОНТРОЛЬ, ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТА ВИПРАВЛЕННЯ БРАКУ

Якість продукції формується у процесі всього циклу виробництва та у зв'язку з цим виникає потреба у управлінні якістю.

Технічний контроль – перевірка відповідності процесів, від яких залежить якість продукції, та їхніх результатів встановленим технічним вимогам[14].

Технічний контроль включає в себе роботи на всіх стадіях виробництва: контроль якості вихідних матеріалів, контроль технологічних процесів термічної обробки, контроль продукції термічного цеху.

Вихідні матеріали піддаються контролю на хімічний склад, макро- і мікроструктуру.

Хімічний склад перевіряється хімічним і спектральним аналізами, тобто методами, що дають кількісну і якісну оцінку хімічного складу.

Мікроаналіз застосовують для виявлення неметалевих включень, тріщин, раковин тощо. Крім того, мікроаналіз дає змогу визначити мікроструктуру сталі. Проводиться цей вид аналізу за допомогою металографічних мікроскопів.

Контроль якості вихідних матеріалів здійснюється в центральній заводській лабораторії (ЦЗЛ).

Найчастіше контроль якості після термічної обробки здійснюють виміром твердості на твердомірах Роквелла.

У термічному цеху (крім контрольних операцій) здійснюється контроль за правильним виконанням технологічних процесів. Контроль технологічного процесу складається насамперед із перевірки дотримання технологічних карт: чи в тій печі проводиться нагрів, чи правильно сформована садка, яка температура гартівної рідини і так далі.

Технологічний контроль контролює температуру печі, атмосферу печі, глибину загартованого шару, справність пристосувань тощо. Найважливішим елементом контролю будь-якого технологічного процесу термічної обробки є контроль температури. На цей вид контролю слід звертати особливу увагу,

тому що основна кількість браку під час термічної обробки залежить від недотримання температурного режиму. Контроль за температурою в печах може здійснюватися за допомогою термометрів і термопар (контактний спосіб), оптичних і радіаційних пірометрів (безконтактний спосіб), електронних потенціометрів, фотопірометрів тощо. Контроль температури повинен забезпечити суворе дотримання режимів термообробки виробів. Для щоденної перевірки робочих приладів використовують платино-платинородієві термопари або хромель-алюмелеві термопари. Водночас здійснюється контроль за часом нагрівання і витримкою інструменту в процесі роботи. Витримка під час остаточного нагрівання під гартування встановлюється за реле часу, на інших позиціях витримка дотримується автоматично за заданою програмою.

Контроль атмосфери печі здійснюється постійно за допомогою газоаналізаторів.

Контроль якості термічної обробки деталей, виявлення внутрішніх і зовнішніх дефектів металу здійснюється за допомогою магнітного, люмінісцентного, рентгенівського, ультразвукового фізичних методів неруйнівного контролю. Магнітний метод використовують для визначення структури і твердості деталі після обробки. Для виявлення дефектів, що виходять на поверхню (тріщин, пор) використовують люмінісцентний метод. Ультразвуковий метод дає змогу виявляти дефекти в виробах та напівфабрикатах великих перерізів. Рентгенодефектоскопія застосовується для виявлення тріщин, раковин, пор та інших внутрішніх дефектів у кованих і зварних інструментах.

Кожна термічно оброблена деталь піддається контролю за зовнішнім виглядом.

Контроль якості термічної обробки поділяють на операційний і остаточний. Операційний контроль здійснюють під час підготовки до роботи і в процесі виконання різних операцій. Його метою є періодична вибіркова перевірка правильності проведення технологічних процесів (температура, величина аустенітного зерна, активність атмосфери, що знеуглецьовує, тощо) і якості термічної обробки (твердість, мікроструктура, зміна розмірів та тощо).

Операційний контроль технологічних процесів здійснюють технологи і контролери термічних цехів із залученням пірометричної і металографічної лабораторій. Остаточний контроль якості здійснюється після завершення всього технологічного циклу термічної обробки і допоміжних операцій; його виконують контролери відділу технічного контролю. Види дефектів, які можуть виникати при термічній обробці виробів, що піддаються поліпшенню з подальшим азотуванням наведені в табл.5.1.

Таблиця 5.1 – Види дефектів виробів із азотованих сталей при проведенні ТО та їх усунення

Вид дефекту	Причини виникнення	Заходи із запобігання	Заходи із усунення
1	2	3	4
Гартування			
Велике зерно	1) Підвищена температура гарту; 2) Підвищений час витримки	Контроль та регулювання температури, дотримання технологічного часу	Відпал та повторне проведення ТО
Короблення, тріщини	Швидке охолодження	Дотримання оптимальної швидкості охолодження при гартуванні	Невиправний
Перепал	Підвищена температура гарту;	Контроль та регулювання температури, дотримання технологічного часу	Невиправний

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4
Неоднорідна структура	Недостатній рівень гомогенізації твердого розчину при нагріванні під гартування, занижена температура гартування або час витримки	Дотримання оптимальної температури та витримки при гартуванні	Проведення повторної ТО з раціональної технології
Занижена твердість	Швидкість охолодження менша за критичну	Контроль швидкості охолодження	Проведення повторної ТО
Відпускання			
Занижені характеристики міцності	Підвищена температура відпускання Підвищений час витримки	Контроль та регулювання температури, дотримання технологічного часу	Проведення повторної ТО за раціональною технологією
Висока твердість	Занижена температура	Контроль та регулювання температури	Проведення повторної ТО
Азотування			
Знижена поверхнева твердість при нормальній товщині азотованого шару	Підвищена температура процесу, високий ступінь дисоціації аміаку, перерва у подачі аміаку	Дотримання технологічного процесу	Проведення повторної ХТО

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4
Плямиста (нерівномірна) твердість азотованого шару	<p>Затіки олова на поверхню, що підлягає азотуванню</p> <p>Погане знежирення виробів. Неповне виконання процесу</p>	<p>Дотримання технологічного процесу</p> <p>Ретельне знежирення виробів</p> <p>Дотримання технологічного процесу</p>	<p>Після лудіння та зачистки границь покриття проводити фосфатування</p> <p>Проведення повторної ХТО</p>
Лущення та розтріскування азотованого шару	<p>Висока концентрація азоту в поверхневому</p> <p>Внутрішня напруга в азотованому шарі</p>	<p>Після закінчення заданого технологічного процесу додатково витримувати вироби в атмосфері аміаку для прискорення дифузії азоту в глиб виробу.</p> <p>Дотримання технологічного процесу</p>	<p>Видалення крихкого поверхневого шару, що має високу концентрацію азоту</p> <p>Виконання стабілізуючого відпускання</p>
Деформація азотованих виробів	Нерівномірне нагрівання азотованих виробів	Контроль та регулювання температури, дотримання технологічного часу	Перевірити розподіл температур у печі. Вжити заходів щодо ліквідації перепаду

			температур
--	--	--	------------

Кінець таблиці 5.1

1	2	3	4
	Наявність залишкових напружень у виробі механічної обробки, азотуванням після перед	Контроль регулювання температури, дотримання технологічного часу	та Виконання стабілізуючих відпусток для зняття напружень у виробі перед азотуванням

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

При проведенні процесів термічної та хіміко-термічної обробки необхідно передбачити міри захисту робітників від впливу небезпечних виробничих факторів. Працюючі повинні використовувати засоби індивідуального захисту. Всі робітники проходять інструктаж щодо техніки безпеки праці.

З метою контролю процесів підготування виробів до термічної обробки, контролю та регулювання параметрів термічної обробки металів (температури, тиску в робочому просторі печі, вмісту компонентів в газовому середовищі тощо) необхідно використовувати блокування, а також засоби світлової та звукової сигналізації при порушеннях технологічного процесу, що можуть призвести до виникнення аварійної ситуації. Нагріті в процесі термічної обробки вироби необхідно розміщувати в місцях, що обладнані ефективною витяжною вентиляцією або в спеціально обладнаних охолоджувальних приміщеннях чи устроях. Приміщення термічних цехів повинні бути оснащені вибухозахищеною витяжною вентиляцією, а також контрольно-вимірювальними приладами для контролю рівнів безпеки небезпечних та шкідливих факторів, що виникають при даному процесі.

При термічній обробці металів необхідно застосовувати пожежонебезпечні рідини та матеріали. При проведенні термічної або хіміко-термічної обробки необхідно дотримуватися правил щодо обслуговування печей, які працюють на газовому паливі та з електричним нагріванням: включені в роботу печі не можна залишати без нагляду; несправні печі експлуатувати забороняється.

В камерних печах на щитах і пультах керування електропечей повинна бути світлова сигналізація про подачу напруги на нагрівальні елементи і про роботу блокувальних пристроїв.

У печах з механізованим підйомом і опусканням дверцят або заслінок робочих вікон, або кришок повинна бути забезпечена можливість зупинки дверцят у будь-якому проміжному положенні, автоматична зупинка механізму підйому та опускання в кінцевих положеннях і виключена можливість падіння дверцят при відключенні механізму.

Завантаження, розвантаження, огляд, ремонт, очищення електропечей повинні здійснюватися при цілком знятій напрузі, щоб уникнути короткого замикання і враження електричним струмом.

Уся група електропечей повинна мати аварійний вимикач, який має відповідний напис і розміщений по змозі ближче до печей. Доступ до аварійного вимикача повинний бути завжди вільним.

Для захисту робітників від впливу небезпечних виробничих факторів, необхідно використовувати засоби індивідуального захисту, такі як захисні окуляри, респіратори, рукавички тощо.

Забезпечити наявність блокування та засобів світлової та звукової сигналізації для контролю та регулювання параметрів процесу азотування, таких як температура, тиск, час обробки тощо. Це допоможе уникнути виникнення аварійних ситуацій та забезпечити безпеку працівників.

Робочі місця, де проводиться азотування, повинні бути оснащені ефективною витяжною вентиляцією, яка забезпечує відведення небезпечних речовин та шкідливих випарів. Для контролю рівнів безпеки небезпечних факторів у приміщенні необхідно встановити контрольно-вимірювальні прилади.

При азотуванні необхідно дотримуватися правил щодо обслуговування печей та інших обладнань. Включені в роботу печі не можна залишати без нагляду, а несправні печі експлуатувати заборонено [12].

7 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

Азотування сталі полягає в тому, що метал піддають нагріванню у середовищі, що характеризується високим вмістом аміаку. В результаті такої обробки з поверхневим шаром металу, насиченого азотом, відбуваються наступні зміни:

- за рахунок того, що твердість поверхневого шару сталі підвищується, покращується зносостійкість деталі;
- збільшується витривалість виробу;
- поверхня виробу стає стійкою до корозії. Така стійкість зберігається при контакті сталі з водою, вологим повітрям і пароповітряним середовищем.

Газове азотування і іонне (плазмове) азотування – це два різних процеси, які застосовують для дифузійного насичення сталі азотом. Порівняння способів наведено в табл. 7.1

Таблиця 7.1– Порівняння методів азотування [Ошибка! Источник ссылки не найден., 14, 16, 18]

Параметр	Газове азотування	Іонне азотування
1	2	3
Середовище	При температурі азотування 500...600°C відбувається часткова дисоціація аміаку, внаслідок чого виділяється атомарний азот за реакцією: $2\text{NH}_3 \leftrightarrow \text{N} + 3/2\text{H}_2$ ↓ $\text{Fe}_\alpha(\text{N}) \rightarrow \gamma' \rightarrow \varepsilon.$	В розрядженому азотовмісному газовому середовищі між катодом (деталлями) і анодом виникає тліючий розряд, який утворює активне середовище та іонізація бомбардує поверхню катода нагрівають її до температури насичення (470...580°C), що забезпечує формування азотованого шару.

Продовження таблиці 7.1

1	2	3
Технологія проведення	Деталі розміщують в печі, де вони нагріваються до необхідної температури, а потім взаємодіють з азотом. Процес триває декілька годин.	Деталі поміщають у вакуумну камеру, де створюють високочастотний електричний розряд. Іони азоту утворюються в плазмі та взаємодіють з поверхнею деталі.
Обладнання	Піч для азотування, в якій відбувається контрольоване нагрівання та насичення азотом.	Вакуумна камера із джерелом високочастотної електричної енергії для утворення плазми.
Переваги	<ul style="list-style-type: none"> - менша кількість енергії порівняно - може бути застосовано до різних типів металів (сталі, алюміній та титан); - забезпечення більш однорідного шару на поверхні матеріалу - можливість контролювати глибину дифузії азоту в матеріал, що дозволяє досягти бажаної твердості та міцності;- не вимагає додаткової обробки поверхні для видалення залишкового шару. 	<ul style="list-style-type: none"> - зменшення тривалості обробки в 2...5 разів, як за рахунок зменшення часу нагрівання і охолодження садки, так і за рахунок зменшення часу ізотермічної витримки; - зниження крихкості зміцненого шару; - скорочення витрат робочих газів в 20...100 разів; - виключення операції депасивації; - зниження деформації настільки, що виключається фінішне шліфування; - простота і надійність екранного захисту від азотування

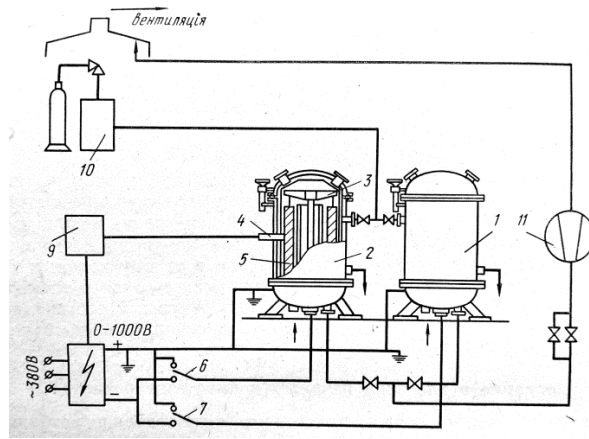
		поверхонь, що не підлягають зміцненню;
--	--	--

Кінець таблиці 7.1

1	2	3
Недоліки	<ul style="list-style-type: none"> - значна тривалість процесу - нерівномірність шару при обробці деталей із складними формами; - обмежена глибина дифузії; - може впливати на розмір та форму деталей через зміну габаритних розмірів після процесу; - потенційні проблеми з екологією та безпекою. 	<ul style="list-style-type: none"> - висока вартість обладнання; - обмежена універсальність (неможливість використання для деяких типів матеріалів); - вимоги до чистоти поверхні: вимагає високої чистоти поверхні матеріалу перед проведенням процесу; - проблеми з іонним бомбардуванням, що може призводити до виникнення мікротріщин на поверхні матеріалу; - складність керування процесом.

Іонне азотування проводять в атмосфері аміаку, азоту або в суміші водню та азоту, тиск атмосфери становить 133...665 Па, а робоча напруга 350...550 В. Азотування проводиться при зниженому тиску, що забезпечує стабільне горіння тліючого розряду. Тривалість процесу від декількох хвилин до 24 годин.

Процес іонного азотування проводять в дві стадії: очистка поверхні катодним розпиленням, що забезпечує активацію поверхні та руйнування оксидних плівок; нагрів поверхні до температури дифузії та насичення її азотом. Установка для іонного азотування складається з робочої вакуумної камери, в якій розміщують деталі (катод), вакуумної системи, установки для приготування газу, блоків керування та управління (рис.7.1).



- 1, 2 – нагрівальні камери; 3 підвіска з деталями; 4 – термопара;
 5 – деталі; 6, 7 – роз’єднувач; 8 – теристорне джерело живлення;
 9 – блок вимірювання та керування температури;
 10 – установка для приготування газу; 11 – вакуумний насос

Рисунок 7.1 – Схема електропечі ОКБ-1566 для іонного азотування [14]

Технологічний процес іонного азотування складається з наступних операцій [14]:

- знежирення деталей;
- установка деталей на пристосування, яке також одночасно використовують для місцевого захисту поверхні, що не підлягає азотуванню;
- очищення поверхні катодним розпиленням впродовж 15...40хв при напрузі 800...1000В. При нагріві до 300...400°C тиск становить 133Па для малої садки та 13,3Па для великої садки;
- нагрів до заданої температури азотування та витримка для отримання необхідної товщини шару. При цьому підтримується тиск 400...650Па та робоча напруга 350...550В. Охолодження деталей в камері печі до 150...200°C впродовж 1...2 години, тиск в камері – 13...65Па.

7.1 Розрахунок кількості печей для газового та іонного азотування

В розділі 4 вказано, що газове азотування проводиться в печі СНА-10.32.13/6М, кількість виробів в печі становить 18576 шт, а маса садки – 1950,48 кг. Загальний час азотування: $\tau_{\text{заг}} = 50,07$ год.

Тривалість іонного азотування складається з наступних складових: катодне очищення ($\tau_{\text{оч}}$) – 40 хв (0,7 год); нагрів та витримка при заданій температурі ($\tau_{\text{в}}$) – 26 годин [14]; охолодження ($\tau_{\text{ох}}$) – 2 години; технологічний час – 10 хв (0,17 год). Тобто, загальний час іонного азотування розрахований за формулою 4.1 становитиме:

$$\tau_{\text{заг}} = \tau_{\text{оч}} + \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{ох}} + 0,2 = 0,7 + 26 + 2 + 0,17 = 28,87 \text{ год.}$$

Кількість виробів для іонного азотування в печі ОКБ-1566, що має дві нагрівальні камери $D = 960$ мм та $H = 1200$ мм [14]. Для розрахунку кількості печі в ярусі використовується формула 7.1 [19]:

$$D_i = D_{i-1} + 2(d_{\text{з.к.}} + z_7), \text{ м} \quad (7.1)$$

де D – діаметр внутрішнього простору печі, м;

$d_{\text{з.к.}}$ – діаметр зубчастого колеса, м, $d_{\text{з.к.}} = 0,08$ м;

z_7 – зазор між деталями, м ($z_7 = 0,5d_{\text{з.к.}} = 0,04$ м).

Тоді, згідно формулі 7.1:

$$D_0 = 0 + 2(0,08 + 0,04) = 0,24 \text{ м;}$$

$$D_1 = 0,24 + 0,24 = 0,48 \text{ м;}$$

$$D_2 = 0,48 + 0,24 = 0,72 \text{ м;}$$

$$D_3 = 0,72 + 0,24 = 0,96 \text{ м.}$$

Оскільки D_3 дорівнює діаметру робочого простору кількість концентраційних кіл приймається рівною 2.

Розрахунок кількості виробів в ярусі проводиться за формулою 7.2 [19]:

$$n_i = (\pi D_i) / 0,06, \text{ шт} \quad (7.2)$$

де D – діаметр внутрішнього простору печі, м (формула 7.1).

Тоді, згідно формулі 7.2:

$$n_0 = (\pi 0,24) / 0,06 = 12,56 \text{ шт (приймається 12);}$$

$$n_1 = (\pi 0,48) / 0,06 = 25,12 \text{ шт (приймається 25);}$$

$$n_2 = (\pi 0,72) / 0,06 = 37,68 \text{ шт (приймається 37).}$$

Таким чином, кількість виробів в ярусі становить 74 шт (12 + 25 + 37).

Розрахунок кількості виробів по висоті здійснюється за формулою 4.4:

$$n_B = \frac{1200 - (2 \times 10)}{10 + 10} = 59 \text{ шт}$$

Тому загальна кількість виробів у садці $N = 59 \times 74 = 4366$ шт.

Маса садки (M_c) 458,43 кг. Враховуючи, що піч має дві камери, то 916,86 кг.

В таблиці 7.2 порівнюється кількість садок та час нагріву на газове та іонне азотування на прикладі зубчастого колеса розміром: $d = 80$ мм, $h = 5$ мм.

Таблиця 7.2 – Кількість садок та час роботи печей при газовому та іонному азотуванні

Виріб	Матеріал	Річна програма, т	Маса 1 шт, кг	Вместимость садки П _с , кг		Кількість садок нарік, кг, М _с		Час нагріву однієї садки, год		Час роботи печі, год	
				СНА-10.32.13/6М	ОКБ-1566	СНА-10.32.13/6М	ОКБ-1566	СНА-10.32.13/6М	ОКБ-1566	СНА-10.32.13/6М	ОКБ-1566
Зубчасте колесо	38X2МЮА	400	0,105	1950,48	916,86	205,07	436,27	50,07	28,87	10267,9	12595,1

Розрахункова кількість печей для проведення азотування визначається за формулою 7.3 [20]:

$$n_p = \frac{T_{\text{заг}}}{\Phi_e}, \text{ шт} \quad (7.3)$$

де $T_{\text{заг}}$ – час роботи печі, год (табл.7.2);

Φ_e – ефективний час роботи обладнання, год, $\Phi_e = 5840$ год (табл.1.2, [20]).

Кількість печей СНА-10.32.13/6М для газового азотування розраховане за формулою 7.3:

шт (приймається 2 печі),

Кількість печей ОКБ-1566 для іонного азотування розраховане за формулою 7.3:

шт (приймається 3 печі).

Таким чином, на прикладі розрахунку кількості печей для азотування показано, що при крупносерійному виробництві може знадобитись більша кількість печей для іонного азотування, ніж для газового.

Економічне обґрунтування вибору між іонним та газовим азотуванням включає оцінку різних факторів, таких як вартість обладнання, витрати на енергію, трудові витрати, якість покриття та термін служби виробів.

Іонне азотування, хоча потребує більш складного обладнання та вимагає високої енергії для генерації плазми, має кращу якість покриття, більш однорідну та контрольовану глибину азотування та менший тепловий вплив на деталі. Це робить іонне азотування більш привабливим для виробництва високоякісних виробів, які вимагають високої точності та стійкості.

Газове азотування, з іншого боку, є більш економічним варіантом, оскільки воно потребує меншої енергії та менш складного обладнання, а також має меншу вартість процесу в цілому. Проте, покриття може бути менш однорідним, а глибина азотування може варіюватися, що робить його менш привабливим для виробництва високоякісних виробів.

Отже, розглянувши основні параметри обох методів азотування та зваживши переваги та недоліки можна узагальнити, що виробництво масових виробів може бути більш економічно вигідним з використанням газового азотування, оскільки він може бути більш швидким і ефективним процесом, ніж іонне азотування.

ВИСНОВКИ

В роботі проаналізовано умови експлуатації зубчастих колес на основі яких висунуті вимоги до матеріалів. Пояснено, чому для виготовлення зубчастого колеса рекомендована сталь марки 38X2МЮА.

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 38X2МЮА, 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 (азотування) на властивості матеріалу, показано діаграму стану Fe-N та зазначені фази, які виділяються при азотуванні сталі 38X2МЮА.

В четвертому розділі наведене обґрунтування режимів термічної обробки, зроблені розрахунки маси садки, тривалості кожного етапу процесу термічної обробки. Було запропоновано обладнання для термічного та хіміко-термічного обробки. На основі чого була складена технологічна картата графік термічної обробки зубчастих колес зі сталі 38X2МЮА.

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.

В цьому розділі основі якісного та розрахункового порівняння двох можливих методів азотування газового та іонного було зазначено доцільність проведення саме газового, як більш економічно вигідного.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Ляшенко Б.
 А.Основные направления развития поверхностного упрочнения зубчатых колес.
 [Текст] / 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 [Текст] / 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 [Текст] / T.V Rajan C. P. Sharma // PHI Learning Pvt. Ltd – 2011 – 611p.
4. Шелковой А.
 Обеспечение эксплуатационных свойств закаленных зубчатых колес. [Текст]/ А. Н.Шелковой, А. А Клочко, М. И Гасанов // Вісник сучасних технологій-2017- № 4- С 61-70.
5. Руденко С.
 Протiwление контактной усталости крупномодульных зубчатых колес из хромо никелевых сталей [Текст] / С. П. Руденко, А. Л П. Валько, С. А. Шишко, П. Г Карпович // Механика машин, механизмов и материалов– 2019 - №1 – С. 58-63.
6. George E. Totten. Steel Heat Treatment -Metallurgy And Technologies [Текст]/ George E. Totten //CRC Press - 2006.- 1077 p.
7. Davis J. R. . ASM Speciality Handbook Stainless Steels (Asm Specialty Handbook) [Текст] /J. R. Davis // ASM International–1995 – 600 p.

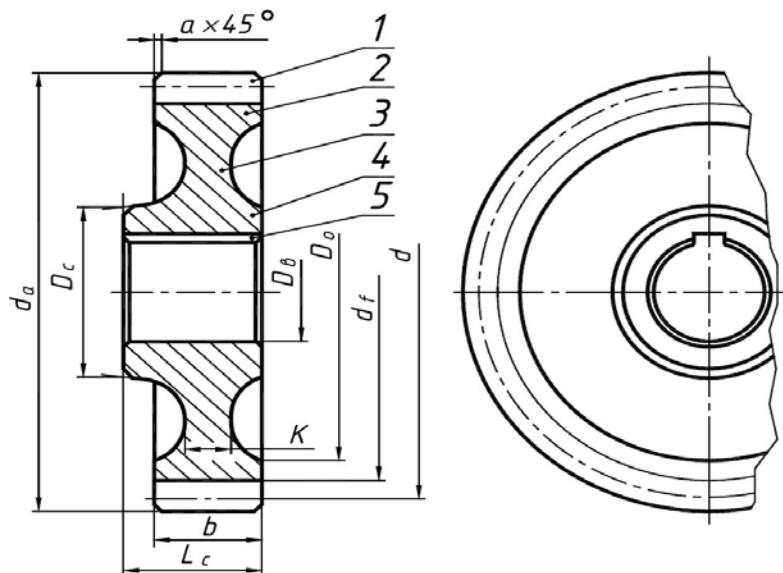
8. Budinski K. G. Properties and Selection.Engineering Materials. Englewood Cliffs[Текст]/ К. G.Budinski,М. К. Budinski // New Jersey: Prentice-Hall – 1992 – 817 p.
9. Основифізико-технічних та хіміко-термічних процесів для підвищення ресурсу виробівмашинобудування. Навчальний посібник[Текст]/ Уклад. С.П. Гожій // Київ: КПІм. ІгоряСікорського, 2022. – 104 с.
10. Massalski T. B. Phase diagrams in materials science[Текст] / T. BMassalski // 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. [Текст]/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 [Текст]: 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[Текст] /П. ОКиричок., В. ГОлійник., Т. Ю.Киричок // К.: Преса України– 2004 – 240 с.
14. Greenberg J. H.Industrial Thermal Processing Equipment Handbook[Текст]/ J. H. Greenberg //Asm International.1994 - 400 p.
15. Dossett J.L, Totten E.G. Salt Bath Heat Treatment and Equipment[Текст]/ J. L. Dossett, G.E.Totten// ASM International – 2014 – 412p.
16. Czerwinski F. Heat treatment: Conventional and novel Applications[Текст]/FCzerwinski // VoD–Books on Demand – 2012 – 46 p.
17. Муравьев, Д. В.. Анализ способов химико-термической обработки при упрочнении зубчатых колес[Текст] / Д.В. Муравьев // Инновационные проекты и технологии машиностроительных производстве - 2019 - №7- С. 20-27.

18. Китаев Н. И. Исследование прочностных характеристик азотированного зубчатого колеса[Текст] / 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 [Текст] / 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 [Текст] /Укл.: І.М. Лазечний, О.А. Глотка, Ю.І. Кононенко, Г.Г. Трикоз, О.В. Лисиця. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 104 с

**ДОДАТОК А ЕСКІЗ ЗУБЧАСТОГО КОЛЕСА, НОМЕНКЛАТУРА,
ХІМІЧНИЙ СКЛАД ТА ВЛАСТИВОСТІ**



1—зубчастий вінець;2—обід;3—диск;4—колонка;5—шпоночний паз;.

Рисунок А.1 – Ескіз зубчастого колеса

Таблиця А.1 – Хімічний склад сталі 38Х2МЮА, % мас (ДСТУ 7806:2015)

Марка сталі	С	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Al
				не більше					
38Х2МЮА	0,35	0,20	0,30	0,025	0,025	1,35	≤0,3	0,15	0,70... 1,10
			
	0,42	0,45	0,60			1,65		0,25	

Таблиця А.2 – Механічні властивості сталі 38Х2МЮА

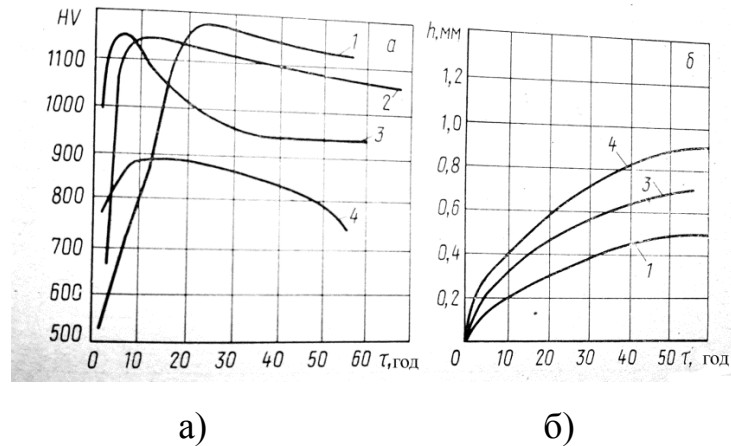
Марка сталі	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	КCu, Дж/см ²	НВ
38Х2МЮА	780...1030	590...880	10...18	45...52	59	250...300
Примітка. Термічна обробка сталі гартування 930...950°С, масло або						

вода та високотемпературний відпуск, 640...680°C, повітря.
--

Таблиця А.2 – 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
1	Зубчасте колесо	38Х2МЮА	0,105	-	-	5	80	Серцевина 285...321 НВПоверхня 950...1000HV
2	Зубчасте колесо	38Х2МЮА	0,120			6	95	Серцевина 285...321 НВПоверхня 950...1000HV
3	Зубчасте колесо	38Х2МЮА	0,135			6	110	Серцевина 285...321 НВПоверхня 950...1000HV
4	Зубчасте колесо	38Х2МЮА	0,240			10	200	Серцевина 285...321 НВПоверхня 950...1000HV

ДОДАТОК Б ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ АЗОТУВАННЯ НА СТРУКТУРУ, ТВЕРДІСТЬ ТА ГЛИБИНУ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ



а – залежність твердості від температури;

б – залежність товщини від часу азотування;

1 – 500°C; 2 – 525°C; 3 – 550°C; 4 – 600°C

Рисунок Б.1 – Залежність твердості HV (а) та товщини (б) шару на сталі 38Х2МЮА від тривалості азотування при різних температурах [Ошибка!

Источник ссылки не найден.]

Таблица Б.1 – Послідовність утворення фаз в поверхневому шарі та його будова в рівноважному стані після азотування при різних температур [Ошибка!

Источник ссылки не найден.]

$t, ^\circ\text{C}$	Послідовність утворення фаз	Будова шару
400...590	$\alpha \rightarrow \alpha_N \rightarrow \gamma' \rightarrow \varepsilon$	$\varepsilon + \gamma' \rightarrow \gamma' \rightarrow \alpha_N + \gamma'_{\text{над}} \rightarrow \alpha$
590...680	$\alpha \rightarrow \alpha_N \rightarrow \gamma_N \rightarrow \gamma' \rightarrow \varepsilon$	$\varepsilon + \gamma' \rightarrow \gamma' \rightarrow \varepsilon \text{VT}(\alpha_N + \gamma') \rightarrow \alpha_N + \gamma'_{\text{над}} \rightarrow \alpha$
680...910	$\alpha \rightarrow \alpha_N \rightarrow \gamma_N \rightarrow \varepsilon$	$\varepsilon + \gamma' \rightarrow \varepsilon \text{VT}(\alpha_N + \gamma') \rightarrow \alpha_N + \gamma'_{\text{над}} \rightarrow \alpha$
≥ 910	$\gamma \rightarrow \gamma_N$	$\alpha + \gamma'$



ДОДАТОК В ГРАФІК ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗУБЧАСТОГО КОЛЕСА

Таблиця В.1 – Карта технологічного процесу термічної обробки зубчастого колеса із сталі 38Х2МЮА

Ескіз виробу			Технічні вимоги			
Див. рис.1.1			Матеріал 38Х2МЮА		Твердість серцев. 285...321 НВ Твердість азот.шару 950...1000 НВ Глибина шару 0,4...0,5 мм	Мікроструктура: серцевина – сорбіт відпуску; поверхня – $\epsilon + \gamma' + (\alpha + \gamma' + \text{нітриди})$
№	Найменування операції	Обладнання	Режим нагрівання: температура, °С, тривалість середи	Режим охолодження: температура °С, тривалість середовище,	Найменування пристроїв, кількість пристроїв, кількість деталей на пристрої	Контроль
1	2	3	4	5	6	7
1	Вхідний контроль	Стилоскоп мікроскоп, твердомер ТШ-2 лінійка.				Хім. склад хутра. Вл-тінаявність поверхневих дефектів, структура
2	Гартування					
2.1	Нагрівання	СНЗ-5.10.3,2/10	$t_n = 940 \pm 10^\circ\text{C}$, $\tau_n = 76,8 \text{ хв}$, ендогаз		Піддон 522 шт	Контроль температури, час, середовище
2.2	Витримка		$t_b = 940 \pm 10^\circ\text{C}$,		Піддон 522 шт	

		$\tau_B = 60$ хв, ендогаз	
--	--	---------------------------	--

Кінець таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7
2.3	Охолодження	Гартівний бак ЗБК-400		Масло И-20А $\tau_{охл}=18,8с$		температура масла, циркуляція
3	Промивання	Мийна машина ММК-400		4...6% розчин Na_2CO_3		
4	Контроль	Твердомір ТК-2				НРС 1 шт від партії
5	Відпуск					
5.1	Нагрівання	СНЗ-5.10.3,2/7	$t_H=620\pm 10^{\circ}C$, $\tau_H= 172$ хв,ендогаз		Піддон 522 шт	Контроль температури, час, середовище
5.2	Витримка		$t_B=620\pm 10^{\circ}C$, $\tau_B = 70$ хв,ендогаз		Піддон 522 шт	
5.3	Охолодження			масло $\tau_{охл}=2,06$ мин		
6	Контроль	Твердомір ТК-2			Столик	100%
7	Азотування					
7.1	Нагрівання	СНА- 10.32.13/6М	$t_H=530\pm 10^{\circ}C$, $\tau_H=172$ хв	25...35% дисоційований аміак	Піддон 18576шт	Контроль температури, час
7.2	Витримка		$t_B=530\pm 10^{\circ}C$, $\tau_B =40$ год,		Піддон 18576шт	
7.3	Охолодження		$\tau_{ох} = 396$ хв	Із піччю до $200^{\circ}C$		
8	Контроль	Твердомір ТК-2			Столик	100%

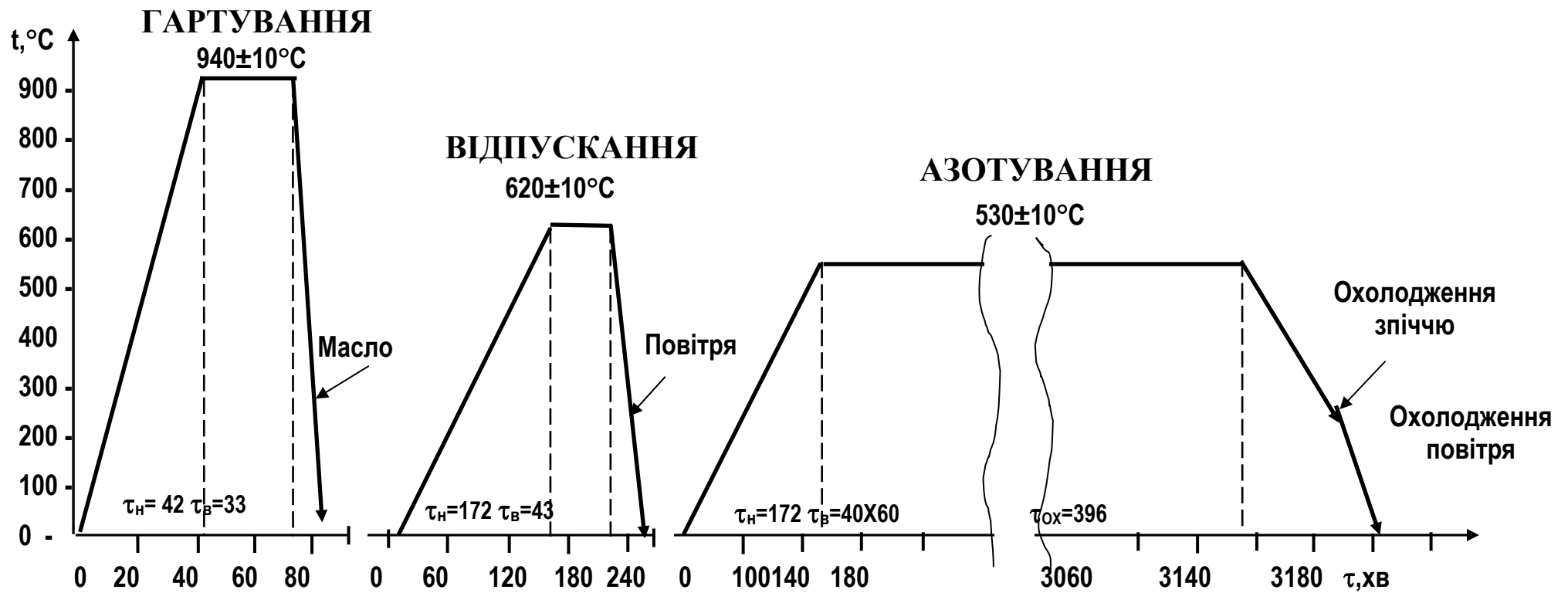


Рисунок В.1 – Графік термічної обробки фланця зі сталі 38ХМЮА

ДОДАТОК Г ВИДИ ДЕФЕКТІВ ВИРОБІВ ІЗ АЗОТОВАНИХ СТАЛЕЙ ПРИ
ПРОВЕДЕННІ ТО ТА ЇХ УСУНЕННЯ

Таблиця Г.1 – Види дефектів виробів із азотованих сталей при проведенні
ТО та їх усунення

Вид дефекту	Причини виникнення	Заходи із запобігання	Заходи із усунення
1	2	3	4
Гартування			
Велике зерно	1) Підвищена температура гарту; 2) Підвищений час витримки	Контроль та регулювання температури, дотримання технологічного часу	Відпал та повторне проведення ТО
Короблення, тріщини	Швидке охолодження	Дотримання оптимальної швидкості охолодження при гартуванні	Невиправний
Перепад	Підвищена температура гарту;	Контроль та регулювання температури, дотримання технологічного часу	Невиправний

Продовження таблиці Г.1

1	2	3	4
Неоднорідна структура	Недостатній рівень гомогенізації твердого розчину при нагріванні під гартування, занижена температура гартування або час витримки	Дотримання оптимальної температури та витримки при гартуванні	Проведення повторної ТО з раціональної технології
Занижена твердість	Швидкість охолодження менша за критичну	Контроль швидкості охолодження	Проведення повторної ТО
Відпускання			
Занижені характеристики міцності	Підвищена температура відпускання Підвищений час витримки	Контроль та регулювання температури, дотримання технологічного часу	Проведення повторної ТО за раціональною технологією
Висока твердість	Занижена температура	Контроль та регулювання температури	Проведення повторної ТО
Азотування			
Знижена поверхнева твердість при нормальній товщині азотованого шару	Підвищена температура процесу, високий ступінь дисоціації аміаку, перерва у подачі аміаку	Дотримання технологічного процесу	Проведення повторної ХТО

Продовження таблиці Г.1

1	2	3	4
Плямиста (нерівномірна) твердість азотованого шару	Затіки олова на поверхню, що підлягає азотуванню	Дотримання технологічного процесу	Після лудіння та зачистки границь покриття проводити фосфатування
	Погане знежирення виробів. Неповне виконання процесу	Ретельне знежирення виробів Дотримання технологічного процесу	Проведення повторної ХТО
Лущення та розтріскування азотованого шару	Висока концентрація азоту в поверхневому Внутрішня напруга в азотованому шарі	Після закінчення заданого технологічного процесу додатково витримувати вироби в атмосфері аміаку для прискорення дифузії азоту в глиб виробу. Дотримання технологічного процесу	Видалення крихкого поверхневого шару, що має високу концентрацію азоту Виконання стабілізуючого відпускання
Деформація азотованих виробів	Нерівномірне нагрівання азотованих виробів	Контроль та регулювання температури, дотримання технологічного часу	Перевірити розподіл температур у печі. Вжити заходів щодо ліквідації перепаду температур

Кінець таблиці Г.1

1	2	3	4
	Наявність залишкових напружень у виробі після механічної обробки, перед азотуванням	Контроль та регулювання температури, дотримання технологічного часу	Виконання стабілізуючих відпусток для зняття напружень у виробках перед азотуванням