

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти Магістра
Бакалавра (Магістра)

Дослідження властивостей сталі 20 після хіміко-термічної обробки





Назва теми

Галузь знань 13 Механічна інженерія
Шифр і назва галузі знань

Спеціальність 132 Матеріалознавство
Шифр і назва спеціальності

Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів
Назва

Шифр КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ

Виконав студент(ка) <u>2-го</u> курсу група <u>МТВАм 24-1</u> Шифр	 Підпис	<u>Вадим БУРДЕЛЬНИЙ</u> Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Керівник <u>к.т.н. доцент</u> Науковий ступінь, вчене звання	 Підпис	<u>Володимир ГОНЧАР</u> Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Нормоконтролер <u>доцент кафедри ТАМ</u> Посада	 Підпис	<u>Олег БАБАК</u> Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
До захисту допускаю: Завідувач кафедри <u>ТАМ</u> Назва	 Підпис	<u>Олександр ДИХА</u> Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Дата <u>10</u> <u>12</u> <u>2025</u>		

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»



З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Бурдельному Вадиму Миколайовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи «Дослідження властивостей сталі 20 після хіміко-термічної обробки».

керівник роботи Гончар Володими Антонович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 25 серпня 2025 р. № 65 (Д28)

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 1 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація по технології, вимоги з охорони праці і безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт; техніко – економічні показники роботи підприємства.

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

1 Методи поверхневого зміцнення деталей;

2 Технології нанесення покриттів;

3 Нітроцементация

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання_ ----

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	<i>Літературний огляд</i>	<i>30.09.2025</i>	
2	<i>Огляд технологій</i>	<i>25.10. 2025</i>	
3	<i>Дослідницький розділ</i>	<i>15.11. 2025</i>	
4	<i>Оформлення розрахунково–пояснювальної записки</i>	<i>22.11. 2025</i>	
5	<i>Оформлення презентації кваліфікаційної роботи</i>	<i>1.12. 2025</i>	
6	<i>Нормоконтроль кваліфікаційної роботи</i>	<i>5.12. 2025</i>	
7	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	<i>5.12. 2025</i>	

Студент

Керівник роботи

В.Б.
Підпис

В.Г.
Підпис

Вадим БУРДЕЛЬНИЙ
ім'я, прізвище

Володимир ГОНЧАР
ім'я, прізвище

РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційну роботу (магістерську роботу) виконано студентом гр. МТВАм 24-1 Вадимом Бурдельним на тему: «Дослідження властивостей сталі 20 після хіміко-термічної обробки».

Встановлено, що в результаті використання газової нітроцементації поверхневі шари сталі 20 зміцнюються зі зростанням мікротвердості за рахунок дифузії атомів азоту та вуглецю і формування дисперсних нітридів та карбонітридів. Показано, що оптимальні властивості досягаються після нітроцементації, гартування та послідуочого низькотемпературного відпуску, що призводить до формування структури дисперсного мартенситу з тією чи іншою кількістю залишкового аустеніту (20 – 40%, в залежності від технологічних режимів процесу).

Мета кваліфікаційної роботи дослідження структурних змін у поверхневих шарах сталі 20 після нітроцементації, аналіз фізико-механічних властивостей поверхневих шарів зразків після хіміко-термічної обробки.

Шляхом досягнення поставленої мети є виконання таких завдань:

На основі літературного огляду технологій зміцнення поверхонь, обрати найбільш раціональну.

Провести аналіз властивостей поверхні до та після обробки;

Призначити параметри обробки поверхні з метою отримання кращих властивостей.

Наукова новизна кваліфікаційної роботи полягає в тому, що було розглянуто та вдосконалено технологію зміцнення поверхонь деталей із сталі.

Практична значущість кваліфікаційної роботи дуже висока, оскільки вона забезпечує зносостійкість шляхом підвищення експлуатаційних характеристик поверхні.

Кваліфікаційна робота містить 80 сторінок машинописного тексту з 9 рисунками та 2 таблицями, а також список використаних джерел із 26 найменувань, вступ, три розділи та висновок.

Ключові слова: СТАЛЬ, НІТРОЦЕМЕНТАЦІЯ, КАРБОНІТРИДИ, ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ТЕМПЕРАТУРА, МІКРОСТРУКТУРА.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Огляд літератури.....	7
1.1 Методи поверхневого зміцнення сталевих деталей.....	7
1.2 Огляд технологій хіміко-термічної обробки.....	8
1.3 Детально нітроцементация.....	21
2 Дослідження.....	41
2.1 Зразки та їх підготовка.....	41
2.2 Дослідження твердості.....	47
3 Результати та їх обговорення.....	51
3.1 Властивості сталі 20 у вихідному стані.....	51
3.2 Властивості поверхневих шарів зразків після нітроцементации.....	52
4. Охорона праці.....	60
Висновки.....	72
Список літератури.....	73
Додаток А.....	76

КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ								
Змн	Арк	№ докум	Підпис	Дат	Дослідження властивостей сталі 20 після хіміко-термічної обробки	Літ	Арк	АКОВШІР
		Бурдєльний	<i>[Signature]</i>				4	
		Гончар	<i>[Signature]</i>					
		Бабак	<i>[Signature]</i>					
		Духа	<i>[Signature]</i>					
ХНУ група МТВАм 24-1								

ВСТУП

Попит на машинобудівну продукцію стабільно зростає, що зумовлює необхідність підвищення експлуатаційної надійності механічних компонентів. Для цього важливо змінювати структуру не всього об'єму деталі, а лише її поверхневого шару, оскільки саме з поверхні зазвичай починаються процеси руйнування. Це спричиняє зменшення поверхневої міцності матеріалу та погіршення його працездатності, що може проявлятися у вигляді дефектів, передчасного зношування та відмови деталі під час роботи.

Серед найперспективніших напрямків розвитку технологій поверхневого зміцнення — удосконалення методів формування захисних шарів, які містять тугоплавкі сполуки, зокрема нітриди та карбіди. У сталях такі сполуки виникають у процесі взаємодії неметалевих елементів (вуглецю, азоту, бору) із залізом та легуючими компонентами. Наявність подібних шарів забезпечує матеріалам високу твердість, зносостійкість і жаростійкість. Для підвищення експлуатаційних властивостей деталей шляхом модифікації структури їх поверхні застосовують різні методи обробки, серед яких одним із найпоширеніших є поверхнева термічна обробка, зокрема цементація та нітроцементація.

Удосконалення технології дифузійного насичення сьогодні є одним із ключових завдань, оскільки цей процес визначає якість та ресурсоємність зміцнення сталевих виробів. Крім традиційного насичення поверхні одним елементом, у технологічних сумішах можуть застосовуватися комбінації декількох активних компонентів, що забезпечує одночасне введення в матеріал двох або більше хімічних елементів.

Нітрокарбонізація передбачає одночасне насичення поверхневого шару

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						5
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

деталі атомами вуглецю та азоту. Цей процес має низку переваг, які роблять його ефективною альтернативою газовій карбюризациі. Зокрема, він проводиться за нижчої температури, що сприяє підвищенню продуктивності, продовженню строку експлуатації печей та скороченню часу обробки. Додавання азоту до твердого розчину аустеніту дає можливість гартувати вироби з нелегованих сталей в олії безпосередньо після нітроцементациі. У результаті гартування в поверхневих зонах формується вуглецево-азотний мартенсит у поєднанні із залишковим аустенітом. Такий структурний стан значно підвищує міцність, ударну в'язкість, опір вигину та зносостійкість оброблених деталей.

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						6
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Методи поверхневого зміцнення сталевих деталей

Поверхнєве зміцнення сталевих елементів застосовується з метою підвищення надійності найбільш відповідальних вузлів та підсилення стійкості конструкційних матеріалів до дії несприятливих чинників, зокрема високоциклічних навантажень, агресивних середовищ та значних температурних коливань [1].

Модифікувати властивості поверхні можна різними технологічними підходами, які умовно поділяють на дві групи:

– нанесення на поверхню шару іншого матеріалу з необхідними параметрами (гальванічні покриття, емалі, лакофарбові та інші полімерні захисні матеріали);

– зміна хімічного складу поверхневого шару металу, що забезпечує формування потрібних властивостей шляхом дифузійної хіміко-термічної обробки, у результаті якої на поверхні формується новий сплав [8].

Зазначені методики реалізуються в різноманітних умовах, які можуть суттєво відрізнятися: у газовому середовищі, у рідині, у пастоподібних сумішах; із застосуванням нагрівання або без нього; під нормальним, підвищеним чи високим тиском; у низькому, середньому чи високому вакуумі; у воді, водяній парі, ендогазі, екзогазі; в електропровідних або діелектричних середовищах; у середовищах із поверхнево-активними або полірувальними властивостями. Конкретна комбінація зовнішніх умов визначає технологічну специфіку кожного окремого процесу [2, 3].

					КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Огляд технологій хіміко-термічної обробки

Дифузійне насичення здійснюється шляхом проведення хіміко-термічної обробки (ХТО), унаслідок якої змінюються хімічний склад, мікроструктура та експлуатаційні характеристики поверхневого шару металевого виробу. Конкретний різновид ХТО визначається тими властивостями, які необхідно надати поверхні оброблюваного металу [3].

Процес ХТО охоплює три взаємопов'язані стадії:

- – формування активних атомів у насичувальному середовищі безпосередньо на поверхні або поруч із поверхнею металу. Інтенсивність цього потоку, тобто кількість атомів, що утворюються за одиницю часу, залежить від складу та фазового стану насичувального середовища (твердого, рідкого чи газоподібного), характеру взаємодії його компонентів, температури, тиску та хімічного складу сталі;
- – адсорбція, тобто поглинання активних атомів поверхнею, що насичується. Цей процес складний і має нестаціонарний характер. Розрізняють фізичну та хімічну адсорбцію, які під час ХТО протікають одночасно. Фізична адсорбція забезпечує прилипання атомів до поверхні та супроводжується можливістю зворотного явища — десорбції. Хімічна адсорбція (хемосорбція) передбачає хімічну взаємодію між атомами адсорбату та адсорбенту;
- – дифузія, тобто переміщення адсорбованих атомів усередині кристалічної решітки металу. Ця стадія можлива лише за достатньо високих температур і за умови, що дифундуючі елементи мають розчинність у

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріалі, який піддається обробці [4].

Товщина дифузійного шару, а відповідно й товщина зміцненої зони на поверхні виробу, є ключовим параметром при оцінюванні якості виробів із водневої сталі (ВСТ). На формування цієї товщини впливають температура процесу насичення, тривалість обробки, хімічний склад сталі, а також концентраційний градієнт між поверхнею виробу та глибинними ділянками насиченого шару.

Дифузійне насичення охоплює низку технологічних процесів: цементацію — введення вуглецю до поверхні, азотування — насичення азотом, а також нітроцементацію та ціанування — одночасне надходження до поверхневих шарів вуглецю й азоту. Окрім цього, існують методики насичення сталі іншими елементами, зокрема хромом (хромування), бором (борування), кремнієм (кремніювання), алюмінієм (алітування), а також комбіноване насичення кремнієм і алюмінієм (алюмосиліфікація). Проте такі процеси застосовують значно рідше [4, 5].

Цементація

Цементація являє собою технологічний процес дифузійного збагачення приповерхневого шару сталі вуглецем. Залежно від способу організації насичувального середовища розрізняють цементацію у твердих карбюризаторах (вуглецевих сумішах) та газову цементацію [5]. Основним призначенням цього процесу є формування твердого й зносостійкого поверхневого шару, що досягається шляхом підвищення концентрації вуглецю в поверхні з подальшим гартуванням і низькотемпературним відпуском. Поєднання цементації з відповідною термічною обробкою забезпечує також зростання межі витривалості деталей [6].

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після цементації мікроструктура поверхневих шарів сталі відповідає заевтектоїдному стану і складається з перліту та вторинного цементиту. У зв'язку з цим для надання виробу необхідних експлуатаційних властивостей обов'язковим є проведення гартування та низького відпуску. Температурні й часові параметри термічної обробки визначаються маркою сталі, функціональним призначенням деталі та її геометричними розмірами.

Деталі, що надходять на цементацію після механічної обробки, зазвичай мають припуск під подальше шліфування в межах 0,05–0,01 мм. У практиці часто виникає потреба цементувати лише окремі ділянки деталі, тоді як інші поверхні захищають від насичення. Для цього застосовують тонкі мідні покриття товщиною 0,02–0,05 мм, які наносять електролітичним способом, або використовують спеціальні ізоляційні пасти на основі вогнетривкої глини, піску, азбесту, глинозему чи тальку з додаванням рідкого скла.

Дифузійне проникнення вуглецю в сталь можливе лише за умови його перебування в атомарному стані, який утворюється в процесі дисоціації вуглецевмісних газів, зокрема монооксиду вуглецю та метану. Процес цементації здійснюють за підвищених температур у межах 1173–1223 К, що забезпечує достатню рухливість атомів вуглецю в аустеніті [6].

При цементації у твердому карбюризаторі насичувальним середовищем слугує деревне вугілля (дубове або березове) з розміром частинок 3,5–10 мм, а також вугільний напівкокс або торф'яний кокс. Для активізації процесу до суміші додають карбонат барію (BaCO_3) і кальциновану соду (Na_2CO_3).

У машинобудівній практиці найчастіше застосовують карбюризатор, до складу якого входить деревне вугілля, 20–35 % BaCO_3 та близько 3,5 % CaCO_3 . Робоча суміш готується шляхом змішування 25–35 % свіжого карбюризатора з 65–75 % відпрацьованого. Вміст BaCO_3 у такій суміші на рівні 5–7 % забезпечує формування шару заданої товщини та запобігає появі

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

грубозернистої цементитної сітки.

Після очищення деталі розміщують у зварних сталевих муфелях прямокутної або циліндричної форми, конструкція яких спрямована на мінімізацію вільного об'єму та забезпечення рівномірного нагріву. Укладення здійснюють пошарово: на дно муфеля засипають шар карбюризатора товщиною 30–40 мм, далі розміщують деталі й знову засипають карбюризатор. Така схема повторюється до заповнення муфеля. Верхній шар між деталями та кришкою має становити 20–30 мм. Об'єм деталей не повинен перевищувати 10–15 %, тоді як карбюризатор займає 85–90 % простору. Під час укладання важливо уникати контакту деталей між собою та зі стінками муфеля, а кожен шар карбюризатора ущільнювати шляхом струшування. Після цього зверху укладають лист азбесту, муфель закривають кришкою та герметизують сумішшю вогнетривкої глини й піску, після чого поміщають у нагріту до заданої температури піч.

Газову цементацію здійснюють у муфельних шахтних електропечах. Як рідкі карбюризатори застосовують бензол, синтин або гас, а як газоподібні — природний і супутні гази. Рідкі карбюризатори подають у піч у вигляді крапель чи порошку через форсунки за допомогою вентиляторів. Результативність процесу оцінюють за ефективною товщиною сформованого цементованого шару [6].

Азотування

Азотування є технологічним процесом хіміко-термічної обробки, що полягає у дифузійному введенні азоту в приповерхневі шари сталі під час нагрівання виробів у середовищі аміаку. Застосування цього методу призводить до істотного підвищення твердості поверхні, покращення її опору зношуванню, збільшення межі витривалості, а також зростання корозійної

					КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стійкості в умовах впливу атмосферного повітря, води, водяної пари та слабколужних середовищ. Завдяки комплексу властивостей, що формуються, азотування широко використовують для обробки сталей різного складу та функціонального призначення, зокрема конструкційних, інструментальних, жароміцних і корозійностійких, а також деяких вогнетривких матеріалів [5, 6].

Однією з характерних особливостей азотування є здатність сформованого шару зберігати високі показники твердості навіть за умов підвищених температур експлуатації. Твердість азотованої поверхні істотно перевищує твердість цементованих шарів і залишається стабільною при нагріванні в інтервалі 773–873 К, що розширює можливості застосування азотованих деталей у термічно навантажених вузлах [6].

Процес азотування реалізується в атмосфері аміаку, який за високих температур піддається термічній дисоціації. Внаслідок цього утворюється атомарний азот, здатний активно проникати у кристалічну ґратку заліза та взаємодіяти з компонентами сталі, формуючи нітридні фази та азотовмісні тверді розчини.

Основними параметрами, що визначають твердість і глибину азотованого шару, є температура процесу та тривалість обробки. Підвищення температури сприяє інтенсифікації дифузії азоту, що приводить до зростання товщини шару, однак водночас супроводжується певним зниженням його твердості. Отже, вибір температурного режиму потребує компромісу між необхідною глибиною насичення та вимогами до механічних властивостей поверхні.

Структурний стан, фізико-механічні характеристики та товщина азотованого шару залежать також від режиму азотування, який визначається температурою, часом витримки та ступенем дисоціації аміаку. У промисловій

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

практиці застосовують два основних режими: одноступеневий, за якого процес проходить при постійній температурі, та двоступеневий, що передбачає поступове підвищення температури в ході обробки. Ступінь дисоціації аміаку регулюється в межах 20–50 % залежно від температури процесу: при 773–793 К вона становить близько 20–25 %, тоді як підвищення температури до 813–843 К забезпечує зростання цього показника до 40–50 %. Одноступеневий режим дозволяє отримати поверхневі шари з максимальною твердістю, але характеризується значною тривалістю процесу, тому для інтенсифікації азотування найчастіше застосовують двоступеневу схему.

У випадках, коли основною вимогою до поверхневого шару є підвищена твердість і висока зносостійкість, доцільним є використання сталі типу 38Х2МЮА. Поєднання хрому, алюмінію та молібдену у складі цієї сталі сприяє формуванню стабільних нітридних фаз, що дозволяє досягати твердості азотованого шару на рівні HV 1200. Додаткова роль молібдену полягає у зниженні схильності матеріалу до релаксаційної крихкості, яка може виникати під час повільного охолодження від температур азотування. Для покращення корозійної стійкості також можливе азотування вуглецевих сталей, що розширює сферу застосування цього процесу.

Ціанування

Ціанування належить до методів хіміко-термічної обробки, сутність яких полягає в одночасному дифузійному насиченні приповерхневих зон сталевих виробів атомами вуглецю та азоту. Поєднана дія цих елементів дає змогу сформувати поверхневий шар із підвищеними показниками твердості та зносостійкості за порівняно короткої тривалості технологічного процесу. Залежно від агрегатного стану та температури насичувального середовища

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						13
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

розрізняють рідинне ціанування (низько- та високотемпературне), ціанування в твердих порошкових сумішах, а також газове ціанування, відоме також як нітросекція [5].

Низькотемпературне ціанування застосовують переважно для середньовуглецевих і нержавіючих сталей, а також для чавунів. Процес реалізується в розплавлених ціанідних ваннах, до складу яких зазвичай входить близько 40 % KNO_3 та 60 % NaCN . Обробку проводять у температурному інтервалі 813–863 К з витримкою від 30 до 180 хвилин. За таких умов азот є домінуючим елементом дифузії, унаслідок чого формується поверхневий шар, за властивостями близький до азотованого. Загальна товщина зміцненої зони після низькотемпературного ціанування зазвичай становить 0,15–0,5 мм [5, 6].

Глибина дифузійного шару істотно залежить від концентрації роданістих сполук (KCNO) у робочій ванні. Максимальна товщина шару досягається за вмісту KCNO на рівні близько 40 % та температури процесу приблизно 843 К. Водночас на кінцевий результат впливають також хімічний склад сталі та тривалість витримки, що обумовлює необхідність індивідуального підбору режимів для різних матеріалів.

Зі збільшенням вмісту вуглецю та легувальних елементів у сталі ефект підвищення твердості внаслідок низькотемпературного ціанування для вуглецевих сталей є обмеженим і, як правило, не перевищує HV 300–350. Для легованих сталей твердість поверхневого шару може досягати значень HV 600–1100, хоча ці показники залишаються нижчими за твердість, отриману в результаті класичного азотування за аналогічних умов. Разом із тим процес істотно покращує протизадірні властивості, підвищує межу витривалості та зносостійкість оброблених виробів.

Найсуттєвішою перевагою низькотемпературного ціанування є

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мінімальний вплив на геометрію деталей. Незначні розмірні зміни та практична відсутність деформацій дозволяють передавати вироби на експлуатацію або подальше складання без додаткових операцій механічної доводки. Саме ця особливість робить процес привабливим для обробки точних і складних за формою деталей.

Разом із тим широке впровадження низькотемпературного ціанування ускладнюється необхідністю застосування дорогих і токсичних ціанідних солей, використання тиглів із спеціальних матеріалів, а також постійного хімічного контролю та періодичного коригування складу робочих ванн.

Високотемпературне рідинне ціанування застосовують з метою отримання більш глибоких і твердих зміцнених шарів. Процес проводять при температурах 1093–1143 К, за яких товщина ціанованого шару становить 0,15–0,35 мм. Для отримання шару більшої глибини, у межах 0,5–2,0 мм, температуру підвищують до 1203–1223 К [6]. Як насичувальне середовище використовують середньоконцентровані ціанідні ванни, що містять NaCN, Na₂CO₃ та NaCl.

У процесі нагрівання ціанідних розплавів відбувається утворення активних форм азоту та вуглецю, які одночасно нітридують і карбюризують поверхневий шар сталі. Співвідношення концентрацій цих елементів у сформованому шарі визначається температурою процесу: зі зростанням температури вміст вуглецю збільшується, тоді як концентрація азоту поступово зменшується. Найінтенсивніше зростання товщини шару та насичення його вуглецем і азотом спостерігається на початковій стадії обробки, зазвичай протягом першої години витримки. З урахуванням цієї особливості загальна тривалість високотемпературного ціанування зазвичай становить від 1,5 до 6 годин [6].

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняно з цементацією, ціанування дозволяє значно швидше отримати необхідну глибину зміцненого шару, супроводжується меншими внутрішніми напруженнями, забезпечує кращу розмірну стабільність деталей складної конфігурації та характеризується підвищеною зносо- й корозійною стійкістю.

Основними недоліками процесу залишаються висока вартість технології, значна токсичність ціанідних сполук та необхідність впровадження суворих заходів охорони праці й екологічного контролю.

Борування та кремніювання

Борування належить до групи хіміко-термічних методів поверхневого зміцнення і полягає у дифузійному введенні бору в приповерхневі області металевої заготовки за умов високотемпературної обробки в спеціально підібраних середовищах. У процесі борування відбувається формування боридних фаз, які зумовлюють істотні зміни фізико-механічних та фізико-хімічних характеристик поверхні деталі.

Залежно від агрегатного стану насичувального середовища розрізняють борування у твердих, рідких та газоподібних середовищах [3, 4, 7]. Найбільш поширеним є тверде борування, що здійснюється в порошкових сумішах у герметично закритих контейнерах — боридизаторах. Обробку проводять у вакуумі або відновлювальних газових атмосферах, зокрема у водневих сумішах, що сприяє стабільності процесу дифузії бору.

Рідке безелектрольне борування застосовують переважно для обробки деталей зі складною геометрією, для яких рівномірність насичення відіграє вирішальну роль. Водночас електролітичний варіант борування доцільний для виробів простої форми та забезпечує стабільність параметрів шару. У таких

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процесах графітові стрижні використовують як аноди, що забезпечує необхідні електрохімічні умови перенесення бору до поверхні деталі.

Газове борування характеризується найнижчими температурними режимами порівняно з іншими методами, однак практичне його застосування суттєво обмежене через токсичність і вибухонебезпечність використовуваних газових середовищ. Саме ці чинники зумовлюють підвищені вимоги до безпеки та складність промислової реалізації даного способу.

Основним призначенням борування є формування поверхневих шарів з підвищеною твердістю, високою зносостійкістю, а також значною кислото- та жаростійкістю. Товщина боридного шару визначається температурно-часовими параметрами насичення та хімічним складом оброблюваної сталі. Встановлено, що зі зростанням вмісту вуглецю та легувальних елементів у сталі швидкість дифузії бору зменшується, що призводить до зниження глибини сформованого шару [7, 8].

Сформований у процесі борування поверхневий шар характеризується надзвичайно високою твердістю, яка досягає значень HV 1800–2000 (18000–20000 МПа), а також винятковою стійкістю до абразивного зношування. Окрім цього, боридні покриття проявляють високу корозійну стійкість, окалинотійкість при температурах до 1073 К та жаростійкість, що робить їх ефективними для експлуатації в умовах підвищених термічних і хімічних навантажень. Борування широко застосовують для підвищення ресурсу втулок бурових насосів, опорних дисків турбобурів, штампів для операцій волочіння, гнуття та формування металу, а також елементів ливарного й штампувального обладнання. У результаті борування довговічність зазначених деталей може зростати в 2–10 разів.

Разом із тим до загальних обмежень процесу борування слід віднести схильність боридних шарів до локального викришування при робочих

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температурах, що перевищують 1073 К. Небезпека також полягає у виникненні напруженого стану на межі між надтвердим боридним шаром і відносно м'якою основою, що може спричиняти відшарування. Додатковим недоліком є складність відновлення зношених борованих поверхонь під час ремонту.

Силіціювання (кремніювання) є спорідненим процесом хіміко-термічного насичення, який передбачає дифузійне збагачення поверхневих шарів виробів кремнієм з метою значного підвищення їх корозійної стійкості в різноманітних агресивних середовищах. Цьому виду обробки піддають переважно деталі, виготовлені з низько- та середньовуглецевих сталей, а також з високоміцного й ковкого чавуну, де необхідно забезпечити стабільність експлуатаційних властивостей у корозійно активних умовах.

Існує кілька технологічних схем нанесення кремнієвих дифузійних покриттів, зокрема порошкові, газові та рідинні методи. Рідинні процеси можуть реалізовуватися як електролітичним, так і хімічним шляхом, що дозволяє адаптувати технологію до конкретної форми та розмірів деталі. Температура насичення зазвичай перебуває в межах 1373–1473 К, а тривалість витримки становить від 2 до 12 годин залежно від вимог до товщини та структури сформованого шару [6].

Дифузійна металізація

Дифузійна металізація є різновидом високотемпературної хіміко-термічної обробки, що передбачає насичення приповерхневих шарів сталевих виробів металевими елементами у спеціально сформованих насичувальних середовищах. Основним призначенням цього процесу є суттєве покращення комплексу експлуатаційних характеристик деталей, зокрема підвищення їх

					КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ	<small>Арк.</small> 18
<small>Змн.</small>	<small>Арк.</small>	<small>№ докум.</small>	<small>Підпис</small>	<small>Дата</small>		

окалиностійкості, корозійної та кислотної стійкості, твердості, а також опору зношуванню в умовах інтенсивних механічних і термічних навантажень.

У ході дифузійної металізації відбувається глибока трансформація хімічного складу, фазового стану та мікроструктури поверхневих зон сталі за рахунок введення легуючих металів, серед яких найчастіше застосовують хром, алюміній, цинк, вольфрам, ванадій та ніобій. Насичення здійснюється за підвищених температур, зазвичай у діапазоні 1273–1373 К, і вимагає тривалої витримки для забезпечення необхідної глибини та рівномірності дифузійного шару [4]. Саме поєднання високих температур і тривалого часу обробки створює умови для активного масоперенесення й формування стабільних захисних шарів.

Реалізація дифузійної металізації можлива різними технологічними шляхами, що визначаються способом транспорту дифузійного елемента до поверхні виробу. Серед основних методів виділяють занурення деталей у розплавлений метал, що доцільно у випадку використання елементів з низькою температурою плавлення, таких як алюміній або цинк. Широко застосовують також насичення з використанням розплавлених солей, яке може здійснюватися як із застосуванням електролізу, так і без нього. Окрім цього, використовують методи насичення сублимованою фазою шляхом випаровування металу, а також газофазні способи, у яких дифузійний елемент переноситься у складі галогеновмісних сполук і подається до поверхні контактним або безконтактним способом.

У результаті дифузійної металізації на поверхні сталі утворюються шари високолегованих твердих розчинів або складних фаз, які надають приповерхневій зоні принципово нових фізико-хімічних властивостей і значно підвищують довговічність виробів [6]. Характер сформованого шару, його структура й експлуатаційні показники залежать від складу насичувального

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

середовища, температури та тривалості процесу, а також від хімічного складу сталі, зокрема від вмісту вуглецю та легувальних елементів [9].

Так, при насиченні сталі нікелем або комбінованими покриттями на основі нікелю та міді, які практично не взаємодіють з вуглецем, останній витісняється вглиб матеріалу. У результаті під металізованим шаром формується зона, збагачена вуглецем, тоді як саме покриття являє собою твердий розчин нікелю в залізі або спільний твердий розчин нікелю та міді в залізній матриці [10, 11]. У випадку формування нікель-хромових покриттів ситуація змінюється, оскільки хром активно взаємодіє з вуглецем, що призводить до утворення карбідних фаз безпосередньо в поверхневому шарі. Тому склад і властивості таких покриттів істотно залежать від початкового вмісту вуглецю в сталі.

Здатність дифузійного шару накопичувати легуючі елементи визначається їхньою розчинністю в матриці покриття або схильністю до утворення стійких хімічних сполук з компонентами основного металу. У випадках, коли легуючі елементи не вступають у взаємодію з покриттям, вони виштовхуються вглиб основного металу, формуючи неоднорідний розподіл складу по товщині матеріалу.

Особливі можливості відкриває одночасне насичення поверхні сталі двома або кількома елементами. У таких умовах властивості, які формуються кожним елементом окремо, можуть поєднуватися з новими ефектами, що виникають унаслідок їхньої спільної дії. Багатокомпонентне дифузійне насичення приводить до утворення поверхневих шарів із якісно новою структурою та значно вищими фізико-хімічними характеристиками порівняно з шарами, отриманими при одноелементній металізації [11, 12].

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Детально нітроцементация

Нітроцементация є різновидом хіміко-термічної обробки, що передбачає одночасне дифузійне введення атомів вуглецю та азоту в приповерхневі шари сталевих виробів. Процес реалізується в газовому середовищі, сформованому сумішшю цементуючих газів і аміаку, при температурах у межах 1113–1133 К. За таких умов забезпечується активна адсорбція та подальша дифузія обох елементів у сталь, що приводить до формування зміцненого поверхневого шару зі зміненим фазовим і хімічним складом. Завдяки поєднанню механізмів карбюризації та азотування нітроцементация (газове ціанування) набула широкого поширення і стала одним із базових методів отримання хіміко-термічно зміцнених шарів у масовому виробництві.

Порівняно з традиційною газовою цементациєю нітроцементация характеризується рядом суттєвих технологічних і економічних переваг, які обумовлюють її практичну доцільність та ефективність [3, 13]. Насамперед слід зазначити, що температура процесу є нижчою, ніж при цементациї, що скорочує тривалість обробки та сприяє підвищенню загальної продуктивності технологічних ліній. Зміщення температурного режиму у бік нижчих значень також призводить до зменшення інтенсивності утворення сажистих відкладень у робочому просторі печей, що позитивно впливає на стабільність атмосфери та умови експлуатації обладнання.

Завдяки зниженим температурам істотно зменшуються термічні деформації деталей, що особливо важливо для виробів складної конфігурації або з жорсткими допусками на розміри. У багатьох випадках це дозволяє здійснювати безпосереднє гартування деталей одразу після нітроцементациї

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						21
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

без додаткового нагрівання, що спрощує технологічний цикл і знижує енергетичні витрати. Наявність азоту у поверхневих шарах сталі забезпечує формування вуглецево-азотних структур, завдяки чому зростає зносостійкість і контактна міцність деталей у порівнянні з виробами, обробленими лише цементацією.

Важливою перевагою нітроцементації є також менша енергоємність процесу, що пов'язано з оптимальнішими температурними режимами та скороченням часу витримки. Робота технологічного обладнання за нижчих температур сприяє збільшенню терміну його служби, зменшенню інтенсивності окислювальних процесів і зниженню витрат на технічне обслуговування. Окрім цього, нітроцементація забезпечує більш рівномірний розподіл твердості по поверхні деталі, ніж класична цементація, що позитивно впливає на надійність і довговічність виробів у процесі експлуатації.

Серед додаткових переваг слід відзначити можливість отримання більшої ефективної глибини загартованого шару та формування поверхні з підвищеною зносостійкістю при відносно менших витратах на обробку. Сукупність перелічених факторів зумовлює економічну доцільність застосування нітроцементації та пояснює її активне використання в сучасному серійному й масовому виробництві деталей машин і механізмів [14, 15].

Суть процесу нітроцементації

Електричні шахтні муфельні печі серії С, оснащені системами примусової циркуляції газового середовища за допомогою вентиляторів, набули широкого промислового використання під час реалізації процесів газового нітроцементування. Конструктивні особливості таких печей забезпечують стабільність температурного поля та рівномірність розподілу насичувальної атмосфери в робочому об'ємі, що є критично важливим для

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формування однорідних зміцнених шарів на поверхні оброблюваних деталей.

Для здійснення процесу нітроцементування в робочий простір печі подають газоподібні або рідкі карбюризатори у поєднанні з аміаком. Саме якісний склад і кількісне співвідношення цих компонентів визначають активність насичувального середовища та ефективність дифузійного насичення поверхні сталі. Кінцеві характеристики сформованого шару залежать від комплексу взаємопов'язаних параметрів, серед яких ключову роль відіграють температура процесу, тривалість витримки та пропорція цементуючого газу відносно аміаку.

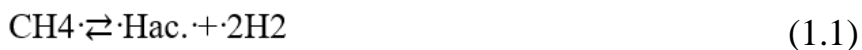
Зміна температурного режиму істотно впливає на склад і геометричні параметри зміцненого шару. Зі зростанням температури інтенсифікується дифузія вуглецю, що сприяє збільшенню товщини шару та підвищенню загального вмісту вуглецю в поверхневій зоні. Водночас при підвищених температурах концентрація азоту у поверхневому шарі зменшується, що пов'язано з особливостями його розчинності та кінетики дифузії в сталі за таких умов.

У процесах нітроцементування як газовий карбюризатор зазвичай застосовують суміші гасу, природного газу та аміаку. Таке поєднання компонентів дозволяє сформувати середовище, здатне одночасно забезпечувати поверхню деталей активними формами вуглецю та азоту. Саме наявність цих активних атомів є визначальною умовою ефективного формування вуглецево-азотних зміцнених шарів.

У ході процесу активні атоми вуглецю та азоту адсорбуються поверхнею сталевих деталей і під дією високої температури дифундують у приповерхневі зони матеріалу. Джерелом таких атомів є хімічні реакції, що відбуваються безпосередньо в газовому середовищі печі. Зокрема, активні форми вуглецю

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та азоту утворюються внаслідок термічної дисоціації метану, чадного газу та аміаку, що забезпечує необхідний потенціал насичення для реалізації процесу нітроцементування [15].



У процесі нітроцементації одним із ключових технологічних завдань є точне керування ступенем насичення поверхневих шарів сталі як азотом, так і вуглецем. Саме раціональне поєднання концентрацій цих елементів у приповерхневій зоні дозволяє сформувати структуру, що забезпечує оптимальний баланс між твердістю, зносостійкістю та експлуатаційною надійністю деталей.

Для отримання нітроцементованого шару високої якості необхідною умовою є підтримання стабільної та контрольованої атмосфери в робочому просторі печі. Будь-які коливання складу газового середовища безпосередньо відбиваються на інтенсивності дифузійних процесів і можуть призвести до нерівномірності властивостей зміцненого шару. Оскільки під час нітроцементації основними компонентами пічної атмосфери є газ, аміак, а також повітря, що дозовано вводиться з метою коригування складу середовища, виникає необхідність у постійному та точному контролі параметрів насичення.

Регулювання активності насичувальної атмосфери здійснюють шляхом контролю вуглецевого потенціалу, який є інтегральною характеристикою здатності газового середовища передавати вуглець поверхні сталі. Встановлення та

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підтримання заданого рівня вуглецевого потенціалу дає можливість управляти інтенсивністю карбюризації та узгоджувати її з процесом азотування, забезпечуючи сталість складу та властивостей нітроцементованого шару по всій поверхні деталі. Саме такий підхід дозволяє досягти відтворюваних результатів і гарантувати високу якість поверхневого зміцнення в умовах промислового виробництва [15, 16].

Одночасне насичення поверхні сталі вуглецем та азотом

За наявності градієнта концентрацій азоту та вуглецю між поверхнею металу і його приповерхневими зонами в матеріалі запускаються дифузійні процеси, що призводять до насичення поверхневих шарів сталі. Атоми вуглецю й азоту, проникаючи в феритно-аустенітну матрицю, займають міжвузлові позиції та формують твердий розчин упровадження. Це стає можливим завдяки тому, що ефективні атомні радіуси вуглецю й азоту не перевищують приблизно 0,59 від атомного радіуса заліза, що забезпечує високу сумісність цих елементів із кристалічною ґраткою Fe.

Механізм одночасного дифузійного насичення сталі вуглецем і азотом принципово відрізняється від процесів класичної цементації або азотування. Така відмінність пояснюється зміною кінетичних і термодинамічних умов дифузії: варіацією коефіцієнтів дифузії обох елементів в аустеніті, зміною енергії активації атомів вуглецю та азоту в залізі, а також трансформацією швидкості насичення приповерхневих шарів залежно від співвідношення концентрацій цих компонентів у насичувальному середовищі [15, 17].

Зменшення концентрації азоту зі зростанням вмісту вуглецю в нітроцементованому шарі може бути пояснене електронною взаємодією

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						25
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

атомів із металевою матрицею. У процесі введення вуглецю та азоту в ґратку заліза ці атоми передають частину своїх валентних електронів незаповненій металевій зоні провідності, переходячи в квазіметалевий стан. Унаслідок цього різко зростає їхня рухливість у кристалічній ґратці. Однак зі збільшенням кількості адсорбованих атомів домінуючого елемента електронна оболонка металу поступово насичується, що обмежує можливість подальшого розчинення атомів другого компонента.

Процес нітроцементації умовно можна розділити на два послідовні етапи [18]. На першому етапі відбувається інтенсивне насичення поверхні сталі вуглецем і азотом у випадку низьковуглецевих сталей або ж переважне азотування із частковим зневуглецюванням за умов зниженої активності карбюризуючого середовища, що визначається його вуглецевим потенціалом. Другий етап характеризується денацією азотованого шару, під час якої атоми азоту поступово переходять із твердого розчину в газову фазу.

Процес денітрифікації обумовлений впливом вуглецю, який підвищує термодинамічну активність азоту в твердому розчині. За таких умов азот витісняється з аустенітної матриці та вивільняється з дифузійного шару, що змінює співвідношення концентрацій елементів по товщині зони насичення.

Одночасна дифузія вуглецю й азоту в сталі супроводжується зростанням швидкості проникнення вуглецю в матеріал. Це пояснюється тим, що зі збільшенням концентрації вуглецю в аустеніті зростає його дифузійний коефіцієнт, аналогічно до поведінки цього елемента при класичній карбюризації [17, 18]. У типових умовах нітроцементації вміст вуглецю в поверхневому шарі досягає близько 1 %, тоді як середня концентрація азоту становить приблизно 0,3 %. Такий розподіл зумовлює формування більш високого концентраційного градієнта саме для вуглецю, внаслідок чого швидкість його дифузії перевищує швидкість міграції азоту [15].

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Температура процесу

Структурні характеристики та товщина нітроцементованого шару, а разом з ними й комплекс його механічних та експлуатаційних властивостей, формуються під дією низки технологічних чинників. До таких належать температура насичення, тривалість витримки та хімічний склад робочої атмосфери, зокрема співвідношення між вуглецевим і азотним потенціалами, що змінюється впродовж усього циклу обробки. Попри вагомість кожного з цих параметрів, саме температура відіграє визначальну роль, оскільки вона контролює інтенсивність дифузії, фазові перетворення та швидкість зростання зміцненої зони.

Згідно з літературними даними, процес нітроцементзації умовно поділяють на два основні режими — низькотемпературний та високотемпературний. Високотемпературне насичення виконують у діапазоні температур вище критичної точки A_{c3} , тоді як низькотемпературне — нижче межі A_{c1} . У першому випадку інтенсифікується проникнення вуглецю, тоді як за нижчих температур переважає дифузія азоту. Окрім цих двох варіантів, у виробничій практиці застосовують і середньотемпературні режими, коли обробку здійснюють між A_{c1} та A_{c3} , що дозволяє комбінувати ефекти насичення обох елементів [17].

Якщо розглядати процеси проникнення азоту та вуглецю окремо, можна дійти висновку, що з підвищенням температури істотно збільшується розчинність вуглецю в аустеніті. Це підсилює його дифузійну рухливість та сприяє активному зростанню дифузійного шару, який формується внаслідок виділення цементиту. Останній містить 6,67 % вуглецю та залишається структурно стабільним до температур, наближених до плавлення сталі.

Щодо азоту, то за незмінних парціальних тисків аміаку та водню його

					<i>KPM MTBA 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надходження до поверхні зі зростанням температури стає інтенсивнішим, ніж його подальше проникнення у глибину шару. Унаслідок цього фактичний рівень азотного насичення знижується. Додатково на цей процес впливає те, що нітриди заліза та азотовмісні аустеніти втрачають стабільність при температурах понад 973 К, що різко обмежує можливості підвищення температури без зміни механізму фазоутворення [18].

Спільне насичення сталі вуглецем і азотом відбувається відповідно до закономірностей їх роздільної дифузії, тому температурний режим та газовий склад печі визначають кінетичні параметри процесу. Найчастіше нітроцементацию проводять за температур 1103–1123 К, оскільки в цьому діапазоні забезпечується оптимальний баланс між швидкістю зростання шару та стабільністю базового металу. Доведено, що максимальна швидкість формування дифузійного шару досягається поблизу 1103 К. Водночас перевищення температури 1173 К може спричинити перегрів серцевини та небажані зміни її структури.

Важливим наслідком зміни температури є перетворення структури не лише самого шару, а й металеві основи. Якщо процес відбувається при температурах, що перевищують Ас3, серцевина деталі, залежно від масивності перерізу та режиму охолодження, може набувати трооститної чи сорбітної структури. Якщо гартування є неповним, у серцевині залишаються ділянки фериту. Перехідна зона між серцевиною та дифузійним шаром формується як трооститно-мартенситна суміш. Усі ці структурні зміни, разом з глибиною шару та його фазовим складом, обумовлюють зміну межі міцності, пластичності, корозійної та зносостійкої поведінки виробу. Зокрема, при підвищенні температури спостерігається збільшення межі витривалості, що пов'язано з більш широкою зоною розподілу залишкових стискуючих напружень.

					<i>KPM MТBA 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Температурний фактор істотно впливає також на твердість нітроцементованого шару. Узагальнені результати промислової практики свідчать, що режим із температурою 1123–1133 К забезпечує формування оптимальної мікроструктури — збалансованого співвідношення мартенситу й залишкового аустеніту, що гарантує високі механічні характеристики. При цьому кількість залишкового аустеніту визначається складом газової атмосфери, умовами гартування та температурою насичення. Зниження температури спричиняє падіння концентрації вуглецю, що призводить до пересичення поверхневого шару та утворення різко окресленої, але крихкої дифузійної зони. Надмірне підвищення температури, навпаки, стимулює вуглецеву дифузію та витіснення азоту, внаслідок чого зменшується статична і динамічна міцність, а також зносостійкість сформованих шарів.

Основні фази в системі Fe-CN

Основною метою процесу нітроцементзації є суттєве підвищення експлуатаційних характеристик сталевих деталей, зокрема таких показників, як твердість, опір зношуванню [18], жаротривкість та здатність матеріалу витримувати тривалий механічний контакт без втрати працездатності. Ефективність цього методу безпосередньо визначається мікроструктурою поверхневого шару, а саме просторовим розподілом атомів азоту й вуглецю по глибині, співвідношенням між їх концентраціями та фазовими складовими, що утворюються в процесі насичення. Сукупність цих параметрів формує унікальний комплекс властивостей, які і визначають переваги нітроцементзації над іншими видами хіміко-термічної обробки.

Щоб з'ясувати, які саме фази можуть виникати в системі Fe–N–C за різних концентрацій азоту та вуглецю, доцільно звернутися до фазових діаграм. У роботі [19] наведено ізотермічні перерізи потрійної системи при

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						29
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

двох характерних температурах — 773 К та 973 К (рис. 1.1 та 1.2). Аналіз цих діаграм дозволяє визначити закономірності формування фазових структур у поверхневому шарі за різних режимів нітроцементатації, а також прогнозувати зміну властивостей у залежності від зміни концентраційних параметрів.

У проміжку температур від 773 до 973 К у системі реалізується утворення карбонітридних фаз, що за своєю кристалічною будовою є аналогами нітридів, притаманних бінарній системі Fe–N. За вищих температур, характерних для нітроцементатації (973–1173 К), формування структурного шару відбувається за механізмами, подібними до тих, що спостерігаються в процесі цементатації. У цей інтервал температура забезпечує інтенсивну дифузію обох елементів, унаслідок чого формується шар зі схожим фазовим складом і з подібними експлуатаційними характеристиками [5].

Таким чином, особливості фазоутворення під час нітроцементатації визначаються як температурним режимом, так і співвідношенням азоту та вуглецю, а аналіз діаграми Fe–N–C дозволяє науково обґрунтовано прогнозувати властивості дифузійного шару та коригувати параметри процесу для досягнення оптимальних результатів.

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

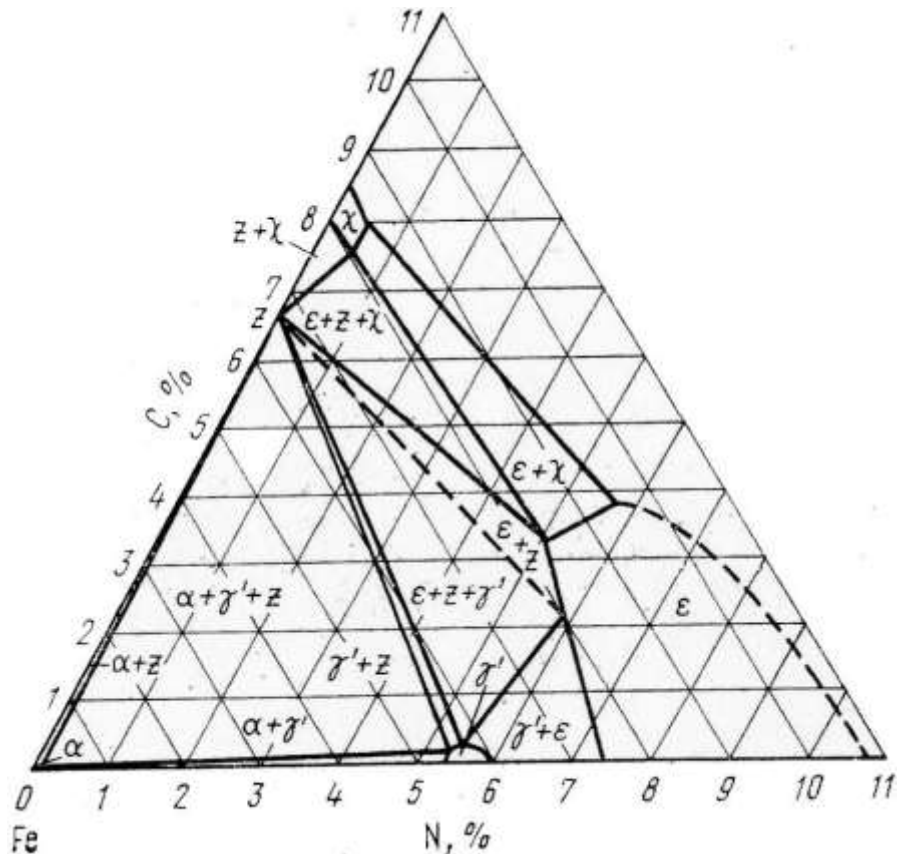


Рис. 1.1 Діаграма системи Fe-NC при 773 К [19]

Щоб коректно інтерпретувати фази, позначені на відповідних схемах та діаграмах, необхідно спершу розглянути фундаментальні типи нітридів заліза — γ' , ϵ та ξ , які формуються в процесі насичення заліза азотом. Їхня поява та стабільність описані діаграмою стану системи Fe–N, що детально наведена у працях [18, 20].

Фаза γ' (нітрид Fe_4N) має гранецентровану кубічну кристалічну ґратку, у якій атоми заліза займають характерні вузли, утворюючи впорядковану просторову структуру. Атоми азоту при цьому не хаотично розташовуються між атомами металу, а вибірково займають приблизно одну четверту частину октаедричних міжвузлових порожнин, що створює значне напруження в ґратці та впливає на дифузійну поведінку цього нітриду. γ' -фаза існує лише в обмеженому

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ

Арк.

31

температурному інтервалі навколо точки A_1 та відповідає вмісту азоту приблизно від 5,3 % до 5,75 %. Межі її стабільності доволі чіткі: при досягненні температури близько 943 К γ' -нітрид перестає бути термодинамічно стійким і зазнає трансформації в інші нітридні фази, які хоча й залишаються стабільними за температурами нижче цього порогу, однак характеризуються вищою концентрацією азоту й іншим розподілом атомів у кристалічній решітці.

Таким чином, γ' -нітрид Fe_4N є однією з ключових фаз, що формуються у системі Fe–N за умов низькотемпературного насичення, і його структура, обмежений температурний діапазон існування та поведінка при нагріванні мають важливе значення для аналізу фазових перетворень, які відбуваються під час нітроцементації та інших процесів дифузійного насичення сталі.

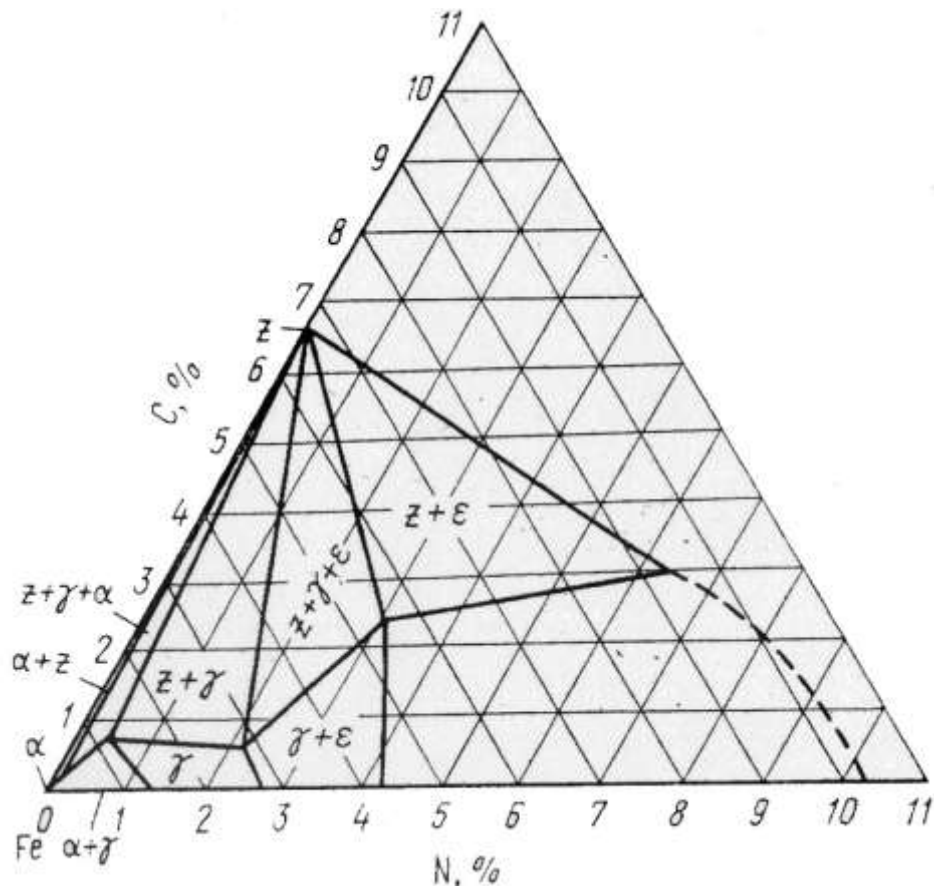


Рис. 1.2 – Діаграма системи Fe-NC при 973 К [19]

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ

Арк.

32

У структурі нітридних фаз атоми заліза формують гексагональну кристалічну решітку, у якій азот розташовується в проміжних міжвузлових позиціях. Такий тип упорядкування зумовлює специфічні властивості цих нітридів, зокрема широке варіювання вмісту азоту — від приблизно 4,35 до 11 мас. %. Зі зростанням температури відбувається зменшення розчинності вуглецю у фазі ϵ : наприклад, за 773 К вона становить близько 4,1 %, тоді як за 973 К знижується до 3,0 % [19]. Це свідчить про те, що підвищення температури сприяє витісненню атомів вуглецю зі структури ϵ -фази, змінюючи її стабільність та фазовий склад.

Орторомбічна ξ -фаза існує у надзвичайно вузькому інтервалі концентрації азоту — орієнтовно від 11,07 до 11,18 мас. %. Такі нітриди залишаються стійкими лише до температури близько 723 К. За подальшого нагрівання, особливо в атмосфері аміаку, ξ -фаза розкладається, поступаючись місцем іншим фазам. Дослідження діаграм Fe–N і Fe–C демонструють, що під час нітроцементації розчинність вуглецю в γ -залізі істотно підвищується — від 0,3 % за 996 К до 2,14 % за 1413 К. Водночас здатність γ -фази розчиняти азот зменшується: від 2,75 % при 923 К до 2,5 % при 1023 К. Така протилежна поведінка обох елементів суттєво впливає на характер формування зміцненого шару.

Розчинність азоту в аустеніті в температурному інтервалі нітроцементації залишається загалом вищою, ніж у вуглецю. Проте практичні дані азотування свідчать, що при температурах понад 973 К концентрація азоту у сформованому шарі зменшується і рідко перевищує 0,7–0,8 мас. %, оскільки високі температури дестабілізують γ -аустеніт та ϵ -фазу, сприяючи їх перетворенню на інші фази.

У потрійній системі Fe–N–C за таких умов відбувається утворення карбонітридів — сполук, які є аналогами нітридів, але частина азоту в їхній решітці заміщена вуглецем. У режимі нітрокарбуризації гексагональні

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

карбонітриди виявляються термодинамічно стійкішими порівняно з іншими сполуками. Їхній склад може змінюватися від $Fe_2(NC)_2$ до $Fe_3(NC)_2$, а концентрація азоту іноді досягає 39 %. Максимальне атомне співвідношення C:N в ϵ -карбонітриді становить 1,2–1,25, що характеризує межу насичення структури вуглецем.

Орторомбичний карбонітрид ξ , будучи ізоморфним до $\xi-Fe_2N$, здатний розчиняти більшу частку вуглецю, зберігаючи аналогічні особливості кристалічного упорядкування. γ' -карбонітрид, у свою чергу, утримує лише обмежену кількість вуглецю в інтервалі 773–973 К [19]. За подальшого насичення вуглецем γ' -фаза трансформується в гексагональний ϵ -карбонітрид. Невеликі зміни параметрів кристалічної решітки, зафіксовані експериментально, також свідчать про незначну розчинність вуглецю в цих сполуках [20].

Ізотермічний переріз діаграми Fe–N–C при 773 К демонструє наявність χ -карбіду (Fe_7C_3 або $Fe_{20}C_9$). За цієї температури вміст розчиненого азоту в χ -карбіді становить приблизно 0,5 мас. % [19], що підтверджує здатність цього карбіду взаємодіяти з азотом за певних термодинамічних умов.

У діапазоні температур 1073–1133 К, характерних для нітроцементациї, на поверхні сталі формується карбонітридна фаза зі структурою, подібною до цементиту Fe_3C . Така ґратка дозволяє азоту проникати не лише на межі зерен, а й у центральні позиції комірок, тоді як вуглець здатний займати вільні міжзернові проміжки. Взаємодія цих дифузійних механізмів визначає склад та властивості зміцненого шару.

За 838 К процес фазового перетворення відповідає реакції, поданій формулою 1.4:



					<i>KPM MTBA 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

і при температурі 848 К:



Перейдемо до аналізу того, як вуглець впливає на рівноважні процеси в системі Fe–C та яким чином його присутність позначається на структурних перетвореннях сталі [20]. У випадку, коли в поверхневій шарі сталі одночасно дифундують азот і вуглець, відбувається помітне зниження температури, за якої аустеніт починає перекристалізовуватися. Іншими словами, область існування γ -фази зміщується у бік менших концентрацій вуглецю, причому ступінь цього зсуву зростає в міру того, як лінія A_{c3} на діаграмі Fe–C опускається до нижчих значень температур. Такий механізм прямо пов'язаний зі зміною термодинамічної стабільності γ -фази під впливом одночасної дії двох інтерстиційних елементів.

Окрім цього, як атоми вуглецю, так і атоми азоту мають здатність підвищувати температуру рекристалізації δ -фериту — високотемпературної об'ємно-центрованої кубічної модифікації заліза. Це явище пояснюється тим, що присутність інтерстиційних атомів суттєво ускладнює переміщення дислокацій у кристалічній решітці, що, своєю чергою, підвищує енергетичний бар'єр для переходу до нового, рекристалізованого стану. Вплив азоту та вуглецю в цьому разі є сумарним і проявляється особливо виразно за високих температур, коли обидва елементи активно взаємодіють із ґраткою фериту.

Як наслідок взаємодії цих процесів, у режимі нітрокарбонізації за температур, нижчих за критичну точку A_3 , формується дифузійний шар складної будови. У цьому шарі структура змінюється поступово в напрямку від поверхні до серцевини виробу. На поверхні зберігається область,

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збільшено насичена вуглецем та азотом, тоді як у глибинних ділянках концентрація інтерстиційних елементів поступово зменшується, що забезпечує перехід від модифікованих структур до вихідної фази металу. Такий градієнтний характер будови є характерною ознакою нітрокарбонізованих шарів і визначає їхні механічні властивості, зокрема зміцнення, стійкість до деформацій та здатність поглинати ударні навантаження.

Структура і властивості поверхневий шару сталі після нітроцементация, що виконується різними режимами

Мікроструктура поверхневого шару, сформованого внаслідок нітроцементация, відіграє ключову роль у визначенні міцнісних характеристик та зносостійкості сталі. Одним із важливих закономірностей є те, що збільшення концентрації азоту за умов підвищеного вмісту вуглецю спричиняє суттєве скорочення частки трооститної складової. Це явище пояснюється тим, що азот, легуючи твердий розчин вуглецю в залізі, впливає на кінетику фазових перетворень: він знижує критичну швидкість гартування, стабілізує процеси відпуску та певною мірою нейтралізує негативні наслідки зменшення карбонового потенціалу шару. Наприклад, при вмісті азоту на рівні 0,49 % кількість трооститу зменшується настільки, що спостерігається зростання твердості приблизно на 12 % порівняно зі структурою з нижчим вмістом азоту [18].

Межа витривалості сталі має чітку кореляцію з товщиною нітроцементованого шару: чим більша товщина дифузійної зони, тим більший опір матеріалу до втомного руйнування. Це зумовлено тим, що зміцнений шар ефективно перерозподіляє напруження, зменшуючи ризик зародження та

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						36
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

поширення мікротріщин.

Після нітроцементатації з наступним гартуванням структура сталі стає суттєво дрібнозернистішою, ніж після традиційної цементатації. Така дрібнодисперсність позитивно впливає на опір крихкому руйнуванню і додатково збільшує межу витривалості. Сформований нітроцементований шар вирізняється високою зносостійкістю та стійкістю до корозійних впливів. Важливою перевагою є й значне підвищення прогартовуваності, що зумовлено азотним легуванням аустеніту. Застосування ступінчастого гартування дозволяє зменшити деформації деталі та мінімізувати необхідність у подальшому шліфуванні.

Зростання міцності сталі після нітроцементатації безпосередньо пов'язане з ефектом, який азот справляє на фазові перетворення й структуру матеріалу. Чим нижча температура проведення нітроцементатації, тим більш вираженим стає вплив азоту, оскільки він активніше стабілізує дрібнодисперсну структуру. У разі повільного охолодження мікроструктура нітроцементованого шару може містити окремі карбонітридні включення або тонку поверхневу суцільну кірку, що додатково підвищує твердість і зносостійкість.

Найкращим варіантом структури, який забезпечує поєднання високої міцності, стійкості до зношування та достатньої пластичності, є дрібно- або середньозернистий мартенсит у поєднанні із залишковим аустенітом у межах 20–40 %. Саме така структура формується після гартування з наступною низькотемпературною релаксацією й вважається оптимальною для деталей, що працюють у складних експлуатаційних умовах.

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

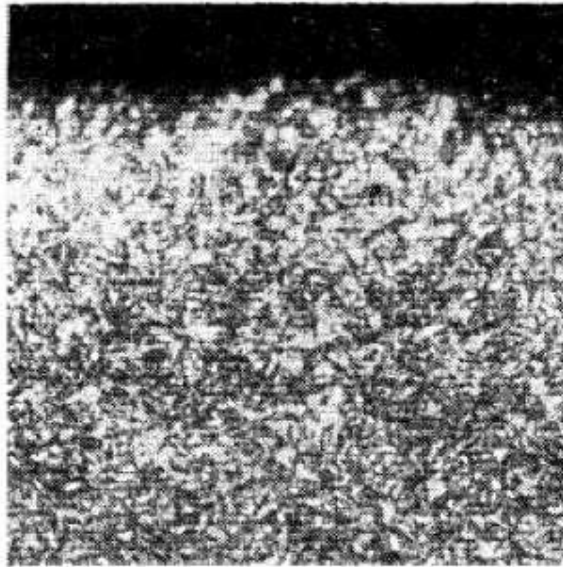


Рис. 1.3 Мікроструктура шару сталі після нітроцементації, гартування та низького відпуску [5]

Зростання об'ємної частки залишкового аустеніту у нітроцементованому шарі істотно впливає на його експлуатаційні характеристики: збільшення цієї фази призводить до помітного зниження контактної міцності та втомної довговічності матеріалу. Формування залишкового аустеніту залежить від комплексу факторів — температури проведення нітроцементації, легувального складу сталі, а також загальної кількості азоту й вуглецю, що поглинаються поверхневими шарами. Особливо сильний вплив має азот: його присутність у твердому розчині здатна різко підвищувати об'ємну частку залишкового аустеніту, навіть за порівняно невеликих концентрацій.

У вуглецевих сталях зміна концентрації вуглецю прямо визначає характер формування мартенситних структур. Зменшення його вмісту сприяє утворенню низьковуглецевого мартенситу, який часто супроводжується домішками трооститу. Протилежна ситуація спостерігається за підвищеного

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вмісту вуглецю: збільшується кількість аустеніту, у структурі виникає карбонітридна фаза, яка поглинає частину азоту й вуглецю, тим самим зменшуючи стабільність залишкового аустеніту. У таких умовах на поверхні формується своєрідна трооститна сітка. Карбонітриди, що утворюються в шарі, хоч і присутні в незначних об'ємах, знижують його ударну в'язкість, спричиняючи схильність до крихкого руйнування. Якщо ж концентрація азоту падає нижче 0,1 %, особливо у випадку внутрішнього окиснення, то твердий розчин збіднюється легувальними елементами, і в структурі починають проявлятися продукти немартенситних перетворень аустеніту.

Важливим фактором, що визначає експлуатаційні властивості нітроцементованого шару, є явище денітрифікації. Нітроген, який входить до складу сталі у вигляді твердого розчину чи нітридних сполук, має здатність інтенсивно випаровуватися або дифундувати назовні за нагрівання. На початковому етапі нітроцементзації поверхня насичується і вуглецем, і азотом, однак у другій фазі процесу дифузія азоту практично припиняється, а його концентрація в приповерхневій області починає зменшуватися навіть за незмінного складу газового середовища. Ступінь денітрифікації зростає разом зі збільшенням температури й часу витримки. У разі багатократного циклу нагрівання та охолодження (наприклад, при гартуванні) втрати азоту можуть сягати 90 %. Саме з цієї причини високі механічні властивості отримують лише тоді, коли гартування проводять безпосередньо після завершення нітроцементзації, не допускаючи тривалої витримки.

Структура нітроцементованого шару має складний і мінливий характер, що визначається температурою та тривалістю обробки. За температури близько 973 К спостерігається формування двох виразно різних зон. У поверхневій області переважає суміш ϵ -карбонітридів з певною кількістю цементиту, де частина атомів вуглецю заміщена азотом. Друга зона являє

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

собою продукти розкладання азотистого аустеніту. Коли температура підвищується до 1073–1103 К, товщина першої зони зменшується, а загальна товщина дифузійного шару різко зростає. За 1123 К верхня зона, багата на карбонітриди, практично зникає, і структура набуває вигляду темних голок мартенситу на світлому тлі залишкового аустеніту.

Систематизувавши дані досліджень, можна зробити висновок, що фазовий склад і властивості нітроцементованого шару формуються не лише через температурні режими, тривалість процесу та хімічний склад газової атмосфери, а й значною мірою залежать від подальшої термічної обробки деталі та легувального складу сталі. У діапазоні 773–973 К переважає утворення карбідів, ізоморфних нітридам системи Fe–N, тоді як за температур 973–1173 К структура визначається закономірностями діаграми Fe–C, у якій основними карбідами виступають фази Fe₃C та Fe₇C₃. Обидві ці сполуки здатні розчиняти азот та утворювати відповідні карбонітриди Fe₃(CN)₂ і Fe₇(CN)₃. У залежності від вмісту та співвідношення вуглецю й азоту поверхневий шар може містити суміш фериту, перліту, залишкового аустеніту та мартенситу з розчиненим азотом у ґратці. Частка залишкового аустеніту безпосередньо визначається кількістю азоту, що розчинений у твердому розчині та карбонітридних фазах.

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						40
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2 ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Зразки та їх підготовка

Вихідним матеріалом для виготовлення лабораторного зразка слугував циліндричний стрижень зі сталі 20 довжиною 100 мм та діаметром 10 мм. Щоб забезпечити можливість подальшого детального дослідження поверхневого шару, на плоскопаралельному верстаті були сформовані дві паралельні базові площини. Після завершення процесу нітроцементації стрижень розрізали на сегменти, які піддавали подальшому шліфуванню та поліруванню до отримання придатного для металографічного аналізу зразка з рівномірно підготовленою поверхнею.

Процес нітроцементації проводили у вертикальній шахтній печі типу «Ц-60». Перед завантаженням зразків до печі необхідно було виконати ретельну підготовку поверхні: вона має бути абсолютно чистою, знежиреною та позбавленою будь-яких забруднень, мастильних залишків чи окалини. Будь-які домішки, зокрема продукти згоряння олив, можуть істотно погіршувати якість майбутнього дифузійного шару та спричиняти нерівномірність насичення вуглецем і азотом [17].

Однією з ключових умов стабільного протікання процесу газової нітроцементації є повна герметичність робочого простору шахтної печі. Цей параметр визначається станом муфеля, ущільненнями між ним та кришкою, а також справністю сальникових прокладок вентилятора. У промислових умовах регулярний контроль муфеля ускладнений, оскільки його виймання з печі потребує повної зупинки обладнання, тому детальний огляд проводять лише за появи ознак порушення технологічного режиму або приблизно раз на тиждень. Ущільнення кришки та вала вентилятора повинні перевірятися щоразу перед запуском процесу. Особлива увага приділяється затвору в

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

крищі: його герметичність визначає не тільки якість насичення, а й безпеку оператора. Якщо система витяжної вентиляції працює коректно, допускається використання піщаного затвора, який має бути сухим, дрібним і ретельно просіяним.

Перевірку герметичності здійснюють за допомогою відкритого полум'я пальника: у місцях витоку газу полум'я спалахує. Проте слід враховувати, що цей метод не фіксує зони підсосу повітря всередину муфеля, які є особливо небезпечними. Найчастіше повітря потрапляє через сальник вентилятора, тому ця ділянка підлягає постійному контролю.

Перед початком кожного циклу нітроцементзації перевіряється стан трубопроводу подачі газу. Під час усього процесу труба має залишатися охолодженою, щоб уникнути локального перегріву чи порушення подачі карбюратора. Тривалість розігріву печі до робочої температури становить 5–7 годин, залежно від її об'єму. Температурний режим фіксується та регулюється за допомогою електронного потенціометра з функцією самозапису, а додатковий контроль здійснюють гальванометром і термопарою, які перевіряють щонайменше раз на добу.

Зразки розташовували у просторому кошику, виготовленому з дротяної сітки, що забезпечувало безперешкодну циркуляцію робочої газової атмосфери. Кошик встановлювали на вантажну платформу, що переміщувалася в муфель. Після завершення всіх підготовчих операцій зразки вважали готовими до високотемпературної обробки (ВТО).

Завантаження здійснювали після того, як температура в усіх зонах печі досягала 1123 К. Після внесення холодних зразків температура неминуче падала на 373–473 К, що створювало ризик окиснення поверхні. Щоб якнайшвидше видалити повітря з печі, одразу запускали нагрівачі, вентилятор та починали подачу карбюратора. Через певний час газу, що виходили з

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відвідної труби, запалювали й повторно перевіряли герметичність. Полум'я пальника слугувало індикатором правильності процесу: у нормальному режимі воно має бути світло-жовтим, заввишки 10–20 см. Його нестабільність чи осідання може свідчити про надмірну подачу карбюризатора або погіршену циркуляцію газів.

Основний процес нітроцементації проводили за температури 1123 ± 10 К [4,18]. Для контролю глибини дифузійного шару застосовували спеціальні контрольні зразки-свідки, виготовлені з тієї ж сталі, що й основний зразок. Їх підвішували у верхній частині печі через герметичний отвір у кришці. Перший зразок вилучали за 30–40 хвилин до планового завершення процесу, другий — дещо пізніше, з урахуванням результатів аналізу першого. Товщина шару, твердість поверхні та серцевини, а також мікроструктура повинні відповідати вимогам ДСТУ 9074:2021.

Нагрівання до температури 1123 ± 10 К тривало протягом 30–60 хвилин у насичувальному середовищі. Після стабілізації температури проводили активне насичення вуглецем та азотом протягом 100–180 хвилин, причому в останній третині подачу аміаку збільшували. Потік газів регулювали так, щоб концентрація CO_2 у печі становила 0,3–0,4 %, що дозволяло керувати вуглецевим потенціалом атмосфери. В основі процесу лежали реакції дисоціації метану, оксиду вуглецю та аміаку, у результаті яких утворювалися атомарні С і N.

Після досягнення необхідної глибини дифузійного шару припиняли подачу карбюризатора, повністю відкривали газовідвідний вентиль і чекали 5–10 хвилин, доки згасне факел. Тільки після цього дозволялося відкрити кришку печі та розвантажити нагріті деталі. Подальше охолодження проводили в масляній ванні з вібрацією протягом 15 хвилин до досягнення температури близько 373 К. Потім зразки промивали, контролювали якість та піддавали

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відпуску: нагрівання до 453–473 К, витримка 60–90 хвилин та охолодження на повітрі.

Схему всього процесу нітроцементатації представлено на рисунку 2.1.

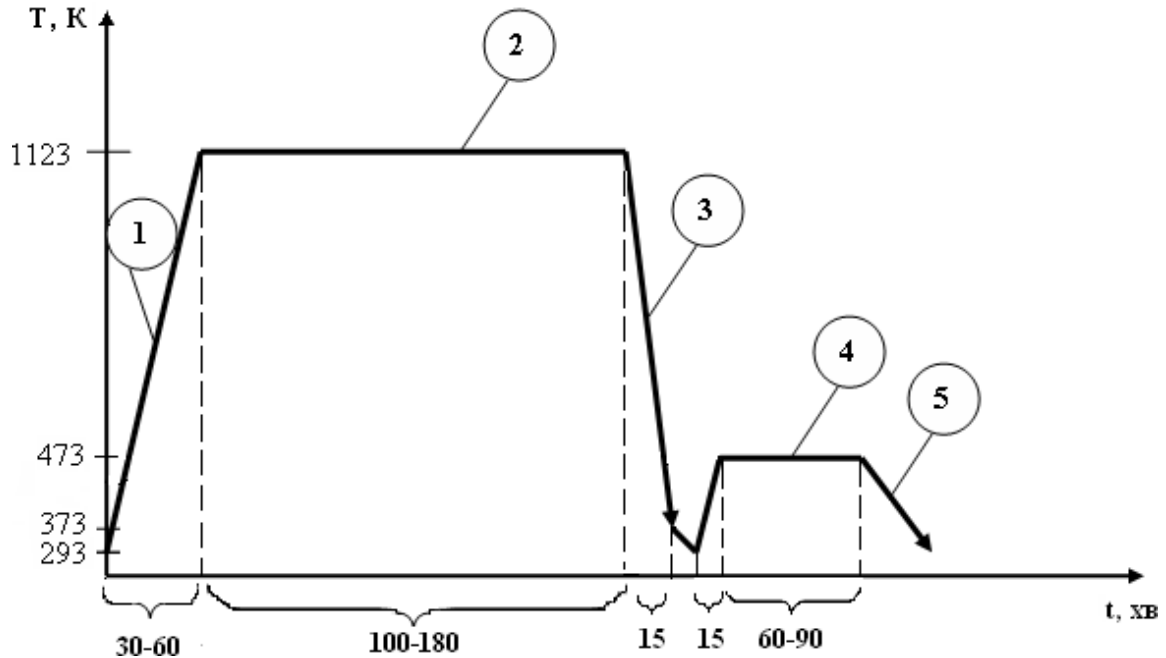


Рис. 2.1 – Нітрокарбонізація зразків зі сталі 20 зразків.

Технологічний цикл нітроцементатації включає послідовність окремих операцій, кожна з яких забезпечує формування необхідної структури зміцненого шару та досягнення заданих експлуатаційних властивостей матеріалу.

Першим етапом є підйом температури зразків з кімнатного рівня (приблизно 293 К) до робочої температури 1123 К у середовищі насичувального газу. Цей процес триває орієнтовно 30–60 хвилин і слугує для повного видалення залишкового повітря з міжповерхневих зон, активації поверхні та підготовки металу до подальшої інтенсивної дифузії атомів вуглецю та азоту.

Другий етап передбачає активне насичення поверхневого шару сталі компонентами газової атмосфери, головним чином — продуктами дисоціації

карбюризатора та аміаку. Насичення відбувається за стабілізованої температури 1123 К упродовж 100–180 хвилин. Саме на цьому етапі формуються карбонітридні структури, відбувається перерозподіл інтерстиційних атомів та закладається майбутня глибина дифузійного шару.

Третім етапом є гартування, яке проводять шляхом швидкого перенесення зразків із печі до масляної ванни. Охолодження зі швидкістю, достатньою для формування мартенситної структури, відбувається з 1123 К до приблизно 373 К, а тривалість перебування в олії становить близько 15 хвилин. Завдяки цьому шар, насичений азотом і вуглецем, набуває високої твердості та структурної стабільності.

На четвертому етапі проводять відпуск, метою якого є зняття внутрішніх напружень та стабілізація мікроструктури. Зразки повторно нагрівають від 293 К до 473 К протягом приблизно 15 хвилин, після чого витримують у цьому температурному режимі 60–90 хвилин. Такий режим забезпечує оптимальне співвідношення між твердістю та в'язкістю матеріалу.

Завершальним, п'ятим етапом є охолодження на повітрі до кімнатної температури. Повільний відвід тепла забезпечує рівномірне формування остаточної структури та мінімізує ризик термічних деформацій.

2.1 Металографічний аналіз

Металографічні дослідження являють собою комплекс методик, призначених для детального аналізу внутрішньої будови металів, включно з їхньою макро- та мікроструктурою [19]. Цей напрям досліджень дає змогу оцінювати якість металу, виявляти дефекти, а також встановлювати причинно-

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наслідкові зв'язки між технологією обробки та отриманими властивостями матеріалу.

Для аналізу структури застосовується метод металографічної оцінки, який поділяють на макроаналіз та мікроаналіз. Під час макроаналізу поверхню підготовленого шліфа вивчають неозброєним оком або з мінімальним збільшенням, що дає можливість розпізнати крупні дефекти, неоднорідності, макросегрегацію та загальний характер структури. Мікроаналіз, навпаки, проводиться із застосуванням мікроскопічної техніки та дозволяє визначати форму й розмір зерен, частку окремих фаз, кількість і типи неметалевих включень, а також виявляти наявність пор чи мікротріщин [21, 22].

Форма зразків для металографічного аналізу найчастіше є циліндричною або прямокутною, проте конкретне місце вирізання визначається завданням дослідження. Якщо зразок має малий розмір або незручну конфігурацію, що унеможлиблює якісну обробку вручну, його фіксують у спеціальному блоці: відливають в епоксидній смолі або затискають між двома сталевими пластинами, використовуючи різьбові елементи [23].

Після вирізання проводиться підготовка поверхні, що складається з двох основних етапів — шліфування та полірування. Для цих операцій застосовують абразивні матеріали: алмазні суспензії та пасти, корунд, наждачний папір різних класів зернистості. У процесі шліфування поступово видаляються поверхневі шари металу різної товщини, що дозволяє послідовно зменшувати глибину поверхневих дефектів і згладжувати нерівності. Зміна зернистості абразиву здійснюється поетапно; при переході на новий абразив зразок повертають на 90°, щоб повністю усунути подряпини, залишені попередньою операцією.

Полірування виконують на тому ж верстаті, але з використанням м'яких полірувальних кругів, просочених суспензією з дрібнодисперсного абразиву.

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Якщо застосовується алмазна паста з меншим розміром зерна, зразок знову орієнтують під кутом 90°, аби досягти поверхні дзеркальної якості без видимих слідів обробки. Завершальним етапом підготовки є хімічне травлення, необхідне для проявлення мікроструктури. Як травильники використовують спиртові або водні розчини кислот; для сталей найчастіше застосовують 3% розчин азотної кислоти в етанолі [23]. Зразок або занурюють у травильник, або наносять реагент безпосередньо на поверхню шліфа. Тривалість травлення встановлюється експериментально, після чого зразок промивають і висушують.

Після виконання всіх етапів підготовки зразок придатний для металографічного аналізу. Дослідження мікроструктури та вимірювання товщини нітроцементованого шару виконують на поперечних шліфах із використанням мікроскопа. У цій роботі застосовували мікроскоп МІМ-8, а фіксацію зображень здійснювали за допомогою цифрової камери Olympus, що дозволяє отримувати високоякісні фотографії структурних елементів..

2.2 Аналіз твердості

Вимірювання твердості, або дюрометрія, є одним із базових та найбільш зручних методів оцінювання локальних механічних властивостей матеріалу. Цей підхід дозволяє визначити твердість надзвичайно малих об'ємів металу, оцінювати різницю між окремими фазовими компонентами сплаву, а також порівнювати твердість окремих ділянок у межах одного структурного елемента. Оскільки вимірювані області мають мікроскопічні розміри, навантаження, яке прикладається до індентора, є мінімальним. Саме тому метод мікротвердості є особливо ефективним під час дослідження тонких поверхневих шарів та невеликих деталей, де інші методи є малоприматними

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[23].

Одним із ключових чинників, що визначають точність результатів, є якість підготовки поверхні зразка. Навіть незначні нерівності поверхні можуть спричиняти значні похибки, оскільки різні мікроділянки чинитимуть неоднаковий опір проникненню індентора. Чим менша сила навантаження, тим вищі вимоги висуваються до рівності та чистоти поверхні. Тому перед проведенням вимірювань поверхня повинна бути не лише ретельно відшліфованою, а й відполірованою до дзеркального блиску. Додатковою умовою є горизонтальне положення досліджуваної площини, що забезпечує перпендикулярне проникнення індентора в матеріал. Важливо також, щоб протилежна сторона зразка була очищена від окалини чи інших нашарувань, які можуть деформувати зразок під час навантаження та спричинити похибки.

Для визначення мікротвердості використовують спеціальний прилад — мікротвердомір, який працює за принципом вимірювання глибини проникнення індентора під навантаженням. У методі Роквелла як індентор застосовують алмазний конус з кутом вершини 120° , навантаження на який становить 60 кгс. Після прикладання навантаження глибина проникнення індентора фіксується за допомогою індикаторної шкали, що дає змогу отримати значення твердості.

Зразок встановлюють на опорний стіл приладу та надійно фіксують гвинтом і маховиком так, щоб його поверхня щільно прилягала до індентора. Значення твердості відображається на індикаторному дисплеї, який містить дві шкали — червону (В) та чорну (С), кожна з яких поділена на 100 частин. Шкали зміщені одна відносно одної на 30 поділок, що пов'язано зі специфікою руху стрілки під час навантаження. Перед початком вимірювання шкалу індикатора за допомогою барабана та шнура встановлюють на нульове значення. Шнур натягується через ролик для забезпечення стабільності

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

показань. Після натискання кнопки запуску прилад переходить у робочий режим, і виконується визначення твердості зразка.

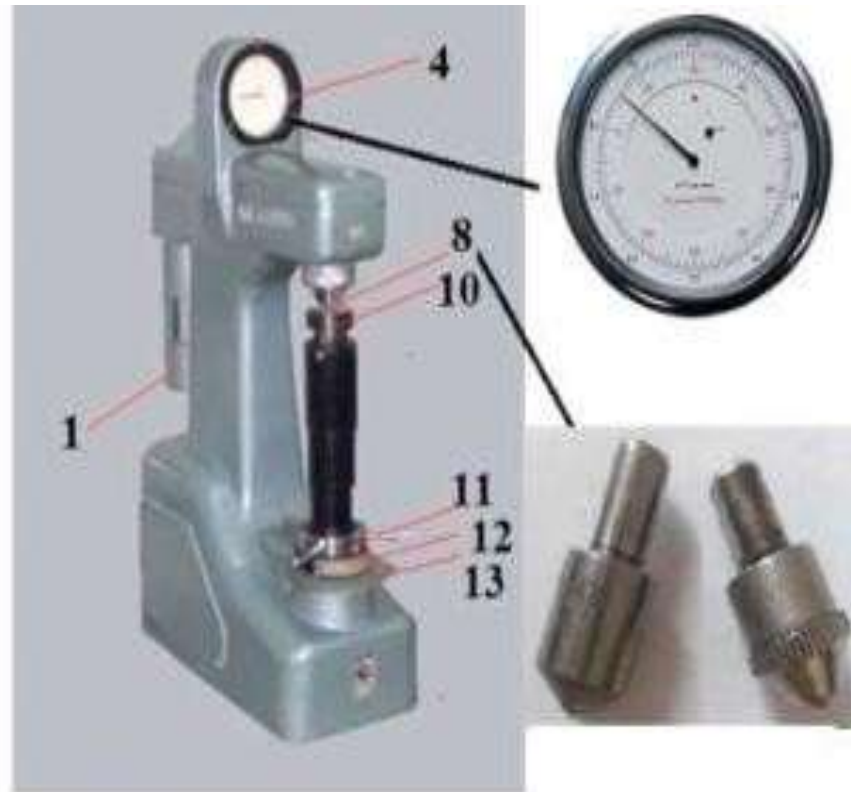


Рис. 2.1 Зовнішній вигляд твердоміра ТК-2

1 – гирі; 2 – підвіска; 3 – важіль; 4 – індикаторний пристрій; 8 – індентор;
 10 – платформа; 11 – гайка-маховик для підйому платформи;
 12 – барабан для обертання шкали; 13 – кнопка запуску [23].

Після завершення навантаження необхідно зняти прикладену силу, що діє на індентор. Для цього гайку-маховик (позиція 11) обережно повертають у напрямку, протилежному до руху годинникової стрілки. У результаті опорний стіл приладу плавно опускається, забезпечуючи безпечне відведення зразка від індентора та запобігаючи появі додаткових

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деформацій, що могли б вплинути на повторюваність результатів.

Після повного відведення навантаження стрілка індикаторної шкали фіксує остаточне значення твердості матеріалу. Це значення є прямим показом глибини проникнення індентора після прикладання стандартного навантаження. Окрім зчитування показів зі шкали, твердість може бути визначена й аналітично — за допомогою спеціальних розрахункових формул, які встановлюють співвідношення між геометрією відбитка, величиною деформації та прикладеним навантаженням. Такі формули дозволяють уточнити або перевірити точність показань індикатора та використовуються у випадках, коли потрібна підвищена точність або додаткова верифікація результатів.

$$\text{HRA, HRC} = 100 - \frac{h-h_0}{k} \quad (2.1)$$

де h – загальна глибина індентора; h_0 – попередня глибина індентора;

k – значення поділки шкали індикатора (0,002 мм для твердомірів типу Роквелла) [23].

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Властивості сталі 20 у вихідному стані

Вихідний зразок, виготовлений зі сталі марки 20, характеризується таким хімічним складом за масовою часткою елементів: вміст вуглецю становить близько 0,22 %, марганцю — 0,55 %, кремнію — 0,21 %, а сірки — приблизно 0,035 %. Зазначене співвідношення елементів є типовим для низьковуглецевих конструкційних сталей і визначає їх схильність до формування пластичної основи з помірними показниками міцності.

Результати металографічного дослідження засвідчили, що у вихідному стані після відпалу зразок має класичну феритно-перлітну мікроструктуру, що підтверджується характерною картиною, наведеною на рисунку 3.1. Така структура свідчить про рівномірний розподіл фаз та відсутність структурних дефектів, що могли б бути наслідком попередньої термічної або механічної обробки. Вимірювання мікротвердості показали, що твердість поверхневого шару вихідного зразка перебуває на рівні приблизно 22 HRC, що відповідає стану відпалу та є характерним для сталі цього класу перед проведенням хіміко-термічної обробки.

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						51
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

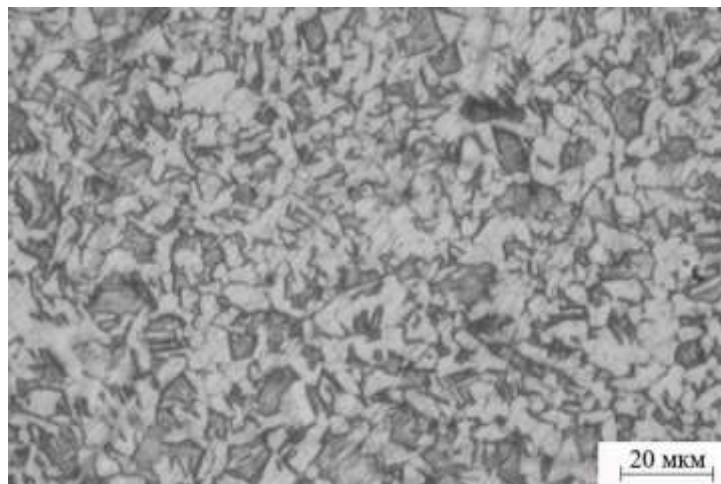


Рисунок 3.1 – Структура відпаленого вихідного зразка

3.2 Властивості поверхневих шарів зразків після нітроцементзації

У результаті проведення нітроцементзації зразків при температурі 1123 К з подальшим гартуванням у маслі та низькотемпературним відпуском за температури 473 К зафіксовано суттєві зміни як у мікроструктурі, так і в експлуатаційних властивостях поверхневого шару. Виявлені перетворення обумовлені насамперед перерозподілом хімічних елементів у приповерхневій зоні, зокрема накопиченням вуглецю та азоту, а також впливом обраних режимів термічної й хіміко-термічної обробки на фазові перетворення.

Зміна хімічного складу поверхні спричинила формування нових структурних складових, що істотно відрізняються від вихідного стану сталі, а також призвела до помітного зростання твердості та зносостійкості шару. Сукупність цих факторів відображає зміну технологічних характеристик матеріалу після комплексної обробки. Загальний вигляд сформованого нітроцементованого шару та характер його будови наочно представлено на рисунку 3.2, що дозволяє візуально оцінити результати проведеного процесу.

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Металографічні дослідження показали, що сформований після нітроцементації поверхневий шар має двофазну будову та складається з пластинчастого (голчастого) мартенситу й залишкового аустеніту [24]. Така структурна комбінація є типовою для сталей, які зазнали насичення інтерстиційними елементами з подальшим гартуванням, і суттєво визначає механічні властивості приповерхневої зони.

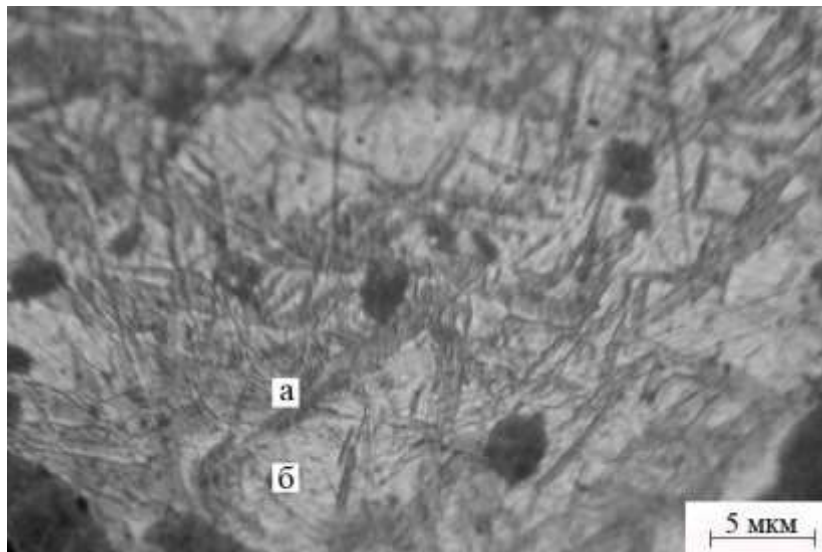


Рис. 3.2 Структура поверхневого шару зразка після обробки
а – мартенсит; б – залишковий аустеніт

Для більш детальної оцінки фазового складу було проведено кількісний аналіз вмісту залишкового аустеніту на різній відстані від поверхні — на глибинах 15, 35 і 50 мкм. Отримані результати засвідчили, що в межах поверхневого шару до глибини приблизно 50 мкм після обробки міститься близько 9–11 % залишкового аустеніту з об’ємно-центрованою кубічною кристалічною ґраткою. Це свідчить про відносно стабільний фазовий стан приповерхневої області після завершення всього циклу термічної обробки.

Вуглець і азот, дифундуючи в γ -залізо під час нітроцементації,

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

утворюють твердий розчин включення. Залишковий аустеніт, тобто та частина γ -фази, яка не зазнала мартенситного перетворення під час гартування, зберігає у своєму складі приблизно таку саму концентрацію розчинених вуглецю та азоту, яка була характерною для аустеніту за температури активного насичення 1123 К. Це означає, що фазовий склад поверхневого шару безпосередньо відображає умови високотемпературного насичення.

Аналіз також підтвердив, що за температури активного процесу (1123 К) у сталі присутня лише одна фаза — аустеніт, який являє собою твердий розчин вуглецю та азоту в γ -залізі. Відсутність інших фаз на цьому етапі пояснюється повною аустенізацією матеріалу за заданого температурного режиму.

Використовуючи графічні залежності, наведені в роботі [20], які описують зміну параметрів кристалічної ґратки аустеніту залежно від концентрації вуглецю та азоту, можна зробити висновок, що через близькі атомні радіуси цих елементів їхній вплив на параметр ґратки γ -фази є майже однаковим. Саме тому складно розділити внесок кожного з них у зміну об'єму кристалічної комірки аустеніту лише за рентгеноструктурними даними.

З огляду на це можна припустити, що поверхневий шар зразка після обробки, до глибини приблизно 50 мкм, містить практично однакову сумарну кількість вуглецю та азоту, яка становить близько 1,4–1,5 %. Теоретичні розрахунки та експериментальні оцінки вказують на незначне підвищення концентрації цих елементів у приповерхневій зоні порівняно з глибшими шарами (до 150 мкм), де середній вміст становить близько 1,3 %. Така різниця пояснюється градієнтом розподілу інтерстиційних елементів, при якому концентрація вуглецю та азоту зменшується в напрямку від поверхні до серцевини зразка.

Формування мартенситу під час гартування відбувається за класичним мартенситним механізмом, посиленням попереднім насиченням сталі вуглецем

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

і азотом. Це призводить до підвищення температури початку мартенситного перетворення [25]. Утворений мартенсит містить таку саму кількість вуглецю та азоту, яку розчиняв аустеніт, що спричиняє значні внутрішні напруження в об'ємно-центрованій кубічній ґратці та потенційне окрихчення поверхневого шару. Саме тому після гартування зразки піддавали низькотемпературному відпуску.

Аналіз результатів відпуску показав, що в процесі релаксації після гартування не відбувалося інтенсивного розпаду мартенситу з утворенням значної кількості карбонітридних сполук, або ж їх кількість була мінімальною. Карбонітриди виявлялися лише у вигляді поодиноких, дисперсно розподілених частинок у мартенситній матриці.

Таким чином, на основі комплексного металографічного та дюрOMETричного аналізу можна стверджувати, що завдяки високому сумарному вмісту вуглецю та азоту (понад 0,6 %) у мартенситі поверхневого шару нітроцементованого зразка сформована структура є термічно стабільною. Це підтверджується тим, що після відпуску за температури 473 К мартенсит не зазнав помітного розпаду. Для порівняння, у зразках сталі 20, які не проходили нітроцементацию, гартування з температури 1123 К з подальшим відпуском призводить до активного виділення карбідів і, відповідно, до погіршення механічних властивостей.

Хоча мартенсит після гартування характеризується дуже високою твердістю, він водночас є крихким через значні внутрішні напруження. Тому відпуск є обов'язковою операцією, спрямованою на зниження мікронапружень, що зазвичай супроводжується незначним зменшенням твердості. У досліджуваних зразках після відпуску зниження мікротвердості не спостерігалось (рис. 3.3), оскільки виділення дрібнодисперсних карбонітридних частинок забезпечило оптимальне поєднання твердості та

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						55
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

структурної стабільності поверхневого шару.

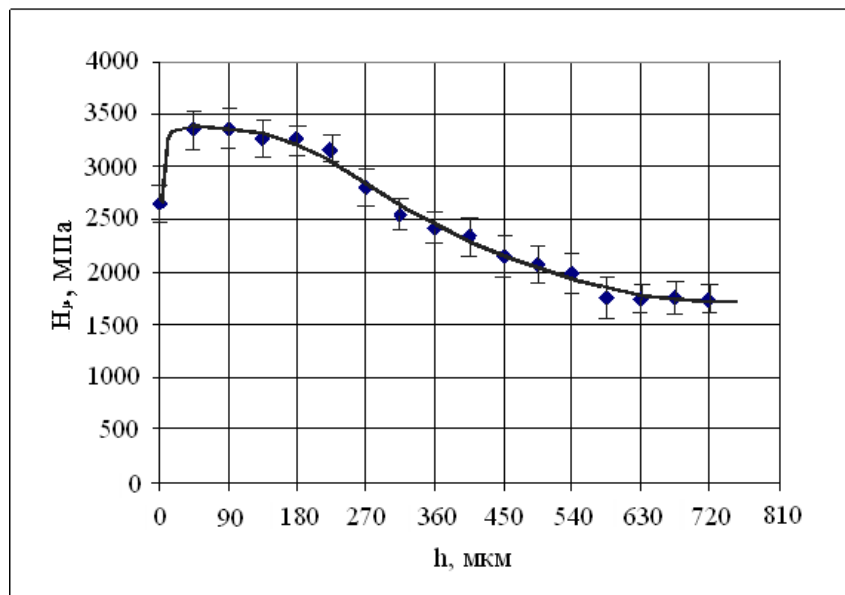


Рис. 3.3 – Розподіл мікротвердості по глибині нітроцементованого зразка

Під час аналізу зразка після проведення хіміко-термічної обробки було зафіксовано істотні зміни мікроструктури приповерхневої зони металу. Характер еволюції структури по глибині нітроцементованого шару наочно проілюстровано на рисунку 3.4. Безпосередньо біля поверхні спостерігається висока концентрація мартенситної складової, а також помітна присутність залишкового аустеніту, який на мікрофотографіях проявляється у вигляді світлих ділянок.

У міру віддалення від поверхні співвідношення структурних складових поступово змінюється: площа, зайнята темними ділянками, зростає, тоді як частка світлих зон неухильно зменшується і на певній глибині практично зникає. Така закономірність свідчить про поетапний перехід від структури, збагаченої інтерстиційними елементами, до менш насичених областей дифузійного шару.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ

Арк.

56

Згідно з літературними даними [25], за режимів нітроцементації, аналогічних застосованим у цій роботі, у структурі можуть з'являтися ділянки трооститу, які локалізуються переважно вздовж меж зерен мартенситу. У зв'язку з цим є підстави припускати, що темні області, зафіксовані на мікроструктурних зображеннях, відповідають саме трооститній складовій. Проте через обмеження класичних металографічних методів однозначно ідентифікувати цю фазу лише за зовнішніми ознаками не видається можливим.

У нижній частині нітроцементованого шару, тобто зі збільшенням глибини насичення (нижня зона на рис. 3.4), простежується плавний структурний перехід від зміцненого приповерхневого шару до вихідної феритно-перлітної структури основного металу. Такий поступовий характер зміни мікроструктури підтверджує наявність чітко сформованого дифузійного градієнта та свідчить про коректність обраного режиму хіміко-термічної обробки.

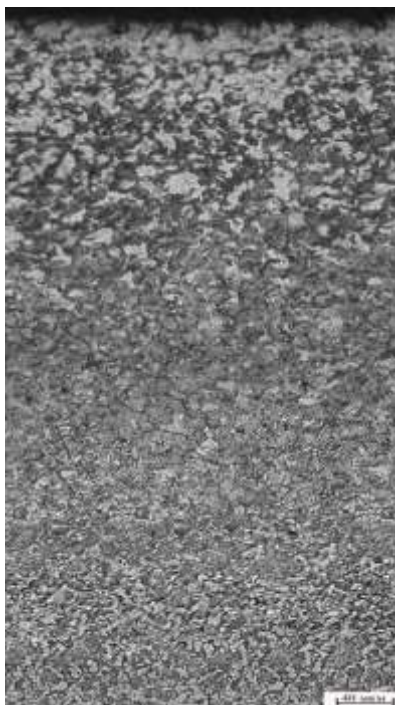


Рис. 3.4 Мікроструктура поверхневих шарів сталевого зразка після обробки

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, у сформованому нітроцементованому поверхневому шарі доцільно виділити три характерні структурні області, які відрізняються фазовим складом і рівнем зміцнення. Перша, безпосередньо приповерхнева зона, характеризується високим ступенем зміцнення та представлена переважно мартенситом у поєднанні з карбонітридними утвореннями. Друга зона є перехідною та виконує роль структурного і механічного «містка» між зміцненим шаром і основним металом. Третя зона відповідає серцевині зразка і зберігає феритно-перлітну структуру, характерну для вихідного стану сталі.

Наявність і послідовність зазначених зон були підтвержені результатами дюрOMETричних вимірювань. Отримані дані свідчать про закономірне зменшення значень мікротвердості в напрямку від поверхні насичення до внутрішніх шарів матеріалу (рис. 3.4). Максимальні значення мікротвердості зафіксовано безпосередньо на поверхні зразка. Подальше зниження твердості пояснюється зміною фазового складу та зменшенням концентрації вуглецю й азоту з глибиною. Зокрема, різниця між показниками твердості поверхневого шару і підповерхневих зон може бути зумовлена наявністю так званого дефектного шару товщиною близько 15 мкм, у якому структура та розподіл фаз відрізняються від глибших ділянок дифузійного шару.

Таким чином, узагальнюючи результати металографічного та дюрOMETричного аналізів, можна зробити висновок, що сформований нітроцементований шар після гартування з подальшим низькотемпературним відпуском має переважно мартенситну структуру з певною кількістю залишкового аустеніту. Саме така структурна комбінація забезпечує ефективне зміцнення поверхні.

Сформована структура позитивно впливає на експлуатаційні властивості

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						58
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

сталі, зокрема сприяє підвищенню зносостійкості, міцності та загальної надійності виробу в умовах тривалої роботи. Це підтверджує доцільність застосування нітроцементациї як ефективного методу поверхневого зміцнення деталей зі сталі 20.

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						59
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

4 БЕЗПЕКА ПРАЦІ

Процес нітроцементації зразків здійснювали із застосуванням шахтної печі типу Ц-60. Для проведення експериментальних досліджень використовували твердомір ТК-2 і оптичний металографічний мікроскоп МІМ-8, а підготовка та оформлення дипломної роботи виконувалися з використанням персонального комп'ютера. Експлуатація зазначеного обладнання пов'язана з підвищеним рівнем потенційної небезпеки, у зв'язку з чим до виконання робіт допускаються лише особи, які пройшли обов'язковий інструктаж з охорони праці та ознайомлені з правилами безпечної експлуатації лабораторного й виробничого устаткування.

Під час роботи з електротехнічним і теплотехнічним обладнанням існує ризик ураження електричним струмом, що може виникнути внаслідок контакту з оголеними струмопровідними елементами або через несправність ізоляції. Крім того, можливе виникнення пожежонебезпечних ситуацій, зумовлених короткими замиканнями чи перевантаженням електромережі.

Робота в умовах металографічної лабораторії супроводжується також низкою інших небезпечних та шкідливих чинників. До механічних небезпек належать можливі травми від абразивних інструментів, пошкодження під час вилучення зразків із форм або їх встановлення у тримачі. Хімічні ризики пов'язані з використанням агресивних реагентів для травлення шліфів, які можуть спричинити хімічні опіки при порушенні правил поводження. Термічні небезпеки виникають при контакті з нагрітими зразками після термічної обробки. Окрім того, вплив факторів виробничого середовища проявляється у вигляді пилу, що утворюється під час сухого шліфування, а також під час роботи з дрібнодисперсними абразивами та порошковими матеріалами.

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						60
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Під час виконання операцій у шахтній печі Ц-60 необхідно неухильно дотримуватися встановлених правил експлуатації, оскільки порушення технологічного режиму або герметичності може створити загрозу вибуху. З огляду на це визначено основні небезпечні фактори та заходи, спрямовані на зменшення їхнього впливу на персонал. До них належать ризики механічних травм [26], які можуть виникати при недотриманні вимог безпеки під час підготовки деталей до нітроцементації; підвищене психофізіологічне навантаження, зумовлене напруженістю та інтенсивністю праці; негативний вплив теплового випромінювання під час завантаження шихти в піч, особливо за відсутності відповідних засобів індивідуального захисту.

Окрему небезпеку становить можливість термічних опіків унаслідок розбризкування гартівної олії під час загартування зразків. Також існує ймовірність механічних ушкоджень при підготовці зразків до випробувань на твердість у разі порушення правил охорони праці. Додаткові ризики пов'язані з використанням насичених вуглеводнів у процесі нітроцементації, зокрема на етапі формування насичувальної атмосфери.

Не менш важливою є загроза ураження електричним струмом, яка може бути спричинена недотриманням правил електробезпеки, несправністю енергоємного обладнання або відсутністю групових чи індивідуальних захисних засобів. Під час нітроцементації можливе також підвищене забруднення повітря шкідливими газоподібними продуктами, що є характерною особливістю цього процесу та створює ризик отруєння. Додатково негативний вплив може мати незадовільний рівень освітлення робочої зони, спричинений забрудненням або несправністю освітлювальних приладів, що погіршує умови праці та зорове навантаження.

Окремо слід відзначити пожежну небезпеку, яка виникає у разі порушення правил пожежної безпеки та може призвести до займання або

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						61
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

поширення пожежі. З урахуванням наведених факторів суворе дотримання вимог охорони праці та застосування відповідних профілактичних заходів є обов'язковою умовою безпечного виконання робіт.

Заходи безпеки.

З метою зниження ймовірності виникнення механічних травм у процесі виконання робіт передбачено комплекс взаємопов'язаних організаційних, технічних і профілактичних заходів.

Організаційні заходи спрямовані на забезпечення належного стану робочих місць, підтримання чистоти, порядку та дисципліни праці. Працівники зобов'язані використовувати сертифіковані засоби індивідуального захисту, зокрема захисні костюми з брезенту, брезентові рукавиці, спеціальне захисне взуття з металевими підносками. Під час виконання операцій із нагрітими заготовками застосовуються буксирувальні ланцюги, теплостійкі костюми, азбестові фартухи та рукавиці відповідно до вимог ГОСТ 12.4.010-75 ССБТ «Засоби індивідуального захисту. Спеціальні рукавички. Технічні умови».

Технічні заходи безпеки передбачають використання виключно справного інструменту та допоміжного навісного обладнання. Транспортування деталей у межах виробничої дільниці, як правило, здійснюється за допомогою кран-балки. При цьому обов'язковим є дотримання вимог до зачеплення контейнерів із деталями, яке не повинно спричиняти їх обертання або неконтрольоване розгойдування. Переміщення вантажів допускається лише за затвердженою схемою, а одночасні рухи в різних напрямках суворо забороняються. Перед початком робіт необхідно перевіряти справність кінцевих вимикачів, блокувальних елементів та гальмівної системи підйимального механізму.

					КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для зменшення негативного впливу психоемоційного напруження та підвищеної інтенсивності праці передбачено раціональну організацію робочого часу, зокрема регламентовані перерви тривалістю близько 10 хвилин на кожну годину роботи, а також впровадження засобів механізації й автоматизації технологічних операцій.

Основний захист від теплових потоків високої інтенсивності забезпечується застосуванням спеціального теплозахисного одягу відповідно до ГОСТ 12.4.221-2002 ССБТ «Спеціальний одяг для захисту від підвищених температур теплового випромінювання». До складу такого захисту входять тканинні костюми з теплостійкими або азбестовими підкладками, а також захисні лицеві щитки, що відповідають вимогам ГОСТ 12.4.035-78 ССБТ «Щитки захисні для обличчя. Технічні умови».

Для усунення ризику термічних опіків, які можуть виникати внаслідок розбризкування гартівної олії під час гартування, використовується спеціальний захисний одяг (тканинний або брезентовий) згідно з ГОСТ 12.4.221-2002 ССБТ, а також суворо дотримуються інструкцій з техніки безпеки при роботі з гартівними середовищами.

З метою попередження механічних травм під час підготовки зразків до випробувань на твердість дозволяється експлуатація лише справного обладнання. До таких робіт не допускаються особи, які не пройшли відповідний інструктаж з охорони праці. Перед встановленням абразивного круга проводиться його обов'язковий огляд і перевірка на відсутність тріщин шляхом легкого постукування дерев'яним молотком масою 200–300 г у підвішеному стані. Справний круг при цьому видає чіткий дзвінкий звук, тоді як дефектний — глухий. Під час обробки деталей, що утримуються вручну, застосовуються напрямні пристрої, які мають бути рухомими та забезпечувати можливість регулювання положення відносно обертового круга.

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Забороняється починати роботу за відсутності захисного екрана або бокових огорожень відповідно до вимог НПАОП 28.52-1.22-64 «Правила та норми безпечної роботи з абразивними інструментами».

Для запобігання ураженню електричним струмом проєктом передбачено комплекс організаційних і технічних заходів електробезпеки. До організаційних належить допуск до роботи лише працівників, які пройшли навчання, перевірку знань з електробезпеки та отримали відповідну групу допуску згідно з вимогами ПУЕЗ 2017 або ПТБЕ. Ремонт електрообладнання дозволяється виконувати виключно спеціально навченому персоналу.

Технічні заходи включають розміщення неізольованих ліній електропередач на важкодоступній висоті (не менше 3,5 м для напруги до 1000 В та не менше 6 м — для напруги понад 1000 В), обов'язкове заземлення, надійне огороження шин і струмопроводів, а також застосування кабельних мереж з опором ізоляції не менше 0,5 МОм. Усе технологічне обладнання повинно бути заземлене відповідно до ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ «Захисне заземлення, занулення». Обов'язковим є використання блокувальних і ізолювальних пристроїв, що забезпечують безпечну експлуатацію електроустановок.

Заходи щодо забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці.

Для зменшення підвищеного забруднення повітря шкідливими газоподібними домішками під час процесів азотування/нітроцементатії над пічним обладнанням доцільно передбачити місцеву витяжну вентиляцію. Така система повинна забезпечувати оперативне уловлювання та відведення газів безпосередньо в зоні їх утворення, що істотно знижує концентрацію небезпечних речовин у робочій зоні та мінімізує ризики отруєння персоналу.

Система освітлення виробничих приміщень у цеху організовується як

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						64
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

природна, штучна та комбінована. Комбінований варіант передбачає, що впродовж світлового дня природне освітлення, яке не досягає нормативних значень, компенсується штучним. Для загального рівномірного штучного освітлення рекомендується застосовувати дугові розрядні лампи типу ДРЛ потужністю 250–400 Вт, які монтуються у світильники типу РСП по одному джерелу світла на світильник. Така схема забезпечує достатню освітленість робочих зон і рівномірність розподілу світлового потоку по площі приміщення.

Проектування виробничої будівлі здійснюється з урахуванням максимально можливого використання природного освітлення, що не лише покращує умови праці, а й дозволяє зменшити витрати електроенергії. У проєктованому цеху природне освітлення реалізується через засклені ділянки огорожувальних конструкцій, а також через верхні світлові елементи на покрівлі (світлові вставки, ліхтарі). Одночасно передбачено штучне освітлення, яке забезпечує стабільні умови видимості незалежно від часу доби та погодних факторів. Освітлення робочих місць виконується відповідно до вимог ДНБ В.2.5-28-2006 «Інженерне обладнання будівель та споруд. Природне та штучне освітлення».

Нормована освітленість для цехових приміщень приймається на рівні 200 лк. За умов комбінування верхнього і бокового природного освітлення коефіцієнт природної освітленості має бути не менше 2, а за іншими схемами (зокрема верхньо-боковою) — не менше 1,2. Локальні освітлювальні прилади повинні оснащуватися відбивачами з непрозорих матеріалів та мати захисний кут не менше 30°, а якщо світильник розташовано нижче рівня очей працівника — не менше 10°, щоб уникати засліплення та надмірного зорового навантаження. Окрім робочого освітлення, у цеху обов'язково передбачають аварійне освітлення, необхідне для безпечної евакуації та виконання

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

невідкладних дій у разі аварій або надзвичайних ситуацій.

Для підтримання параметрів повітряного середовища в межах норм (згідно з показниками, наведеними в таблиці 4.1) на об'єкті передбачається загальнопромислова система вентиляції. Проект вентиляції виконується відповідно до СНиП 20485-86 «Опалення, вентиляція та кондиціонування повітря. Норми проектування». Запроектовані рішення мають відповідати також вимогам ГОСТ 121005-88 «Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря в робочій зоні» та СН 245-71 «Санітарні норми проектування промислових підприємств». У холодний період року для забезпечення нормативної температури повітря використовується система опалення (обігрівачі), яка працює у взаємозв'язку з вентиляцією, не допускаючи переохолодження робочої зони.

Подальшим етапом є розрахунок продуктивності природної вентиляції, який дозволяє визначити необхідний повітрообмін і обґрунтувати параметри вентиляційної системи для підтримання допустимих концентрацій шкідливих речовин та комфортних мікрокліматичних умов. Розрахунок:

$$L=K \cdot V_n, \text{ м}^3/\text{год.} \quad (4.1)$$

де: K – кратність повітрообміну (K=2) V_n – об'єм приміщення

$$S = 850 \text{ м}^2 \text{ h}=7$$

$$L= K \cdot V_n = 2 \cdot (850 \cdot 7) = 11900 \text{ м}^3$$

Таблиця 4.1 – Оптимальні умови в робочій зоні виробничого приміщення

Пора року	Температура, °С (оптимальний - допустимий)	Вологість, % (оптимальна)	Швидкість руху повітря, м/с (оптимальна)

Холодна	16-19	40-60	<0,3
Тепла	18-26	40-60	<0,4

Розрахунок продуктивності природної вентиляції для виробничих приміщень:

$$L=K \cdot V_n, \text{ м}^3/\text{год.} \quad (4.2)$$

де: K. – кратність повітрообміну

(K=2) V_n – об'єм приміщення

$$S = 850 \text{ м}^2 \text{ h}=7$$

$$L = K \cdot V_n = 2 \cdot (850 \cdot 7) = 11900 \text{ м}^3$$

Розрахунок кількості зовнішнього повітря, необхідного для поглинання надлишкового тепла:

$$L = \frac{Q}{c \cdot \gamma (t_{\text{вн.}} - t_{\text{зовн.}})} \text{ м}^3/\text{год} \quad (4.2)$$

де: Q – кількість виділеного тепла, кДж/год

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

γ – густина зовнішнього повітря

$$Q = 38000 \text{ кДж/год}$$

$$t_{\text{вн}} = 37, \text{ °С}$$

$$t_{\text{зовн}} = 27, \text{ °С}$$

					КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

$$L = \frac{38000}{1 \cdot 1,17(37-27)} = 3247,8 \text{ м}^3/\text{год}$$

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						68
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Заходи пожежної безпеки.

Відповідно до вимог Національного будівельного стандарту В.1.1.7–2002 «Пожежна безпека будівельних майданчиків», будівельні конструкції виробничих приміщень мають II ступінь вогнестійкості, що означає їх виконання переважно з негорючих або вогнезахищених матеріалів, здатних тривалий час протистояти дії відкритого полум'я та високих температур без втрати несучої здатності.

Аналіз умов експлуатації обладнання та організації виробничого процесу дозволяє виділити основні чинники, які можуть призводити до виникнення пожеж у цеху. До них належать порушення встановленого технологічного режиму, несправності електрообладнання (зокрема короткі замикання або перевантаження електричних мереж), конструктивні недоліки машин і механізмів, а також виконання ремонтних робіт безпосередньо в зоні експлуатації обладнання.

Система заходів пожежної безпеки на підприємстві формується за кількома напрямками та включає організаційні, технічні, режимні та експлуатаційні заходи.

Організаційні заходи передбачають забезпечення правильної експлуатації технологічного обладнання і внутрішньоцехового транспорту, утримання будівель, приміщень і території у справному та чистому стані, а також регулярне навчання персоналу правилам пожежної безпеки і діям у разі виникнення пожежі.

Технічні заходи спрямовані на дотримання чинних норм і правил пожежної безпеки під час проєктування та експлуатації будівель і споруд, монтажу електричних мереж, систем опалення, вентиляції та освітлення. Важливе значення має також своєчасний контроль технічного стану

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обладнання і запобігання виникненню джерел займання.

До режимних (регуляторних) заходів належать обмеження та заборони, зокрема заборона куріння в невідведених для цього місцях, виконання зварювальних та інших вогневих робіт у пожежонебезпечних приміщеннях без спеціального дозволу та відповідних заходів захисту.

Забезпечення цеху первинними засобами пожежогасіння здійснюється відповідно до вимог НАПБ 03.001–2004 «Типові норми належності вогнегасників». З урахуванням площі цеху, яка становить 1815 м², передбачено встановлення двох порошкових вогнегасників місткістю по 5 кг кожен, що забезпечує необхідний рівень пожежного захисту для даної категорії приміщення.

Проєктом також передбачено організацію шляхів евакуації персоналу у разі виникнення пожежі. Евакуація здійснюється через проходи, коридори, аварійні та основні виходи. Оскільки будівля є одноповерховою, евакуаційним вважається вихід, що веде безпосередньо з приміщення майстерні назовні через коридор або тамбур. Шляхи евакуації розміщені таким чином, щоб забезпечити їхню рівномірну доступність, при цьому максимальна відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу не перевищує 50 м, що відповідає вимогам чинних нормативних документів..

Таблиця 4.2 – Інвентаризація пожежних щитів

№	Ім'я	Номер
1	Вогнегасник	3
2	Пісок	1
3	Сокира / Лом	2
4	Лопата	2
5	Відро	2

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Параметри евакуаційних шляхів і виходів у будівлі відповідають вимогам пожежної безпеки та забезпечують можливість швидкого і безпечного залишення приміщень у разі надзвичайної ситуації. Ширина пожежних сходів становить 4 м, що дозволяє одночасний рух значної кількості людей. Проходи, призначені для евакуації персоналу, мають ширину 1 м, ширина коридорів складає 1,4 м, а дверні прорізи евакуаційних виходів — 2 м, що забезпечує достатню пропускну здатність і зменшує ризик утворення заторів під час евакуації. Усі ворота та двері, які використовуються як евакуаційні виходи, відчиняються у напрямку виходу назовні, що відповідає вимогам нормативних документів і підвищує рівень безпеки.

Будівля оснащена комплексом протипожежних засобів і обладнання, до складу якого входять первинні засоби пожежогасіння, стаціонарні та переносні вогнегасники, а також система внутрішнього протипожежного водопостачання, призначена для оперативного гасіння пожеж на початкових стадіях їх виникнення. Наявність внутрішніх пожежних кранів дозволяє швидко підключати пожежні рукави та подавати воду безпосередньо в осередок загоряння.

Відповідно до вимог НАПБ 03.001–2004 «Типові норми належності вогнегасників», у виробничому цеху передбачено встановлення протипожежного щита, укомплектованого необхідним інвентарем для локалізації та ліквідації пожежі на початковому етапі. Склад і кількість елементів, що входять до комплекту протипожежного щита, визначені нормативними вимогами та наведені у таблиці 4.2, де подано повний перелік пожежно-технічного інвентарю..

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Формування у приповерхневій зоні сталі 20 структури з домінуванням мартенситної фази (приблизно 90 %) після нітроцементації зумовило істотне підвищення рівня твердості поверхневих шарів. У результаті такої структурної перебудови твердість зросла з характерних для вихідного стану значень близько 22 HRC до рівня приблизно 60 HRC, що свідчить про ефективність застосованого режиму хіміко-термічної обробки та значне зміцнення поверхні.

Подальший низькотемпературний відпуск нітроцементованих зразків сталі 20 у температурному інтервалі 453–473 К не спричинив зменшення мікротвердості приповерхневих шарів. Це пояснюється тим, що процес зняття внутрішніх механічних напружень, які виникли внаслідок гартування, супроводжувався виділенням лише незначної кількості тонкодисперсних карбонітридних частинок. Такі виділення не призвели до помітного розпаду мартенситної матриці, а навпаки, сприяли збереженню досягнутого рівня твердості та стабільності структури поверхневого шару..

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						72
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Павленко В.П. Матеріалознавство: Підручник – К.: Освіта України, 2011. – 504 с.
2. Мовчан В.Г., Мовчан О.Г. Матеріалознавство : Підручник для студентів вищих начальних закладів – К. :Кондор, 2008. – 376 с.
3. Дятлов В.И., Левченко В. М. Теорія і практика термічної обробки металів: Підручник – К.: Політехніка, 2013. – 312 с.
4. Сологуб М.А. (ред.), Рожнецький І.О., Некоз О.І. та ін. Технологія конструкційних матеріалів: підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. — К.: Вища школа, 2002. — 374 с.
5. Власенко А.М. Матеріалознавство та технологія металів: підручник. — К.: Літера ЛТД, 2019. — 224 с.
6. Криль Я.А. (ред.), Геворкян Е.С., Луцак Д.Л. Матеріалознавство. Сталь: класифікація, виробництво, споживання, маркування: навчальний посібник. — Львів: «Новий Світ-2000», 2020. — 267 с.
7. Grachev S.V Boronizing and borochromizing in a vibrofluidized bed / S.V. Grachev, L.A.Mal'tseva, T.V. Mal'tseva, A.S.Kolpakov, M.Yu Dmitriev / Metal Science and Heat Treatment. – 1999. – Vol.41, №11. – P. 465– 468.
8. H. Holberg and A. Aittokoski Boriding: Theory and practice – Amsterdam: – Elsevier, 2014 – 384 p.
9. G. Krauss, R. C. Ruhl Principles of Heat Treatment of Steel - Material Park (Ohio): – ASM International, 1997. – 736 p.
10. S. M. Copley, R. A. H. Edwards, J. A. Houghton. "Heat Treatment and Properties of Iron and Steel" – NY: CRC Press, 1980. – 512 p.
11. Sokolov A.G., Effect of process factors and chemical composition of steels

					КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

on the structure and properties of nickel-bearing diffusion coatings / A.G Sokolov, Artem'ev V.P // Metal Science and Heat Treatment. – 2007. – Vol.49, №3-4. – P. 194 – 199. 34

12. Mittal V. K. Surface Hardening of Metals – Oxford : - Elsevier, 2019. – 712 p.

13. Kyhareva N.G. Carburizing and nitriding of the steel 20 in fluid bed./ N.G. Kyhareva, T.Babyl, A.A.Shipko, T.N.Shtolik // Metal Science and Heat Treatment. – 1975. – Vol.17, №1 – P.37-40.

14. E. A. Gulyaev Chemical Heat Treatment of Metals – Amsterdam : - Elsevier, 1989. – 368 p.

15. Шубін Р.П., Грінберг М.Л. Нітроцементация деталей машин – К.: Машинобудування, 1975. – 207с.

16. A. L. Greer, A. E. Romanov, and A. S. Argon "Diffusion and Interface Phenomena in Materials" – Amsterdam: - Elsevier, 2005. – 704 p.

17. A. F. Zoeller Nitrocarburizing Case Hardening by Gas Nitriding – Amsterdam : – Elsevier, 1999. – 320 p.

18. Gyulikhandanov E.L. Kinetics of steel saturation with nitrogen and carbon during high temperature carbonitriding with high nitrogen potential/ E.L.Gyulikhandanov, V.I. Shapochkin // Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov – 1994. – № 4. – P. 2-5.

19. Bannykh O.A., Drits M.E. State diagrams of double and multiple iron-based systems: Handbook. – M.: Metallurgy, 1996. – 439 p.

20. Bogomolova N.A. Practical metallography: Textbook. for medium Vocational school. – 3rd ed., revised. and additional – M.: Higher School, 1987. – 240.

21. Bogomolova N.A. Practical metallography: Textbook. for medium Vocational school. – 3rd ed., revised. and additional – M.: Higher School, 1987. –

					<i>KPM МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

240 p.

22. Beckert M., Klemm H. Methods of metallographic etching: Handbook
Transl. with him. N.I. Turnina, E.Ya. Kaputkina - M.: Metallurgy, 1988 – 400 p.

23. Халявко В.В. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів:
Навчальний посібник – К.: Центр учбової літератури, 2016. – 156с.

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						75
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ДОДАТОК А

					<i>КРМ МТВА 25 24337. 000 ПЗ</i>	Арк.
						76
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

**Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства
Освітня програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Тема:

«Дослідження властивостей сталі 20 після хіміко-термічної обробки»

**Виконав: гр. МТВАм 24-1 Вадим БУРДЕЛЬНИЙ
Керівник: доц. Гончар В.А.**

Мета роботи дослідження структурних змін у поверхневих шарах сталі 20 після нітроцементації, аналіз фізико-механічних властивостей поверхневих шарів зразків після хіміко-термічної обробки.

Основні завдання дипломної роботи:

- На основі літературного огляду технологій зміцнення поверхонь, обрати найбільш раціональну.
- Провести аналіз властивостей поверхні до та після обробки;
- Призначити параметри обробки поверхні з метою отримання кращих властивостей.

Технології, широко застосовуються, для зміцнення поверхні деталей машин

Цементація

Азотування

Борування

Нітроцементація

Борування та кремніювання

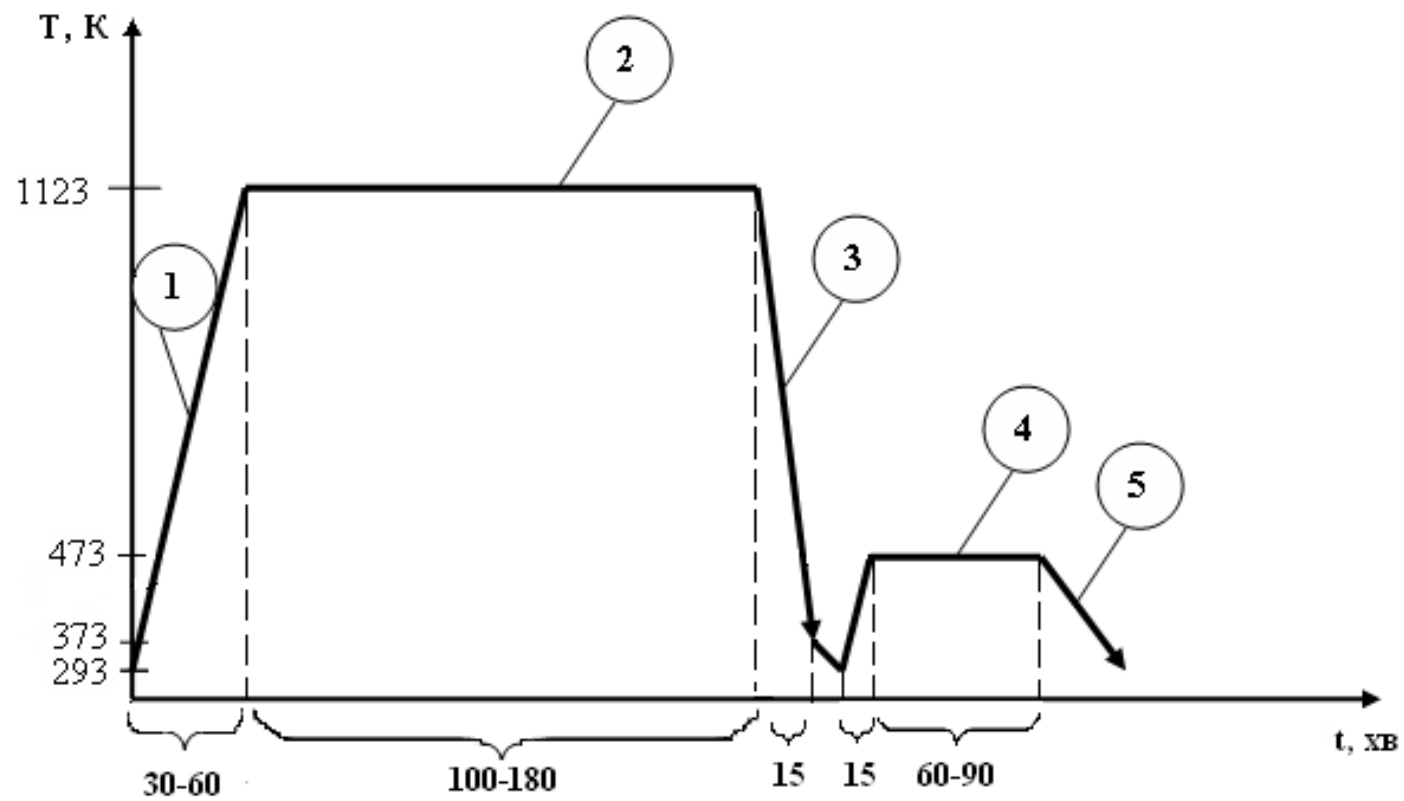
Дифузійна металізація

Термічна обробка

Переваги нітроцементатації в порівнянні з іншими технологіями

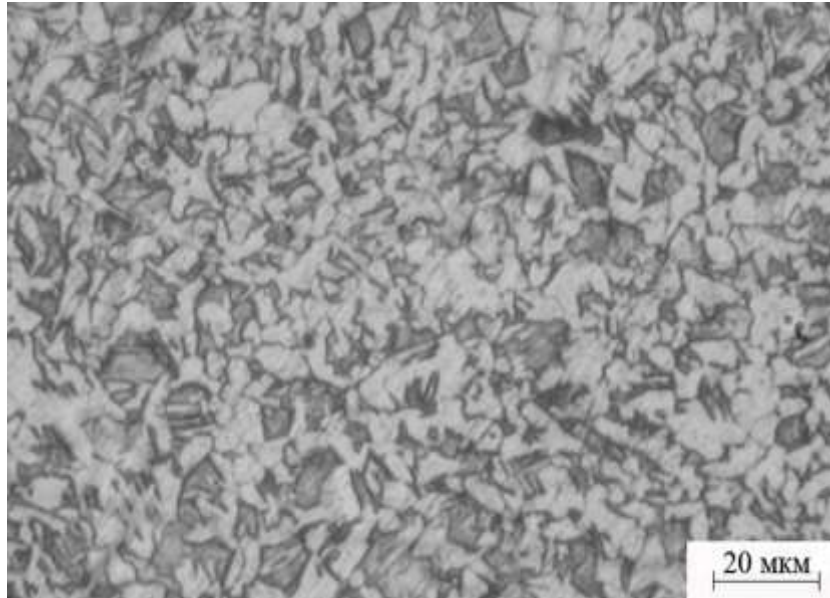
- температура процесу (1113 – 1133 К) нижче ніж при обробці деталей цементатацією;
- скорочення тривалості процесу і підвищення продуктивності;
- менше сажоутворення;
- менші деформації деталей і можливість здійснювати безпосереднє гартування після нітроцементатації внаслідок нижчої температури процесу;
- вища зносостійкість деталей внаслідок додаткового насичення сталі азотом ;
- менша енергоємність процесу;
- більший термін служби устаткування, зумовлений роботою за нижчої температури;
- рівномірна поверхнева твердість в порівнянні з цементатацією;
- більша глибина гартування;
- можливість утворення більш стійкого до зносу шару;
- менші витрати на обробку.

Процес обробки

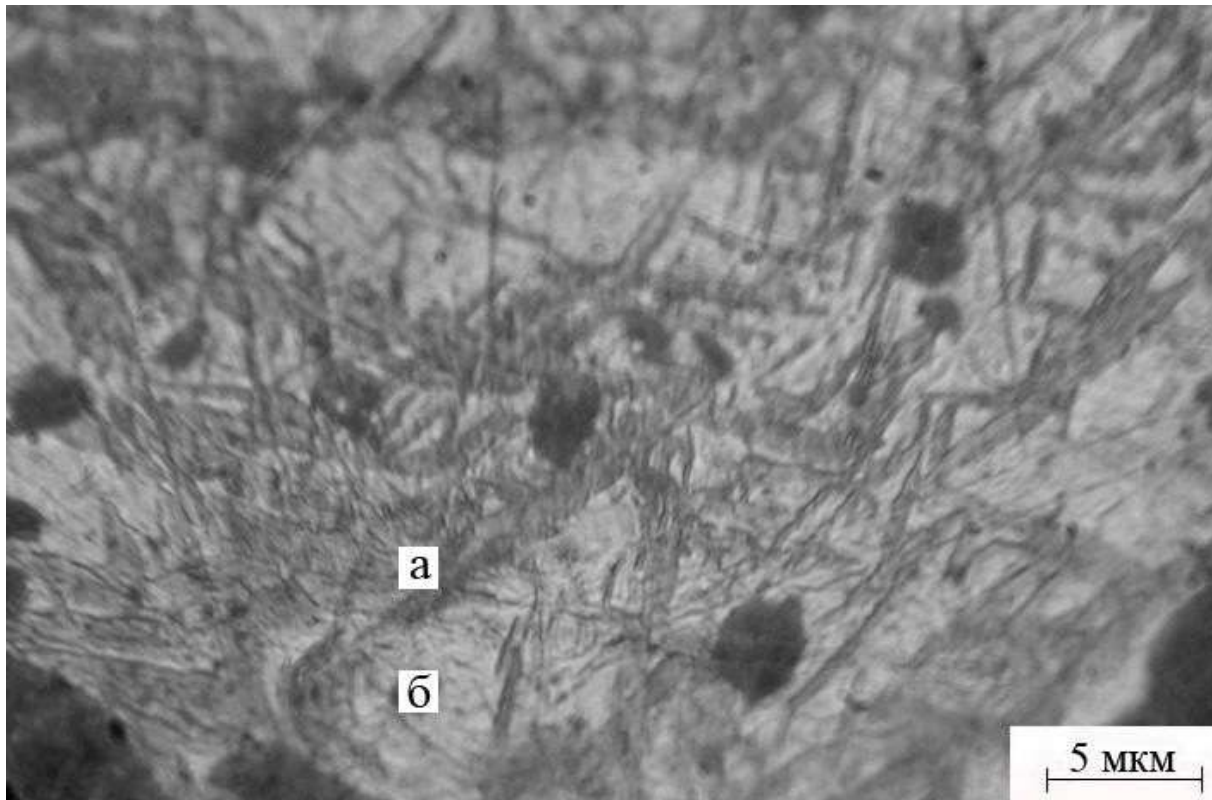


Матеріал зразка до обробки

Хімічний склад сталі 20 згідно масовій частки складає: C – 0,22%, Mn – 0,55%, Si – 0,21%, S – 0,035%.



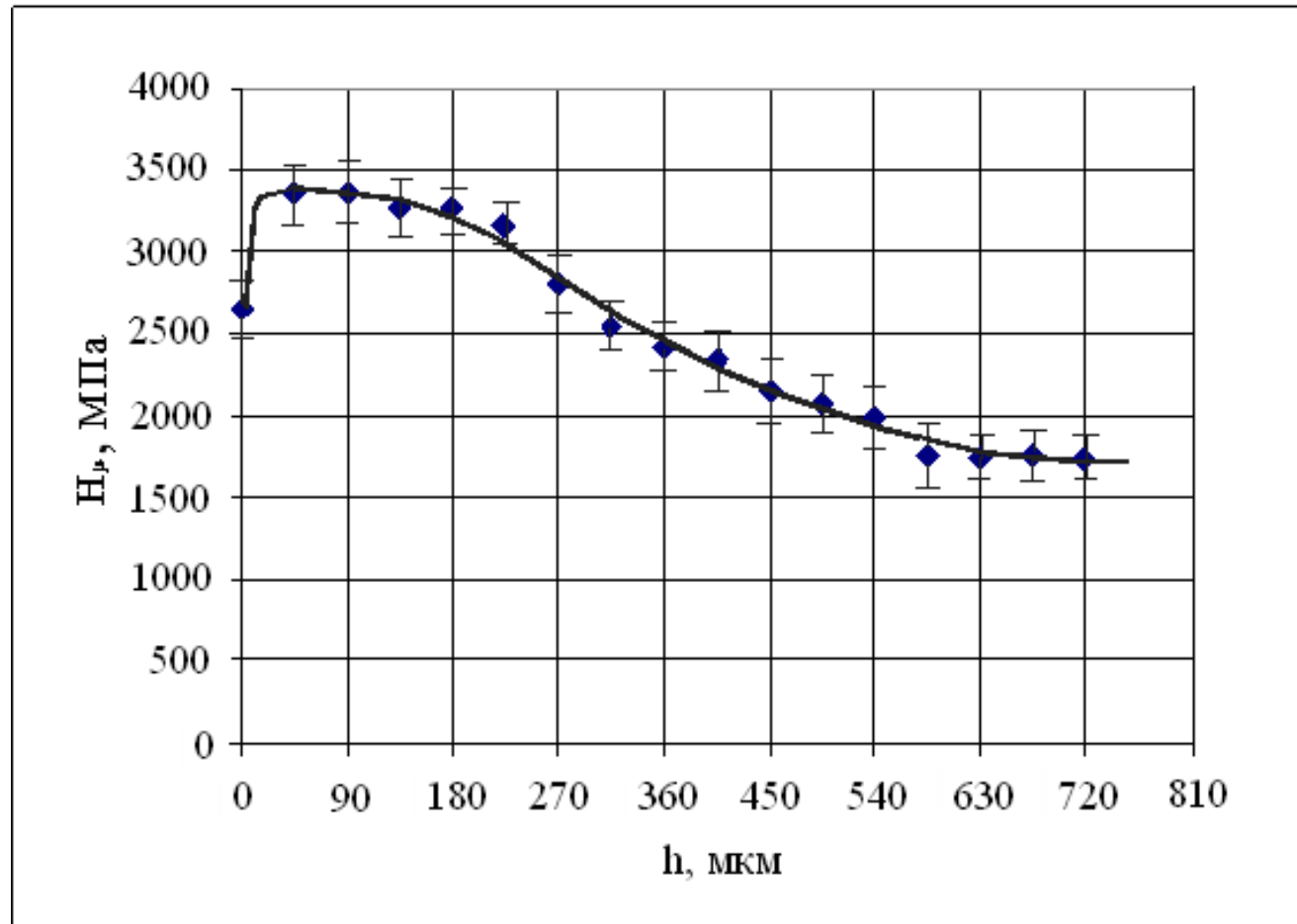
Зразок після обробки



Структура поверхневого шару зразка після обробки

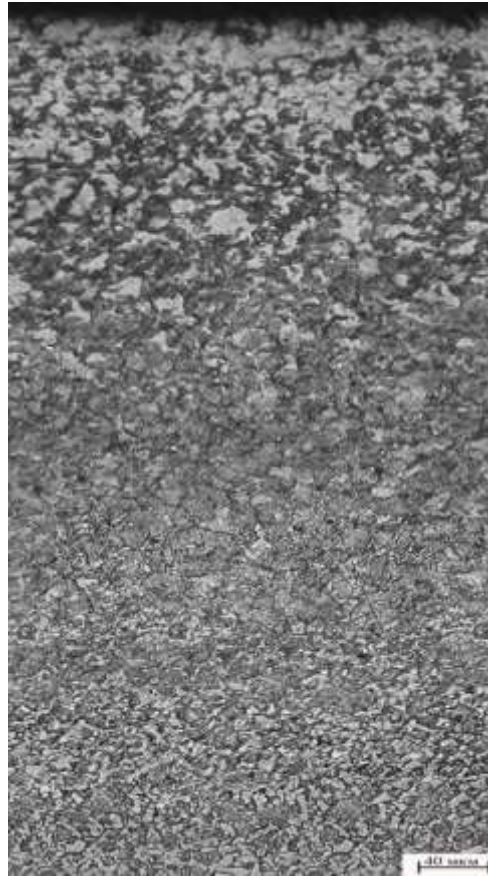
а – мартенсит; б – залишковий аустеніт

Твердість



Розподіл мікротвердості по глибині нітроцементованого зразка

Мікроструктура поверхневих шарів



Мікроструктура поверхневих шарів сталевго зразка після обробки

ВИСНОВКИ

Наявність високого вмісту мартенситу (~ 90 %) в структурі поверхневих шарів сталі 20 після нітроцементації викликала підвищення твердості у них 22 HRC до 60 HRC.

Твердість розподіляється нерівномірно по глибині, поступово спадаючи

Відпуск нітроцементованих зразків сталі 20 при температурі 453...473 К не призводив до зниження мікротвердості поверхневих шарів зразків через зняття механічних напружень внаслідок виділення незначної кількості дисперсних карбонітридів.

Рекомендуємо режим обробки: температура нітроцементації 1123К, час насичення 3 год, гартування в маслі протягом 15 хв від 1123 до 373 К, відпуск з витримкою 60 – 90 хв при температурі 473 К, охолодження на повітрі.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!