

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет  
Факультет митної справи матеріалів, технологій та гостинності  
Кафедра матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»

**Розробка технології азотування  
деталей з високолегованих сталей /  
Development of nitriding technology for  
high-alloy steel parts**

132 Матеріалознавство

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Матеріалознавство

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи ПМ-41

**Лотарев Ігор Вадимович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник:

д.т.н., професор

**Єфременко Василь Георгійович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., професор

**Кашицький Віталій Павлович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2026 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Імбирович Н.Ю.

“\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

## З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

\_\_\_\_\_ (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_

керівник роботи \_\_\_\_\_,

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від \_\_\_\_\_ року № \_\_\_\_\_

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

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

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

## 6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи | Примітка |
|-------|-------------------------------------|------------------------------------------------|----------|
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |
|       |                                     |                                                |          |

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Лотарев І. В. Назва теми: «Розробка технології азотування деталей з високолегованих сталей»

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури, додатків.

У кваліфікаційній роботі розроблено технологічний процес азотування високолегованих сталей, що використовуються для виготовлення .

Основні рішення, прийняті в роботі направлені на забезпечення комплексу необхідних властивостей досліджуваної сталі та раціонального технологічного процесу, а також дослідження структури матеріалу силової шпильки до та після іонно-плазмового азотування, аналізу значень мікротвердості від глибини шару та підбору коректного технологічного процесу.

Загальний обсяг роботи: 50 сторінка, 4 розділи та висновки, 16 рисунків, 8 таблиць, 25 літературних джерел.

Ключові слова: азотування, нітридні сполуки, нітридний шар, силова шпилька, технологічний процес, термічна обробка. Глибина шару, мікротвердість.

|           |           |          |        |      |                                                                                                                                              |                                              |      |         |  |
|-----------|-----------|----------|--------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------|---------|--|
|           |           |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ                                                                                                                         |                                              |      |         |  |
|           |           |          |        |      |                                                                                                                                              |                                              |      |         |  |
| Зм.       | Арк.      | № докум. | Підпис | Дата | Розробка технології азотування<br>деталей з високолегованих сталей<br>/ Development of nitriding<br>technology for<br>high-alloy steel parts | Літ.                                         | Арк. | Акрушів |  |
| Розробив  | Лотарев   |          |        |      |                                                                                                                                              |                                              | 3    | 50      |  |
| Перевірив | Єфременко |          |        |      |                                                                                                                                              |                                              |      |         |  |
|           |           |          |        |      |                                                                                                                                              | ЛНТУ,<br>каф.матеріалознавства,<br>гр. ПМ-41 |      |         |  |
| Н. Контр  | Мисковець |          |        |      |                                                                                                                                              |                                              |      |         |  |
| Затв.     | Імбірович |          |        |      |                                                                                                                                              |                                              |      |         |  |

## ABSTRACTS

Lotarev I. V. Thesis Title: «Development of nitriding technology for high-alloy steel parts» Bachelor's Thesis in the “Materials Science” Educational Program, Major 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The bachelor's thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, a bibliography, and appendices.

The thesis develops a technological process for the nitriding of high-alloy steels used in the manufacture of .

The main solutions adopted in the thesis are aimed at ensuring the set of necessary properties of the studied steel and a rational technological process, as well as investigating the structure of the power stud material before and after ion-plasma nitriding, analyzing microhardness values as a function of layer depth, and selecting the correct technological process.

Total volume of the work: 50 pages, 4 chapters and conclusions, 16 figures, 8 tables, 25 references.

Keywords: nitriding, nitride compounds, nitride layer, load-bearing stud, technological process, heat treatment, layer depth, microhardness.

|      |      |          |        |      |                      |      |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|      |      |          |        |      | БП 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                      | 4    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

## ЗМІСТ

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                             | 6  |
| РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....                               | 8  |
| 1.1. Умови експлуатації деталей з високолегованих сталей .....          | 8  |
| 1.2. Характеристика високолегованих сталей як об'єкта азотування .....  | 10 |
| 1.3. Огляд і порівняльний аналіз методів хіміко-термічної обробки ..... | 13 |
| 1.4. Азотування у виробництві та його технологічні особливості .....    | 15 |
| 1.5. Висновки та постановка завдань .....                               | 17 |
| РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....                                     | 19 |
| 2.1. Порівняння технологій азотування .....                             | 19 |
| 2.2. Вибір технології азотування .....                                  | 22 |
| 2.3. Підготовка деталей до азотування .....                             | 25 |
| 2.4. Проектування технологічного процесу плазмового азотування .....    | 26 |
| РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА .....                                         | 31 |
| 3.1. Характеристика об'єкту дослідження .....                           | 31 |
| 3.2. Аналіз структурного стану після термічної обробки .....            | 34 |
| 3.3. Структурний стан деталі після азотування .....                     | 37 |
| 3.4. Аналіз механічних властивостей .....                               | 37 |
| РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ .....                           | 41 |
| 4.1. Аналіз зміни мікротвердості .....                                  | 41 |
| 4.2. Формування експлуатаційних характеристик .....                     | 43 |
| ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ .....                                | 45 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                        | 48 |
| ДОДАТКИ                                                                 |    |

## ВСТУП

Підвищення надійності та довговічності деталей машин є одним із важливих завдань сучасного матеріалознавства та машинобудування. Значна частина відмов деталей із високолегованих сталей пов'язана не з руйнуванням усього об'єму матеріалу, а з деградацією поверхневого шару внаслідок зношування, контактної втоми, корозійного впливу та дії змінних навантажень. Тому актуальним є застосування технологій поверхневого зміцнення, які дозволяють підвищити експлуатаційні властивості деталей без істотної зміни властивостей серцевини.

Одним із ефективних методів хіміко-термічної обробки високолегованих сталей є азотування. Його перевагами є формування високотвердого дифузійного шару, підвищення зносостійкості та втомної міцності, а також відносно низька температура процесу, що зменшує ризик деформацій деталей. Особливо важливим є правильний вибір режимів азотування, оскільки структура, товщина і фазовий склад зміцненого шару істотно залежать від хімічного складу сталі, температури, тривалості процесу та складу насичувального середовища.

Традиційні методи термічної обробки (гартування та відпуск) забезпечують підвищення міцності матеріалу в об'ємі, однак не дозволяють одночасно досягти високої твердості поверхні, зносостійкості та збереження в'язкості серцевини. У зв'язку з цим у сучасній інженерії поверхні широко застосовуються методи хіміко-термічної обробки, які дозволяють формувати зміцнений поверхневий шар із заданими властивостями при збереженні пластичності та міцності основного металу.

Азотування є одним із найбільш ефективних методів поверхневого зміцнення деталей машин, що дозволяє комплексно підвищити їх експлуатаційні характеристики без значного впливу на геометрію та властивості серцевини. Це обґрунтовує актуальність досліджень, спрямованих

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      | 6    |

на розробку та оптимізацію технологій азотування для високолегованих сталей, які широко застосовуються у відповідальних вузлах машин і механізмів. Іонно-плазмове азотування, відоме в міжнародній літературі як plasma nitriding, є різновидом хіміко-термічної обробки, при якому дифузійне насичення поверхні азотом здійснюється в умовах тліючого розряду в розрідженому азотовмісному газовому середовищі.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування тексту та для пошуку літератури виключно з метою уточнення формулювань, перевірки достовірності інформації у наукових публікаціях та опрацювання літературних джерел. Усі основні судження були прийняті автором роботи, а сама робота перевірена на достовірність згідно принципів академічної доброчесності на відсутність запозичень та генерованих ШІ результатів.

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 7    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

# РОЗДІЛ 1

## ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1. Умови експлуатації деталей з високолегованих сталей

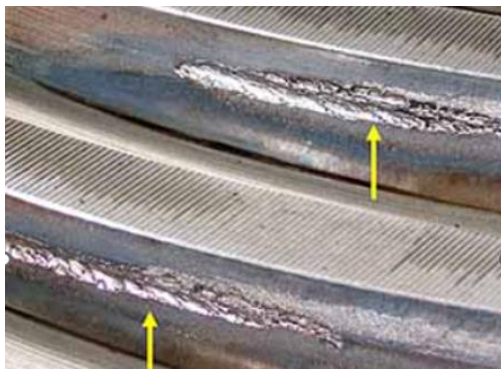
Експлуатаційні властивості деталей машин значною мірою визначаються станом їх поверхневого шару, оскільки саме поверхня першою сприймає дію зовнішніх навантажень і агресивних середовищ. Для деталей із високолегованих сталей, які широко застосовуються у відповідальних вузлах машинобудування (шестерні, вали, штоки, прес-форми, елементи гідравлічних систем), характерним є комплексний вплив механічних, термічних і фізико-хімічних факторів [1].

У процесі роботи такі деталі зазнають дії змінних і контактних навантажень, що супроводжуються розвитком втомних процесів. Особливо небезпечними є контактна втома і пітинг, які виникають у зоні локальних напружень при циклічному навантаженні [2, 3]. Крім того, у вузлах тертя реалізуються різні механізми зношування – абразивне, адгезійне та окиснювальне. У разі недостатньої твердості або стабільності поверхневого шару це призводить до інтенсивного руйнування матеріалу, втрати точності та передчасного виходу деталі з ладу.

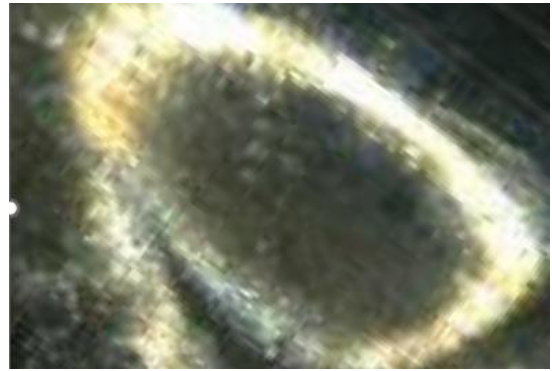
Додатковим фактором є вплив температури. Навіть при відносно невисоких робочих температурах (200...500 °C), характерних для багатьох машинобудівних вузлів, можливе розм'якшення поверхні, релаксація залишкових напружень і зміна фазового складу. Для високолегованих сталей це особливо актуально через наявність карбідо- та нітридоутворюючих елементів (Cr, Mo, V, Al), які визначають стабільність структури при нагріванні [4, 5].

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 8    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

У багатьох випадках деталі експлуатуються в умовах агресивних середовищ (волога, активні гази, мастильні матеріали з домішками), що спричиняє корозійне або корозійно-втомне руйнування (рисунок 1.1). Поєднання корозії та циклічних навантажень суттєво прискорює ініціацію та розвиток тріщин у поверхневому шарі [3].



а



б

Рисунок 1.1 – Корозійно-втомне руйнування (а), піттингова пляма (б)

Враховуючи зазначені умови експлуатації, до деталей із високолегованих сталей висувається комплекс вимог, які часто є суперечливими з точки зору властивостей матеріалу в об'ємі та на поверхні. Основними з них є:

- висока твердість поверхневого шару (зазвичай 900...1200 HV) для забезпечення зносостійкості;
- підвищена опірність контактній втомі та утворенню пітингу;
- наявність стискуючих залишкових напружень у поверхневому шарі;
- достатня товщина зміцненого шару (0,2...0,6 мм залежно від призначення деталі);
- збереження в'язкої та міцної серцевини деталі;
- висока корозійна стійкість;
- мінімальні деформації після обробки.

Традиційні методи термічної обробки (гартування з відпуском) не забезпечують одночасного досягнення всього комплексу зазначених

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 9    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

властивостей, особливо для високолегованих сталей [1]. Зокрема, підвищення твердості по всьому об'єму призводить до зниження в'язкості та підвищення ризику крихкого руйнування.

У зв'язку з цим доцільним є застосування методів хіміко-термічної обробки, які дозволяють формувати дифузійно зміцнений поверхневий шар із заданими властивостями без суттєвого впливу на серцевину [5, 6]. Серед таких методів азотування займає особливе місце, оскільки забезпечує формування високотвердих нітридних фаз, створення стискуючих залишкових напружень і підвищення зносо- та корозійної стійкості при відносно низьких температурах процесу [7].

Аналіз умов експлуатації та вимог до деталей свідчить про необхідність застосування технологій поверхневого зміцнення, серед яких азотування є одним із найбільш ефективних для високолегованих сталей. Це обґрунтовує подальший розгляд особливостей матеріалу та вибору раціонального способу азотування.

## 1.2. Характеристика високолегованих сталей як об'єкта азотування

Високолеговані сталі є перспективними матеріалами для азотування, оскільки містять підвищену кількість легуючих елементів, здатних утворювати термодинамічно стійкі нітриди. До таких елементів належать Cr, Mo, V, W, Al, Ti, які під час насичення азотом формують дисперсні нітридні фази та забезпечують високу твердість, зносостійкість і термічну стабільність поверхневого шару. Азотування як хіміко-термічна обробка полягає у дифузійному насиченні поверхні азотом і застосовується для підвищення твердості, зносостійкості, межі витривалості, корозійної та ерозійної стійкості деталей [8...10].

Для азотування найбільш придатними є леговані конструкційні, інструментальні, мартенситні корозійностійкі та жароміцні сталі. Їх спільною

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 10   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

особливістю є наявність легуючих елементів із високою спорідненістю до азоту. У сталях із Cr, Mo, V, Al і W азот не лише розчиняється у твердому розчині, а й утворює нітриди або карбонітриди, які дисперсно зміцнюють дифузійний шар. Саме тому високолеговані сталі після азотування можуть досягати значно вищої поверхневої твердості, ніж вуглецеві або низьколеговані сталі.

Структура азотованого шару зазвичай має градієнтну будову (рисунок 1.2): на поверхні формується сполучний, або так званий «білий», шар, нижче – дифузійна зона, а далі – серцевина матеріалу. Після газового азотування може формуватися тонкий товщиною близько 7...8 мкм і дифузійний шар порядку десятків мікрометрів [9, 11].

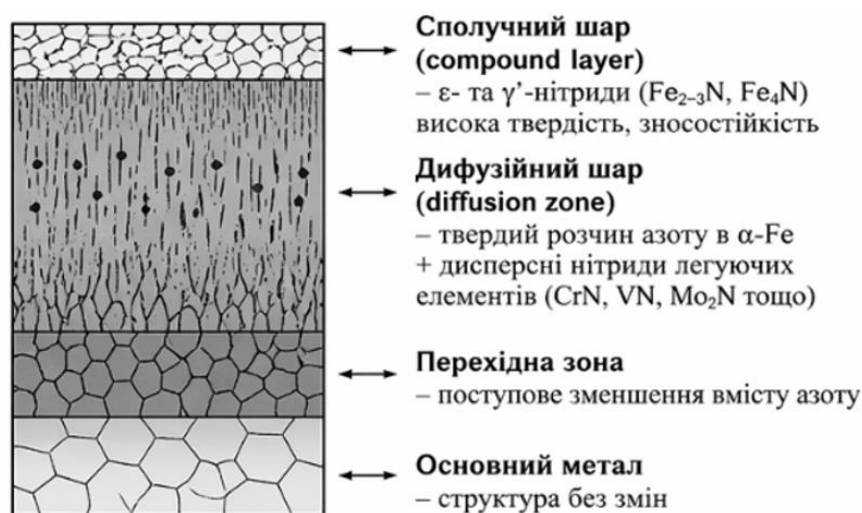


Рисунок 1.2 – Схема будови азотованого шару [11]

Особливо важливою характеристикою високолегованих сталей є їх вихідний структурний стан. У мартенситних і інструментальних сталях азотування відбувається на фоні мартенситної матриці, карбідів і залишкового аустеніту. Структура азотованої зони залежить від температури та часу процесу, а також від наявності карбідів у матриці.

У корозійностійких високолегованих сталях важливо враховувати присутність хрому. Cr сприяє утворенню твердих нітридів CrN і  $\text{Cr}_2\text{N}$ , що підвищує твердість і зносостійкість, але надмірне виділення нітридів хрому

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 11   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

може збіднювати прилеглі ділянки матриці хромом і знижувати корозійну стійкість. Тому для аустенітних і мартенситних нержавіючих сталей часто застосовують низькотемпературне плазмове азотування, яке дає змогу сформувати азотонасичений шар без надмірної втрати корозійної стійкості (таблиця 1.1).

Для сталей із високим вмістом хрому, молібдену і ванадію важливо не лише сформувати твердий поверхневий шар, а й уникнути надмірної крихкості.

Таблиця 1.1 – Особливості азотування легованих сталей

| Група сталей                      | Типові легуючі елементи | Особливість під час азотування                                                 | Очікуваний ефект                                            |
|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Інструментальні гарячої роботи    | Cr, Mo, V               | Формування нітридів і карбонітридів у мартенситній матриці                     | Підвищення твердості, теплостійкості, зносостійкості        |
| Швидкорізальні сталі              | W, Mo, V, Cr            | Наявність великої кількості карбідів; азотування змінює поверхневу зону        | Підвищення зносостійкості різального інструменту            |
| Мартенситні корозійностійкі сталі | Cr, Mo, Ni              | Ризик утворення CrN і зниження корозійної стійкості при завищених температурах | Підвищення твердості за умови контролю температури          |
| Аустенітні нержавіючі сталі       | Cr, Ni, Mo              | Доцільне низькотемпературне азотування для формування азотонасиченого шару     | Зростання твердості без значної втрати корозійної стійкості |
| Жароміцні сталі                   | Cr, Mo, V, W            | Потреба у стабільному шарі при підвищених температурах                         | Підвищення опору зношуванню та термічній втомі              |

Надто товстий або пористий сполучний шар може погіршити опір ударному навантаженню та сприяти відшаруванню. Під час вибору режиму азотування необхідно контролювати температуру, тривалість, активність азоту та склад газового середовища. Основний шар забезпечує високий опір зношуванню, тоді як зона дифузійного шару підвищує опір втомному руйнуванню завдяки зміцненню та стискуючим залишковим напруженням. З

технологічної точки зору високолеговані сталі є складнішим об'єктом азотування, ніж вуглецеві сталі. Їх легування уповільнює дифузію азоту, але одночасно забезпечує вищий ефект дисперсійного зміцнення. Тому для таких сталей часто потрібні довші витримки або застосування плазмового азотування, яке активізує поверхню та покращує керованість процесу [12].

### 1.3. Огляд і порівняльний аналіз методів хіміко-термічної обробки

Методи хіміко-термічної обробки (ХТО) є ключовими технологіями керування властивостями поверхневих шарів сталей і сплавів. Їх сутність полягає у зміні хімічного складу поверхні шляхом дифузійного насичення активними елементами (С, N, В тощо) з подальшим формуванням зміцнених шарів із заданою структурою та властивостями [13]. Вибір конкретного методу визначається умовами експлуатації деталі, вимогами до поверхневого шару та особливостями матеріалу. До основних методів ХТО належать:

- цементация (насичення вуглецем);
- азотування (насичення азотом);
- нітроцементация (одночасне насичення С і N);
- борування;
- ціанування та карбонітрування.

Ці методи відрізняються механізмом насичення, температурою процесу, товщиною зміцненого шару та кінцевими властивостями. Згідно з сучасними підручниками з інженерії поверхні, ХТО дозволяє формувати градієнтні структури, де поверхневий шар має високу твердість і зносостійкість, а серцевина зберігає в'язкість і міцність [7, 13].

Цементация є одним із найпоширеніших методів ХТО, що полягає у дифузійному насиченні поверхні вуглецем при температурах 900...950 °С з подальшим гартуванням. У результаті формується високовуглецевий мартенситний шар товщиною до 1...2 мм. Основними перевагами цементации є

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 13   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

висока контактна міцність; ефективність для деталей, що працюють при ударних навантаженнях [14].

Однак для високолегованих сталей цементація має обмеження, пов'язані з високими температурами процесу (ризик росту зерна), значними деформаціями, необхідністю подальшого гартування.

Азотування здійснюється при значно нижчих температурах (480...580 °C), що дозволяє уникнути фазових перетворень у серцевині деталі. У процесі формується тонкий, але надзвичайно твердий поверхневий шар, що складається зі сполучного шару ( $\epsilon$ ,  $\gamma'$  фази) та дифузійної зони [15].

Аналіз показує, що для високолегованих сталей азотування є найбільш доцільним методом, оскільки:

- забезпечує максимальну твердість при мінімальних деформаціях;
- не потребує гартування;
- добре узгоджується з легованим складом сталі;
- дозволяє формувати стабільний поверхневий шар при експлуатації.

Азотування є оптимальним методом хіміко-термічної обробки для підвищення експлуатаційних властивостей деталей із високолегованих сталей, що обґрунтовує його вибір як базової технології у даній роботі. Ці властивості роблять азотування оптимальним для високолегованих сталей, особливо інструментальних і корозійностійких, однак слід враховувати один вагомий недолік – тривалість процесу, доцільність азотування має враховувати цей фактор. Порівняння методів ХТО відображено в таблиці 1.2.

Серед запропонованих для порівняння методів ХТО, азотування має найнижчу температуру процесу і при відносно тонкому поверхневому шарі дає можливість отримати високу твердість та зносостійкість.

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 14   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика методів ХТО

| Метод           | Температура<br>, °C | Товщина<br>шару | Твердість,<br>HV | Деформації | Особливості                             |
|-----------------|---------------------|-----------------|------------------|------------|-----------------------------------------|
| Цементация      | 900-950             | 1-2 мм          | 700-800          | значні     | глибокий шар,<br>потребує<br>гартування |
| Азотування      | 480-580             | 0,1-0,6 мм      | 900-1200         | мінімальні | висока<br>твердість,<br>стабільність    |
| Нітроцементация | 700-900             | 0,3-0,8 мм      | 700-900          | помірні    | компроміс<br>властивостей               |
| Борування       | 800-1000            | 0,05-0,3 мм     | 1500-2000        | значні     | дуже твердо,<br>але крихко              |

#### 1.4. Азотування у виробництві та його технологічні особливості

Азотування як процес хіміко-термічної обробки може реалізовуватись різними технологічними способами, які відрізняються механізмом активації середовища, швидкістю дифузії азоту, керованістю процесу та економічною ефективністю. Вибір конкретного методу визначається типом сталі, геометрією деталі, вимогами до якості поверхневого шару та виробничими можливостями підприємства [16].

Газове азотування є класичним методом, що здійснюється в середовищі аміаку при температурах 500...580 °C. У процесі дисоціації аміаку відбувається утворення активного атомарного азоту, який дифундує в поверхню сталі. До переваг методу можна віднести відносну простоту технології; можливість обробки великогабаритних деталей та рівномірність шару [16, 17]. Однак тривалість процесу до 20...80 годин а керованість фазового складу обмежена. Газове азотування широко застосовується у серійному виробництві, однак для високолегованих сталей часто потребує точного контролю потенціалу азоту.

Плазмове азотування здійснюється в умовах вакууму в тліючому розряді. Деталь виступає катодом, іони азоту прискорюються електричним полем та бомбардують її поверхню, активуючи дифузію. Переваги цього

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      | 15   |

методу полягають у високій керованості процесу, можливості регулювання товщини та складу шару, відсутності значного окиснення, меншій тривалості процесу. Недоліками є складність обладнання, вища вартість установки, обмеження за розмірами деталей. Цей метод є найбільш перспективним для високолегованих сталей, оскільки дозволяє контролювати утворення нітридів і запобігати надмірному виділенню сполук CrN [17].

Рідинне азотування здійснюється в розплавах солей, що містять азотовмісні сполуки. Азот дифундує в поверхню деталі безпосередньо з рідкого середовища. Висока швидкість процесу азотування при даному методі є однією з його переваг, також існує можливість одночасного азотування і карбонізації. Токсичність середовища та складність утилізації відходів обмежують цей спосіб азотування через ризики екологічного характеру. У сучасному виробництві цей метод поступово витісняється плазмовими технологіями. [18].

### 1.5. Висновки та постановка задачі

Проведено комплексний аналіз умов експлуатації деталей із високолегованих сталей, їх властивостей як об'єкта хіміко-термічної обробки, а також сучасних методів поверхневого зміцнення. Встановлено, що більшість відмов таких деталей обумовлена деградацією поверхневого шару внаслідок зношування, контактної втоми, корозійного впливу та дії змінних навантажень, що визначає доцільність застосування методів інженерії поверхні.

Високолеговані сталі, завдяки наявності елементів з високою спорідненістю до азоту (Cr, Mo, V, Al), є ефективним об'єктом азотування. У процесі дифузійного насичення формуються зміцнені шари з високою твердістю, дисперсною структурою нітридів та сприятливими залишковими напруженнями. Надмірне утворення нітридів, зокрема хрому, може негативно

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 16   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

впливати на корозійну стійкість, що потребує оптимізації технологічних параметрів процесу. Порівняльний аналіз методів хіміко-термічної обробки показав, що азотування має суттєві переваги над цементацією, нітроцементацією та боруванням для високолегованих сталей, оскільки забезпечує високу твердість поверхні при відносно низьких температурах процесу та мінімальних деформаціях. Серед способів реалізації азотування найбільш перспективним є метод, який дозволяє можливості високої керованості, регулювання структури шару та екологічною безпечністю.

Ефективність азотування істотно залежить від комплексу технологічних параметрів, зокрема температури процесу, тривалості витримки, складу газового середовища, потенціалу азоту, а також вихідного структурного стану матеріалу. Недостатня оптимізація цих параметрів може призводити до формування крихких фаз, пористості сполучного шару або недостатньої глибини дифузійної зони.

Мета роботи – розробити та обґрунтувати технологію азотування деталей з високолегованих сталей для підвищення їх твердості, зносостійкості та експлуатаційної довговічності.

Об’єкт дослідження – процес хіміко-термічної обробки деталей з високолегованих сталей методом азотування.

Предмет дослідження – вплив режимів азотування на формування структури, товщини, мікротвердості та експлуатаційних властивостей азотованого шару високолегованих сталей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати умови експлуатації деталей з високолегованих сталей та вимоги до їх поверхневого шару;
- характеризувати високолеговані сталі як об’єкт азотування;
- провести огляд і порівняльний аналіз основних методів хіміко-термічної обробки сталей;

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 17   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

- обґрунтувати вибір методу азотування як раціональної технології поверхневого зміцнення;
- визначити основні технологічні параметри азотування: температуру, тривалість процесу, склад середовища та глибину зміцненого шару;
- розробити технологічну схему азотування деталей з високолегованих сталей.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої технології азотування для підвищення ресурсу деталей із високолегованих сталей, що працюють в умовах тертя, зношування, контактних навантажень і корозійного впливу.

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 18   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

## РОЗДІЛ 2

### ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

#### 2.1. Порівняння технологій азотування

Азотування є одним із найбільш ефективних методів хіміко-термічної обробки високолегованих сталей, оскільки забезпечує формування зміцненого поверхневого шару без суттєвої зміни геометрії виробу [7,19]. Для силових шпильок, болтів та інших кріпильних елементів із сталі 13X11H2B2МФ, які працюють за умов підвищених температур, циклічних навантажень і контактної тертя, азотування є доцільним способом підвищення зносостійкості, опору втомі та стабільності поверхневого шару.

Для тонкостінних або високоточних виробів складної конфігурації рекомендовано застосовувати низькотемпературне азотування в інтервалі 500...520 °С. За таких температур зберігається стабільність серцевини після попередньої термічної обробки, зменшується ризик короблення, а також формується достатньо твердий дифузійний шар. Тривалість процесу визначається необхідною товщиною зміцненого шару: зі збільшенням часу витримки глибина азотування зростає, однак процес має дифузійний характер і сповільнюється з часом.

Підвищення температури азотування прискорює дифузію азоту та збільшує товщину шару, проте водночас може знижувати його твердість [11]. Це пояснюється коагуляцією нітридів легувальних елементів, зокрема Cr, Mo, V, W, а також зменшенням дисперсності нітридної фази. Для деталей типу силових шпильок доцільною є товщина зміцненого шару близько 0,30...0,60 мм, що забезпечує поєднання високої поверхневої твердості та достатньої несучої здатності шару.

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 19   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

Більш сучасним і технологічно керованим методом є іонне, або плазмове, азотування. Процес проводять у розрідженій азотовмісній атмосфері, де оброблювана деталь є катодом, а стінки камери – анодом. Під дією тліючого розряду іони азоту бомбардують поверхню деталі, активують її, очищують від оксидних плівок і забезпечують дифузійне насичення азотом. Плазмове азотування зазвичай реалізується у дві стадії: катодне очищення поверхні та власне насичення азотом.

У традиційному газовому азотуванні при 500...520 °С тривалість процесу може становити 24...60 год (рисунок 2.1), що є основним технологічним недоліком методу [7, 11]. Для скорочення тривалості застосовують двоступінчасте азотування: перший етап проводять при 500...520 °С для формування високотвердого поверхневого шару, а другий – при 540...560 °С для інтенсифікації росту дифузійної зони. Такий підхід дозволяє зменшити загальний час обробки без істотного зниження твердості поверхні.

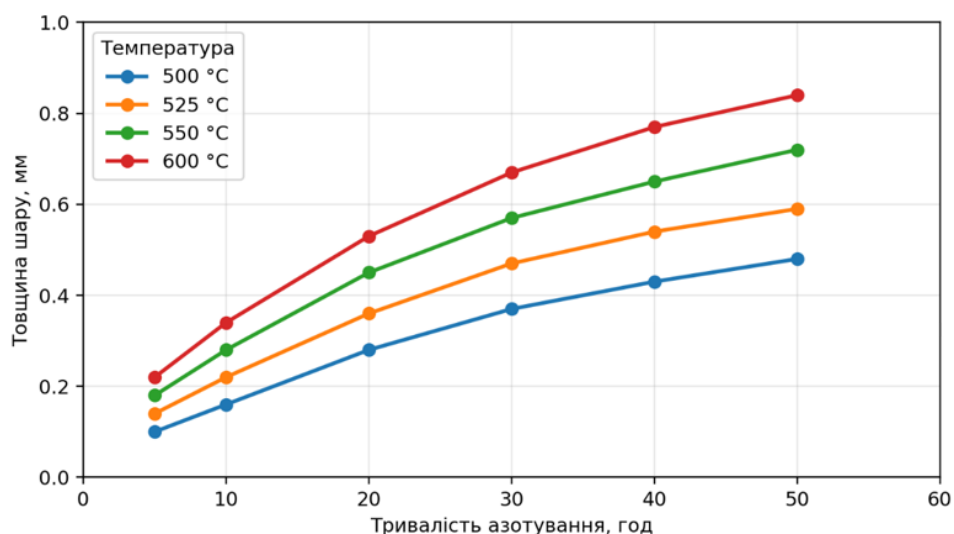


Рисунок 2.1 – Вплив температури та часу обробки на твердість і товщину азотованого шару

Катодне очищення триває орієнтовно 5...60 хв і забезпечує видалення поверхневих забруднень та оксидів. Основне азотування проводять при 470...580 °С, тиску близько 1...10 мм рт. ст. та тривалості 1...24 год.

Перевагою плазмового азотування є суттєве скорочення часу процесу, можливість регулювання фазового складу шару, менша деформація деталей і краща рівномірність насичення складнопрофільних поверхонь. Саме тому для силових шпильок із сталі 13X11H2B2MФ найбільш доцільним є плазмове азотування при 500...530 °С протягом 10...16 год.

Окремим різновидом процесу є нітроцементация / нітрокарбюризація, коли поверхня насичується не лише азотом, а й вуглецем. У результаті формується тонкий карбонітридний шар типу  $Fe_{2-3}(N,C)$ , який має меншу крихкість порівняно з чисто нітридною білою зоною та забезпечує високий опір зношуванню. Таку обробку часто проводять при температурі близько 570 °С протягом 1,5...3 год у газових або рідких середовищах. Для легованих сталей твердість карбонітридного шару може досягати HV 600...1100.

Рідинне азотування, відоме також як теніфер-процес, проводять у розплавах солей при температурі близько 570 °С протягом 0,5...3 год. Воно забезпечує формування тонкого карбонітридного шару завтовшки близько 7...15 мкм і дифузійної зони до 0,15...0,50 мм. Перевагами методу є мала деформація, висока зносостійкість і коротка тривалість процесу. Основними недоліками залишаються токсичність соляних ванн, екологічні обмеження та складність утилізації відпрацьованих середовищ.

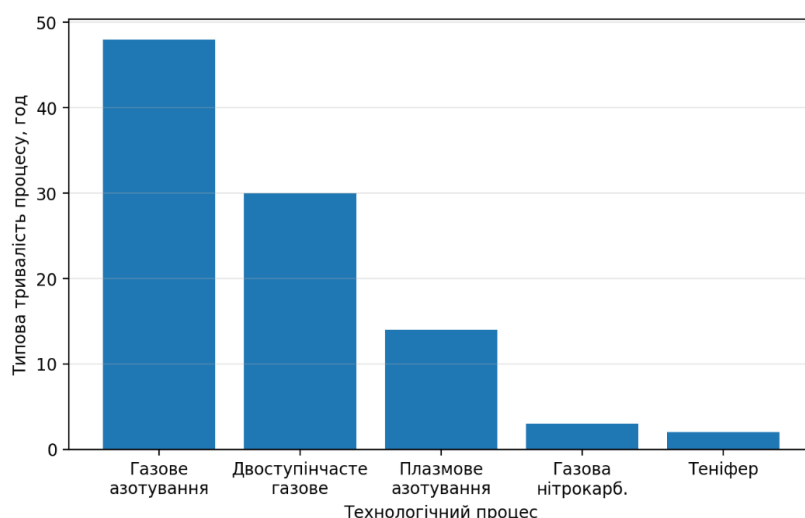


Рисунок 2.2 – Порівняння тривалості процесів

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 21   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

Для обраної сталі 13X11H2B2MФ найбільш раціональним варіантом є плазмове азотування, оскільки воно краще відповідає вимогам до високоточних силових шпильок: забезпечує контрольовану товщину шару, мінімальне короблення, можливість обробки різьбової поверхні та формування нітридів легувальних елементів Cr, Mo, V і W [19].

Аналіз представлених залежностей (рисунок 2.2) свідчить, що зі збільшенням температури азотування від 500 до 600 °С інтенсивність дифузії азоту зростає, що супроводжується збільшенням товщини зміцненого шару. Для сталі 13X11H2B2MФ оптимальним є температурний інтервал 510...530 °С, за якого забезпечується формування дифузійного шару товщиною 0,30...0,40 мм при збереженні структурної стабільності серцевини.

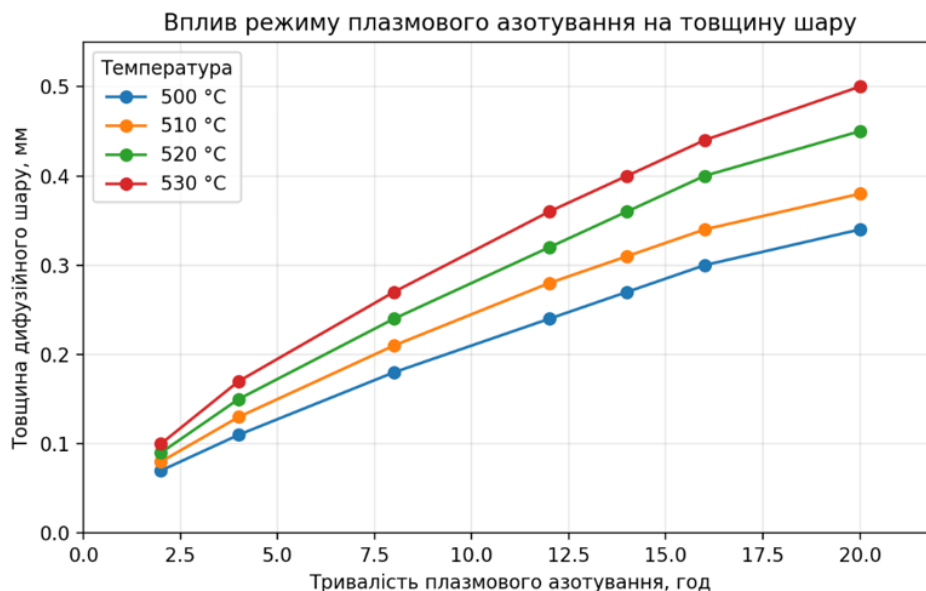


Рисунок 2.3 – Вплив температури на твердість і товщину шару після плазмового азотування

## 2.2. Обґрунтування вибору технології азотування

Одним із найбільш ефективних методів дифузійного зміцнення сталевих деталей є іонно-плазмове азотування, яке належить до прогресивних

різновидів хіміко-термічної обробки. Зазначена технологія широко використовується для підвищення довговічності деталей машин, різального та формоутворювального інструменту, штампового оснащення, елементів енергетичного та авіаційного обладнання, робота яких пов'язана з інтенсивним тертям, контактними навантаженнями, циклічним напруженим станом і впливом підвищених температур.

Сутність іонно-плазмового азотування полягає у дифузійному насиченні поверхневих шарів металу атомарним азотом в умовах низького тиску в активованому газорозрядному середовищі. Процес реалізується у герметичній вакуумній камері, де оброблювані деталі виконують функцію катода, а корпус установки – анода. Після подачі напруги між електродами формується аномальний тліючий розряд, у результаті якого молекули робочої газової суміші дисоціюють та іонізуються, утворюючи високореакційне плазмове середовище (рисунок 2.4). Активні іони та атоми азоту, взаємодіючи з поверхнею металу, забезпечують її очищення, активацію та подальше дифузійне насичення [10, 19].

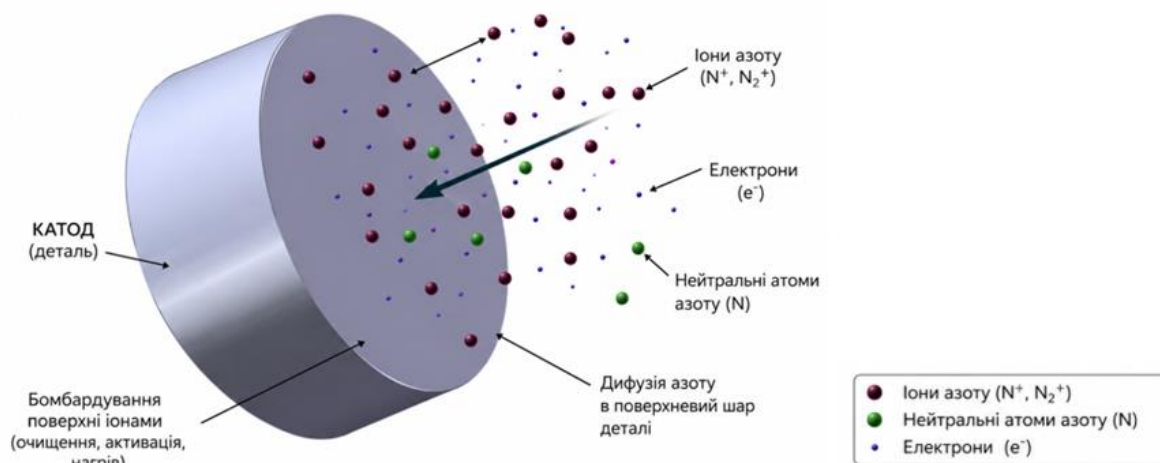


Рисунок 2.4 – Схема процесу іонно-плазмового азотування

Типовий технологічний процес іонно-плазмового азотування здійснюється в середовищі азотно-водневої суміші при тиску 150...1000 Па і температурі 400...700 °С. Вибір конкретного режиму визначається хімічним

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 23   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

складом матеріалу, конструктивними особливостями виробу, необхідною глибиною зміцненого шару та заданими експлуатаційними характеристиками. Основними параметрами, що визначають кінетику насичення та фазовий склад сформованого шару, є температура обробки, тривалість витримки, робочий тиск, співвідношення азоту й водню в робочій атмосфері, а також енергетичні характеристики тліючого розряду.

Для легованих і жароміцних мартенситних сталей, зокрема для сталі 13X11N2B2МФ, найбільший практичний інтерес становить низькотемпературне плазмове азотування в інтервалі 480...530 °С. Застосування таких температур дозволяє формувати високоміцний дифузійний шар без суттєвого зниження твердості серцевини після попередньої термічної обробки. Це особливо важливо для силових кріпильних елементів, різьбових деталей та компонентів газотурбінних установок, де одночасно потрібні висока поверхнева твердість і збереження об'ємної міцності.

Плазмове азотування, на відміну від традиційного газового, рідинного або порошкового азотування, забезпечує формування більш однорідного дифузійного шару з керованим фазовим складом, мінімальною товщиною крихкої сполучної зони та значно меншою деформацією деталей, що особливо важливо для виробів складної конфігурації та точних різьбових елементів [19, 20]. Крім того, завдяки реалізації процесу у вакуумі в умовах тліючого розряду суттєво скорочуються тривалість обробки, витрати робочих газів і енергоспоживання, одночасно підвищуються відтворюваність результатів, екологічна безпечність процесу та можливість автоматизованого керування параметрами зміцнення.

Порівнюючи технологічні процеси, та виходячи із доцільності технологічних процесів, для силової шпильки було обрано технологію плазмowego азотування.

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 24   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

### 2.3. Підготовка деталей до азотування

Якість формування дифузійного азотованого шару, його рівномірність, фазовий склад та експлуатаційні характеристики значною мірою визначаються станом поверхні деталей перед проведенням іонно-плазмового азотування. Особливо це актуально для силових шпильок, які працюють в умовах підвищених статичних і циклічних навантажень, де навіть незначні поверхневі дефекти можуть стати осередками концентрації напружень і ініціації втомного руйнування. У зв'язку з цим підготовка деталей до хіміко-термічної обробки є одним із ключових етапів розроблюваного технологічного процесу.

Досліджувані силові шпильки виготовляються зі сталі 13X11H2B2МФ, яка належить до класу високолегованих жароміцних мартенситних сталей і характеризується підвищеною схильністю до пасивації поверхні внаслідок високого вмісту хрому. Тому перед азотуванням особливу увагу необхідно приділяти видаленню оксидних плівок та активації поверхні.

Перед проведенням іонно-плазмового азотування шпильки повинні пройти попередню термічну обробку, яка забезпечує формування стабільної структури серцевини та мінімізацію внутрішніх напружень. Для сталі 13X11H2B2МФ доцільним є застосування гартування при температурі 1020...1040 °С з подальшим охолодженням на повітрі та високого відпуску при температурі 540...560 °С. Температура відпуску повинна перевищувати температуру майбутнього азотування не менше ніж на 20...30 °С, що забезпечує структурну стабільність серцевини та виключає її додаткове розміцнення в процесі плазмового насичення.

Після термічної обробки деталі піддаються повній механічній обробці, яка включає токарну обробку, формування посадочних поверхонь, нарізання метричної різьби М16×1,5, шліфування та остаточне доведення функціональних поверхонь. Параметри шорсткості поверхні, що підлягає азотуванню, повинні відповідати значенням не менше  $R_a$  1,25...2,5 мкм, що

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 25   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

забезпечує рівномірне формування дифузійного шару та стабільність кінетики насичення.

Конструктивні елементи шпильки не повинні містити гострих кромek, підрізів, надмірно малих радіусів переходу або інших геометричних концентраторів напружень. Особливу увагу слід приділяти переходам між різьбовою та гладкою частинами стрижня, оскільки саме в цих зонах під час експлуатації концентруються максимальні напруження.

#### 2.4. Проектування технологічного процесу плазмового азотування

Іонно-плазмове азотування силових шпильок зі сталі 13X11H2B2MФ виконується у вакуумній установці тліючого розряду з катодним завантаженням деталей у середовищі азотно-водневої газової суміші (рисунок 2.5). Технологічний процес призначений для формування на різьбових і посадочних поверхнях шпильок дифузійного зміцненого шару з підвищеною твердістю, контактною витривалістю та зносостійкістю за умови збереження міцності серцевини.

Перед проведенням азотування силові шпильки повинні пройти попередню термічну обробку відповідно до режимів, наведених у таблиці 2.1. Для сталі 13X11H2B2MФ рекомендовано проводити гартування при температурі 1020...1040 °C з охолодженням на повітрі та високий відпуск при температурі 540...560 °C з витримкою 3...4 год, що забезпечує формування структури відпущеного мартенситу з дисперсними карбідами легувальних елементів.

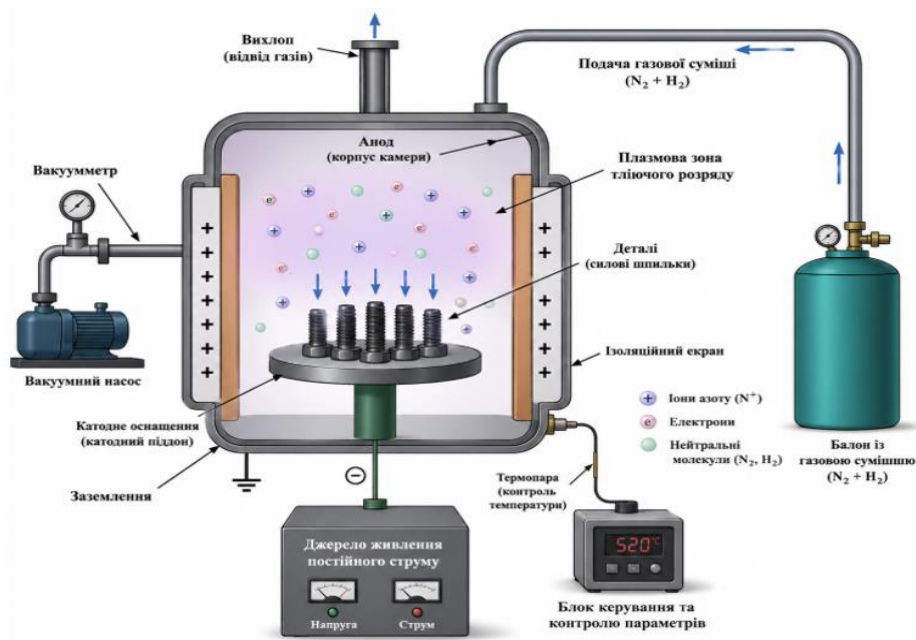
Таблиця 2.1 – Режим попередньої термічної обробки

| Матеріал    | Гартування                 | Відпуск                         | Твердість |
|-------------|----------------------------|---------------------------------|-----------|
| 13X11H2B2MФ | 1020-1040 °C<br>повітряне. | 540-560 °C, 3-4 год<br>повітря. | 32-40 HRC |

Після завершення попередньої термічної та механічної обробки силові шпильки встановлюють на катодному технологічному оснащенні таким чином, щоб виключити контакт різбових поверхонь між собою та забезпечити рівномірний доступ плазмового середовища до всіх функціональних поверхонь (рисунок 2.5, б).



а



б

Рисунок 2.5 – Загальний вигляд вакуумної установки для плазмового азотування (а), схема установки (б)

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 27   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

Основними технологічними параметрами процесу є температура азотування, робочий тиск у вакуумній камері, склад газового середовища, напруга тліючого розряду, тривалість катодного очищення та ізотермічної витримки.

Перед основною стадією насичення проводиться вакуумування робочої камери до залишкового тиску не більше 10...20 Па. Після досягнення заданого вакууму в камеру подається технологічна газова суміш, що складається з 75 % водню та 25 % азоту. Робочий тиск процесу встановлюється в межах 300...500 Па.

Після стабілізації газового середовища проводиться катодне очищення поверхні деталей у тліючому розряді при напрузі 800...1100 В протягом 20...30 хв. Дана операція забезпечує видалення пасивуючих оксидних плівок, адсорбованих газів та органічних забруднень, що особливо важливо для хромистих жароміцних сталей. Основна стадія азотування проводиться при температурі 510...530 °С. Для силових шпильок зі сталі 13X11H2B2MФ раціональним є режим 520 °С з витримкою 14 год, що забезпечує формування дифузійного шару товщиною 0,30...0,40 мм при поверхневій твердості 900...1050 HV.

Під час проведення процесу контролюються температура садки, тиск робочого середовища, сила струму розряду та стабільність плазмового факела. У випадку тимчасового зниження температури або короткочасного припинення електроживлення цикл азотування призупиняється, а тривалість вимушеної паузи не враховується до загального технологічного часу витримки.

Після завершення ізотермічної витримки охолодження деталей здійснюється безпосередньо у вакуумній камері в атмосфері захисного газового середовища до температури 180...200 °С, що дозволяє запобігти окисненню поверхні та появі кольорів мінливості. Після досягнення вказаної температури камеру розгерметизують і виконують вивантаження деталей.

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 28   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

Послідовність операцій подано на рисунку 2.6. На рисунку 2.7 подано температурно-часовий графік режиму плазмового азотуванні силовій шпильки.



Рисунок 2.6 – Схема послідовності технологічного процесу азотування деталей

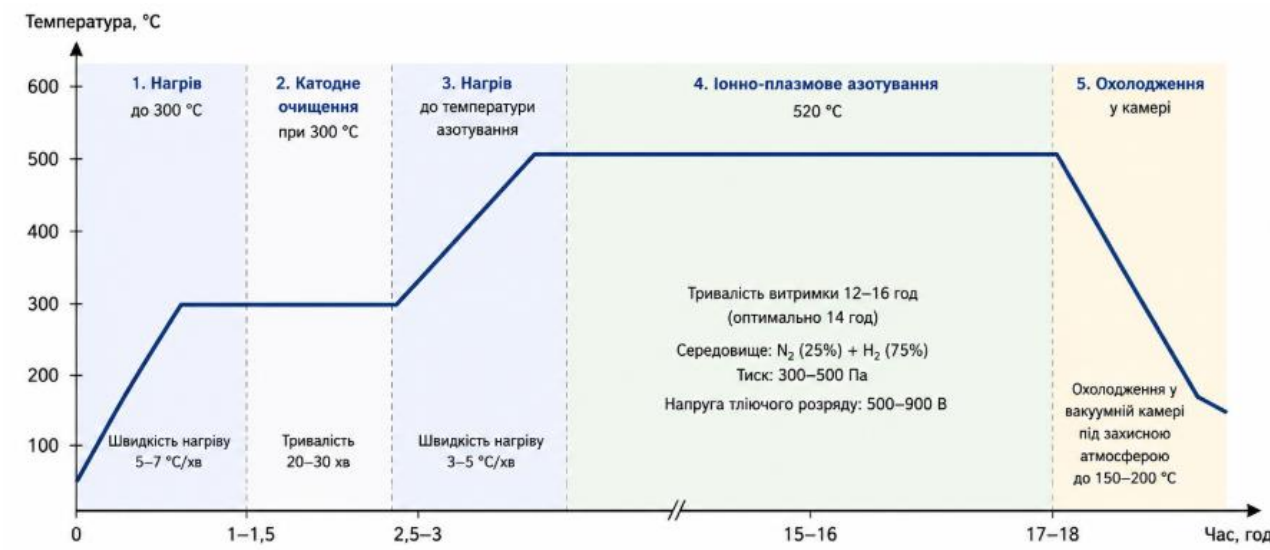


Рисунок 2.7 – Графік режиму іонно-плазмового азотування силовій шпильки зі сталі 13X11H2B2MФ

Азотовані шпильки повинні мати рівномірну матово-сіру поверхню без локальних перегрівів, плям, слідів мікродугового пробою, викришування або поверхневих мікротріщин. Одночасно з основними деталями в камеру завантажують контрольні зразки, виготовлені з тієї ж сталі та піддані аналогічній попередній термічній обробці. Контрольні зразки використовуються для визначення глибини дифузійного шару, мікроструктури та мікротвердості після завершення процесу. Режим іонно-плазмового азотування забезпечує формування на поверхні силових шпильок зі сталі

13X11H2B2МФ однорідного зміцненого шару з високою твердістю, підвищеним опором контактному зношуванню та втомному руйнуванню, що є необхідною умовою експлуатації в умовах гарячої зони енергетичних установок. Очікується формування зміцненого шару загальною товщиною 0,30...0,40 мм, при цьому товщина сполучного шару не перевищує 10...15 мкм, а поверхнева мікротвердість досягає 900...1050 HV.

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      | 30   |

## РОЗДІЛ 3

### ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

#### 3.1. Характеристика об'єкту дослідження

Об'єктом дослідження в даній роботі є силова шпилька, призначена для формування відповідального різьбового з'єднання в конструкціях, що працюють в умовах підвищених механічних і термічних навантажень (рисунок 3.1). Силкові шпильки належать до групи високонавантажених кріпильних елементів, основним функціональним призначенням яких є створення та тривале збереження попереднього натягу в з'єднанні, забезпечення герметичності вузлів, точного взаємного позиціонування деталей, а також рівномірного розподілу експлуатаційних навантажень у контактних зонах [21].



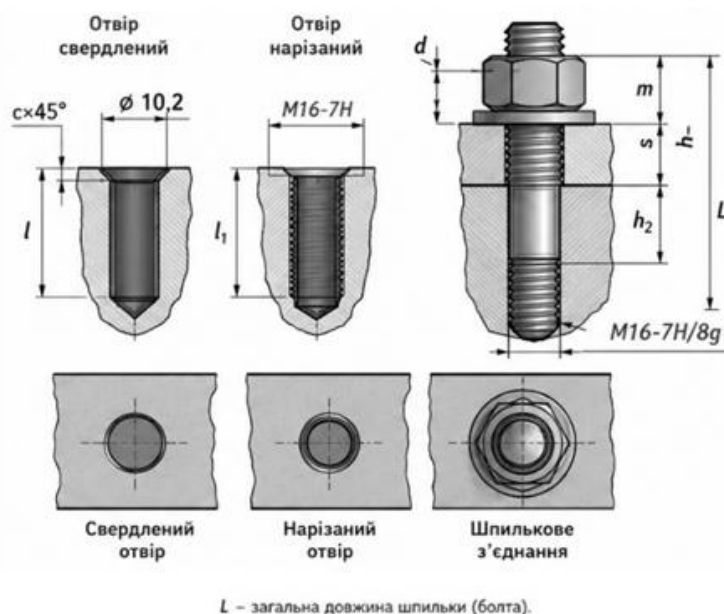
Рисунок 3.1 – Загальний вигляд силових шпильок

На відміну від звичайних болтових з'єднань, шпилькові з'єднання широко застосовуються в тих конструкціях, де необхідне багаторазове

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 31   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

складання та розбирання без пошкодження різбових поверхонь базової деталі, а також у вузлах, що працюють за умов високих температур, вібраційних навантажень, знакозмінного напруженого стану та дії агресивних середовищ. До таких вузлів належать фланцеві з'єднання газотурбінних установок, парових турбін, компресорних систем, камер згоряння, елементів енергетичного та авіаційного обладнання.

У даній роботі як конструктивний прототип прийнято силову шпильку типорозміру M16×1,5×120 мм, яка за своїми геометричними параметрами відповідає поширеним кріпильним елементам гарячої зони газотурбінних агрегатів (рисунок 3.2). Основними робочими поверхнями досліджуваної деталі є різбові ділянки, посадочні циліндричні поверхні та перехідні радіуси, які в процесі експлуатації зазнають найбільшого впливу контактних напружень, фретинг-зношування, локальних пластичних деформацій та циклічного навантаження.



$d$  – номінальний діаметр різьби (M16);  
 $m$  – висота гайки;  
 $s$  – товщина шайби;  
 $h_1$  – товщина верхньої деталі;

$h_2$  – товщина нижньої деталі (фланця);  
 $l$  – глибина свердленого отвору;  
 $l_1$  – глибина нарізаного отвору;  
 $l_0$  – довжина згинчування;

Рисунок 3.2 – З'єднання шпилькою

Аналіз умов експлуатації показує, що найбільш критичними зонами силових шпильок є западини різьбового профілю, ділянки переходу від різьби до гладкої частини стрижня, а також контактні поверхні взаємодії з гайкою та шайбами. Саме в цих зонах відбувається концентрація напружень, зародження втомних мікротріщин, розвиток адгезійного зношування та фретинг-корозійних процесів, що в кінцевому підсумку визначає довговічність усього з'єднання. З огляду на це поверхневий стан матеріалу, мікроструктура приповерхневого шару та рівень залишкових стискуючих напружень мають визначальний вплив на експлуатаційну надійність деталі.

Для виготовлення силової шпильки в даній роботі обрано сталь 13X11H2B2MФ, яка належить до класу високолегованих жароміцних мартенситних корозійностійких сталей. Даний матеріал застосовується для виготовлення відповідальних деталей енергетичного та авіаційного машинобудування, що працюють при температурах до 550...600 °С в умовах тривалих статичних і циклічних навантажень.

Хімічний склад сталі характеризується підвищеним вмістом хрому, нікелю, молібдену, вольфраму та ванадію, що забезпечує поєднання жароміцності, структурної стабільності та здатності до дисперсійного зміцнення (таблиця 3.1) [22, 23]. Хром сприяє підвищенню жаростійкості та корозійної стійкості матеріалу, нікель стабілізує структуру та підвищує в'язкість, молібден і вольфрам підвищують опір повзучості та зберігають міцність при тривалому нагріванні, а ванадій забезпечує дисперсійне зміцнення за рахунок утворення карбідних і нітридних фаз.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталі 13X11H2B2MФ

| Елемент      | C         | Cr        | Ni      | W       | Mo      | V         | Mn   | Si   |
|--------------|-----------|-----------|---------|---------|---------|-----------|------|------|
| Кількість, % | 0,10-0,16 | 10,5-12,0 | 1,5-2,5 | 1,0-2,0 | 0,7-1,2 | 0,15-0,35 | ≤0,8 | ≤0,8 |

Після стандартної термічної обробки (гартування та високого відпуску) сталь 13X11H2B2MФ формує структуру відпущеного рейкового мартенситу з

|     |      |          |        |      |                      |  |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|--|--|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ |  |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      |  |  | 33   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |  |  |      |

дисперсними карбідними виділеннями, яка забезпечує високий рівень механічних характеристик. Типові механічні властивості матеріалу після термічної обробки наведено в таблиці 3.2 [22].

Таблиця 3.2 – Механічні властивості сталі 13X11H2B2MФ після термічної обробки

| Властивість                    | Значення     |
|--------------------------------|--------------|
| Тимчасовий опір, $\sigma_B$    | 950-1100 МПа |
| Межа текучості, $\sigma_{0.2}$ | 750-850 МПа  |
| Відносне подовження, $\delta$  | 10-14 %      |
| Відносне звуження, $\psi$      | 40-50 %      |
| Твердість                      | 32-40 HRC    |

Вибір даної сталі для виготовлення силових шпильок обумовлений не лише її високими об'ємними механічними характеристиками, але й значною схильністю до поверхневого зміцнення методами хіміко-термічної обробки. Наявність у складі сталі хрому, молібдену, ванадію та вольфраму створює сприятливі умови для формування дисперсних нітридів під час іонно-плазмового азотування, що дозволяє отримувати поверхневі шари з твердістю 900...1100 HV та товщиною 0,25...0,40 мм без суттєвого зниження в'язкості серцевини.

Силовa шпилька типорозміру M16×1,5×120 мм зі сталі 13X11H2B2MФ поєднує складні умови експлуатації, наявність локально навантажених поверхонь та високу чутливість до структурного стану поверхневого шару, що робить її доцільною для застосування технології іонно-плазмового азотування.

### 3.2. Аналіз структурного стану після термічної обробки

Умовою забезпечення високої експлуатаційної надійності силових шпильок, що працюють в умовах підвищених механічних і термічних навантажень, є формування оптимального структурного стану матеріалу перед проведенням хіміко-термічної обробки. Попередня термічна обробка

високолегованих жароміцних сталей повинна забезпечувати отримання стабільної структури серцевини, необхідного рівня міцності, пластичності та ударної в'язкості, а також мінімізацію залишкових внутрішніх напружень, здатних впливати на геометричну стабільність різьбового профілю в процесі плазмового азотування.

Сталь 13X11H2B2MФ належить до класу мартенситних жароміцних хромонікелевих сталей із карбідним зміцненням. Завдяки комплексному легуванню хромом, нікелем, молібденом, вольфрамом і ванадієм дана сталь характеризується високою прогартуваністю, здатністю до дисперсійного зміцнення та структурною стабільністю в умовах тривалого нагрівання. Після кристалізації структура сталі представлена неоднорідною ферито-карбідною сумішшю з можливими карбідними ліквідаційними виділеннями, що обумовлює необхідність проведення повної термічної обробки перед остаточним механічним та хіміко-термічним зміцненням.

З метою формування необхідного комплексу механічних властивостей для досліджуваної сталі застосовано гартування при температурі 1020...1040 °С з охолодженням на повітрі та подальший високий відпуск при температурі 540...560 °С з витримкою 3...4 год. Такий режим забезпечує повне перетворення структури в аустенітну матрицю, розчинення частини вторинних карбідних фаз та формування пересиченого твердого розчину, який у процесі охолодження трансформується в голчастий мартенсит. На рисунку 3.3 подано температурні режими гартування та високого відпуску досліджуваної сталі.

Після гартування структура сталі представлена переважно пакетним мартенситом із підвищеною густиною дислокацій, незначною кількістю залишкового аустеніту та частково нерозчиненими карбідами легувальних елементів (рисунок 3.4). Такий структурний стан характеризується високою твердістю, однак супроводжується значним рівнем внутрішніх напружень та зниженою пластичністю, що є небажаним для різьбових силових елементів.

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 35   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

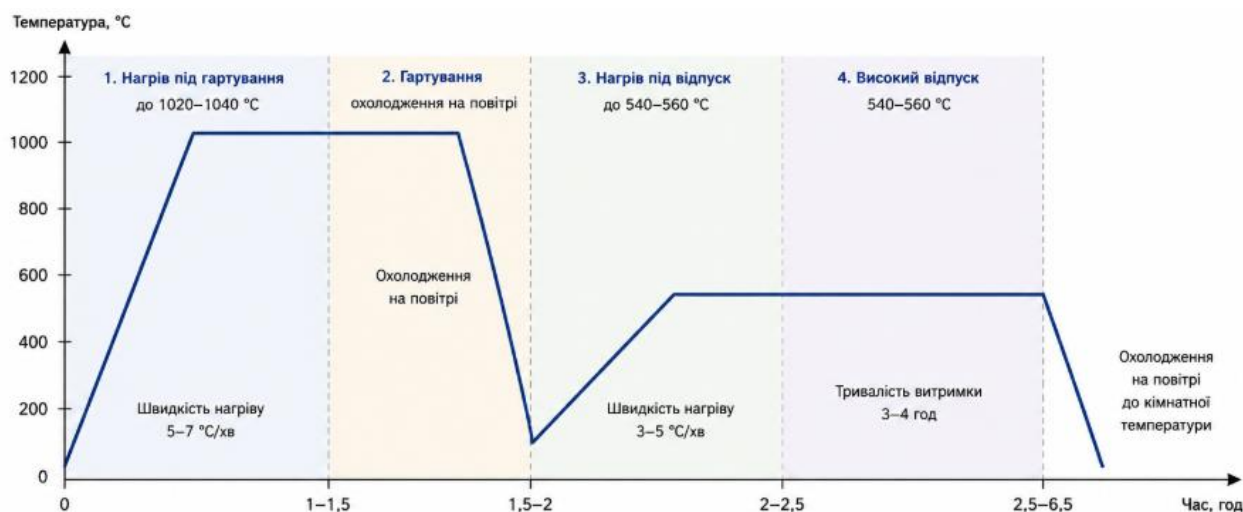


Рисунок 3.3 – Графік режиму попередньої термічної обробки сталі 13X11H2B2МФ



Рисунок 3.4 – Мікроструктура сталі 13X11H2B2МФ після гартування.  $\times 500$ .

Проведення високого відпуску сприяє зниженню внутрішніх напружень, стабілізації мартенситної матриці та виділенню дрібнодисперсних карбідних фаз типу  $M_{23}C_6$ ,  $MC$  та  $M_6C$ , утворених за участю хрому, ванадію, молібдену та вольфраму. У результаті формується структура відпущеного рейкового мартенситу, яка поєднує високий рівень міцності з достатньою пластичністю та ударною в'язкістю (рисунок 3.5).

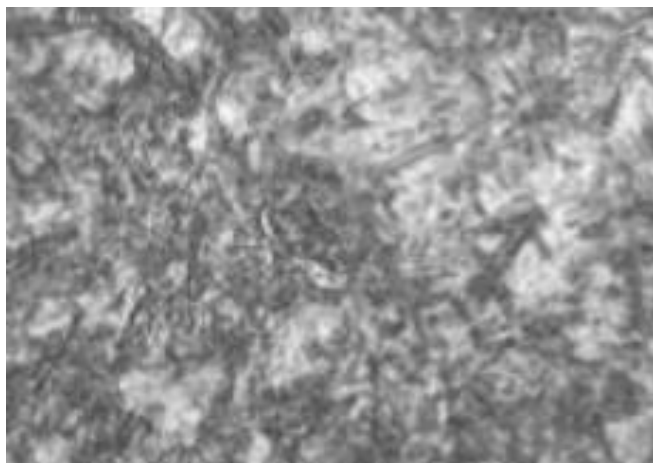


Рисунок 3.5 – Мікроструктура сталі 13X11H2B2МФ після гартування і високого відпуску.  $\times 500$

Аналіз структурного стану показує, що після завершення термічної обробки в матеріалі формується рівномірна дрібнодисперсна мартенситно-карбідна структура без ознак перегріву, коагуляції карбідної фази або міжзеренного виснаження легувальними елементами. Саме такий структурний стан є найбільш сприятливим для подальшого іонно-плазмового азотування, оскільки забезпечує активну взаємодію легувальних елементів із дифундуючим азотом та інтенсивне утворення дрібнодисперсних нітрідів.

### 3.3. Структурний стан деталі після азотування

Під час іонно-плазмового азотування силових шпильок зі сталі 13X11H2B2МФ, попередньо підданих гартуванню та високому відпуску, в приповерхневих шарах металу відбувається комплекс фізико-хімічних і структурних перетворень, пов'язаних з адсорбцією активованих частинок азоту, їх іонним бомбардуванням поверхні, дифузійним проникненням у кристалічну ґратку заліза та взаємодією з легувальними елементами матриці. У результаті таких процесів формується багат шарова зміцнена структура, яка

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 37   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

істотно відрізняється від структури серцевини як за фазовим складом, так і за дислокаційним станом, морфологією виділень та рівнем внутрішніх напружень.

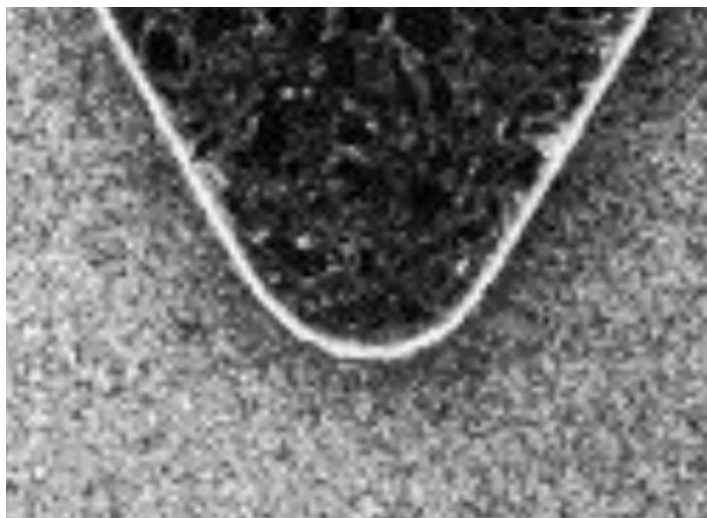
Початкова структура сталі після попередньої термічної обробки представлена відпущеним рейковим мартенситом з рівномірно розподіленими дисперсними карбідами і характеризується високою густиною дислокацій, значною кількістю меж рейок мартенситу, субзеренних меж та дефектів кристалічної будови, які в процесі азотування виконують роль прискорених шляхів дифузії азоту. Саме це забезпечує високу кінетику насичення навіть при відносно низьких температурах процесу 510...530 °С.

На початковій стадії іонно-плазмового азотування під дією аномального тліючого розряду поверхня силової шпильки піддається катодному очищенню. Позитивно заряджені іони азоту та водню, прискорені електричним полем, бомбардують катодну поверхню, викликаючи руйнування пасивуючих оксидних плівок, десорбцію поверхневих забруднень та активацію поверхневих атомів металу. Для високолегованої хромистої сталі цей етап має принципове значення, оскільки наявність стабільної плівки оксиду хрому суттєво ускладнює початкове проникнення азоту в металеву матрицю.

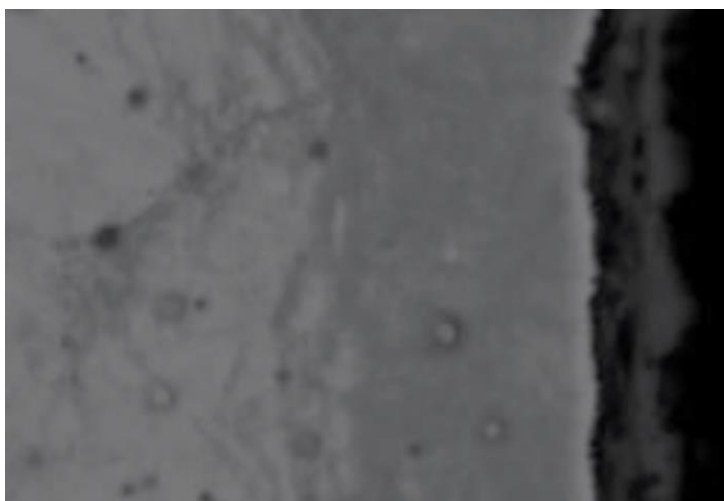
Після завершення катодної активації на поверхні металу відбувається інтенсивна адсорбція атомарного азоту, який, завдяки високій хімічній активності, починає розчинятися в  $\alpha$ -твердому розчині заліза. Концентрація азоту в поверхневих шарах поступово зростає до рівня, при якому система стає термодинамічно нестійкою, що призводить до утворення перших нітридних фаз. На поверхні деталі формується так званий сполучний шар, який складається переважно з нітридів заліза фазового складу  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N та частково  $\varepsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N. Для режимів, обраних у даній роботі, з температурою азотування 520 °С та використанням азотно-водневої суміші зі зниженим азотним потенціалом, формування надмірно товстого  $\varepsilon$ -шару обмежується, що

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 38   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

дозволяє мінімізувати крихкість поверхні та зберегти високу контактну витривалість різбового профілю (рисунок 3.6).



а



б

Рисунок 3.6 – Структура азотованого шару:

а – на поверхні різі.  $\times 300$ ;

б – на циліндричній поверхні.  $\times 800$ .

Безпосередньо під сполучним шаром формується дифузійна зона, яка є основною функціональною частиною зміцненого шару. У цій області атоми азоту дифундують у мартенситну матрицю та вступають у взаємодію з

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 39   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

легувальними елементами, які мають високу спорідненість до азоту. У результаті відбувається виділення дрібнодисперсних нітридів типу:

- CrN, Cr<sub>2</sub>N – нітриди хрому;
- VN – нітриди ванадію;
- Mo<sub>2</sub>N – нітриди молібдену;

Дані виділення рівномірно розташовуються в межах мартенситних рейок, по дислокаційних скупченнях та субзернових межах, утворюючи ефективну систему дисперсійного зміцнення. Внаслідок цього рух дислокацій суттєво ускладнюється, що приводить до різкого зростання мікротвердості поверхневих шарів.

У процесі дифузійного насичення атоми азоту частково займають міжвузлові позиції в об'ємноцентрованій кубічній ґратці  $\alpha$ -заліза, викликаючи її локальне викривлення. Виникатимуть значні залишкові стискуючі напруження, які є одним із головних факторів підвищення втомної міцності та опору контактному руйнуванню різбових поверхонь.

Особливо важливим для силових шпильок є те, що дифузійна зона формується не лише на гладких поверхнях, але й у западинах різбового профілю, де спостерігається максимальна концентрація експлуатаційних напружень. Наявність стискуючих залишкових напружень у цих зонах суттєво знижує ймовірність зародження втомних тріщин і розвитку фретинг-зношування.

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 40   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

## РОЗДІЛ 4

### АНАЛІЗ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

#### 4.1. Аналіз зміни мікротвердості поверхні

Після іонно-плазмового азотування контроль товщини зміцненого шару здійснювали на спеціально підготовлених металографічних шліфах, виготовлених із контрольних зразків. Зразок розрізали перпендикулярно до азотованої поверхні, заливали у полімерну оправку, після чого послідовно шліфували, полірували і протравлювали 4 %-м розчином азотної кислоти в етиловому спирті (ніталь). Подальше дослідження проводили за допомогою оптичного мікроскопа, де за характерною межею між дифузійною зоною та основним металом визначали загальну товщину азотованого шару. Металографічний аналіз виконували відповідно до вимог ДСТУ 3008:2015 [24].

Визначення мікротвердості азотованого шару проводили методом Віккерса згідно ДСТУ EN ISO 6507 [25] на тому ж мікрошліфі за допомогою мікротвердоміра при навантаженнях  $HV_{0.05}$ . Відбитки алмазної піраміди мають бути послідовними: від поверхні в напрямку до серцевини з кроком 25...50 мкм, що дозволяє побудувати профіль розподілу твердості по глибині зміцненого шару та точно визначити ефективну глибину азотування. Для сталі силової шпильки очікувана поверхнева мікротвердість після плазмового азотування становить 900...1050 HV, а зниження до рівня твердості серцевини спостерігається на глибині близько 0,30...0,40 мм. Випробування виконують відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 6507 – Метод Віккерса. У таблиці 4.1 подано основні властивості після обробки.

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 41   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

Отриманий рівень твердості та структурна стабільність серцевини є достатніми для подальшого проведення плазмового азотування без ризику об'ємного розміцнення матеріалу (таблиця 4.2; рисунок 4.1).

Таблиця 4.1 – Властивості сталі 13X11H2B2МФ після плазмового азотування

| Властивість                    | Значення     |
|--------------------------------|--------------|
| Тимчасовий опір, $\sigma_B$    | 950-1100 МПа |
| Межа текучості, $\sigma_{0,2}$ | 750-850 МПа  |
| Відносне подовження, $\delta$  | 10-14 %      |
| Відносне звуження, $\psi$      | 40-50 %      |
| Твердість                      | 32-40 HRC    |

Важливою перевагою обраного режиму є те, що температура азотування (510...530 °C) є нижчою за температуру попереднього відпуску, що виключає повторні фазові перетворення в серцевині деталі та забезпечує збереження заданого комплексу механічних властивостей.

Таблиця 4.2 – Зміна твердості по глибині азотованого шару

| Глибина шару, мм | Мікротвердість, HV <sub>0.05</sub> |
|------------------|------------------------------------|
| 0,00             | 1020                               |
| 0,05             | 980                                |
| 0,10             | 930                                |
| 0,15             | 860                                |
| 0,20             | 780                                |
| 0,25             | 650                                |
| 0,30             | 520                                |
| 0,35             | 420                                |

Загалом, проведена обробка забезпечує формування структурно стабільної мартенситно-карбідної матриці з високим рівнем міцності та достатньою пластичністю, що створює оптимальні передумови для подальшого формування дифузійного азотованого шару в процесі іонно-плазмового зміцнення.

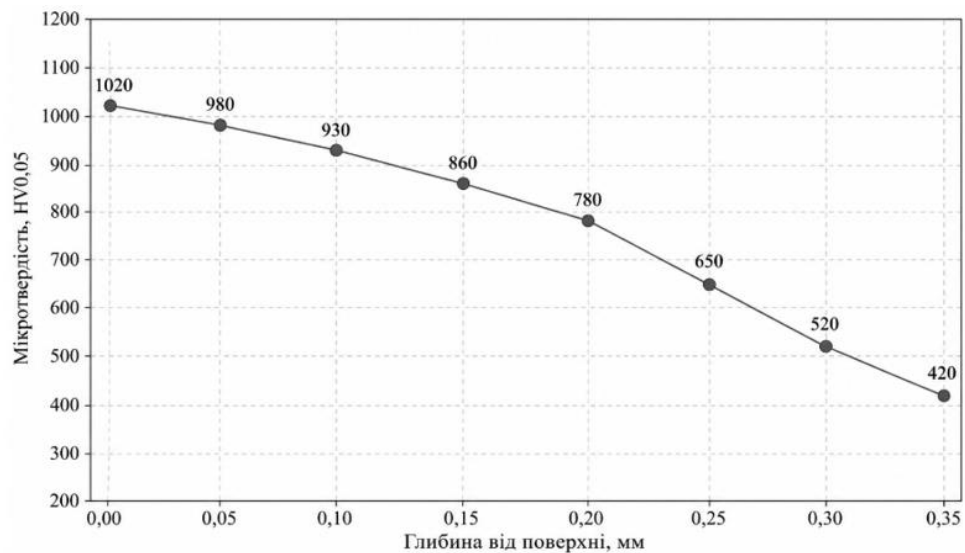


Рисунок 4.1 – Мікротвердість поверхневого шару залежно від глибини азотованого шару

Отримані дані і візуалізація через залежність свідчить, що максимальна мікротвердість формується безпосередньо в приповерхневій зоні та досягає 1020 HV<sub>0,05</sub>, що обумовлено утворенням сполучного шару та високою концентрацією азоту. Із віддаленням від поверхні спостерігається закономірне зниження твердості внаслідок зменшення концентрації нітридоутворюючих фаз, а на глибині 0,30...0,35 мм твердість наближається до значень основного металу, що підтверджує формування дифузійного шару товщиною близько 0,30...0,40 мм.

#### 4.2. Формування експлуатаційних характеристик

Аналіз літературних даних та результатів досліджень мартенситних високолегованих сталей після плазмового азотування показує, що реалізація обраного технологічного режиму дозволяє досягти суттєвого підвищення основних експлуатаційних характеристик (таблиця 4.3).

Іонно-плазмове азотування забезпечує формування на поверхні силових шпильок зі сталі 13X11H2B2МФ багатошарової структурно стабільної

системи, яка складається зі сполучного шару, дифузійної зони та зміцненої мартенситної матриці, що підтверджено мікроструктурними дослідженнями. Поєднання високої поверхневої твердості, дрібнодисперсного нітридного зміцнення та залишкових стискуючих напружень забезпечить суттєве підвищення зносостійкості, контактної витривалості та довговічності різбових силових елементів при збереженні об'ємної міцності серцевини.

Таблиця 4.3 – Прогнозована зміна експлуатаційних властивостей після азотування

| Показник               | До азотування | Після азотування       |
|------------------------|---------------|------------------------|
| Твердість поверхні, HV | 360-400       | 900-1050               |
| Зносостійкість         | 1,0 у.о.*     | Зростає у 2,5-2,8 рази |
| Контактна витривалість | 1,0 у.о.*     | Зростає 2,5-4,0        |
| Межа витривалості      | 1,0 у. о.*    | Зростає 1,8-2,5        |
| Опір заїданню          | 1,0 у. о.*    | Зростає 1,4-1,8        |

\*у.о. – умовно прийнята одиниця для порівняння зміни властивостей.

Формування зазначених фаз сприяє виникненню високого рівня залишкових стискуючих напружень, які суттєво підвищують втомну довговічність різбових поверхонь. Для силових шпильок це має особливе значення, оскільки зародження втомних тріщин зазвичай відбувається саме у западинах різбового профілю.

## ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

У кваліфікаційній роботі відповідно до поставленої мети, яка полягала у проєктуванні технологічного процесу іонно-плазмового азотування силової шпильки зі сталі 13X11H2B2MФ виконано комплексний аналіз матеріалу, умов експлуатації деталі, сучасних методів хіміко-термічної обробки та розроблено раціональний технологічний маршрут поверхневого зміцнення.

Встановлено, що основними факторами, які обмежують їх ресурс, є дія циклічних механічних навантажень, підвищених температур, вібраційного впливу, контактного тертя та локальної концентрації напружень у западинах різьбового профілю. Поверхневі шари є найбільш критичними зонами зародження втомних тріщин, фретинг-зношування та контактного руйнування, що обумовлює необхідність застосування ефективних методів поверхневого зміцнення.

Аналіз фізико-механічних та структурних характеристик підтвердив доцільність вибору матеріалу для виготовлення відповідальних силових шпильок, що працюють в умовах підвищених термомеханічних навантажень. Порівняльний аналіз технологій та методів хіміко-термічної обробки підтвердив, що найбільш технологічно доцільним методом поверхневого зміцнення досліджуваної деталі є іонно-плазмове азотування, яке, порівняно з традиційним газовим азотуванням, забезпечує більш високу інтенсивність масопереносу азоту, скорочення тривалості технологічного циклу, мінімальні деформації різьбового профілю, стабільність отриманих властивостей при обробці високолегованих хромистих сталей.

Розроблено технологічний процес виготовлення та зміцнення силової шпильки, який включає попередню термічну обробку, механічну підготовку поверхонь, катодне очищення та подальше іонно-плазмове азотування у вакуумній установці тліючого розряду. Для сталі 13X11H2B2MФ

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 45   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

обґрунтовано раціональний режим попередньої термічної обробки, що передбачає гартування при температурі 1020...1040 °С з охолодженням на повітрі та високий відпуск при температурі 540...560 °С, що забезпечує формування стабільної структури відпущеного мартенситу з дисперсними карбідними виділеннями.

За результатами технологічного проєктування встановлено раціональні параметри іонно-плазмового азотування, які передбачають проведення процесу при температурі 510...530 °С, робочому тиску 300...500 Па, використанні азотно-водневої газової суміші та тривалості ізотермічної витримки 12...16 год. Реалізація запропонованого режиму забезпечує формування однорідного дифузійного шару товщиною 0,30...0,40 мм з поверхневою мікротвердістю 900...1050 HV без структурного розміщення серцевини деталі.

Отримані результати підтверджують досягнення поставленої мети роботи та свідчать про те, що іонно-плазмове азотування є найбільш ефективним і технологічно обґрунтованим методом поверхневого зміцнення силових шпильок зі сталі 13X11H2B2MФ, який забезпечує підвищення експлуатаційної надійності деталей без погіршення їх геометричної точності та об'ємних механічних властивостей.

За результатами виконаної роботи рекомендується застосовувати іонно-плазмове азотування силових шпильок зі сталі 13X11H2B2MФ після попереднього гартування та високого відпуску, причому температура попереднього відпуску повинна перевищувати температуру азотування не менше ніж на 20...30 °С, що забезпечує структурну стабільність серцевини деталі. Перед азотуванням необхідно забезпечувати ретельне очищення поверхні від мастильних матеріалів, оксидних плівок та технологічних забруднень, оскільки стан поверхні безпосередньо впливає на рівномірність дифузійного насичення та однорідність сформованого шару.

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 46   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

Для отримання оптимального співвідношення між твердістю поверхні, товщиною дифузійного шару та в'язкістю різьбових витків рекомендується проводити азотування при температурі 520 °С протягом 14 год, що забезпечує формування зміцненого шару товщиною близько 0,35 мм при поверхневій мікротвердості близько 1000 HV.

Для підтвердження стабільності якості азотованого шару доцільно впроваджувати обов'язковий металографічний контроль товщини шару, контроль мікротвердості відповідно до ДСТУ ISO 6507-1, а також періодичний неруйнівний контроль різьбових поверхонь з метою своєчасного виявлення поверхневих мікродефектів.

Запропонована технологія може бути рекомендована для виготовлення та відновлення відповідальних кріпильних елементів енергетичного, авіаційного, компресорного та спеціального машинобудування, де до деталей висуваються підвищені вимоги щодо довговічності, зносостійкості та роботи в умовах підвищених температур.

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 47   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. - 89 с..
2. Aeshah H. Alamri, Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines – An overview, Engineering Failure Analysis, Volume 116, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104735>.
3. Пінчук С.Й., Рослик І.Г., Гальченко Г.Ю., Амбражей М.Ю. Корозійна поведінка насосно-компресорних труб з легованих хромовмісних сталей. Теорія і практика металургії: Загальнодержавний науково-технічний журнал. – Дніпро: НМетАУ, 2021. - №3, 91 с..
4. Sobol, O., Andreev, A., Stolbovoy, V., Knyazev, S., Barmin, A., & Krivobok, N. (2016). Study of the effect of ion nitriding regimes on the structure and hardness of steel. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(5(80)), 63–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.63659>
5. Berladir, K.; Hovorun, T.; Botko, F.; Radchenko, S.; Oleshko, O. Thin Modified Nitrided Layers of High-Speed Steels. Materials 2025, 18, 2434. <https://doi.org/10.3390/ma18112434>.
6. Landek, D.; Kurtela, M.; Stojanović, I.; Jačan, J.; Jakovljević, S. Corrosion and Micro-Abrasion Properties of an AISI 316L Austenitic Stainless Steel after Low-Temperature Plasma Nitriding. Coatings 2023, 13, 1854. <https://doi.org/10.3390/coatings13111854>.
7. Термічна обробка: конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійних програм «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг та менеджмент» спеціальності 132 «Матеріалознавство» галузі знань 13 «Механічна інженерія» денної та заочної форм навчання / уклад. Н.П. Зайчук, Ю.П. Фещук. – Луцьк: ЛНТУ, 2024. – 96 с.

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 48   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

8. Матеріалознавство та конструкційні матеріали: Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами «Медична інженерія», «Регенеративна та біофармацевтична інженерія» спеціальності 163 «Біомедична інженерія» / Л. Д. Тарасова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2560 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 143 с.

9. Методи досліджень та обробки у видавництві та поліграфії: курс лекцій [Електронний ресурс] // навч. посіб. для докторів філософії спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія» // Укладачі: П. О. Киричок, Т. Ю. Киричок, Т. А. Роїк, О. І. Бараускене. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,38 Мбайт). – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 210 с..

10. Конструкційні матеріали для поліграфічної техніки: курс лекцій [Електронний ресурс] // навч. посіб. для докторів філософії спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія» // Укладач: Т. А. Роїк. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,54 Мбайт). – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 107 с.

11. Термічна обробка: методичні вказівки до практичних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійних програм «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг» спеціальності G8 Матеріалознавство галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво денної та заочної форм навчання / уклад. Н.П. Зайчук, Н.Ю. Імбірович – Луцьк: ЛНТУ, 2026. – 77 с.

12. Термічна обробка: конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійних програм "Матеріалознавство", "Індустріальний інжиніринг та менеджмент" спеціальності 132 "Матеріалознавство" галузі знань 13 "Механічна інженерія" денної та заочної форм навчання / уклад. Н.П. Зайчук, Ю.П. Фещук. – Луцьк: ЛНТУ, 2024. – 96 с.

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 49   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

13. Афтанділянц Є.Г. Матеріалознавство: Підручник / Є.Г. Афтанділянц, О.В. Зазимко, К.Г. Лопатько. – Херсон: Олді-плюс, Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. – 612 с.
14. Totten, G.E. (Ed.). (2006). Steel Heat Treatment Handbook - 2 Volume Set (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482293029>.
15. <https://virgamet.com.ua/blog/azotuvannia-stali-oglyad>.
16. Zhou, Y.-L.; Xia, F.; Xie, A.-J.; Peng, H.-P.; Wang, J.-H.; Li, Z.-W. A Review – Effect of Accelerating Methods on Gas Nitriding: Accelerating Mechanism, Nitriding Behavior, and Techno-Economic Analysis. Coatings 2023, 13, 1846. <https://doi.org/10.3390/coatings13111846>.
16. [https://heattreatmentmasters.com/nitriding-heat-treatment-process/?utm\\_source](https://heattreatmentmasters.com/nitriding-heat-treatment-process/?utm_source).
17. <https://www.slideshare.net/slideshow/ald-france-nitriding-process-and-furnaces-66679353/66679353>.
18. [https://www.hefgroupindia.in/liquid\\_process.html?utm\\_source](https://www.hefgroupindia.in/liquid_process.html?utm_source).
19. M.G. Bolotov, G.P. Bolotov, and M.M. Rudenko, The Impact of Nitriding Parameters on Evolution of Properties of Stainless-Steel Surface Plasma-Nitrided in Glow Discharge, Progress in Physics of Metals, **25**, No. 1: 74–113 (2024)
20. І.В. Смирнов, І.А. Селіверстов, А.В. Чорний. Іонно-плазмове азотування конструкційних сталей. ФОРУМ ІНЖЕНЕРІВ МЕХАНІКІВ 2024 XXVI МНТК “Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта”, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024 131-132 с.
21. Рудь Ю.С. Р 83 Основи конструювання машин: Підручник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. 2-е вид., переробл. - Кривий Ріг: Видавець ФО-П Чернявський Д.О., 2015. – 492 с.; з іл.
22. [https://www.splav-kharkov.com/en/e\\_mat\\_start.php?name\\_id=11&utm\\_source](https://www.splav-kharkov.com/en/e_mat_start.php?name_id=11&utm_source)
23. <https://auremo.biz/materials/stal-13h15n4am3-ep310-vns-5.html>
24. ДСТУ 3008:2015
25. ДСТУ EN ISO 6507 «Металеві матеріали. Випробування на твердість за Віккерсом»

|     |      |          |        |      |                      |      |
|-----|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|     |      |          |        |      | БР 0226.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                      | 50   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |