

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА

на тему *Визначення впливу концентрації легуючих елементів і температури в процесі іонно-плазмового азотування на приріст твердості сталей 4X5MΦC, P6M55 і 13X*

Шифр: КРБМТВАТАМ 25.22157.000. ПЗ

Галузь знань	<u>13 – Механічна інженерія</u> Шифр і назва галузі знань
Спеціальність	<u>132 – Матеріалознавство</u> Шифр і назва спеціальності
Рівень вищої освіти	<u>Перший бакалаврський</u> Рівень вищої освіти
Освітньо-професійна програма	<u>Відновлення та технічний сервіс автомобілів</u> Назва освітньої програми

Виконав: студент 3 курсу, група МТВАс-22-2 Марков Володимир МАРКОВ
Курс, група виконавця Підпис Ім'я, прізвище

Керівник: д-р.техн.н., професор кафедри ТАМ Г. Драч Ілона ДРАЧ
Науковий ступінь, посада Підпис Ім'я, прізвище

До захисту допускаю:

зав. кафедри ТАМ, д-р.техн.н., професор

Диха
Підпис

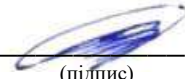
Олександр ДИХА
Ім'я, прізвище

6 червня 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства
Рівень вищої освіти перший бакалаврський
Галузь знань 13 – Механічна інженерія
Спеціальність 132 – Матеріалознавство
Освітньо-професійна програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ



(підпис)

д-р.техн.н., проф. Олександр ДИХА

Науковий ступінь, ім'я, прізвище

20 лютого 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Завдання видано студенту

Маркову Володимирі Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Визначення впливу концентрації легуючих елементів і температури в процесі іонно-плазмового азотування на приріст твердості сталей 4X5МФС, Р6М55 і 13Х»

Керівник роботи

професор кафедри ТАМ Драч Ілона Володимирівна

(посада, прізвище, ім'я, по батькові)

2. Затверджено наказом університету від 7 лютого 2025 р. № 26

3. Дата видачі завдання студенту: 20 лютого 2025 р.

4. Строк подання студентом роботи на кафедру: 10 червня 2025 р.

5. Вихідні дані: *джерела інформації щодо теми КРБ; матеріали переддипломної практики: технічні умови на технологію іонно-плазмового азотування.*

6. Зміст пояснювальної записки (перелік задач): *провести аналіз предметної області, вивчити основи процесу іонно-плазмового азотування інструментальних сталей: суть, мету, механізм процесу та основні технологічні параметри; розробити алгоритм розрахунку приросту твердості сталі при азотуванні; вивчити вплив температури азотування на приріст твердості сталей 4X5МФС, Р6М5 13Х; вивчити вплив коливань хімічного складу на твердість поверхні при азотуванні*

7. Перелік графічного матеріалу: *графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах.*

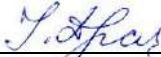
8. Консультанти розділів роботи:

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

9. Календарний план виконання кваліфікаційної роботи бакалавра:

№	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання	Примітка
1	<i>Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи бакалавра з керівником</i>	<i>01.02.2025</i>	<i>виконано</i>
2	<i>Ознайомлення з предметною областю, формулювання мети та задач дослідження, визначення об'єкта та предмета дослідження</i>	<i>30.02.2025</i>	<i>виконано</i>
3	<i>Робота над розділом 1 – Характеристика предметної області та постановка задачі</i>	<i>30.02.2025</i>	<i>виконано</i>
4	<i>Робота над розділом 2 – Іонно-плазмове азотування: процес, недоліки і переваги</i>	<i>15.04.2025</i>	<i>виконано</i>
5	<i>Робота над розділом 3 – Визначення впливу концентрації легуючих елементів і температури в процесі іонно-плазмового азотування на приріст твердості інструментальних сталей</i>	<i>15.05. 2025</i>	<i>виконано</i>
6	<i>Оформлення пояснювальної записки згідно вимог</i>	<i>30.05.2025</i>	<i>виконано</i>

Виконавець: студент 3 курсу, група МТВАс-22-2  Володимир МАРКОВ
Курс, група виконавця Підпис Ім'я, прізвище

Керівник: д-р.техн.н., професор кафедри ТАМ  Ілона ДРАЧ
Науковий ступінь, посада Підпис Ім'я, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: Визначення впливу концентрації легуючих елементів і температури в процесі іонно-плазмового азотування на приріст твердості сталей 4Х5МФС, Р6М55 і 13Х

Виконавець кваліфікаційної роботи бакалавра: студент групи МТВАс-22-2
Марков Володимир Юрійович

Керівник кваліфікаційної роботи бакалавра: д-р.техн.н., професор кафедри ТАМ
Драч Ілона Володимирівна

Кваліфікаційна робота бакалавра містить:

Пояснювальна записка				Кількість додатків
Сторінок	Рисунків	Таблиць	Джерел інформації	
63	16	6	33	1

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена дослідженню впливу параметрів процесу іонного азотування та хімічного складу сталі на якісні характеристики зміцненого шару.

Метою роботи є оцінювання впливу параметрів процесу іонного азотування (зокрема, температури азотування і коливань хімічного складу зразка) на приріст твердості азотованого шару.

Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання дослідження:

- вивчити основні принципи та методи іонного азотування;
- розробити алгоритм розрахунку приросту твердості сталі при азотуванні;
- вивчити вплив температури азотування на приріст твердості сталей 4Х5МФС, Р6М5 13Х;
- вивчити вплив коливань хімічного складу на твердість поверхні при азотуванні.

Ключові слова: іонно-плазмове азотування, інструментальні сталі, хімічний склад сталі, температурні режими, якісні характеристики зміцненого шару.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Характеристика предметної області та постановка задачі.....	9
1.1 Аналіз предметної області	9
1.2 Особливості іонного азотування виробів з інструментальної сталі	11
1.3 Методи оцінювання результатів азотування виробів з інструментальної сталі	14
1.4 Розрахунковий метод для визначення приросту твердості сталі при азотуванні	15
1.5 Мета і задачі дослідження	17
2 Іонно-плазмове азотування: процес, недоліки і переваги	19
2.1 Суть та призначення азотування.....	19
2.2 Фізико-хімічні особливості азотування	21
2.3 Утворення світлого шару та дифузійної зони	23
2.4 Основні етапи оброблення деталей азотуванням	26
2.5 Оцінка результатів азотування	27
2.6 Іонне азотування	29
Висновки до розділу	33

					КРБМТВАТАМ 25.22157.000 ПЗ			
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	Визначення впливу концентрації легуючих елементів і температури в процесі іонно-плазмового азотування на приріст твердості сталей 4Х5МФС, Р6М55 і 13Х	Літ.	Арк.	Акрушіє
Розроб.	Марков	<i>Марков</i>					5	69
Перевір.	Драч	<i>Т. Драч</i>						
Реценз.								
Н. Контр.	Бабак	<i>Бабак</i>				ХНУ група МТВАс 22-2		
Затверд.	Духа	<i>Духа</i>						

3 Визначення впливу концентрації легуючих елементів і температури в процесі іонно-плазмового азотування на приріст твердості інструментальних сталей	35
3.1 Матеріали і методики дослідження	35
3.2 Технологічні особливості іонного азотування виробів з інструментальних сталей	42
3.3 Результати дослідження	49
3.4 Аналіз одержаних результатів	52
Висновки до розділу	55
Висновки.....	57
Перелік посилань	60
Додаток.....	64

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		6

ВСТУП

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена дослідженню впливу параметрів процесу іонного азотування (зокрема, температури азотування і коливань хімічного складу зразка) на характеристики азотованого шару.

Актуальність.

Іонне азотування – один з найбільш ефективних способів поверхневого зміцнення, що підвищує твердість, опір зношуванню, контактну витривалість, опір до схоплювання, теплостійкість та корозійну стійкість різноманітних деталей машин, штампового та ріжучого інструменту. Основною відмінністю іонного азотування, яке вигідно виділяє його на тлі інших методів високотемпературної хіміко-термічної обробки (ХТО) (цементації, нітроцементації тощо), є малі деформації та короблення деталей або їхня повна відсутність. Це пов'язано з низькими температурами процесу 350...600 °С [1].

Значно менші деформації або повна їх відсутність дозволяють виключити з технологічного ланцюжка етап фінішного шліфування виробу [2].

На сьогодні в технології азотування існує ряд чинників керування процесом азотування, зміна яких дає можливість регулювати структурний стан азотованого шару, а отже, і експлуатаційні властивості деталей машин. Серед цих чинників можна виділити: температуру та час азотування, склад насичувального середовища як на стадії розігріву, так і на стадії витримки, ступінь дисоціації аміаку при газовому азотуванні (або відсотковий вміст азоту в суміші), склад азотованої сталі тощо. Однак ці чинники керування дозволяють впливати на структуру та властивості азотованого шару лише безпосередньо в процесі азотування [3].

У дослідженнях [4–6] вказується, що на структуру та властивості азотованого шару має істотний вплив вихідний структурний стан сталі до азотування.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

За існуючої технології азотування попередня термообробка (ПТО) перед азотуванням розглядається тільки як спосіб отримання заданих механічних властивостей серцевини азотованих деталей, зменшення їх жолоблення і покращення оброблюваності різанням [7]. Залежність структури та властивостей азотованого шару від режимів ПТО не враховується.

Тому для підвищення ефективності процесу азотування є важливим встановлення залежностей структури і властивостей зміцненого шару від режимів ПТО. Є також актуальним оцінити потенціал ПТО як чинника керування структурою та властивостями азотованого шару. Це має істотно розширити технологічні можливості процесу азотування.

Метою цієї роботи є оцінювання впливу параметрів процесу іонного азотування (зокрема, температури азотування і коливань хімічного складу зразка) на приріст твердості азотованого шару.

Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання дослідження:

- вивчити основні принципи та методи іонного азотування;
- розробити алгоритм розрахунку приросту твердості сталі при азотуванні;
- вивчити вплив температури азотування на приріст твердості сталей 4X5MФС, P6M5 13X;
- вивчити вплив коливань хімічного складу на твердість поверхні при азотуванні.

Об'єкт дослідження – процеси іонно-плазмового азотування.

Предмет дослідження – методи випробувань і теоретичних досліджень твердості поверхні зразків при азотуванні.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Аналіз предметної області

Азотування – загальна назва для процесів азотування та карбонітрування. Розглянемо основні поняття та визначення, пов'язані з процесами азотування [2, 8, 9]:

1. Азотування – процес азотування сталі, що реалізується шляхом перенесення атомів азоту до поверхні.

2. Карбонітрування – процес хіміко-термічної обробки сталі, що реалізується шляхом перенесення до поверхні деталі азоту та вуглецю.

3. Товщина азотованого шару – глибина дифузійної зони, яка зазвичай визначається як відстань від поверхні, на якій твердість металу становить 400 HV або на 50 HV вище за твердість серцевини.

4. Поверхневий шар – іноді називається білим шаром або нітридним шаром – складається з γ' - та/або ϵ -фази.

5. Дифузійна зона – зона, що знаходиться під поверхневим шаром, в якому азот розчинений у твердому розчині або входить до складу нітридів/карбонітридів.

6. γ' -фаза – Fe_4N (ГЦК (гранецентрована кубічна) гратка). Це фаза з високою твердістю, що формується при насиченні заліза азотом.

7. ϵ -фаза – Fe_{2-3} (N, C) (ГПУ (гексагональна примітивна (щільноупакована)) гратка). Ця фаза також є твердою, з високими зносостійкими властивостями.

8. Азотованість – здатність сталі абсорбувати азот і підвищувати при цьому твердість на певну величину.

Процеси азотування – це хіміко-термічна обробка, в ході якої азот і вуглець переносяться з насичувального середовища на поверхню сталі. Як

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

середовище можуть застосовуватися газ, плазма, сіль або, рідше, псевдозріджений шар. Метод було запропоновано наприкінці 1920-х років і його використання все більше набирає популярності. Класичне газове азотування було розроблене для підвищення міцності втоми і зносостійкості при зниженому рівні деформації.

Азотування сталі або дифузне збагачення азотом металу є технологією, за якою деталі витримуються в азотовмісних газах або дисоційованому аміаку при температурі понад 500 °С. В результаті цього процесу серцевина деталі отримує структуру сорбіту і набуває поверхневого шару [8].

Сталі після азотування поверхні характеризуються підвищеними зносо- та корозійною стійкістю, кращими втомними характеристиками. Запобігається холодне зварювання сталей, особливо у вузлах, схильних до тертя в захисній атмосфері [1, 2, 8].

9. Іонне азотування (ІА) є найбільш технологічним процесом хіміко-термічної обробки. Для протікання процесу ІА між анодом (корпусом камери або захисними екранами) та деталями, розміщеними на катоді, підтримується аномальний тліючий розряд. Робочими газами в устаткуванні зазвичай є азот і аргон (з балонів) і водень, що виробляється електролізером [9].

ІА дозволяє позбутися таких недоліків газового азотування, як велика тривалість і трудомісткість процесу, підвищена крихкість шару, недостатня контактна витривалість зміцненого матеріалу, нестабільність результатів. Поряд з екологічністю та економічністю процесу, ІА дозволяє отримувати дифузійні шари заданого складу та структури як з нітридною зоною на поверхні, так і без неї. У першому випадку забезпечуються високі корозійна стійкість і прироблюваність поверхонь, що труться (для деталей, що працюють на знос (рис.1.1), у другому – опір знакозмінним навантаженням в умовах зношування при високих тисках (для різального та штампового інструменту) [10].

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10



а)

б)

Рисунок 1.1. Внутрішньозубчаста шестерня планетарного (епіциклічного) редуктора: а – до обробки зі слідами використання; б – після азотування

1.2 Особливості іонного азотування виробів з інструментальної сталі

У сучасній промисловості багатьох країн світу існує тенденція до широкого застосування іонного азотування як ефективного методу низькотемпературної хіміко-термічної зміцнювальної обробки різального та штампового інструменту [11, 12]. Технологічними чинниками, що впливають на ефективність іонного азотування, є температура процесу, тривалість насичення, тиск, склад і витрата робочої газової суміші.

Конструктивно установка іонного азотування складається з робочої камери, системи електроживлення, газовакуумної системи та системи охолодження (рис.1.2) [2].

За конструкцією робочої камери установки поділяються на: ковпакові, ковпакові секційні, шахтні та дверні залежно від типу виробів, які підлягають зміцнювальній обробці.

На даний момент у світі використовується умовно два типи установок іонного азотування: установки з пасивними «гарячими» стінками виробництва Ionitech (Болгарія) [13], Puls-Plasma nitriding Units (Бразилія) [14] та установки з активними «гарячими» стінками: PVA Industrial Vacuum Systems GmbH (Plateg) [15] (Німеччина), ELTROPULS Heat-Treatment-Unit [16] (Німеччина), RÜBIG Heat Treatment [17] (Австрія), Ionitech (Болгарія) [13].

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

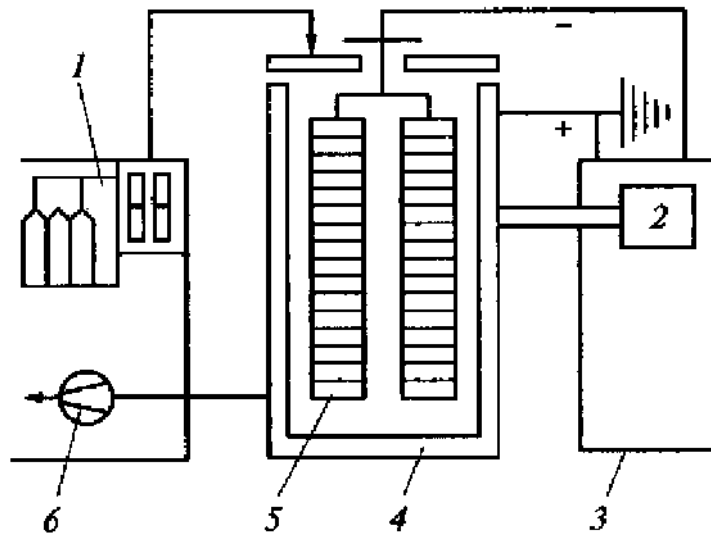


Рисунок 1.2 – Схема установки іонного азотування [2]:

- 1 – система подачі газу; 2 – прилад, що регулює температуру;
 3 – блок електроживлення; 4 – вакуумний контейнер; 5 – деталі;
 6 – вакуумний насос

До установок з гарячими пасивними стінками належать установки, вакуумні камери яких мають екранну теплоізоляцію з листового металу – у таких камерах теплообмін між садкою і водоохолоджувальною стінкою відбувається через пакет екранів і температура внутрішнього екрану, зверненого до садки, залежить від кількості екранів та температури садки [18]. Якщо в камері відсутні теплозахисні екрани, то таку камеру можна класифікувати як камеру з холодними стінками. Недоліком такої конструкції є великий градієнт температури між зовнішніми та внутрішніми частинами садки, а також підвищена витрата електроенергії; зазвичай такі установки мають джерела живлення великої потужності – сила струму може бути на рівні 2000 А і більше [2, 18].

В установках з «гарячими» стінами нагрівання садки деталей комбінований – частково від стінок, а частково тліючим розрядом. Цикл розігріву садки в таких установках починається з розігріву стінки камери, і

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деталі нагріваються конвективно або за допомогою внутрішнього вентилятора, або за допомогою випромінювання від стінки до температури 200-300°C і більше, а далі, при досягненні в камері певного вакууму, запалюється розряд і відбувається комбінований нагрів.

Швидкість охолодження садки в таких камерах визначається геометрією деталей і щільністю завантаження, і її можна регулювати шляхом вибору методу охолодження – наприклад, в камеру подається азот до певного тиску і включається вентилятор, розташований всередині камери, а також вентилятори зовні камери [18].

У деяких спеціальних випадках доцільно проводити охолодження в плазмі, причому в цьому випадку можна задавати потрібний темп охолодження – це можна здійснювати в установках як з холодними, так і з гарячими стінками.

Таким чином, в установках з гарячими стінками для підтримки температури садки на необхідному рівні можна знизити потужність тліючого розряду в порівнянні з такою ж камерою, що має холодні стінки. Однак слід пам'ятати, що тліючий розряд повинен залишатися аномальним – тобто вся садка має бути покрита світінням розряду [18].

Незважаючи на досить широке застосування іонного азотування в промисловості для зміцнення ливарної та штампової оснастки з інструментальних сталей, в літературі відсутні дані з розгляду можливості реалізації управління процесом азотування деталей з точки зору забезпечення необхідного рівня шорсткості, оскільки завданням зміцнювальної обробки штампової або ливарної продукції є, крім підвищення твердості також збереження високого ступеня чистоти після азотування [19].

При іонному азотуванні розігрів деталей здійснюється в розряді шляхом іонного бомбардування поверхні, і вже на стадії розігріву через це може змінитися в гірший бік шорсткість поверхні [7].

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
						13
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1.3 Методи оцінювання результатів азотування виробів з інструментальної сталі

Перевірка результатів азотування безпосередньо на деталі бажана, але не завжди можлива [2, 8].

Для перевірки результату азотування за допомогою мікроскопа оцінюються такі параметри [8].

1. Товщина світлого шару, мкм.
2. Пористість у відсотках від загальної товщини світлого шару.
3. Твердість дифузійної зони $HV_{0,2}$.
4. Твердість світлого шару, HV_1 .
5. Глибина азотованого шару.

Вимірювання твердості дифузійної та світлої зон після азотування проводиться за допомогою мікротвердомірів, і зазвичай здійснюється методом Віккерса (HV) або Кнуопа (HK). Етапи дослідження [8, 9]:

1. Підготовка зразка: шліфування та полірування перерізу зразка до дзеркального блиску; травлення (опціонально), щоб краще візуалізувати межу між дифузійною зоною та основним металом; якщо цікавить вимірювання по профілю глибини – важливо робити поперечний шліф до азотованої поверхні.

2. Вибір методу вимірювання твердості.

Мікротвердість за Віккерсом (HV): використовується навантаження: 10–1000 г (0,01–1 кг); робиться серія втиснень від поверхні вглиб (через рівні інтервали, напр. 10, 20, 30, ... мкм); будується профіль твердості (графік "глибина – твердість").

Мікротвердість за Кнуопом (HK): застосовується для тонких шарів або коли потрібно високу точність біля меж зони.

3. Визначення зон.

Дифузійна зона (біла зона, або "compounded layer") – зазвичай найближча до поверхні, дуже тверда (800–1200 HV).

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Світла зона (підбіла, або "diffusion zone") – глибша, має поступове зменшення твердості до значень основного металу (~300–600 HV).

Застосовують переважно $HV_{0.05}$ або $HV_{0.1}$, щоб уникнути впливу деформації.

Використовують мікроскоп з мікротвердоміром, щоб точно позиціонувати втиск.

4. Побудова профілю твердості: за результатами вимірювань створюють графік "глибина – HV".

Зміна твердості допомагає визначити товщину дифузійної зони (від поверхні до початку спаду твердості) та глибину азотованого шару (до стабілізації HV на рівні основного металу).

1.4 Розрахунковий метод для визначення приросту твердості сталі при азотуванні

Для кількісного оцінювання приросту твердості сталі в процесі азотування за допомогою математичного моделювання та з врахуванням фізико-хімічних процесів, які відбуваються в матеріалі використовують розрахунковий метод [20 – 22].

Актуальність такого підходу полягає в:

1. Складності безпосередніх експериментальних вимірювань:

– глибоких мікроструктурних змін: азотування супроводжується формуванням тонких шарів, в яких відбуваються складні дисперсні та дифузійні процеси. Вимірювати приріст твердості в цих малих об'ємах безпосередньо є складною процедурою;

– на мікроскопічному масштабі: дифузійна зона має дуже малу товщину, тому експериментальні вимірювання методом втиснення часто потребують високої точності та спеціального обладнання.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахункові моделі дозволяють обійти ці труднощі із застосуванням математичних залежностей.

2. Можливості врахування багатьох параметрів.

Диференційований вплив параметрів: твердість матеріалу після азотування залежить від температури, часу процесу, складу сталі, концентрації азоту у поверхневому шарі та утворення нітридів. Розрахунковий підхід дозволяє врахувати ці змінні через відповідні моделі (наприклад, моделі розповсюдження азоту за Фіком) та їх вплив на кінцеву твердість.

Прогнозування мікроструктурних змін: за допомогою розрахунків можна моделювати формування та розподіл нітридних фаз, які зміцнюють поверхневий шар, що є важливим для підвищення твердості сталі.

3. Економії часу та ресурсів.

Оптимізація технологічних режимів: розрахунковий метод дозволяє швидко прогнозувати вплив змін технологічних параметрів (наприклад, часу та температури азотування) на приріст твердості, що зменшує кількість натурних експериментів та дозволяє оптимізувати технологічний процес.

Безруйнівне оцінювання: розрахункові підходи є недеструктивними, що важливо для контролю якості в умовах виробництва, де безпосередні механічні вимірювання можуть пошкодити зразок або внести додаткові похибки.

4. Валідації та підтримки експериментальних даних.

Підсилення експериментальних результатів: розрахункові моделі дозволяють перевірити та уточнити результати вимірювань, забезпечуючи більш повне розуміння процесу. Комбінування експериментальних даних з результатами моделювання дає можливість створити більш надійну технологічну картину.

Сценарне моделювання: за допомогою розрахункових методів можна проводити аналіз різних сценаріїв процесу та його наслідків, що допомагає передбачити результати при зміні умов азотування без проведення дорогих серій експериментів.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
						16
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Отже, використання розрахункового методу для визначення приросту твердості при азотуванні обумовлено тим, що воно дозволяє:

- врахувати складний комплекс факторів, що впливають на мікроструктуру та механічні властивості сталі,
- отримати точні прогнози без необхідності дорогих і часто складних експериментальних вимірювань,
- оптимізувати технологічні процеси та забезпечити контроль якості шляхом порівняння розрахункових результатів з безпосередніми вимірюваннями.

Такі підходи є важливими для створення надійних технологій термохімічного оброблення та забезпечення високих експлуатаційних характеристик кінцевої продукції.

1.5 Мета і задачі дослідження

У дослідженнях [4–6] зазначено, що вихідний структурний стан сталі до азотування суттєво впливає на формування структури та властивостей азотованого шару.

За сучасної технології азотування попередня термообробка (ПТО) розглядається переважно як засіб забезпечення заданих механічних властивостей серцевини азотованих деталей, зменшення їх жолоблення та покращення оброблюваності різанням [23].

При цьому вплив режимів ПТО на структуру й властивості азотованого шару зазвичай не враховується.

З огляду на це, важливо встановити залежності між параметрами ПТО та характеристиками зміцненого шару, що дозволить підвищити ефективність процесу азотування.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Крім того, актуальним є вивчення потенціалу ПТО як чинника керування структурою та властивостями азотованого шару, що відкриває можливості для розширення технологічного арсеналу азотування.

Це обумовило вибір теми кваліфікаційної роботи і визначення мети і завдань дослідження.

Метою цієї роботи є оцінювання впливу параметрів процесу іонного азотування (зокрема, температури азотування і коливань хімічного складу зразка) на приріст твердості азотованого шару.

Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання дослідження:

- вивчити основні принципи та методи іонного азотування;
- розробити алгоритм розрахунку приросту твердості сталі при азотуванні;
- вивчити вплив температури азотування на приріст твердості сталей 4X5MФС, P6M5 13X;
- вивчити вплив коливань хімічного складу на твердість поверхні при азотуванні.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		18

2 ІОННО-ПЛАЗМОВЕ АЗОТУВАННЯ: ПРОЦЕС, НЕДОЛІКИ І ПЕРЕВАГИ

2.1 Суть та призначення процесу азотування

Азотування – це насичення поверхні сталі азотом. Процес здійснюється в середовищі аміаку в інтервалі температур 480... 560 °С. За таких температур відбувається дисоціація аміаку з утворенням атомарного азоту ($2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$), який дифундує поверхневі шари деталі. Розчинність у сталі азоту більша, ніж вуглецю, – 0,1 % при 591 °С [2, 8, 9].

На рисунку 2.1 [19] зображено іонне азотування сталевих деталей у плазмі тліючого розряду: характерне фіолетове світіння вказує на активну фазу азотування у середовищі суміші аргону та азоту.



Рисунок 2.1 – Вигляд робочої камери під час процесу іонного азотування: деталі рівномірно оточені плазмою, що забезпечує активне насичення поверхні азотом

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Азотування сталі проводяться з метою:

1. Підвищення трибологічних властивостей.
2. Підвищення зносостійкості.
3. Підвищення корозійної стійкості (корозійна стійкість може бути збільшена ще більше за подальшого оксидування).
4. Підвищення статичної міцності.
5. Підвищення втомної міцності.
6. Отримання мінімального рівня деформації під час зміцнення.

Виконання азотування дозволяє отримати стабільніші показники твердості сталі, ніж при здійсненні цементації. Так, поверхневий шар виробу, який було піддане азотуванню, зберігає свою твердість навіть при нагріванні до температури 550-600 °С, тоді як після цементації твердість поверхневого шару може почати знижуватися вже при нагріванні виробу понад 225 °С. Характеристики міцності поверхневого шару сталі після азотування в 1,5-2 рази вищі, ніж після гартування або цементації [9].

Оскільки температура обробки не перевищує 600°C, то структурних перетворень, подібних до тих, які протікають в результаті аустенітизації при гартуванні, не відбувається, що дозволяє проводити охолодження з будь-якою швидкістю без ризику виникнення мартенситу. З цієї причини, на відміну від гартування, деформації та короблення азотованих деталей та інструментів виходять незначними. Це дозволяє спростити подальшу обробку і взагалі позбутися її, тобто піддавати азотуванню вже готові деталі, що пройшли обробку різанням, шліфуванням, без припуску на остаточну обробку як при цементації [8, 9].

Азотування проводять у спеціальних електричних печах, з герметичним сталевим муфелем усередині, куди поміщають деталі, а потім подається аміак NH₃, який під впливом температури дисоціює (розпадається) на атомарний азот і водень [18].

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Атоми азоту, що внеслись в поверхневий шар матеріалу, дифундують надалі, як по межах зерен, так і через них.

2.2 Фізико-хімічні особливості азотування

Азотування передбачає перенесення азоту та вуглецю з атмосфери в сталь шляхом реалізації трьох основних стадій [24]:

1. Перенесення атомів із газу до поверхні сталі.
2. Дифузія атомів через поверхневий світлий шар.
3. Дифузія атомів углиб металу в дифузійній зоні.

Вуглець і азот дифундують усередині світлого шару, а також відбувається дифузія вуглецю зі сталі в поверхневий світлий шар.

Для розуміння процесів, що протікають при азотуванні, можна використовувати рівноважну діаграму стану Fe–N (рис. 2.2) [8, 9].

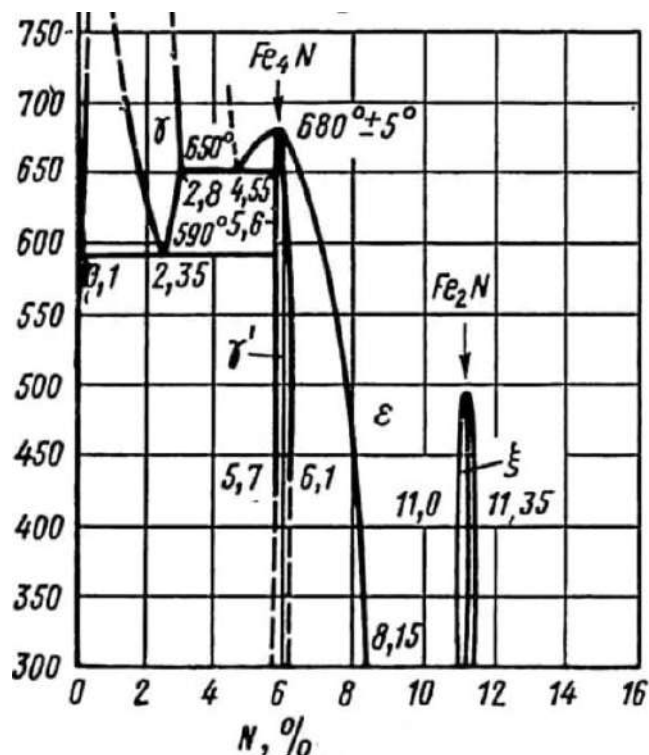


Рисунок 2.2 – Діаграма стану системи Fe–N: фазові рівноваги у залежності від температури і вмісту азоту (мас. %) [9]

На рисунку 2.2 вісь X – вміст азоту (N, % мас.); вісь Y – температура (°C); криві поділяють області стабільності різних фаз: α – ферит (тілоцентроване кубічне залізо, з розчиненим азотом); γ – аустеніт (гранецентрована кубічна гратка); γ' (Fe_4N) – нітрид заліза (γ' -фаза); ϵ (Fe_{2-3}N) – фаза з більшим вмістом азоту; ξ (Fe_2N) – фаза з ще більш насиченою структурою; δ – високотемпературна фаза заліза; зазначені критичні температури та межі фазових переходів (наприклад, Fe_4N стабільний до $\sim 680^\circ\text{C}$).

При нормальних температурах азотування спочатку азот розчиняється в α -залізі, але тільки до концентрації не більшій за 0,10 мас. %. Коли вміст азоту перевищить цей рівень, утворюється γ' -нітрид, Fe_4N . При концентрації азоту більшій за 6% γ' -нітрид починає перетворюватися на ϵ -нітрид, Fe_{2-3}N . При температурах нижче 500°C може утворитися ξ -нітрид, Fe_2N , що містить близько 11% азоту (рис. 2.3) [9].

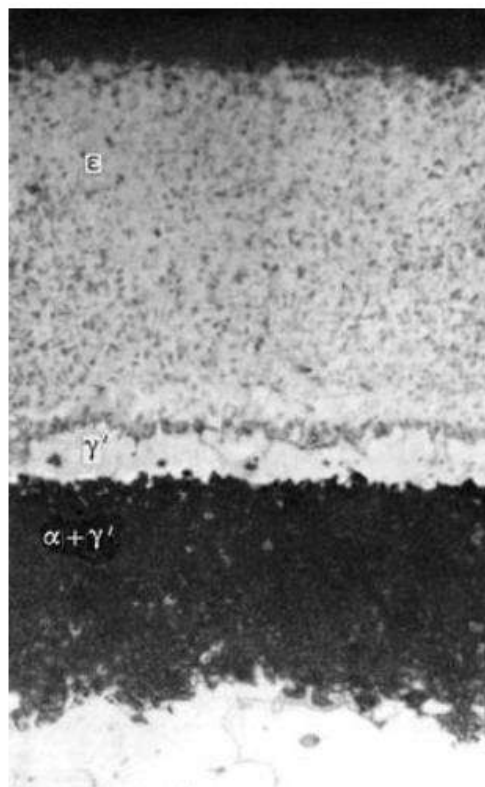


Рисунок 2.3 – Нітридна зона на зразку зі сталі Р6М5 [9]

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Після азотування серцевина деталі має структуру сорбіту, отриману термообробкою до процесу азотування, а поверхневий шар завтовшки 0,01-0,6 мм (залежно від призначення) має мікроструктуру, вказану нижче (рис. 2.4) [9].

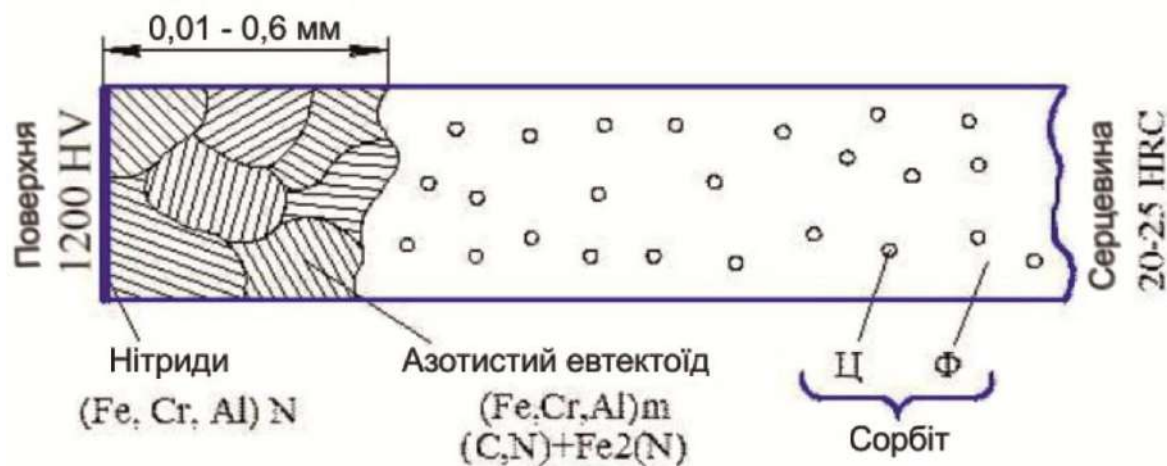


Рисунок 2.4 – Схема мікроструктури зразка після азотування [9]

2.3 Утворення світлого шару та дифузійної зони

При азотуванні утворюється тонкий поверхневий світлий шар, що містить γ' - і ϵ -фазу, і дещо протяжна дифузійна зона під ним.

Механізм утворення світлого шару достовірно не відомий так само, як не відомі склад і структура шару, необхідні для отримання оптимальних властивостей. Актуальними є дослідження щодо встановлення впливу товщини, фазового та хімічного складу, мікроструктури світлого шару на властивості азотованих деталей [5, 8, 9].

Утворення азотованого шару починається з декількох зародків зерен на поверхні деталі. Утворення нітридів протікає за допомогою зародження γ' -фази на поверхні заліза. Процес триває доти, доки на поверхні не починає формуватися ϵ -фаза. Це триває доти, доки не сформується світлий шар, що складається з ϵ -фази поблизу поверхні та γ' -фази під нею.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Вуглець впливає на процес зародження та кількість γ' - та ε -фаз. Чим вищий вміст вуглецю в сталі, тим більший вміст ε -фази у світлому шарі, і навпаки, чим менший вміст вуглецю в сталі, тим більший вміст γ' -фази.

Для азотування характерним є те, що чим вищий ступінь легування сталі, тим тонший світлий шар [9]:

1. Для нелегованої та низьколегованої сталі при звичайній тривалості азотування утворюється шар товщиною 0,01...0,02 мм.

2. Для високолегованої сталі товщина світлого шару становить 0,005...0,010 мм залежно від системи легування та вмісту легуючих елементів.

Товщина світлого шару зростає із збільшенням часу витримки та температури азотування.

Чи матиме світлий шар негативний чи позитивний вплив на експлуатаційні характеристики азотованих деталей, цілком залежить від умов роботи самих деталей. Він може бути корисний, або шкідливий при різних поєднаннях складу і товщини.

Світлий шар містить пористу зону поблизу поверхні. Коли вміст азоту у шарі високий, через утворення газоподібного азоту всередині шару формуються пори. Тиск азоту викликає послідовне розширення пор, що призводить до утворення каналів, спрямованих до поверхні деталі. Азот виходить цими каналами назовні, залишаючи всередині шару пори.

Зменшивши активність азоту в атмосфері печі, додавши, наприклад, водень, можна зменшити вміст азоту на поверхні сталі, а отже, знизити пороутворення. За такого зниження концентрації азоту формується тонший шар.

Склад атмосфери також впливає на мікроструктуру та товщину світлого шару. Висока активність азоту призводить до утворення товстого світлого шару з великою пористістю. Знижена активність азоту призводить до утворення щільнішого шару. У разі збільшення активності вуглецю в атмосфері пористість зменшується, а кількість ε -фази збільшується [5, 9].

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Товщина дифузійної зони визначається здатністю азоту дифундувати вглиб сталі і, отже, залежить від температури, тривалості витримки та хімічного складу сталі [25].

За твердість дифузійної зони відповідальні два механізми зміцнення: твердорозчинне зміцнення та дисперсійне отвердіння.

Твердорозчинне зміцнення є основним механізмом у разі нелегованої вуглецевої сталі. Збільшення температури процесу азотування викликає збільшення концентрації розчиненого у ферит азоту, а висока швидкість охолодження фіксує пересичений твердий розчин. При низькій швидкості охолодження азот виділяється у вигляді нітридів заліза або легуючих елементів.

Дисперсійне отвердіння є основним механізмом зміцнення у разі легованих сталей. Нітриди виділяються при температурі азотування, і на них практично не впливає швидкість охолодження. Нітриди легуючих елементів, що виділилися, підвищують твердість дифузійної зони.

Залежно від марки сталі та температури азотування безпосередньо під світлим шаром твердість дифузійної зони може становити 300...1300 HV [5, 9].

На рис. 2.5 [9] показані профілі твердості для сталі 30ХМФА азотованої при 530 і 550 °С.

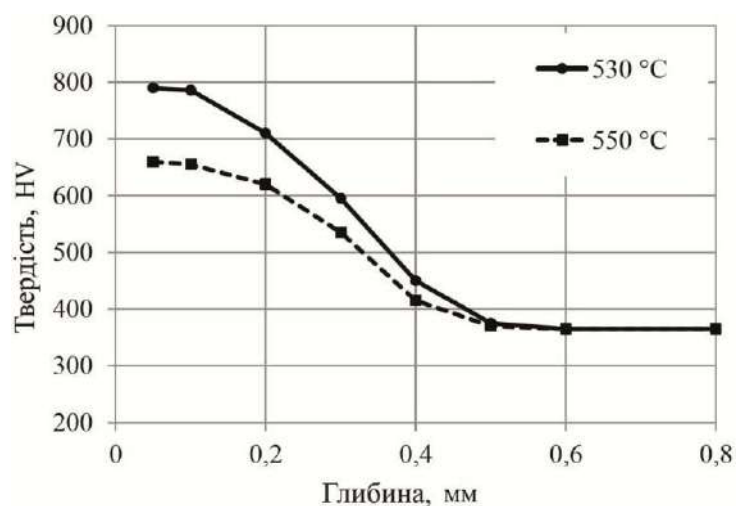


Рисунок 2.5 – Вплив температури азотування на твердість сталі 30ХМФА (азотування за 530 і 550 °С, 25 год) [9]

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

При нижчій температурі твердість виявилася вищою. Різниця у твердості залежить від розміру, типу та кількості нітридів, що виділилися за даної температури.

У дифузійній зоні формуються стискаючі напруження, які сприяють підвищенню міцності втоми деталі. Чим вище швидкість охолодження після азотування, тим більшим є стискаючі напруження.

При однаковій температурі азотування на поверхні високолегованої сталі формується тонша дифузійна зона, ніж на поверхні низьколегованої сталі. Однак твердість дифузійної зони у високолегованої сталі буде вищою.

При надто високій температурі азотування виникає ризик утворення нітридів за межами зерен, що може спричинити дефекти, наприклад, на гострих кромках та кутах деталей.

2.4 Основні етапи оброблення деталей азотуванням

1. Чорнове механічне оброблення.

2. Попереднє термічне оброблення металу (термопокращення), що включає в себе дві операції – гартування і відпуск (високий). Така обробка забезпечує високу в'язкість і міцність серцевини деталі. Гартування сталі здійснюється при високих температурах (850-950 °C) з подальшим охолодженням в олії або воді. Температура відпуску – від 600 до 670 °C (рис. 2.6) [8, 9].

3. Захист частин металевої поверхні, що не планується насичувати азотом. Застосовується обмазування рідким склом або покриття оловом, яке наноситься товщиною не більше 0,015 мм на заготовку за електролітичною технологією.

4. Безпосереднє насичення поверхні сталі азотом – азотування.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

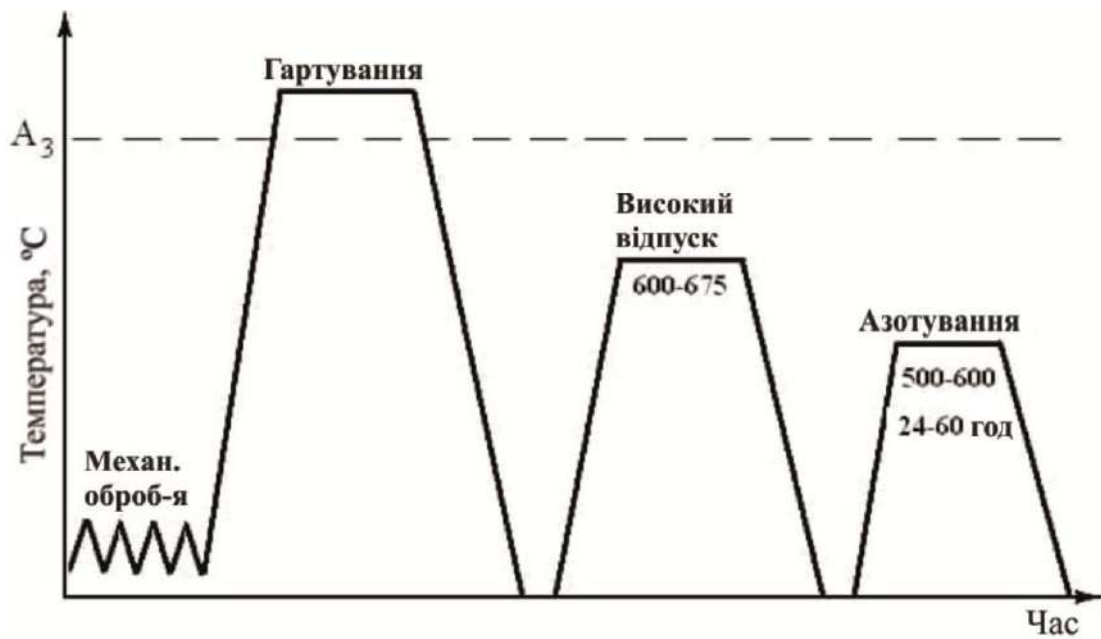


Рисунок 2.6 – Схема основних етапів процесу азотування [9]

5. Остаточне механічне оброблення деталі, зокрема, шліфування металу. Ці операції потрібні для того, щоб деталь мала необхідні (фінальні) геометричні параметри.

2.5 Оцінка результатів азотування

Перевірка результатів азотування безпосередньо на деталі бажана, але не завжди можлива через те, що або є обмежена кількість деталей, або через те, що деталі дуже дорогі, і використовувати стандартні методи контролю, що їх руйнують, не вигідно. Альтернативою руйнівним методам контролю є перевірка поверхневої твердості деталі шляхом застосування невеликого навантаження. Існують також неруйнівні методи контролю, такі як вихрострумний контроль товщини світлого шару [9].

Для перевірки результату азотування в садці деталей кладеться зразок-свідок з того самого матеріалу, що й деталі. На зразку-свідку згодом перевіряється якість азотування. Зразок готується до перевірки стандартним

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

методом шляхом відрізки, шліфування, полірування та травлення. При різанні зразка необхідно переконатися, щоб не пошкодити і не видалити світлий поверхневий шар. Після цього за допомогою мікроскопа оцінюється:

1. Товщина світлого шару, мкм.
2. Пористість у відсотках від загальної товщини світлого шару.
3. Твердість дифузійної зони $HV_{0,2}$.
4. Твердість світлого шару, HV_1 .
5. Глибина азотованого шару.

Сьогодні є кілька способів визначення глибини азотованого шару.

Товщину азотованого шару можна визначити шляхом вимірювання мікротвердості на поперечному шліфі ($HV_{0,2}$). Товщина шару у цьому випадку визначається як відстань від поверхні до точки, у якій твердість становить 400 HV (рис. 2.7 [9]). Ця величина застосовна лише до низьколегованих сталей. Для інших сталей має використовуватися інше граничне значення.

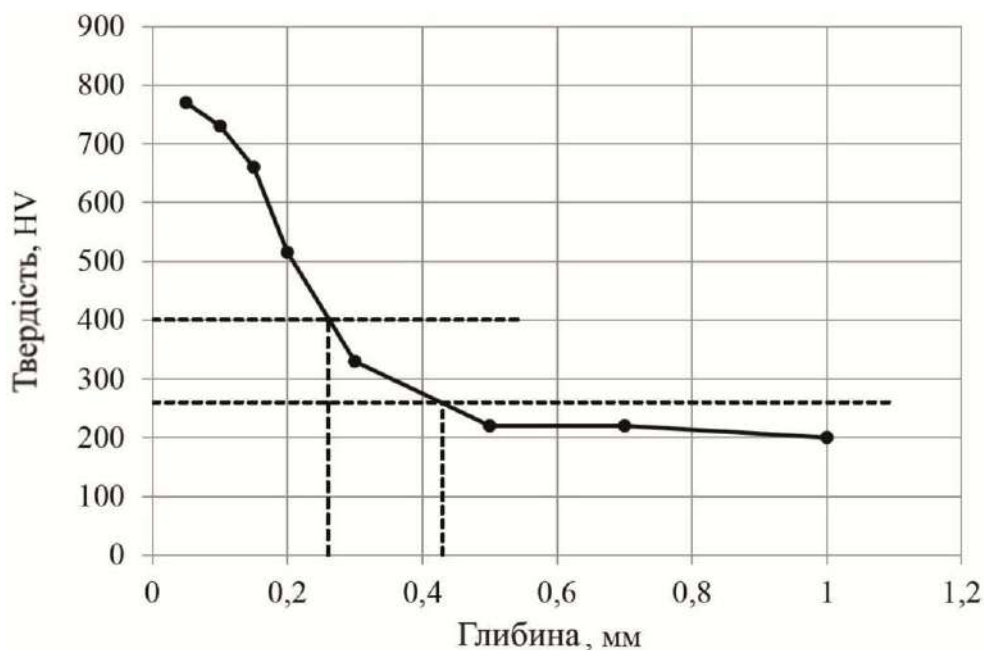


Рисунок 2.7 – Визначення глибини азотованого шару [9]

Ще один відомий спосіб визначення глибини азотованого шару – це глибина, на якій твердість металу на 50 HV вища за твердість серцевини (рис. 2.7). Оскільки різні методи дають різні результати, для призначення режиму азотування важливо вказувати, який метод контролю слід використовувати.

Твердість світлого шару дуже важко виміряти оскільки він дуже тонкий. Якщо твердість визначати шляхом застосування малого навантаження, то отримане значення буде ще більш неточним, ніж при застосуванні великого навантаження. Зазвичай для визначення твердості світлого шару використовують методи Віккерса і Кнупа, з допомогою яких твердість вимірюється безпосередньо на поверхні виробу чи зразка. Для цього поверхню полірують для отримання чіткого відбитка та проведення точного вимірювання його діагоналей. Частина прикладеного навантаження сприймається дифузійною зоною, що лежить під світлим шаром. Тому виміряна твердість змінюватиметься частково залежно від прикладеного навантаження, частково залежно від твердості та товщини світлого шару та дифузійної зони. У результатах завжди слід позначати навантаження, яке використовувалося для оцінки твердості [8, 9, 24].

Товщина світлого шару може бути визначена шляхом лінійного вимірювання, яке дає усереднений результат.

Пористість зазвичай оцінюється з допомогою оптичного мікроскопа. Можна також автоматизувати вимірювання за допомогою аналізатора зображень.

2.6 Іонне азотування

Азотування в плазмі називають також іонним азотуванням, здійснюється в середовищі іонізованого газу. Плазма утворюється при низькому тиску, коли між деталями (катодом) та стінками камери (анодом) виникає напруга [9].

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Процес іонного азотування був запатентований Бергаусом на початку 1930-х років. Протягом 1960 – 1970-х рр. процес почав широко використовуватися у промисловості [9].

Процес здійснюється в такий спосіб. Після завантаження деталей з робочої камери відкачується газ до тиску 10...1000 Па, а потім камера заповнюється атмосферою, в якості якої може бути використаний азот, а також водень і газ-джерело вуглецю (пропан або метан).

Між деталями та стінками камери подається напруга 300...1000 В. Деталі можуть стояти на платформі або підвішуватися. Коли подається напруга, газ іонізується, і позитивно заряджені атоми азоту набувають високої кінетичної енергії. Іонізовані атоми прискорюються в напрямку деталей і вибивають атоми з їхньої поверхні. Вибиті атоми заліза утворюють у плазмі нітриди, які осідають назад на поверхню деталей. Таким чином, азот потрапляє на поверхню деталей і потім дифундує вглиб металу. Велика кількість енергії, вивільнена при зіткненні атомів з поверхнею деталей, перетворюється на тепло. Азот і вуглець проникають через поверхню деталей і вступають у реакцію з атомами заліза, утворюючи γ' - та ϵ -фази. При цьому утворюється синьо-блакитне світіння навколо деталей, що обробляються [18].

Необхідна мікроструктура та товщина поверхневого шару контролюються сумішшю газів. Водень додається в атмосферу для регулювання азотного потенціалу [8, 9].

У деяких випадках перед азотуванням проводиться операція очищення поверхні, яка називається розпорошенням, коли іони вибивають атоми поверхневого шару виробів. При цьому використовуються переважно іони водню чи аргону. Іони аргону відносно важкі і призводять до кращого ефекту розпилювання, ніж атоми водню.

Іонному азотуванню можуть піддаватися всі марки сталі, що піддаються газовому азотуванню. Іонне азотування також може використовуватися для

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

високолегованих сталей (інструментальних та корозійностійких), азотування яких звичайними методами утруднене [8, 9].

Контрольовані параметри процесу: склад газу, температура, час витримки та тиск атмосфери. Тривалість іонного азотування вибирається (як і при газовому азотуванні) таким чином, щоб отримати необхідну глибину азотованого шару. Глибина дифузійного шару приблизно така ж, як і при газовому азотуванні при тій самій температурі, але при часі витримки до 15 годин, іонне азотування протікає набагато швидше, оскільки на поверхні швидше утворюється висока концентрація азоту. Зазвичай тривалість іонного азотування становить від 0,5 до 60 годин залежно від необхідної товщини шару та твердості [8, 9].

При іонному азотуванні товщина світлого шару поверхні деталей становить до 20 мкм залежно від марки матеріалу і параметрів процесу. Склад світлого шару може бути наступним: або γ' -фаза, або ϵ -фаза, або обидві фази одночасно (найчастіший випадок). Можна підібрати і такі параметри режиму, щоб світлий шар не формувався взагалі [18].

Процес може здійснюватися за температури 400...650 °С. Іонне азотування практично здійснюється за нормальної температури 480...520 °С.

Вибір температури процесу визначається маркою сталі та необхідними властивостями азотованого шару.

Гартування після іонного азотування здійснюється також у вакуумній камері з використанням захисного газу. Охолодження проводиться або повільно при атмосферному тиску, або прискорено при підвищеному тиску, або при циркуляції атмосфери.

При іонному азотуванні споживання газу невелике.

Головні переваги іонного азотування:

1. Активність азоту на поверхні може контролюватись.
2. Процес можна використовувати для широкого спектру марок сталей.

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

3. Досить просто захистити поверхні, які не потрібно азотувати, шляхом нанесення спеціальної фарби або механічно (з використанням кожуха, укріттів тощо).

Іонне азотування може використовуватися для широкої номенклатури виробів:

1. Осі, зубчасті колеса та інші деталі, що вимагають високу зносостійкість та втомну міцність.

2. Ковані та штамповані інструменти, для яких необхідно зменшити зношування та отримати високий опір термічної втоми.

3. Інструмент для виготовлення листів, для якого потрібно зменшити зношування та тертя між листом та інструментом.

4. Деталі з корозійностійкої сталі, що вимагають хорошої зносостійкості.

5. Деталі гідравлічних пристроїв, що вимагають гарну зносостійкість та опір корозії.

Різновидом іонного азотування є технологія активного екрану. При цьому плазма створюється за допомогою сітки, встановленої навколо деталей, яка працює в якості катода. Ця сітка навколо деталей, або екран, піддається розпорощенню іонами замість самих деталей.

Активний екран працює як нагрівач; він передає тепло деталям у вигляді випромінювання. Це забезпечує більш рівномірне азотування поверхні деталей. Екран та деталі є катодом, а камера печі – анодом.

Випробування показали, що розподіл температури в деталях у всій садці дуже однорідний, навіть коли обробляються деталі різного розміру. Таким чином, цей спосіб азотування дозволяє при обробці змішувати в одній садці деталі різного розміру та форми.

Основні недоліки іонного азотування:

1) висока вартість обладнання. Установка для іонного азотування є складною і дорогою, що робить цей метод менш доступним для невеликих підприємств;

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

2) складність процесу. Потребує точного контролю параметрів (температура, тиск, напруга), що вимагає кваліфікованого персоналу;

3) обмеження за формою виробів. Вироби зі складною геометрією або з глибокими отворами можуть оброблятися нерівномірно через утруднений доступ плазми до деяких зон;

4) необхідність ретельної підготовки поверхні. Поверхня виробу має бути дуже чистою, інакше якість азотування знижується;

5) можливість утворення крихких фаз. При неправильному підборі параметрів можуть утворюватися надлишкові нітридні фази, які зроблять поверхню крихкою;

6) товщина шару обмежена. Азотований шар зазвичай має невелику глибину (0,1–0,6 мм), що може бути недостатнім для деяких застосувань.

Висновки до розділу

У цьому розділі проаналізовано суть, фізико-хімічні особливості та основні етапи процесу іонно-плазмового азотування. Встановлено, що іонне азотування є високоефективним методом хіміко-термічної обробки, який дозволяє формувати тверді азотовані шари з контрольованими структурою та властивостями.

Розглянуто формування світлого шару та дифузійної зони, які визначають експлуатаційні характеристики оброблених деталей. З'ясовано, що на якість азотованого шару суттєво впливають параметри режиму, підготовка поверхні та вихідний структурний стан матеріалу.

Показано переваги іонного азотування, серед яких: низька температура процесу, мінімальна деформація, висока чистота обробки, можливість локального зміцнення. Водночас відзначено і недоліки, зокрема складність обладнання, вимоги до вакууму та необхідність точного контролю режимів.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Таким чином, іонно-плазмове азотування є перспективною технологією зміцнення деталей машин і інструментів, яка потребує подальшої оптимізації параметрів з урахуванням властивостей вихідного матеріалу та умов експлуатації.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		34

3 ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ І ТЕМПЕРАТУРИ В ПРОЦЕСІ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ НА ПРИРІСТ ТВЕРДОСТІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ

3.1 Матеріали і методики дослідження

Контрольні зразки-свідки розміром 15×10×10 мм виготовлені зі сталі Р6М5 і піддані до аналогічної попередньої термічної обробки (відпал), як і основний інструмент. Використовувалися також зразки, відпущені (у стані поставки – загартування з триразовим відпуском).

Перед азотуванням зразки шліфувалися і безпосередньо перед завантаженням в камеру знежирювалися за допомогою ганчірки, змоченої розчинником типу «646».

Враховувалося, що на шліфованій поверхні глибина шару може бути дещо більшою, ніж після фрезерування, точіння або зубодовбання, що пов'язано з утворенням на поверхні в першому випадку розтягуючих залишкових напружень, що полегшують дифузію азоту, на відміну від стискаючих напружень у другому випадку, за якого дифузія азоту утруднена.

Ці фактори також слід враховувати під час контролю якості азотування різних виробів, що пройшли різну механічну обробку.

Крім того, для отримання якісних результатів аналізу необхідно також дотримуватись низки вимог:

- згідно з п.3.2. ДСТУ ГОСТ 2999:2007 [26] «поверхня випробуваного зразка повинна мати шорсткість не більше 0,16 мкм за ДСТУ ISO 4287:2012 [27] і бути вільною від окисної плівки та сторонніх речовин»;

- згідно з п.3.3. ДСТУ ГОСТ 2999:2007 [26], «при вимірюванні твердості повинна бути забезпечена перпендикулярність докладання діючого зусилля до випробуваної поверхні».

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Розрахунок приросту твердості проводився для трьох марок сталей, легованих різними елементами з різним їх вмістом – 4Х5МФС, Р6М5 та 13Х. Усі три марки сталей є азотованими сталями і широко використовуються у вітчизняному машинобудуванні.

Склад сталей відповідно до ДСТУ ГОСТ 5950:2003 [28] та ДСТУ ГОСТ 19265:2003 [29] наведено у відповідних таблицях 3.1 – 3.3.

Таблиця 3.1 – Склад сталі 4Х5МФС

Група сталі					Сталь інструментальна штампова				
Марка сталі					4Х5МФС				
Масова частка елементів, %									
С	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	Cu
0.32 - 0.4	0.9 - 1.2	0.2 - 0.5	до 0.4	до 0.03	до 0.03	4.5 - 5.5	1.2 - 1.5	0.3 - 0.5	до 0.3

Таблиця 3.2 – Склад сталі Р6М5

Група сталі					Сталь інструментальна швидкорізальна						
Марка сталі					Р6М5						
Масова частка елементів, %											
С	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	W	V	Co	Cu
0.82 - 0.9	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	до 0.6	до 0.025	до 0.03	3.8 - 4.4	4.8 - 5.3	5.5 - 6.5	1.7 - 2.1	до 0.5	до 0.25

Таблиця 3.3 – Склад сталі 13Х

Група сталі					Сталь інструментальна легована						
Марка сталі					13Х						
Масова частка елементів, %											
С	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	W	V	Ti	Cu
1.25 - 1.4	0.1 - 0.4	0.15 - 0.45	до 0.4	до 0.03	до 0.03	0.4 - 0.7	до 0.2	до 0.2	до 0.15	до 0.03	до 0.3

Для забезпечення високої стійкості штампового та ріжучого інструменту необхідно, щоб твердість серцевини була на рівні 245...280 НВ, твердість поверхні після азотування – 800...1100 Н при глибині шару не меншій 0,15 мм. Забезпечити таке поєднання необхідних параметрів може лише легована сталь, що має у своєму складі елементи, нітриди яких зумовлюють підвищення твердості внаслідок азотування, тобто виходячи з цього і вибирається марка сталі, яка може забезпечити ці характеристики попередніми відпуском та подальшим азотуванням.

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							36

Слід враховувати, що оскільки всі нітридоутворювальні елементи одночасно є і карбідоутворювальними, то в процесі попереднього покращення в залежності від умов відпуску (температури та тривалості) вони більшою чи меншою мірою зв'язуються в карбіди. В результаті цього при подальшому азотуванні є лише обмежена їх кількість для утворення нітрідів.

Наслідком цього є те, що поверхнева твердість інструментів, підданих більш високому відпуску, буде нижчою.

Для основного діапазону температур при відпуску легованих сталей $\Delta T = 550 - 650$ °C співвідношення між загальним вмістом елемента сталі [%Me] та його концентрацією в твердому розчині c_{Me} становить [2]:

- для хрому: $c_{Cr}=0,75[\%Cr]$;
- для молібдену: $c_{Mo}=(0,5...0,8) [\%Mo]$;
- для марганцю: $c_{Mn}=(0,6...0,8) [\%Mn]$;
- для кремнію: $c_{Si}= [\%Si]$.

Обґрунтування:

- кремній залишається повністю в твердому розчині фериту або аустеніту. Це елемент-розчинник, і його розчинність у фериті досить висока;
- на відміну від карбідоутворювальних елементів (Cr, Mo, V тощо), кремній не схильний до утворення стійких карбідів у звичайних умовах термообробки;
- при відпуску сталі (550-650 °C) кремній не виділяється з твердого розчину.

Після високого відпуску для молібдену та хрому концентрація їх у твердому розчині складає 50-70%, тобто у карбідах міститься 30-50% легуючих елементів, які не беруть участі в зміцненні сталі при азотуванні шляхом утворення нітрідів цих елементів.

Залежно від марки сталі (її відпускнуї характеристики) призначається температура відпуску, точність дотримання якої залежить від зношеності печей і дотримання термістом технологічного режиму відпуску. Якщо температура

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

відпуску змінюється від процесу до процесу, то твердість серцевини також буде різною. Також можлива зміна хімічного складу сталі.

Тому виникає необхідність теоретичного прогнозування впливу коливання відсоткового складу легуючих елементів сталі (особливо нітридоутворювальних) на твердість азотованого шару, при незмінному значенні температури азотування.

Твердість азотованого шару легуваних сталей визначається концентрацією азоту в твердому розчині (твердорозчинне зміцнення), а також кількістю і дисперсністю нітрідів легуючих елементів, що виділилися.

При досить великому часі азотування досягається термодинамічна рівновага між поглиненим азотом і нітридами, що виділилися, які і забезпечують приріст твердості легуваної сталі після азотування. Нітридоутворювальними легуючими елементами є Ti, Al, Cr, V, Mo, Si, причому Ti, Al, Cr, W, V, Mo збільшують розчинність азоту в α -твердому розчині, а Ni і Si знижують її, тим самим зменшуючи величину твердорозчинного зміцнення азотованого шару легуваної сталі.

Для розрахунку приросту твердості сталей після іонноплазмового азотування застосуємо алгоритм, розроблений на основі розрахункових моделей, наведених у [2, 20 – 22].

Приріст твердості після азотування визначається за формулою (3.1):

$$\Delta HV = HV_n - HV_0, \quad (3.1)$$

де HV_n – твердість поверхні після азотування;

HV_0 – твердість основи, яка задається попереднім відпуском.

Має місце емпірична залежність [2]:

$$HV_n = k \cdot (-g_c) + C,$$

де HV_n – мікротвердість нітридного шару;

g_c – зведена вільна енергія нітридоутворення (кДж/моль);

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

k – емпіричний коефіцієнт, що враховує вплив структури, концентрації азоту, температури тощо;

C – поправочна константа, яка залежить від базового матеріалу та умов азотування.

Для кількісних оцінок зміцнення азотованої сталі скористаємось значенням параметра g_c , який характеризує вільну енергію нітридоутворення для сталей, легованих кількома нітридоутворювальними елементами:

$$g_c = \frac{\Delta G_0}{RT} = \sum \frac{N_i}{x_i} g_i, \quad (3.2)$$

де g_c – зведена вільна енергія нітридоутворення для сталей, легованих кількома нітридоутворювальними елементами;

ΔG_0 – зміна вільної стандартної енергії під час утворення нітридів;

N_i – мольна частка i -го легуючого елемента, %;

x_i – стехіометричний коефіцієнт в реакції утворення нітридів;

g_i – зведена вільна енергія утворення відповідних нітридів легуючого елемента.

Для малих вмістів легуючих елементів (менше 5–10%) у сталі маємо формулу (3.3) для наближеного значення мольної частки i -го легуючого елемента:

$$N_i \approx \frac{M_{Fe}}{100M_i} c_i = \frac{0,56}{M_i} c_i, \quad (3.3)$$

де M_{Fe} – молекулярна маса заліза, г/моль;

M_i – молекулярна маса i -го легуючого елемента, г/моль;

c_i – концентрація i -го легуючого елемента, %.

Стехіометричний коефіцієнт в реакції утворення нітридів – це число, що вказує, в якому кількісному співвідношенні атоми металу (або іншого елемента) реагують з азотом для утворення нітриду відповідного складу.

Загальний вигляд реакції утворення нітриду MeN є (3.4):

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39



Стехіометричний коефіцієнт у реакції утворення нітридів (x_i) – це число атомів або молекул кожної речовини, яке показує їх співвідношення в хімічному рівнянні, що описує утворення нітридів (сполук азоту з металами або неметалами).

Щоб обчислити стехіометричні коефіцієнти у реакціях утворення нітридів заданих елементів (Cr, Mo, Mn, Si), потрібно написати рівняння реакцій утворення нітридів із простих речовин виду:

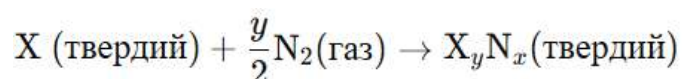


і зрівняти ці рівняння.

Зведена вільна енергія утворення відповідних нітридів легуючого елемента (g_i) – це термодинамічна величина, яка характеризує енергетичну вигідність (стійкість) утворення нітридної фази з цього елемента та азоту при певних умовах (температурі, тиску).

Властивості g_i :

- це вільна енергія Гіббса (ΔG) реакції утворення нітриду;
- зведена (нормована) – зазвичай подається на 1 моль утвореного нітриду;
- вона показує, наскільки реакція утворення нітриду є термодинамічно сприятливою. Чим менше значення g_i , тим термодинамічно стабільніший нітрид, і тим раніше він утвориться при азотуванні;
- для реакції типу:



					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

де X – легуючий елемент (наприклад, Cr, Al, Ti тощо), зміна вільної енергії визначається як:

$$g_i = \Delta G_f^\circ = G_{X_y N_x}^\circ - \left(G_X^\circ + \frac{y}{2} G_{N_2}^\circ \right)$$

– обчислення g_i :

Спосіб 1: Використання термодинамічних таблиць:

JANAF Thermochemical Tables [30];

HSC Chemistry (HSC Software by Outotec) [31];

NIST Chemistry WebBook [32];

Термодинамічні властивості неорганічних речовин [33].

Спосіб 2: Розрахунок за рівнянням Гіббса [2, 24]:

Якщо дано стандартну ентальпію та ентропію утворення:

$$g_i = \Delta H_f^\circ - T \cdot \Delta S_f^\circ$$

де ΔH_f° – ентальпія утворення (кДж/моль),

ΔS_f° – ентропія утворення (Дж/моль·К),

T – температура в Кельвінах.

Розрахункова формула для визначення твердості азотованого шару має вигляд (3.5):

$$HV = HV_{cm} + \Delta HV, \quad (3.5)$$

де HV_{cm} – твердість серцевини.

3.2 Технологічні особливості іонного азотування виробів

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

з інструментальних сталей

Технологічні можливості установки іонного азотування з активними гарячими стінками дозволяють задавати різний режим розігріву та витримки – наприклад, основний внесок у розігрів садки деталей може давати гаряча стінка, а розігрів тліючим розрядом служить лише доповненням. Аналогічна ситуація спостерігається і на стадії витримки – в залежності від температури стінки камери, яка обумовлює величину теплових втрат садки через випромінювання, потужність розряду можна варіювати в досить широких межах, проте необхідно пам'ятати, що розряд повинен залишатися аномальним.

Розглянемо докладніше питання нагріву садки деталей в установці іонного азотування. При нагріванні в розряді садки деталей загальною масою m , кг, що мають температуру t_0 , яка дорівнює температурі навколишнього середовища, в момент часу $\tau = 0$ починає рівномірно за обсягом виділятися потужність P , Вт. Питома теплоємність металу садки визначається як $\text{Вт}\cdot\text{с}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, коефіцієнт теплопровідності матеріалу деталей приймемо $\lambda = \infty$ (тобто перепади температури всередині деталей садки відсутні). У міру нагрівання деталей вони віддають енергію в довкілля через тепловий опір R_T , К/Вт. Тепловий опір в даному випадку визначається променевим теплообміном між стінкою камери, що нагрівається зовнішнім джерелом, з деталями садки.

Енергія, що виділяється в деталях садки за час dt , дорівнює $P dt$ і витрачається на нагрівання маси m на dt і на тепловідведення в навколишнє середовище. При цьому на нагрівання тіла йде $m\cdot c\cdot dt$, $\text{Вт}\cdot\text{с}$, а в навколишнє середовище іде $(t - t_0) / R_T \cdot dt$, $\text{Вт}\cdot\text{с}$.

Відповідно до [18], у нагрівання садки йде близько 80-85% електричної потужності розряду, що визначається як добуток сили струму на напругу та коефіцієнт заповнення (для імпульсного джерела живлення). Нагрів безпосередньо катода – садки деталей визначається добутком щільності струму тліючого розряду на величину катодного падіння потенціалу – $U_{\text{КПП}}$, яке завжди є меншим прикладеної напруги. Для розглядуваного випадку це і є величина

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

$P = j \cdot U_{\text{КПП}}$. Таким чином, диференціальне рівняння енергетичного балансу для цього випадку має вигляд:

$$Pd\tau = mcdt + \frac{t-t_0}{R_T} d\tau. \quad (3.6)$$

Після інтегрування цього рівняння з урахуванням умов: при $\tau = 0$ $t = t_0$ одержимо:

$$\tau = mcR_T \ln \frac{PR_T}{PR_T - (t-t_0)}; \quad (3.7)$$

$$t = t_0 + PR_T \left(1 - e^{-\frac{\tau}{mcR_T}} \right). \quad (3.8)$$

У виразах (3.6) – (3.8) τ – час нагрівання тіла від температури t_0 до t . Зі збільшенням часу нагрівання температура тіла безперервно наближається до стаціонарної – t_{max} . Як впливає з вищенаведених виразів, час нагріву садки t визначається потужністю, що йде на нагрівання, і тепловим опором системи «садка-стінка».

Питання нагрівання та витримки садки для установок з холодними стінками досить детально розглянуті в [18], де показано, що в залежності від геометрії робочої камери, температури садки та її випромінювальної поверхні, кількості теплозахисних екранів та ступеня їх чорноти, температура внутрішнього екрану може відрізнятись від температури садки на 70-80 °С. Цей температурний інтервал визначає тепловий опір садки в конкретній камері з холодними стінками.

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

В установках з гарячими стінками різниця температур між стінкою та садкою може бути практично будь-якою – і ця різниця температур визначатиме величину теплових втрат камери як на стадії розігріву, так і на стадії витримки.

Параметри режиму зміцнювальної обробки методом іонного азотування є взаємопов'язаними, тому енергетичні характеристики тліючого розряду не можуть до певної міри вибиратися довільно, тому що для забезпечення, наприклад, необхідної температури для кожної конкретної садки і геометрії розрядної камери встановлюються деякі комбінації енергетичних показників розряду струму і напруги розряду.

При призначенні режиму обробки керуються, перш за все, вимогами конструкторської документації щодо параметрів азотованого шару – глибини та поверхневої твердості.

Особливістю азотування деталей з інструментальних сталей є те, що через наявність у них великих концентрацій легуючих елементів, а також вуглецю, при азотуванні можливе утворення тендітного нітридного шару, який може погіршити експлуатаційні характеристики виробів після азотування. Важливим фактором зміцнювальної обробки методом іонного азотування, наприклад, штампової або ливарної оснастки є те, що поверхня таких виробів має дуже високий ступінь чистоти і завданням зміцнювальної обробки є, крім підвищення твердості, також збереження цього високого ступеня чистоти після азотування. Так, наприклад, робочі поверхні матриць, притисків та виштовхувачів витяжних штампів, вирубних штампів при штампуванні тонколистових м'яких кольорових металів та сплавів та неметалічних матеріалів; робочі поверхні пуансонів та матриць зачистних штампів; поверхні кочення в блоках з кульковими напрямними; поверхні рухомих з'єднань напрямних колонок та втулок у блоках прецизійних штампів повинні мати 10-й клас чистоти [9].

При газовому азотуванні, коли відсутній ефект розпилення поверхні внаслідок іонного бомбардування, формоутворюючий інструмент після

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
						44
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

азотування піддається лише легкому поліруванню (практично без зменшення товщини зміцненого шару) [10].

Як відомо з [9], іонне азотування змінює шорсткість поверхні: у деталей, що мають високий клас чистоти поверхні, відбувається погіршення якості, а у деталей з низьким класом чистоти – навпаки, поліпшення якості. Причиною цього є розпилення поверхні виробу, яке може статися як при розігріванні садки деталей, що здійснюється в розряді шляхом іонного бомбардування поверхні, так і на стадії витримки, залежно від режиму обробки.

Таким чином, вже на стадії розігріву внаслідок розпилення поверхні деталі її шорсткість може погіршитися. Розпорошення матеріалу починається після того, як енергія іонів перевищить деяку граничну енергію – для заліза (основа інструментальних сталей) гранична енергія іонів аргону становить 14–20 еВ (електронвольт) [18]. Це енергія вже іонізованих іонів аргону (Ar^+), які прискорюються в електричному полі і "бомбардують" поверхню оброблюваного матеріалу. Така енергія забезпечує: очистку поверхні (вибивання оксидів, забруднень); активацію поверхні для подальшої хіміко-термічної обробки (наприклад, азотування); може викликати структурні зміни в приповерхневому шарі (ущільнення, дислокації).

При взаємодії іонів азоту з поверхнею більш кращим є процес дисоціативної рекомбінації та взаємодії з поверхнею – утворення нітридів заліза та легуючих елементів, а також дифузія у глиб металу [9].

У [18] проведено дослідження впливу режиму обробки – розігріву та витримки – на характер зміни шорсткості поверхні. В експериментах середні значення величини параметра J/p^2 на стадії розігріву в суміші аргону з невеликими добавками азоту і водню (частка аргону – 90%) в режимі обмеження напруги на електродах склали $(4,5...9) \cdot 10^{-4} \text{ А/м}^2 \cdot \text{Па}^2$, що відповідає значенню катодного падіння потенціалу 200 ... 250 В при тиску в камері – 130 ... 200 Па. Розрахунки показали, що іони аргону за таких параметрів процесу набувають енергію в катодному шарі лише на рівні 15,8...21 еВ тобто у межах порогової енергії. Отже, якість поверхні при такій обробці має зберегтися

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

практично у вихідному стані. Експерименти проводилися за трьома різними режимами: базовим: максимальна напруга – до 650 В, максимальний струм розряду – до 20 А; режимом зниженої напруги: максимальна напруга – не вище 450 В, струм розряду – не більше 15 А та режиму низької напруги: максимальна напруга – не вище 350 В, струм розряду – не вище 10 А. Було встановлено, що при режимі зниженої напруги шорсткість поверхні покращилася на 40-45%, а при режимі низької напруги на 70-80% щодо стандартного базового режиму обробки. Однак при цьому в силу обмеження максимальних значень струму і напруги відбувається збільшення тривалості розігріву садки до робочої температури більш ніж удвічі в порівнянні з базовим режимом. Уникнути цього недоліку можна в тому випадку, якщо розігрів садки здійснюється, в основному, випромінюванням від гарячої стінки і частково тліючим розрядом. Таким чином, задаючи певну швидкість розігріву садки, можна регулювати внесок у розігрів від стінки та від тліючого розряду. Основне питання в цьому випадку – параметри розряду мають забезпечувати його існування у вигляді аномального.

Таким чином, процес іонного азотування складається з кількох послідовних етапів, що характеризуються певними технологічними та фізичними особливостями. Після вакуумування робочої камери до деякого залишкового тиску на деталь-катод подається напруга (пульсуюча або постійна) і потім поступово йде збільшення поданої потужності – це процес очищення деталей іонним бомбардуванням. Для того, щоб цей процес протікав ефективно, розрядна напруга має бути на рівні 600 В і більше. Протягом цього циклу (кроку чи сегмента процесу) відбувається зародження мікродуг, які очищають поверхні від залишків миючого засобу, оксидів та інших забруднень. Якщо ж розігрів здійснювати гарячою стінкою, то при нагріванні поверхні деталей відбувається їх очищення від залишків вологи, миючого засобу шляхом випаровування у вакуумі, отже, напруга живлення розряду може бути значно меншою.

Чим менше на поверхні деталей залишків миючого засобу, оксидів та інших забруднень, тим менше часу займає процес очищення. Після того, як розряд починає горіти стабільно, в камеру подається плазмоутворювальний газ і

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

шляхом поступового збільшення потужності деталі розігріваються до необхідної температури. Природно, чим більша питома потужність розряду, тим більша інтенсивність розігріву деталей. У разі камери з гарячими стінками розігрів можна здійснювати в основному стінкою, а на тліючий розряд залишається лише очищення поверхні деталей іонним потоком при невисокій напрузі горіння розряду. При іонному азотуванні інтенсивність розпилення поверхні залежить від величини густини струму та катодного падіння потенціалу [5, 23]. Іони в катодному шарі набувають енергії тільки на довжині вільного пробігу тобто коли не відбувається їх перезарядка на атомах чи молекулах [9, 24]. Тому, чим вищий тиск у камері і чим менша прикладена до катода напруга, тим меншу енергію можуть придбати іони і, відповідно, тим менш ефективно відбуватиметься розпилення, а, отже, і зміна шорсткості поверхні.

Отже, задаючи певний тиск у камері і потужність тліючому розряду в установці з гарячими стінками можна забезпечити збереження високої чистоти поверхні деталей.

Експерименти на установці з гарячими стінками проводилися при тиску в камері 137 Па, температура садки становила 508-515 °С, площа оброблюваної поверхні становила 12,07 м². Робочим середовищем слугувала суміш газів аргону, азоту та водню. Завданням експериментів було визначення параметрів тліючого розряду – щільності струму та напруги на електродах – залежно від різниці температур між садкою та гарячою стінкою, яка підігрівалася ніхромовим нагрівачем. Різниця температур між садкою і гарячою стінкою становила від 3 до 30°С. На рисунках 3.1 – 3.3 наведено зміну напруги катод-анод, сили струму розряду та густини струму як функції різниці температур садка-стінка [18].

Аналіз одержаних даних показує, що реальна густина струму склала від 1,24 до 4,05 А/м² при значенні нормальної густини струму для заданої температури 0,63 А/м². Отже, розряд у цьому випадку існував як аномальний, тобто вся садка деталей була покрита світінням.

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

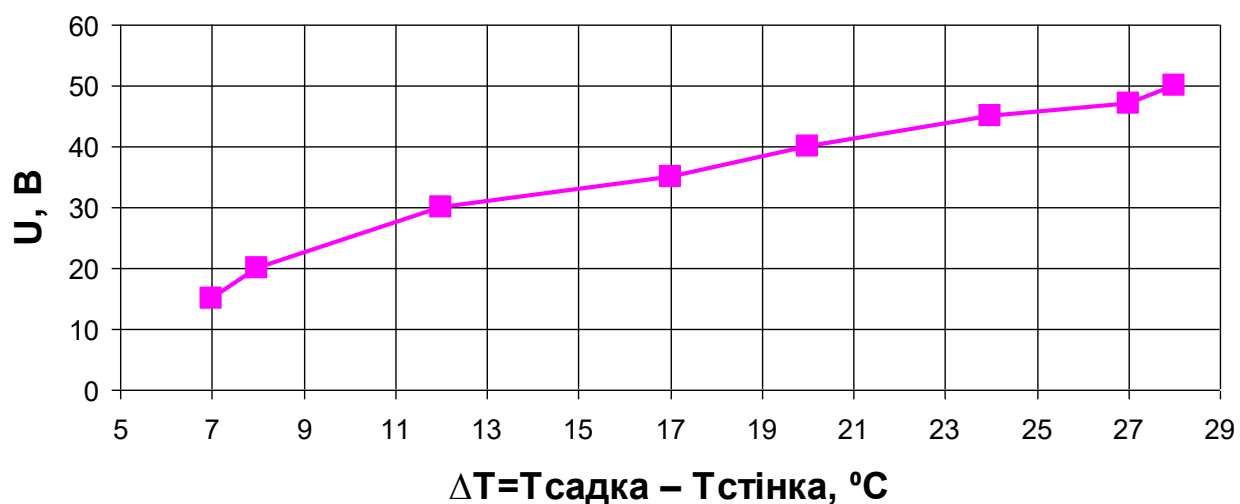


Рисунок 3.1 – Зміна напруги катод-анод залежно від різниці температур садки і стінки

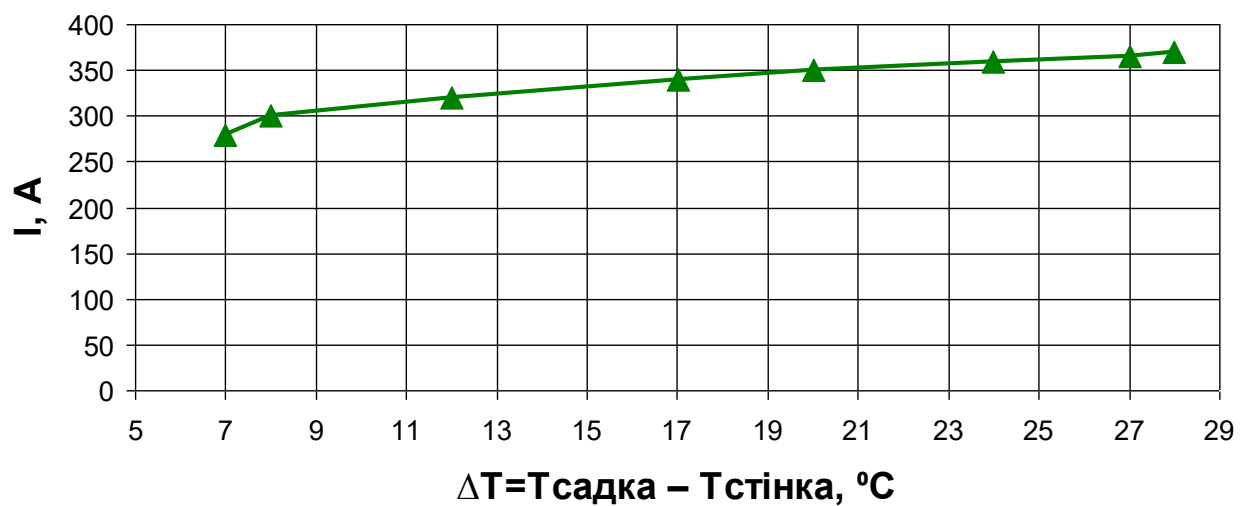


Рисунок 3.2 – Зміна сили струму розряду залежно від різниці температур садки і стінки

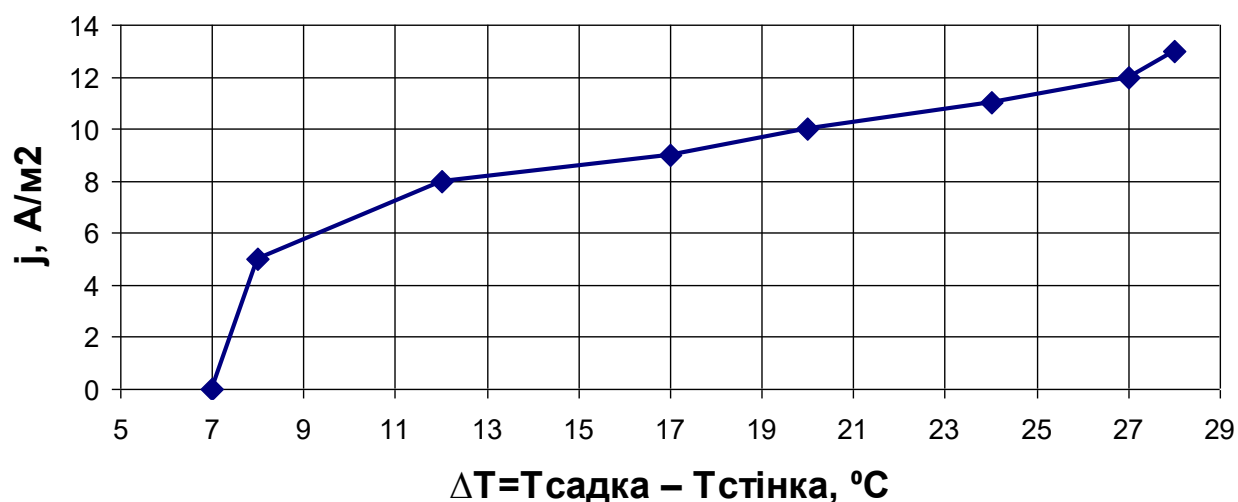


Рисунок 3.3 – Зміна густини струму залежно від різниці температур садки і стінки

За допомогою графіка [18] за величиною J/p^2 було визначено значення катодного падіння потенціалу для заданого діапазону різниць температур. Відповідні значення $U_{\text{кпп}}$ склали від 228 до 320 В, що, за даними роботи [18], гарантує при заданому тиску мінімальну енергію іонів – нижчу за поріг розпилення заліза іонами аргону.

У [5] було показано, що для формування азотованого шару на сталі 4Х5МФС, необхідного для штампової та ливарної оснастки з даної марки сталі, значення щільності потоку азоту на стадії витримки має бути на рівні 1,5 – 2 л / год·м². Якщо вважати, що максимальна частка азоту в робочій суміші може досягати 90 %, то мінімально допустима густина струму повинна бути відповідно 1,86...2,48 А/м², що цілком укладається в діапазон отриманих значень.

3.3 Результати дослідження

Для з'ясування впливу типу легуючого елемента та його концентрації на приріст твердості після іонно-плазмового азотування було проведено

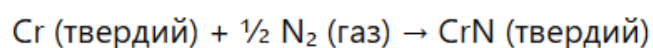
розрахунки для трьох марок сталей – 4Х5МФС, Р6М5 і 13Х, у яких збільшується кількість легуючих компонентів.

Розрахунок проводився для трьох значень температур – 450 °С, 480 °С та 520 °С.

Дані розрахунків величини g_i за формулою (3.2) для трьох легуючих елементів Cr, Mo, Mn, Si при 450°С (723 К), 480°С (753 К), 520°С (793 К) взято з термодинамічних таблиць [30 – 33].

Хром (Cr) – CrN.

Реакція утворення:



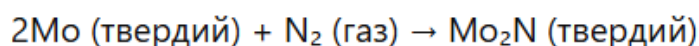
ΔG_f° при 723 К: ≈ -145 кДж/моль;

ΔG_f° при 753 К: ≈ -93 кДж/моль;

ΔG_f° при 793 К: ≈ -60 кДж/моль.

Молібден (Mo) – Mo₂N.

Реакція утворення:



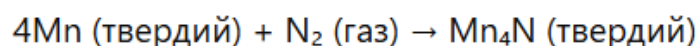
ΔG_f° при 723 К: ≈ -190 кДж/моль;

ΔG_f° при 753 К: ≈ -190 кДж/моль;

ΔG_f° при 793 К: ≈ -50 кДж/моль.

Марганець (Mn) – Mn₄N.

Реакція утворення:



ΔG_f° при 723 К: ≈ -90 кДж/моль;

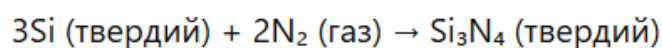
					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

ΔG_f° при 753 К: ≈ -90 кДж/моль;

ΔG_f° при 793 К: ≈ -90 кДж/моль.

Кремній (Si) – Si₃N₄

Реакція утворення:



ΔG_f° при 723 К: ≈ -750 кДж/моль;

ΔG_f° при 753 К: ≈ -750 кДж/моль;

ΔG_f° при 793 К: ≈ -580 кДж/моль.

– кремній (Si) має найнижче значення ΔG_f° , що свідчить про високу термодинамічну стабільність Si₃N₄.

– нітриди, утворені молібденом (Mo), марганцем (Mn) та хромом (Cr), є менш стабільними і залежать від температурних режимів, що може впливати на їх здатність до азотування за певної температури.

Стехіометричні коефіцієнти у реакціях утворення нітридів елементів Cr, Mo, Mn, Si подані в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Стехіометричні коефіцієнти (x_i) елементів Cr, Mo, Mn, Si

Елемент	Формула нітриду	Реакція	Стехіометрія (Метал : N ₂)
Cr	CrN	$\text{Cr} + \frac{1}{2}\text{N}_2 \rightarrow \text{CrN}$	2 : 1
Mo	Mo ₂ N	$2\text{Mo} + \frac{1}{2}\text{N}_2 \rightarrow \text{Mo}_2\text{N}$	4 : 1
Mn	Mn ₄ N	$4\text{Mn} + \frac{1}{2}\text{N}_2 \rightarrow \text{Mn}_4\text{N}$	8 : 1
Si	Si ₃ N ₄	$3\text{Si} + 2\text{N}_2 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4$	3 : 2

Дані розрахунків величини g_c за формулою (3.2) для трьох марок сталей подані в таблиці 3.5.

Далі визначали значення HV за формулою (3.5).

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Таблиця 3.5 – Розрахункові значення величини g_c
для марок сталей 4Х5МФС, Р6М5 і 13Х

Марка сталі	g_c								
	450°C			480°C			520°C		
	Межа			Межа			Межа		
	Нижня	Середня	Максимальна	Нижня	Середня	Максимальна	Нижня	Середня	Максимальна
4Х5МФС	1,037	1,195	1,353	0,983	1,134	1,279	0,921	1,062	1,203
Р6М5	1,053	1,226	1,399	0,991	1,155	1,318	0,897	1,045	1,196
13Х	0,151	0,251	0,351	0,145	0,240	0,336	0,135	0,224	0,313

У таблиці 3.6 подано дані значень для величини ΔHV для трьох марок сталей в залежності від вмісту легуючих елементів і температури азотування.

Таблиця 3.6 – Розрахункові значення ΔHV

Марка сталі	ΔHV								
	450°C			480°C			520°C		
	Межа			Межа			Межа		
	Нижня	Середня	Максимальна	Нижня	Середня	Максимальна	Нижня	Середня	Максимальна
4Х5МФС	690	720	730	680	710	720	670	700	715
Р6М5	480	500	520	480	490	510	470	480	495
13Х	100	190	245	100	185	230	95	150	220

3.4 Аналіз одержаних результатів

Як видно з наведених даних, найбільший вплив коливання відсоткового вмісту легуючих елементів на приріст твердості після азотування має місце для сталі 13Х і найменше – для сталей 4Х5МФС, Р6М5.

Найбільш наочно це видно із діаграм (рис. 3.4, 3.5, 3.6, 3.7).

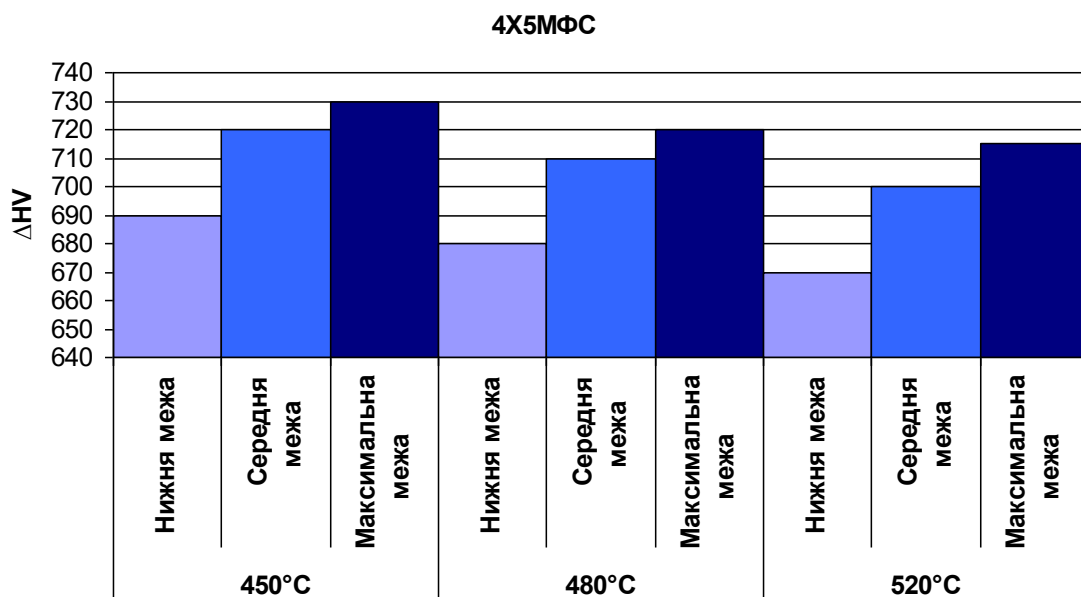


Рисунок 3.4 – Розрахункові значення приросту твердості після азотування для сталі 4X5MФC залежно від концентрації легуючих елементів та температури азотування

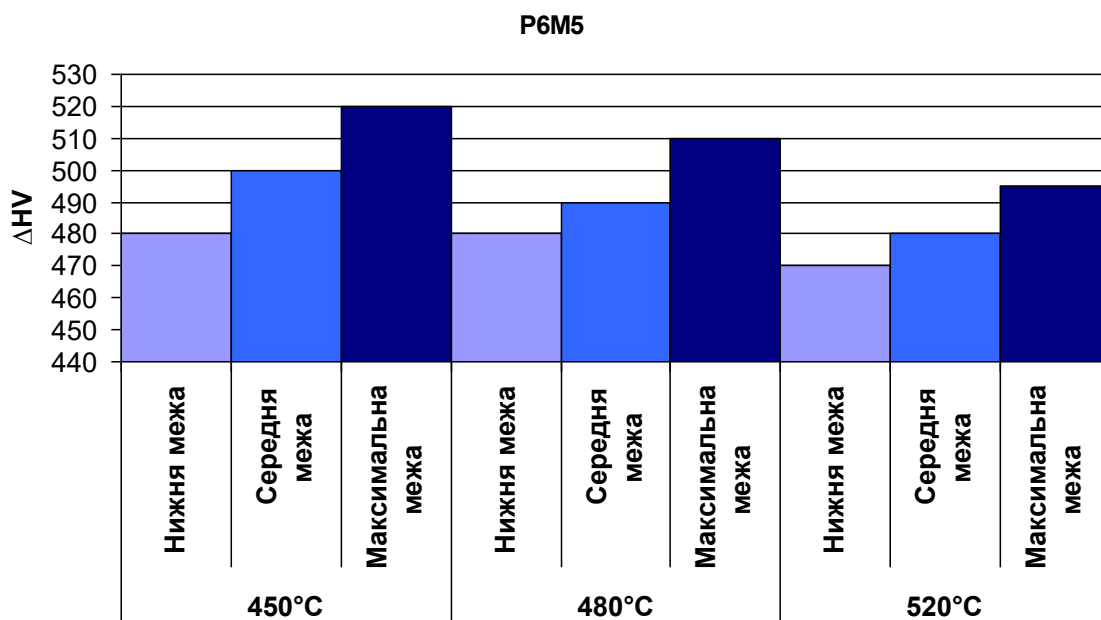


Рисунок 3.5 – Розрахункові значення приросту твердості після азотування для сталі P6M5 залежно від концентрації легуючих елементів та температури азотування

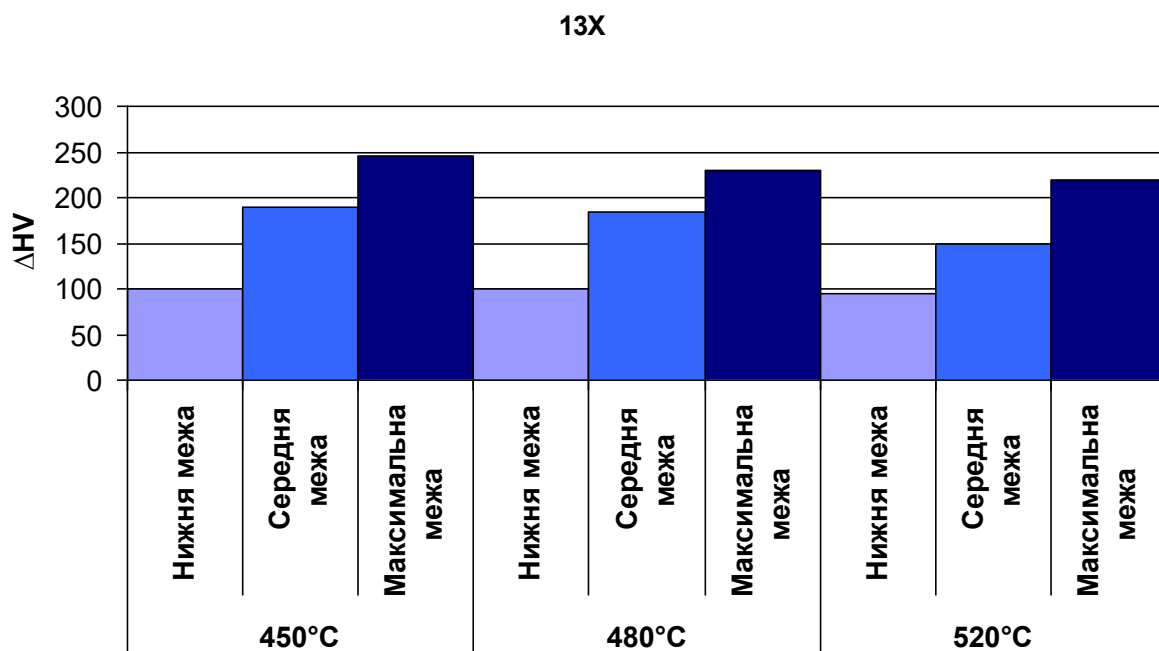


Рисунок 3.6 – Розрахункові значення приросту твердості після азотування для сталі 13X залежно від концентрації легуючих елементів та температури азотування

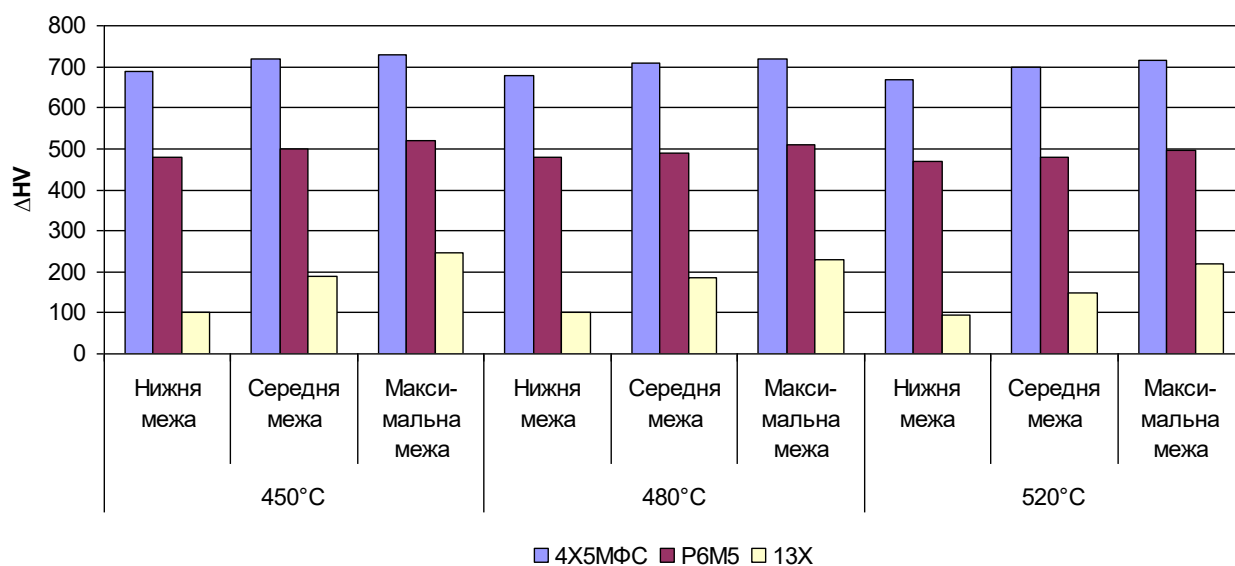


Рисунок 3.7 – Порівняння розрахункових значень приросту твердості після азотування для сталей 4X5MΦC, P6M5 і 13X залежно від концентрації легуючих елементів та температури азотування

З представлених діаграм видно, що сталю, найбільш стійкою до коливань відсоткового вмісту легуючих елементів є 4X5MФC і P6M5.

Отже, відхилення у температурі при відпуску, а також коливання відсоткового вмісту легуючих елементів не зможуть значною мірою вплинути на формування азотованого шару, зокрема, його твердість.

Така залежність твердості сталі від вмісту легуючих елементів і температури азотування обумовлена, мабуть, тим, що нітриди, які утворюються при азотуванні, забезпечують високу твердість шару і температура процесу (у розглянутому інтервалі) в незначній мірі позначається на прирості твердості.

Сталь 13X є більш чутливою до відхилень легуючих елементів від середнього значення. Це, мабуть, обумовлено меншою концентрацією легуючих елементів у цій сталі порівняно з 4X5MФC та P6M5.

Слід мати на увазі, що при відпуску частина легуючих елементів може перейти в карбіди, тим самим знизивши їхню концентрацію та твердість після азотування. Тому при виготовленні виробів із цих сталей з їх подальшим азотуванням ці фактори необхідно враховувати шляхом організації вхідного контролю складу сталей та точного забезпечення необхідної температури відпуску, що формує твердість серцевини.

Висновки до розділу

Проведені дослідження з впливу різниці температур між садкою і гарячою стінкою для робочого діапазону зміцнювальної обробки інструментальних сталей методом іонного азотування на параметри тліючого розряду показали, що в діапазоні різниці температур від 12 °C і вище параметри розряду відповідають критерію існування його у вигляді аномального, при цьому забезпечується необхідна хімічна активність розряду і низьке значення катодного падіння потенціалу, що унеможливорює розпилення поверхні.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Вивчено вплив температури азотування на приріст твердості сталей 4X5MΦC, P6M5 13X. Встановлено, що приріст твердості при азотуванні сталі 4X5MΦC, P6M5 гарантовано дає твердість поверхні (згідно з вимогами конструкторсько-технічної документації) у всьому діапазоні зміни твердості серцевини – 245...280 НВ.

Для сталі 13X має місце різкіша залежність твердості від температури азотування, що повинно враховуватися при виборі режиму попередньої термообробки та безпосередньо азотування виробів, виготовлених з цих марок сталей.

Вивчено вплив коливань хімічного складу на твердість поверхні при азотуванні. Встановлено, що найбільш стійкими до коливань відсоткового вмісту легуючих елементів є сталі 4X5MΦC і P6M5. Причини цього – підвищена концентрація легуючих елементів у сталях 4X5MΦC та P6M5 порівняно зі сталлю 13X.

Отже, відхилення у температурі при відпуску, а також коливання відсоткового вмісту легуючих елементів не зможуть значною мірою вплинути на формування азотованого шару. Тому завданням безпосередньо технологічного процесу іонного азотування є забезпечення необхідної твердості та глибини нітридного шару.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена дослідженню впливу параметрів процесу іонного азотування та хімічного складу сталі на якісні характеристики зміцненого шару.

З аналізу літературних джерел, встановлено, що вихідний структурний стан сталі до азотування відіграє ключову роль у формуванні структури та властивостей азотованого шару. Попри те, що попередня термообробка традиційно використовується для забезпечення механічних характеристик серцевини, її вплив на параметри зміцненого шару часто ігнорується. Виявлена необхідність у дослідженні зв'язку між режимами ПТО та властивостями азотованого шару відкриває перспективи для цілеспрямованого керування процесом азотування та розширення його технологічних можливостей. Це обґрунтовує актуальність обраного напрямку дослідження та визначає його мету і завдання.

З аналізу матеріалів другого розділу можна зробити висновки.

1. Іонно-плазмове азотування є ефективним методом хіміко-термічної обробки, що дозволяє формувати тверді азотовані шари з контрольованою структурою та властивостями.

2. Формування світлого шару та дифузійної зони є ключовими чинниками, які визначають експлуатаційні характеристики азотованих деталей.

3. На якість азотованого шару суттєво впливають технологічні параметри процесу, підготовка поверхні та вихідний структурний стан матеріалу.

4. Основними перевагами іонного азотування є:

- низька температура обробки,
- мінімальна деформація деталей,
- висока чистота поверхні після обробки,
- можливість локального зміцнення.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
						57
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

5. До недоліків методу належать складність обладнання, високі вимоги до вакууму та необхідність точного контролю параметрів процесу.

6. Іонно-плазмове азотування є перспективною технологією зміцнення машин та інструментів, яка потребує подальшої оптимізації з урахуванням властивостей вихідного матеріалу та умов експлуатації.

Аналіз матеріалів третього розділу дає можливість зробити висновок, що температурна різниця між садкою і гарячою стінкою значно впливає на параметри тліючого розряду. При різниці температур від 12 °С і вище забезпечується аномальний режим розряду з необхідною хімічною активністю та низьким катодним падінням потенціалу, що запобігає розпиленню поверхні.

На основі застосування розробленого алгоритму розрахунку приросту твердості сталей після іонноплазмового азотування встановлено.

1. Температура азотування суттєво впливає на приріст твердості інструментальних сталей:

– для сталей 4X5MФC та P6M5 забезпечується стабільний приріст твердості, що відповідає вимогам КТД у всьому діапазоні твердості серцевини (245...280 НВ);

– для сталі 13X спостерігається більш різка залежність твердості від температури азотування, що потребує точнішого підбору режиму попередньої термообробки.

2. Щодо стійкості до коливань хімічного складу сталей:

– сталі 4X5MФC та P6M5 є більш стійкими до змін у процентному вмісті легуючих елементів завдяки їхній підвищеній концентрації.

– сталь 13X є менш стійкою, що може призводити до варіативності твердості після азотування.

3. Щодо технологічної стабільності процесу:

– відхилення у температурі відпуску та коливання легуючих елементів не призводять до суттєвих змін у якості азотованого шару для сталей 4X5MФC і P6M5.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– основне завдання технолога – забезпечення стабільної твердості та заданої глибини нітридного шару в процесі іонного азотування.

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		59

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1 Dearnley PA. Introduction to Surface Engineering. Cambridge University Press; 2017.

2 Лахтин, Ю.М. Теория и технология азотирования / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, Г. Шпис, З. Бемер – Москва : Металлургия, 1991. – 320 с.

3 Bergelt, T., Landgraf, P., Grund, T., Bräuer, G. Lampke, T. (2022). Modelling of layer development and nitrogen distribution on different microstructures during plasma nitriding. Surface and Coatings Technology. 447. 128813.

4 Безводневе азотування в тліючому розряді з незалежними параметрами процесу / М. Є. Скиба, В. П. Олександренко, М. С. Стечишин, М. В. Лук'янюк, В. П. Олександренко. // Вісник Хмельницького національного університету. Машинознавство та обробка матеріалів в машинобудуванні. № 2 (271). – 2019. – С. 11–16.

5 Landgraf, P., Bergelt, T., Rymer, L.-M., Kipp, C., Grund, T., Bräuer, G., Lampke, T. (2022). Evolution of Microstructure and Hardness of the Nitrided Zone during Plasma Nitriding of High-Alloy Tool Steel. Metals. 12. 866.

6 Mokrzycka, M., Przybyło, A., Góral, M., Kościelniak, B., Drajewicz, M., Kubaszek, T., ... & Pytel, M. (2024). The influence of plasma nitriding process conditions on the microstructure of coatings obtained on the substrate of selected tool steels. Advances in Mechanical and Materials Engineering, 41(1), 5-16.

7 Bhadraiah, D., Nouveau, C., Veeraswami, V., & Rao, K. R. M. (2021). Plasma based nitriding of tool steel for the enhancement of hardness. Materials Today: Proceedings, 46, 940-943.

8 Дробот О. С., Підгайчук С. Я., Боровик Л. В. Технологія конструкційних матеріалів і основи матеріалознавства в технічних системах охорони державного кордону: навчальний посібник. Хмельницький : Видавництво НАДПСУ, 2019. 264 с.

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9 Мохорт А.В., Чумак М.Г. Термічна обробка металів: Навчальний посібник. –К.: Либідь. 2002. –512с.

10 Aparecida dos Santos de Almeida, E., Milan, J. C. G., & Edil da Costa, C. (2015). Acquired properties comparison of solid nitriding, gas nitriding and plasma nitriding in tool steels. *Materials Research*, 18(1), 27-35.

11 Chang, Y. Y., & Amrutwar, S. (2019). Effect of plasma nitriding pretreatment on the mechanical properties of AlCrSiN-coated tool steels. *Materials*, 12(5), 795.

12 Kumar, A., Kaur, M., Singh, S., Joseph, A., Jhala, G., & Bhandari, S. (2018). High-temperature tribological studies of plasma-nitrided tool steels. *Surface Engineering*, 34(8), 620-633.

13 Ionitech Ltd . URL: <http://www.ionitech.com> (дата звернення: 15.05.2025).

14 Puls-Plasma nitriding Units. URL: www.nitriion.com.br (дата звернення: 15.05.2025).

15 PVA Industrial Vacuum Systems GmbH. URL: <http://www.plateg.com> (дата звернення: 15.05.2025).

16 ELTROPULS Heat-Treatment-Unit. URL: <http://www.eltropuls.de/> (дата звернення: 15.05.2025).

17 RUBIG Heat Treatment. URL: <https://www.rubig.com/> (дата звернення: 15.05.2025).

18 Єрофєєва А.А. «Підвищення енергоефективності камерних нагрівальних печей шляхом використання керованих електричних полів». URL: https://ipbt.ust.edu.ua/file/diss_yerofieieva.pdf (дата звернення: 15.05.2025).

19 Азотування. URL: <https://karbaz.com.ua/nashi-uslugi/azotacija/> (дата звернення: 15.05.2025).

20 Ratajski J., Suszko T. Modelling of the nitriding process, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 195, Issues 1–3, 2008, Pages 212-217.

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

21 Manuel E., Antonio J., Ceniceros Antonio J., Acosta S., Darío R., Rosado Raúl, Castillo F., Oseguera J. (2016). Modeling of compound layer growth during nitriding of pure iron. *Scientific Research and Essays*. 11. 135-146.

22 Triwiyanto Askar, Zainuddin Azman, Abidin K.A.Z., Billah M.A., Hussain Patthi. (2014). Mathematical Modelling of Nitride Layer Growth of Low Temperature Gas and Plasma Nitriding of AISI 316L. *MATEC Web of Conferences*. 13. 04022.

23 Podgornik, B., Sedlaček, M., Žužek, B., & Guštin, A. (2020). Properties of tool steels and their importance when used in a coated system. *Coatings*, 10(3), 265.

24 Сушко О. В. Прикладне матеріалознавство: підручник для вищих навчальних закладів III-IV ступенів акредитації. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/7209> (дата звернення: 15.05.2025).

25 Hawryluk, M., Lachowicz, M., Janik, M., Ziemba, J., & Gronostajski, Z. (2021). Influence of the nitrided layer thickness of dies made of two types of tool steel used in hot extrusion of valve forgings made of nickel–chromium steel on the durability of these tools. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21(4), 151.

26 ДСТУ ГОСТ 2999:2007. «Метали і сплави. Метод вимірювання твердості за Віккерсом»

27 ДСТУ ISO 4287:2012 «Шорсткість поверхні. Терміни, визначення та параметри».

28 ДСТУ ГОСТ 5950:2003 «Прутки, смуги та мотки з інструментальної легованої сталі. Загальні технічні умови»

29 ДСТУ ГОСТ 19265:2003 «Прутки і смуги з швидкорізальної сталі. Технічні умови»

30 Chase M. W. (1985). *JANAF Thermochemical Tables* (4th ed.). National Institute of Standards and Technology. URL: <https://kinetics.nist.gov/janaf/> (дата звернення: 15.05.2025).

31 Outotec Research Oy. (2025). *HSC Chemistry Software*. URL: <https://www.hsc-chemistry.com/> (дата звернення: 15.05.2025).

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

32 NIST. (2025). NIST Chemistry WebBook. National Institute of Standards and Technology. URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/> (дата звернення: 15.05.2025).

33 Barin I. (1995). Thermochemical Data of Pure Substances (3rd ed., Vols. 1–2). Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft. URL: <https://archive.org/details/thermochemicalda0000bari> (дата звернення: 15.05.2025).

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		63

ДОДАТОК

					<i>КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		64

Додаток А

Презентаційний матеріал

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Визначення впливу концентрації легуючих елементів і температури в процесі іонно-плазмового азотування на приріст твердості сталей 4Х5МФС, Р6М55 і 13Х

Виконав : студент групи МТВАс-22-2
Марков В.Ю.

Керівник : д.т.н., доцент Драч І.В.

Кафедра
трибології, автомобілів і матеріалознавства

ОБ'ЄКТ дослідження – процеси іонно-плазмового азотування.

ПРЕДМЕТ дослідження – методи випробувань і теоретичних досліджень твердості поверхні зразків при азотуванні.

МЕТА кваліфікаційної роботи оцінювання впливу параметрів процесу іонного азотування (зокрема, температури азотування і коливань хімічного складу зразка) на приріст твердості азотованого шару.

ЗАВДАННЯ кваліфікаційної роботи :

- вивчити основні принципи та методи іонного азотування;
- розробити алгоритм розрахунку приросту твердості сталі при азотуванні;
- вивчити вплив температури азотування на приріст твердості сталей 4Х5МФС, Р6М5 13Х;
- вивчити вплив коливань хімічного складу на твердість поверхні при азотуванні.

2

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

- вихідний структурний стан сталі перед азотуванням є ключовим фактором, що визначає структуру і властивості азотованого шару;
- попередня термообробка (ПТО), яка традиційно спрямована на забезпечення механічних властивостей серцевини, має суттєвий вплив і на параметри зміцненого шару, хоча цей вплив часто залишається недооціненим;
- існує потреба у дослідженні взаємозв'язку між режимами попередньої термообробки та характеристиками азотованого шару, що дозволить цілеспрямовано керувати процесом азотування;
- такий підхід розширює технологічні можливості іонного азотування і дає підстави для розробки адаптивних режимів обробки відповідно до властивостей конкретного матеріалу.

3

					КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

ІОННО-ПЛАЗМОВЕ АЗОТУВАННЯ: ПРОЦЕС, НЕДОЛІКИ І ПЕРЕВАГИ

4

- Іонно-плазмове азотування є ефективним методом ХТО, що дозволяє формувати тверді азотовані шари з контрольованою структурою та властивостями.
- Формування світлого шару та дифузійної зони є ключовими чинниками, які визначають експлуатаційні характеристики азотованих деталей.
- На якість азотованого шару суттєво впливають технологічні параметри процесу, підготовка поверхні та вихідний структурний стан матеріалу.
- Основними перевагами іонного азотування є:
 - низька температура обробки,
 - мінімальна деформація деталей,
 - висока чистота поверхні після обробки,
 - можливість локального зміцнення.
- До недоліків методу належать складність обладнання, високі вимоги до вакууму та необхідність точного контролю параметрів процесу.
- Іонно-плазмове азотування є перспективною технологією зміцнення машин та інструментів, яка потребує подальшої оптимізації з урахуванням властивостей вихідного матеріалу та умов експлуатації.

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ І ТЕМПЕРАТУРИ В ПРОЦЕСІ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ НА ПРИРІСТ ТВЕРДОСТІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Таблиця 3.1 – Склад сталі 4X5МФС

Група сталі		Сталь інструментальна штампова									
Марка сталі		4X5МФС									
Масова частка елементів, %											
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	Cu		
0,32 - 0,4	0,9 - 1,2	0,2 - 0,5	до 0,4	до 0,05	до 0,03	4,5 - 5,5	1,2 - 1,5	0,3 - 0,5	до 0,3		

Таблиця 3.2 – Склад сталі Р6М5

Група сталі		Сталь інструментальна швидкозатвердіюча									
Марка сталі		Р6М5									
Масова частка елементів, %											
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	W	V	Co	Cu
0,82 - 0,9	0,2 - 0,5	0,2 - 0,5	до 0,6	до 0,025	до 0,03	3,8 - 4,4	4,8 - 5,3	5,5 - 6,5	1,7 - 2,1	до 0,5	до 0,25

Таблиця 3.3 – Склад сталі 13X

Група сталі		Сталь інструментальна легувана									
Марка сталі		13X									
Масова частка елементів, %											
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	W	V	Ti	Cu
1,25 - 1,4	0,1 - 0,4	0,15 - 0,45	до 0,4	до 0,03	до 0,03	0,4 - 0,7	до 0,2	до 0,2	до 0,15	до 0,03	до 0,3

5

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ І ТЕМПЕРАТУРИ В ПРОЦЕСІ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ НА ПРИРІСТ ТВЕРДОСТІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для основного діапазону температур при відпуску легуваних сталей $\Delta T = 550 - 650$ °C співвідношення між загальним вмістом елемента сталі [%Me] та його концентрацією в твердому розчині c_{Me} становить:

- для хрому: $c_{Cr} = 0,75 [\%Cr]$;
- для молібдену: $c_{Mo} = (0,5 \dots 0,8) [\%Mo]$;
- для марганцю: $c_{Mn} = (0,6 \dots 0,8) [\%Mn]$;
- для кремнію: $c_{Si} = [\%Si]$

6

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ

Арк.

66

**ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ І
ТЕМПЕРАТУРИ В ПРОЦЕСІ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ НА
ПРИРІСТ ТВЕРДОСТІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ**

Алгоритм розрахунку приросту твердості сталі при азотуванні

- $N_i = c_{Mei}$ – мольна частка i -го легуючого елемента, %
- (1) $N_i = \frac{M_{Fe}}{100M_i} c_i = \frac{0,56}{M_i} c_i$ для малих вмістів легуючих елементів (менше 5–10%)
- (2) x_i – стехіометричний коефіцієнт в реакції утворення нітридів знаходимо з рівняння реакції: X (твердий) + $\frac{y}{2} N_2$ (газ) → $X_y N_x$ (твердий)
- (3) $g_i = \Delta G_f^\circ = G_{X_y N_x}^\circ - \left(G_X^\circ + \frac{y}{2} G_{N_2}^\circ \right)$ зведена вільна енергія утворення нітридів л.е.
- (4) $g_c = \frac{\Delta G_0}{RT} = \sum \frac{N_i}{X_i} g_i$ зведена вільна енергія нітридоутворення для сталі
- (5) $HV_n = k \cdot (-g_c) + C$, мікротвердість нітридного шару
- (6) $\Delta HV = HV_n - HV_0$, приріст твердості сталі при азотуванні

7

**ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ І
ТЕМПЕРАТУРИ В ПРОЦЕСІ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ НА
ПРИРІСТ ТВЕРДОСТІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ**

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Таблиця 4 – Стехіометричні коефіцієнти (x_i) елементів Cr, Mo, Mn, Si

Елемент	Формула нітриду	Реакція	Стехіометрія (Метал : N ₂)
Cr	CrN	Cr + ½N ₂ → CrN	2 : 1
Mo	Mo ₂ N	2Mo + ½N ₂ → Mo ₂ N	4 : 1
Mn	Mn ₃ N	4Mn + ½N ₂ → Mn ₃ N	8 : 1
Si	Si ₃ N ₄	3Si + 2N ₂ → Si ₃ N ₄	3 : 2

Таблиця 5 – Розрахункові значення величини g_c для марок сталей 4X5MФС, P6M5 і 13X

Марка сталі	g_c								
	450°C			480°C			520°C		
	Межа			Межа			Межа		
Нижня	Середня	Максимальна	Нижня	Середня	Максимальна	Нижня	Середня	Максимальна	
4X5MФС	1,037	1,195	1,353	0,983	1,134	1,279	0,921	1,062	1,203
P6M5	1,053	1,226	1,399	0,991	1,155	1,318	0,897	1,045	1,196
13X	0,151	0,251	0,351	0,145	0,240	0,336	0,135	0,224	0,313

8

**ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ І
ТЕМПЕРАТУРИ В ПРОЦЕСІ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ НА
ПРИРІСТ ТВЕРДОСТІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ**

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Таблиця 6 – Розрахункові значення ΔHV

Марка сталі	ΔHV								
	450°C			480°C			520°C		
	Межа			Межа			Межа		
Нижня	Середня	Максимальна	Нижня	Середня	Максимальна	Нижня	Середня	Максимальна	
4X5MФС	690	720	730	680	710	720	670	700	715
P6M5	480	500	520	480	490	510	470	480	495
13X	100	190	245	100	185	230	95	150	220

9

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ

Арк.

67

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ І
ТЕМПЕРАТУРИ В ПРОЦЕСІ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ НА
ПРИРІСТ ТВЕРДОСТІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

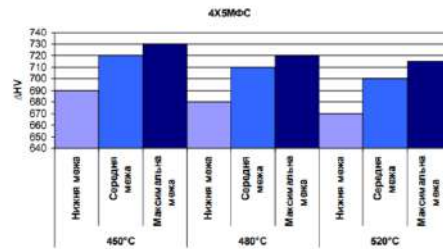


Рисунок 1 – Розрахункові значення приросту твердості після азотування для сталі 4X5MФC залежно від концентрації легуючих елементів та температури азотування

10

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ І
ТЕМПЕРАТУРИ В ПРОЦЕСІ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ НА
ПРИРІСТ ТВЕРДОСТІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

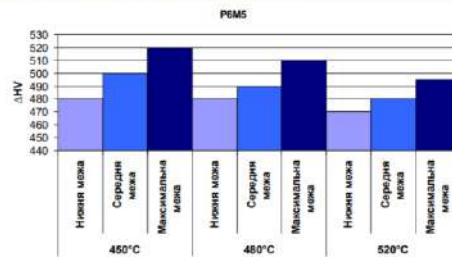


Рисунок 2 – Розрахункові значення приросту твердості після азотування для сталі P6M5 залежно від концентрації легуючих елементів та температури азотування

11

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ І
ТЕМПЕРАТУРИ В ПРОЦЕСІ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ НА
ПРИРІСТ ТВЕРДОСТІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

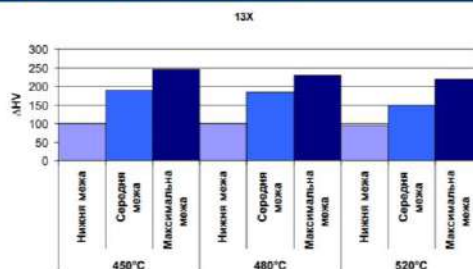


Рисунок 3 – Розрахункові значення приросту твердості після азотування для сталі 13X залежно від концентрації легуючих елементів та температури азотування

12

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ

Арк.

68

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ І ТЕМПЕРАТУРИ В ПРОЦЕСІ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ НА ПРИРІСТ ТВЕРДОСТІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

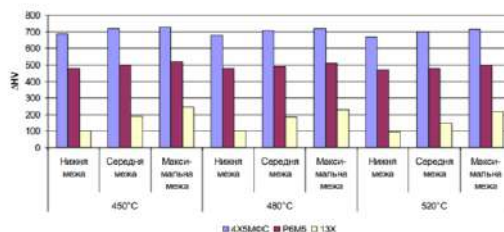


Рисунок 4 – Порівняння розрахункових значень приросту твердості після азотування для сталей 4X5MФC, P6M5 і 13X залежно від концентрації легуючих елементів та температури азотування

13

Висновки

На основі застосування розробленого алгоритму розрахунку приросту твердості сталей після іонноплазмового азотування встановлено.

1. Температура азотування суттєво впливає на приріст твердості інструментальних сталей:
 - для сталей 4X5MФC та P6M5 забезпечується стабільний приріст твердості, що відповідає вимогам КТД у всьому діапазоні твердості серцевини (245...280 НВ);
 - для сталі 13X спостерігається більш різка залежність твердості від температури азотування, що потребує точнішого підбору режиму попередньої термообробки.
2. Щодо стійкості до коливань хімічного складу сталей:
 - сталі 4X5MФC та P6M5 є більш стійкими до змін у процентному вмісті легуючих елементів завдяки їхній підвищеній концентрації.
 - сталь 13X є менш стійкою, що може призводити до варіативності твердості після азотування.
3. Щодо технологічної стабільності процесу:
 - відхилення у температурі відпуску та коливання легуючих елементів не призводять до суттєвих змін у якості азотованого шару для сталей 4X5MФC і P6M5.
 - основне завдання технолога – забезпечення стабільної твердості та заданої глибини нітридного шару в процесі іонного азотування.

14

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБМТВАТАМ 25 22157. 000 ПЗ

Арк.

69