

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи


МАГІСТРА


Освітньо-кваліфікаційний рівень

Спеціальність 132 – Матеріалознавство
Шифр і назва спеціальності
Освітньо-професійна програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів
Назва освітньої програми

на тему ***Моделювання процесів кінетики нагріву при хіміко-термічній обробці інструментальної сталі Р6М5***

Шифр: МРТАМ 24.23608.000. ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група МТВАМ-23-1  Роман КОЛІСНИК
Курс, група виконавця Підпис Ім'я, прізвище

Керівник: д.т.н., доцент кафедри ТАМ  Ілона ДРАЧ
Науковий ступінь, посада Підпис Ім'я, прізвище

До захисту допускаю:
зав. кафедри ТАМ, д.т.н., професор  Олександр ДИХА
Підпис Ім'я, прізвище

5 12 2024 р.

Хмельницький 2024

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *інженерії, транспорту та архітектури*

Кафедра *трибології, автомобілів та матеріалознавства*

Рівень вищої освіти *другий магістерський*

Галузь знань *13 – Механічна інженерія*

Спеціальність *132 – Матеріалознавство*

Освітньо-професійна програма *Відновлення та технічний сервіс автомобілів*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ



(підпис)

д.т.н., професор Олександр ДИХА

Науковий ступінь, ім'я, прізвище

7 жовтня 2024 року

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Коліснику Роману Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Моделювання процесів кінетики нагріву при хіміко-термічній обробці інструментальної сталі Р6М5»

Керівник роботи Драч Ілона Володимирівна д.т.н., доцент

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

Затверджено наказом університету від 28 серпня 2024 р. № 60 (Д28)

2. Строк подання студентом роботи на кафедру: 2 грудня 2024 р.

3. Вихідні дані: *фізико-механічні характеристики та структурні параметри інструментальної сталі (Р6М5), характеристики установок, режими нагрівання струмами високої частоти.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік задач): *провести аналіз предметної області, провести моделювання методом скінченних елементів процесу хіміко-термічної обробки зразків із інструментальної сталі; шляхом експериментальних досліджень структури та фізико-механічних властивостей зміцнених зразків верифікувати побудовану модель; побудувати модель зростання глибини азотованого шару сталі Р6М5, як функції температури та часу азотування; перевірити моделі шляхом порівняння розрахованої глибини азотованого шару з експериментально визначеною при різних температурах та тривалості азотування..*

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

6. Консультанти розділів роботи:

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

7. Дата видачі завдання 10 червня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Термін виконання	Примітка
1	<i>Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики дипломної роботи з керівником</i>	<i>30.08.2024</i>	<i>виконано</i>
2	<i>Ознайомлення з предметною областю, формулювання мети та задач дослідження, визначення об'єкта та предмета дослідження</i>	<i>10.09.2024</i>	<i>виконано</i>
3	<i>Робота над розділом 1 – Характеристика предметної області та постановка задачі</i>	<i>20.09.2024</i>	<i>виконано</i>
4	<i>Робота над розділом 2 – Види хіміко-термічної обробки, їх характеристика</i>	<i>30.09.2024</i>	<i>виконано</i>
5	<i>Робота над розділом 3 – Результати експериментального дослідження процесу зміцнення різального інструменту зі сталі Р6М5 азотуванням</i>	<i>30.10.2024</i>	<i>виконано</i>
6	<i>Робота над розділом 4 – Моделювання процесів кінетики нагріву та нарощення азотовмісного шару при хіміко-термічній обробці інструментальної сталі Р6М5</i>	<i>20.11.2024</i>	<i>виконано</i>
7	<i>Оформлення пояснювальної записки згідно вимог</i>	<i>1.12.2024</i>	<i>виконано</i>
8	<i>Нормоконтроль пояснювальної записки</i>	<i>5.12.2024</i>	<i>виконано</i>
9	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	<i>5.12.2024</i>	<i>виконано</i>

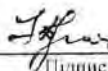
Студент


Підпис

Роман КОЛІСНИК

Ім'я, прізвище

Керівник


Підпис

Ілона ДРАЧ

Ім'я, прізвище

РЕФЕРАТ

Тема дипломної роботи:	<u>Моделювання процесів кінетики нагріву</u> <u>при хіміко-термічній обробці</u> <u>інструментальної сталі Р6М5</u>
Виконавець дипломної роботи:	<u>студент групи МТВАм-23-1</u> <u>Колісник Роман Володимирович</u>
Керівник дипломної роботи бакалавра:	<u>д.т.н., доцент кафедри ТАМ</u> <u>Драч Ілона Володимирівна</u>

Дипломна робота бакалавра містить:

Пояснювальна записка				Кількість додатків
Сторінок	Рисунків	Таблиць	Джерел інформації	
94	46	9	30	2

Наведено результати чисельного моделювання процесу індукційної хіміко-термічної обробки (ІХТО) дискових зразків із інструментальної швидкорізальної сталі Р6М5. Модель враховує розташування оброблюваних виробів та їх кінетику нагріву всередині герметичної камери в азотовмісному середовищі. Визначення температурних полів, що відповідають дифузійним процесам азоту в сталевих виробах (при температурі понад 600 °С), дозволило встановити глибину та рівномірність прогріву виробів та глибину дифузійного шару. У процесі моделювання встановили вплив струму індуктора на поверхневу температуру зразків. Процес чисельного моделювання полягав у розв'язанні крайової задачі електродинаміки та нестационарної теплопередачі системи індуктор-камера-зразок. Запропоновано аналітичну модель прогнозування товщини азотовмісного шару. Перевірка моделей на експериментальному матеріалі показала хорошу узгодженість з емпіричними даними.

Ключові слова: різальний інструмент для технічного обслуговування автомобіля, інструментальна швидкорізальна сталь, азотування, дифузія азоту, розподіл тепла, метод скінченних елементів, задачі електродинаміки та теплопровідності, аналітична модель прогнозування товщини азотованого шару.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Характеристика предметної області та постановка задачі дослідження.....	10
1.1 Хімічний склад сталі Р6М5.....	10
1.2 Використання сталі Р6М5.....	13
1.3 Заточування виробів зі сталі Р6М5.....	18
1.4 Розшифрування марки сталі Р6М5.....	19
1.5 Механічні властивості сталі Р6М5.....	20
1.6 Особливості термічної обробки сталі Р6М5.....	21
1.7 Хіміко-термічна обробка (ХТО) сталі Р6М5.....	26
1.8 Мета і задачі дослідження.....	30
2 Види хіміко-термічної обробки, їх характеристика.....	33
2.1 Процеси ХТО.....	33
2.2 Режими основних видів хіміко-термічної обробки.....	35
2.3 Хіміко-термічна обробка з нагріванням СВЧ.....	44
2.4 Азотування швидкорізальної сталі Р6М5.....	46
Висновки до розділу.....	48
3 Результати експериментального дослідження процесу зміцнення різального інструменту зі сталі Р6М5 азотуванням.....	49
3.1 Експериментальний підбір оптимальних режимів обробки.....	49
3.2 Вплив азотування на фізико-механічні властивості інструменту зі сталі Р6М5.....	54
3.2.1 Зносостійкість інструменту зі сталі Р6М5.....	54
3.2.2 Теплостійкість інструменту зі сталі Р6М5.....	56

					МРТАМ 24.23608.000 ПЗ		
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат			
Розроб.		Колісник			Літ.	Арк.	Акрюшів
Перевір.		Драч				5	
Реценз.					ХНУ група МТВАм 23-1		
Н. Контр.		Бабак					
Затверд.		Диха					

Моделювання процесів
кінетики нагріву при хіміко-
термічній обробці
інструментальної сталі Р6М5

ВСТУП

Азотування є найбільш поширеним та ефективним методом поверхневого зміцнення. Така хіміко-термічна обробка здатна підвищити поверхневу твердість, контактну витривалість, опір зношування і захоплювання, а також теплостійкість і корозійну стійкість деталей машин широкої номенклатури, зокрема різального інструменту для технічного обслуговування автомобілів. Експлуатаційні вимоги до деталей призвели до необхідності заміни високотемпературних способів хіміко-термічної обробки (цементация, високотемпературна нітроцементация та ін.) на процеси зміцнення при нижчих температурах (500-650 °С), а саме до азотування. Цій заміні сприяли нові технологічні розробки у сфері різних методів азотування. Сучасні наукові розробки дозволяють ліквідувати такі недоліки азотування як значна тривалість процесу, збільшена крихкість поверхневого шару, недостатні значення контактної витривалості, трудомісткість процесу [1].

Незважаючи на досить широке застосування процесу азотування на практиці, залишається досить багато невирішених питань, пов'язаних в основному з механізмом структуроутворення у формуванні дифузійного шару [2].

Саме особливості структури азотованого шару і самої матриці визначають працездатність деталей машин а, отже, і вибір сталей, технологій попередньої обробки та безпосередньо технологію азотування. Тому на сьогоднішній день прогнозування та моделювання процесів формування структури та властивостей у дифузійному шарі при азотуванні є досить актуальним завданням.

Моделювання процесів, що відбуваються під час азотування – це найбільш ефективна методика розробки технологічного процесу. Застосування розрахункових методів дає можливість досить оперативно отримувати інформацію про основні властивості зміцненого шару, швидкість протікання дифузійних і структуроформувальних процесів, про формування нітридного і карбонітридного шарів при варіюванні температурно-часових режимів.

Моделювання різних процесів азотування дає можливість для простого та оперативного вирішення багатьох технологічних завдань з контролю та

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		7

управління режимами насичення дифузійних шарів, прогнозування кінцевих результатів та можливості розробки інноваційних режимів обробки. При цьому врахування чинників складності та дороговартості проведення великої кількості експериментів робить математичне моделювання процесів азотування особливо перспективним методом дослідження.

Об'єктом дослідження є процеси термохімічного оброблення інструментальної сталі в азотовмісному середовищі.

Предметом дослідження є моделювання процесів кінетики нагріву та нарощення азотовмісного шару при хіміко-термічній обробці інструментальної сталі Р6М5.

Метою цієї роботи є дослідження залежності глибини азотованого шару і поверхневої твердості від значень температури і тривалості хіміко-термічної обробки сталі при азотуванні.

Завданнями роботи є:

- 1) аналіз існуючих технологій, що покращують експлуатаційні властивості виробів;
- 2) моделювання методом скінченних елементів термічних режимів процесу хіміко-термічної обробки зразків із швидкорізальної сталі;
- 3) розробка методики і плану проведення експериментальних робіт та дослідження структури і фізико-механічних властивостей зміцнених зразків;
- 4) розробка залежностей зміни твердості від температури і тривалості обробки струмами високої частоти, а також від вмісту азоту в поверхневому шарі зразків;
- 5) моделювання зростання глибини азотованого шару сталі Р6М5, як функції температури та часу азотування. Перевірка моделі шляхом порівняння розрахованої глибини азотованого шару з експериментально визначеною при різних температурах та тривалості азотування.

Виявлено залежності впливу хіміко-термічної обробки на властивості та структуру поверхні виробів з інструментальної сталі. Вирішено завдання електродинаміки та нестационарної теплової передачі, які дозволили визначити вплив струмів високої частоти на розподіл температурних полів.

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		8

На основі першого закону Фіка побудовано прогностичну модель визначення глибини азотованого шару для процесу азотування інструментальної швидкорізальної сталі. Побудована модель показала хорошу узгодженість з експериментальними результатами як для газового азотування, так й іонного азотування сталі Р6М5.

За результатами дослідження опубліковано статтю (Додаток А):

Колісник Р. В., Драч І. В., Бабак О. П., Вичавка А. А. (2024). Моделювання процесів електродинаміки та тепловтрат у камері при азотуванні. Збірник праць ХІХ Міжнародної наукової конференції "Сучасні досягнення в науці та освіті", 29 вересня - 6 жовтня 2024 р., м. Нетанія (Ізраїль). – Хмельницький : ХНУ, С. 79 – 84.

<https://elar.khmnmu.edu.ua/handle/123456789/16894>

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		9

○ P6M5 можна оброблювати різальними і шліфувальним інструментом.

Основні характеристики сталі P6M5 подано в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Характеристики сталі P6M5

Характеристика	Значення
Марка й аналоги	P6M5 . Аналоги – SKH51, T11302, M2, 3343, BM2, HS6-5-2, HS6-5-2HC, X85WMoCrV6-5-4, Z85WDCV, HS6-5-2, S6-5-2, S6-5-2S, SC6-5-2, SW7M, W6Mo5Cr4V2, HS6-5-2, X82WMoV6-5
Клас	Сталь інструментальна швидкорізальна
Види випуску	Сортовий прокат, у тому числі фасонний, калібрований пруток, шліфований пруток та сріблянка, смуга, поковки та ковані заготовки
Твердість металу	62-65 HRC
Температура гартування	Гартування 1220 °C в маслі, відпуск трикратний по 1 год.
Тип охолодження	Охолодження уповільнене в колодязі
Рівень крихкості	Малосхильна
Ударна в'язкість	0.25 МДж/м ²
Температура критичних точок	$A_{c1} = 840$, $A_{c3}(A_{cm}) = 875$, $A_{r3}(A_{rcm}) = 805$, $A_{r1} = 765$

Продукція зі сплаву P6M5 гарно працює з кислотостійкими і жароміцними сталями, які належать до аустенітного класу.

Недоліки сплаву P6M5:

- складність ручного оброблення виробів з P6M5;
- зниження якості заточування при різкому охолодженні;
- тонка кромка на різальному інструменті.

Зазначені мінуси не є критичними, мають мінімальний вплив на зручність використання інструмента.

					MPTAM 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		12

1.2 Використання сталі P6M5

Сталь класу P6M5 використовується для металорізального, різьбонарізного інструменту, а також для інструментів, що працюють з великим ударним навантаженням і високою швидкістю різання. Висока твердість сталі P6M5 пояснює можливість її використання для інструментів для різання металу.

Свердла P6M5 (рисунок 1.2).

За допомогою свердл P6M5 формуються наскрізні та глухі отвори малого діаметра. Вироби встановлюються в дрилі, шуруповерти та стаціонарні станки. Вони затребувані при проведенні монтажних і ремонтних робіт, виготовлені компонент машин і механізмів.

Свердла по металу P6M5 подані в декількох виконаннях:

- спіральні;
- конусні;
- центрувальні;
- лівосторонні;
- циліндричні.

Виготовляються свердла P6M5 за ДСТУ 10902:2008, ДСТУ 401:2008 і ДСТУ 2092:2008 [3-5]. Можливим є використання інших стандартів, які регламентують виробництво продукції особливого призначення.



Рисунок 1.2 – Свердло P6M5

Свердла по металу зі сталі P6M5 можуть піддаватись додатковому обробленню. В результаті вони набувають певного кольору, який інформує про специфіку процедури.

					MPTAM 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		13

Чорний. Оброблення парою, дозволяє ефективніше взаємодіяти з конструкційними і легованими сталями.

Золотистий (рисунок 1.3). Відпуск і гартування. Такі свердла мають підвищену міцність, краще опираються механічній дії.

Яскраво золотистий. Обробка нітритом титану, яка є найбільш надійним захистом. Подібний інструмент має мінімальний коефіцієнт тертя, гарно працює з твердосплавними заготовками.



Рисунок 1.3 – Свердла Р6М5, покриті нітритом титану

Мітчики Р6М5.

Використання мітчиків Р6М5 (рисунок 1.4) дозволяє підготувати внутрішню різьбу в рамках металічних заготовок. Вироби подаються в різному виконанні:

- мітчики для ручної й автоматизованої праці;
- поодинокі гайкові мітчики;
- конічні мітчики;
- плашечні мітчики;
- комбіновані мітчики тощо.

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		14

Більшість мітчиків подані в трьох виконаннях: чорнові, проміжні та фінішні. Вироби використовуються в зазначеній послідовності при нарізанні різьби. Це дозволяє отримати найкращий результат.



Рисунок 1.4 – Набір мітчиків Р6М5

Регламентується виготовлення мітчиків Р6М5 ДСТУ 3266:2008 [6]. Стандарт відображає параметри виробів, клас їх точності, специфіку зберігання і експлуатації, а також інші параметри.

Плашки Р6М5 (рисунок 1.5).

Для нарізування зовнішньої різьби на циліндричних заготовках часто використовуються плашки Р6М5. Вироби виготовляють за 25.100.50 [7].

Використовуються плашки такої конфігурації:

- цільні;
- розрізні;
- розсувні.

Вироби призначені для нарізування метричної і дюймової, лівої і правої різьби. Для роботи з конічними заготовками існують спеціальні, конічні плашки.

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		15



Рисунок 1.5 – Конічна плашка P6M5

Фрези P6M5 (рисунок 1.6).

За допомогою фрез P6M5 здійснюється якісна обробка металічних заготовок. Інструмент взаємодіє з кольоровими металами, легуваними і конструкційними сталями. Виконуються також кінцеві фрези P6M5, а також дискові, торцеві, фасонні і кутові фрези. Виробники виготовляють фрези P6M5 за 25.100.20 [8].



Рисунок 1.6 – Торцева насадна фреза P6M5

					MPTAM 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		16

Полотно Р6М5 (рисунок 1.7).

За допомогою полотен Р6М5 виконуються відрізні операції різної складності. Продукція виготовляється за 25.100.40 [9], забезпечує ефективну різку листового матеріалу.

В доступі є полотна для ручної і машинної праці. Вироби простів установці, мають довготривалий термін служби.



Рисунок 1.7 – Полотно Р6М5

Різці Р6М5.

Використання різців Р6М5 (рисунок 1.8) сприяє ефективному виконанню токарних операцій. Типове виконання продукції гарантує її сумісність зі станками, виключає проблеми при встановленні та експлуатації.

Інструмент виготовляють за 25.100.99 [10], ДСТУ 10046:2008 [11], ДСТУ 18874:2008 [12] і ДСТУ 18878:2008 [13]. Нестандартна продукція випускається за ТУ. Різці реалізуються поштучно і в наборі.



Рисунок 1.8 – Різець пластинчатий лівий Р6М5

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		17



Рисунок 1.10 – Заточування свердла

1.4 Розшифрування марки сталі Р6М5

Кожна марка сталі має своє маркування, в якому зашифровано її основні характеристики.

Розшифрування марки сталі Р6М5 (рисунок 1.11):

- Р – швидкорізальна,
- 6 – відсоток вмісту вольфраму,
- М – наявність у сталі молібдену,
- 5 – відсоток змісту молібдену.



Рисунок 1.11 – Розшифрування маркування

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		19

Сталь поєднує високу теплостійкість з високими твердістю, зносостійкістю при підвищених температурах та підвищеним опором пластичній деформації.

Для забезпечення червоностійкості сталь легують великою кількістю вольфраму у поєднанні з молібденом та ванадієм.

1.6 Особливості термічної обробки сталі Р6М5

Термічна обробка сталі складається із гартування з подальшим триразовим відпуском. Нагрів під гартування проводиться до температури 1210-1230°C (рисунок 1.12) з метою розчинення в аустеніті як можливо більше легованих карбідів.



Рисунок 1.12 – Термічна обробка сталі Р6М5

Високі температури гартування необхідні для повнішого розчинення вторинних карбідів в аустеніті та отримання при нагріванні високолегованого хрому, вольфраму, молібдену та ванадію. Це забезпечує отримання після гартування мартенситу, стійкого проти відпуску, тобто теплостійкість.

Для швидкорізальної сталі характерним є збереження дрібного зерна, навіть за дуже високих температур гартування. Щоб уникнути утворення тріщин в інструменті, при нагріванні до температури гартування його підігрівають [16].

Гартування заготовок на базі Р6М5 – складний і трудомісткий процес. Фахівці застосовують ступінчасту модель термообробки з тривалою підтримкою температури в рамках заданих діапазонів (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Гартування сталі Р6М5

Роботи виконуються у визначеній послідовності [15]:

- Відпуск в межах 200 градусів протягом години.
- Повторний відпуск при підвищенні температури до 300 градусів. Як і в попередньому випадку, тривалість процедури складає одну годину.
- Нагрівання заготовки до 690 градусів з підтримкою заданої температури протягом 3 хвилин.

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		22

- Підвищення температури до 860 градусів з витримкою 3 хвилини.
- Нагрівання до температури гартування – 1230 градусів з витримкою 1,5 хвилини і наступним різким охолодженням. В ролі охолоджуючого середовища застосовують масло або селітру (допускається повітряне охолодження).
- Трикратний відпуск при температурі 560 градусів. Тривалість кожного етапу складає 1,5 години.

Під час відпуску в сплав додаються легуючі присадки. Вони провокують утворення карбідів, які підвищують міцнісні характеристики виробу.

Первинні дендрити оточені сіткою ледебуриту. При охолодженні аустеніт перетворюється на перліт та бейніт.

Їх фазовий склад у відпаленому стані є легованим феритом і карбідами.

У фериті розчинена більша частина хрому; майже весь вольфрам (молібден) та ванадій знаходяться в карбідах (рисунок 1.14).

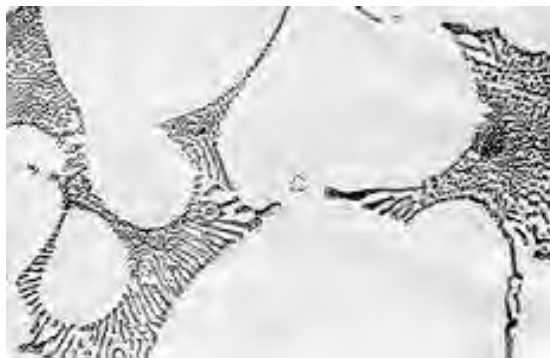


Рисунок 1.14 – Мікроструктура швидкорізальної сталі

У процесі гартування не весь аустеніт перетворюється на мартенсит. Частина його за рахунок більшої стійкості, викликаній легуванням, залишається нерозкладеною і присутня у сталі у вигляді залишкового аустеніту. Тому мікроструктура загартованої сталі Р6М5 складається з первинного мартенситу, залишкового аустеніту та складних карбідів.

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		23

Внаслідок малої теплопровідності швидкорізальної сталі нагрівання її під гартування ведеться з попереднім підігрівом, щоб уникнути появ великих термічних напруг і утворення тріщин в інструменті. Застосовується двоступінчастий підігрів при температурах 400-500 ° С (електропіч) та 840-860 ° С (соляна ванна) (рисунок 1.15). Охолоджуючим середовищем при гартуванні є олія [16].

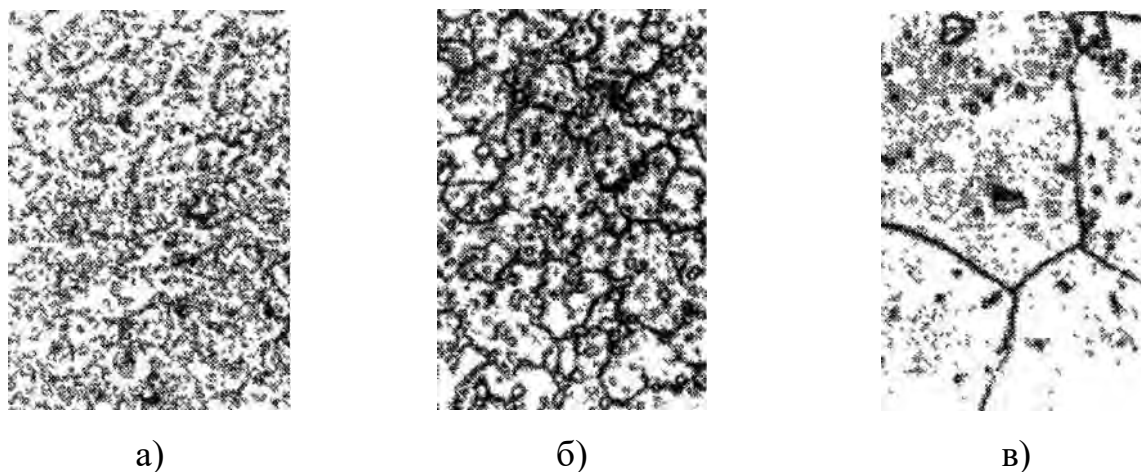
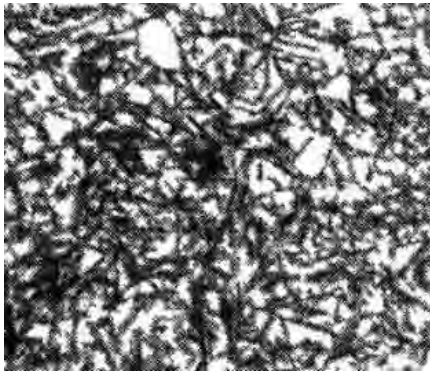


Рисунок 1.15 – Структура ($\times 500$) гартованої швидкорізальної сталі Р6М5 при різних температурах гартування: а) – температура гартування 1150 °С; б) – температура гартування 1200 °С; в) – температура гартування 1150 °С

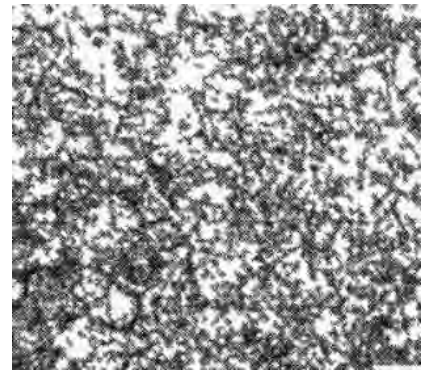
Відпуск швидкорізальної сталі проводиться при температурі 540-580°С. Так як залишковий аустеніт у сталі має велику стійкість, для його перетворення на вторинний мартенсит потрібно кілька циклів високого відпуску, а іноді і охолодження до від'ємної температури. Застосовується короткочасний триразовий відпуск інструменту при температурі 560°С з витримкою по 30 хвилин (рисунок 1.16) [16].

Схема термічної обробки швидкорізальної сталі Р6М5 показана на рисунку 1.17. У дужках показано кількість вуглецю в мартенсіті і кількість залишкового аустеніту в структурі сталі %.

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		24



а)



б)

Рисунок 1.16 – Структура ($\times 500$) відпущеної швидкорізальної сталі Р6М5 при різних температурах відпуску:

а) – температура відпуску 500 °С; б) – температура відпуску 600 °С

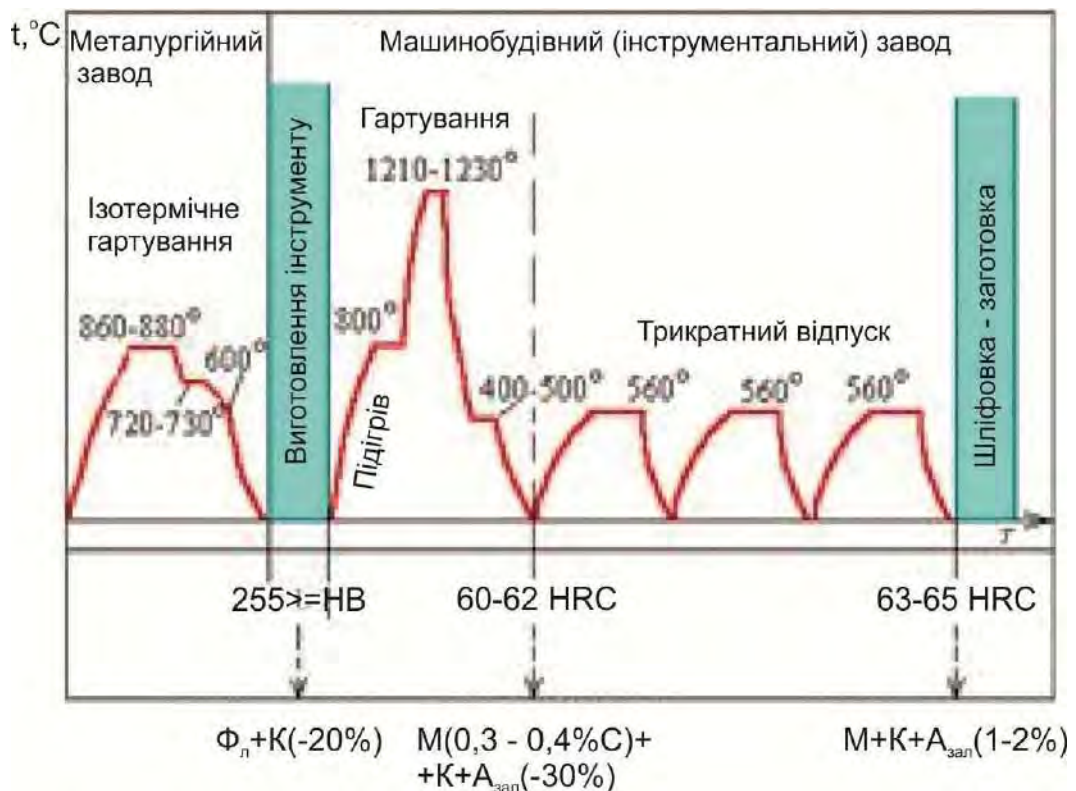


Рисунок 1.17 – Схема термічної обробки швидкорізальної сталі Р6М5:

$\Phi_{л}$ – легований ферит; К – карбід; М – мартенсит; $A_{зал}$ – залишковий аустеніт

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

Для подальшого підвищення твердості, зносостійкості та корозійної стійкості поверхневого шару різальних інструментів застосовують такі технологічні операції, як ціанування, азотування, сульфідкування, оброблення паром та інші технології поверхневого зміцнення. Їх виконують після остаточної термообробки, шліфування та заточування інструментів [16].

1.7 Хіміко-термічна обробка (ХТО) сталі Р6М5

Ціанування – процес одночасного дифузійного насичення поверхневих шарів сталі атомарним вуглецем та азотом в розплаві ціаністих солей або твердому карбюризаторі [17].

Ціанування здійснюють при 550-570 ° С протягом 5-30 хв. в рідких середовищах та 1,5-3,0 год. в газовому середовищі (рисунок 1.18). Для рідинного ціанування використовують ванни з розплавами NaCN (90 або 50%), Na₂CO₃, NaOH (KOH). Газове ціанування виконують у суміші аміаку і газу, що науглерожує.

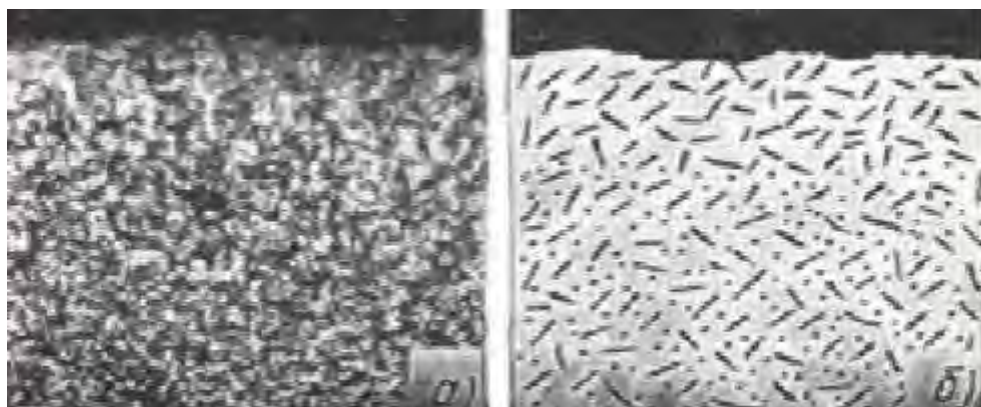


Рисунок 1.18 – Мікроструктура (а) та схема мікроструктури (б) при ціануванні

Певні вироби зі сталі Р6М5 піддають *цинкуванню*. Операція проходить в газовому або рідкому середовищі, яке містить велику кількість Zn, триває біля

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		26

30 хвилин (рисунок 1.19). Після її завершення заготовка набуває надійного захисного покриття [17].



Рисунок 1.19 – Цинкування заготовок гарячим способом

Азотування – процес дифузійного насичення поверхонь сталевих деталей атомарним азотом в середовищі аміаку. Азотування інструментів проводиться при 550-660 С тривалістю 10-40 хв. в атмосфері аміаку. Проводять також газове азотування у суміші 20% аміаку та 80% азоту; останнє краще, так як в цьому випадку забезпечується менша крихкість шару (рисунок 1.20) [18].

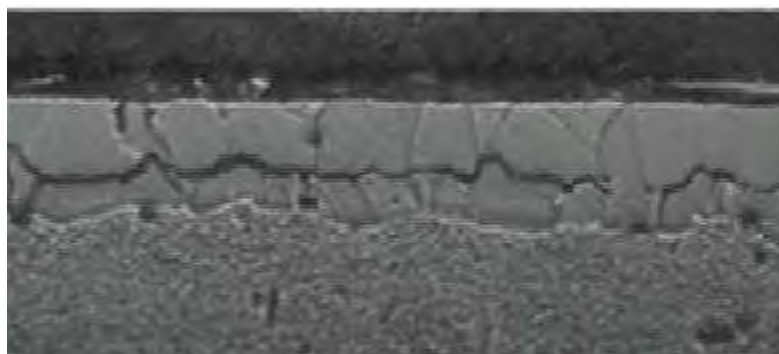


Рисунок 1.20 – Мікроструктура при азотуванні

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		27

Азотування підвищує корозійну стійкість метала, його твердість і зносостійкість. Процедура проходить в газовій камері. Сплав нагрівається до заданої температури, після чого піддається дії азоту та аміаку. Тривалість процедури складає 40 хвилин.

Сульфідкування проводять при 450-560 °С, тривалістю від 45 хв до 3,0 год в рідких розплавах, наприклад 17% NaCl, 25% BaCl₂, 38% CaCl₂, 3-4% K₄Fe(CN)₆, які додають сірковмісні сполуки FeS, Na₂SO₄, KCNS [18].

При *обробці паром* інструменти поміщають у герметичну піч і витримують при 300-350 ° С під тиском 1-3 МПа протягом 20-30 хв. для видалення повітря. Потім температура підвищується до 550-570 ° С, проводиться витримка 30-60 хв., охолодження пари до 300-350 ° С, після чого подача пари припиняється. Закінчується охолодження в печі або на повітрі, потім інструмент негайно промивають в гарячому веретенному маслі.

Цементация – це процес насичення поверхневого шару сталі вуглецем. Мета цементації – збагатити поверхневий шар деталі вуглецем до концентрації 0,8-1,1% і отримати після гарту, високу твердість поверхневого шару при збереженні пластичної серцевини (рисунок 1.21) [18].

Цій обробці піддають такі деталі машин і апаратів, які повинні мати зносостійку робочу поверхню і в'язку серцевину. Цементация та подальша термічна обробка одночасно підвищують зносостійкість та межу витривалості деталі.

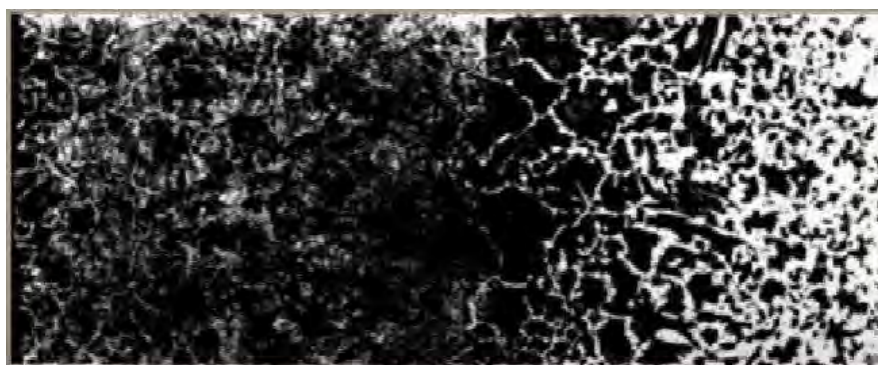


Рисунок 1.21 – Мікроструктура швидкорізальної сталі при цементації

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		28

Тверде хромування широко застосовується для підвищення терміну служби оброблювального та різального інструменту, штампів і прес-форм, особливо обробки неметалевих матеріалів (пластмаси, скла, гуми тощо), збільшення зносостійкості деталей двигунів (поршневих кілець, циліндрів, поршневих пальців тощо) та інших машин (рисунок 1.22) [18].



Рисунок 1.22 – Структура швидкорізальної сталі після хромування

Отже, тверде хромування застосовують для зменшення тертя, підвищення міцності. Внаслідок проведення процедури хромування, підвищується корозійна стійкість сталі до прісної та солоної води, азотної кислоти, до газового впливу (до 800°C).

Товщина покриття твердого хромування здебільшого становить від 0.075 до 0.35 мм.

Нітроцементація – процес одночасного дифузійного насичення поверхневих шарів сталі атомарним вуглецем та азотом в газовому середовищі.

Борування – процес дифузійного насичення поверхневих шарів сталі атомарним бором (рисунок 1.23) [18].

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		29



Рисунок 1.23 – Мікроструктура сталі після борування

1.8 Мета і задачі дослідження

Підвищення надійності та довговічності інструментального та технологічного оснащення в більшості випадків пов'язано з використанням складно- та високолегованих сталей (зокрема, Р6М5) та оптимізацією їх термічної обробки. Однак такий шлях часто є недостатньо ефективним. Альтернативою йому можуть бути різні способи хіміко-термічної обробки (ХТО) інструменту.

Серед усього різноманіття способів ХТО слід виділити технологію азотування, яка вигідно відрізняється від інших технологій простотою реалізації та економічністю. Зазначимо, що традиційний процес азотування має суттєві недоліки: неможливість регулювання складу та товщини зміцненого шару, велика тривалість дифузійного насичення, неможливість отримання шару однакової товщини по всій оброблюваній поверхні деталей складної конфігурації.

Аналіз сучасної літератури показав, що в галузі технології азотування спостерігається тенденція пошуку нових високоефективних способів впливу на робочу поверхню інструменту з метою інтенсифікації дифузійного насичення та

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		30

підвищення якості одержуваних поверхневих шарів. Розроблено та доводиться до технологічної досконалості метод азотування в низькотемпературній плазмі тліючого розряду – іонне азотування. Використання електричних розрядів у вихідних газових середовищах дозволяє активізувати перетворення не тільки в газовому середовищі поблизу оброблювальної поверхні, але і в твердому, насичуваному матеріалі.

Відомо, що при азотуванні металів і сплавів процес отримання насичувального елемента в активному стані - іонізаційний, зумовлений утворенням іонів у робочому просторі, особливо поблизу поверхні інструмента, що обробляється. Тому завдання багаторазового збільшення кількості актив іонізації та розширення технологічних можливостей процесу іонного азотування є актуальною.

Технологічний процес хіміко-термічного виготовлення сталевого інструменту включає наступні операції: заготівельну, механічну, термохімічну обробку, контроль якості.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у створенні енергоефективного та ресурсозберігаючого методу зміцнення інструментальної сталі з використанням струмів високої частоти, включаючи формування зносостійкого дифузійного шару, а також у встановленні залежностей між умовами хіміко-термічної обробки із застосуванням струмів високої частоти та мікроструктурою, механічними властивостями робочих поверхонь інструменту.

Вхідні дані: фізико-механічні характеристики та структурні параметри інструментальної сталі (Р6М5), характеристики установок, режими нагрівання струмами високої частоти.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Проаналізувати існуючих технологій, що покращують експлуатаційні властивості виробів.
2. Здійснити моделювання методом кінцевих елементів процесу хіміко-термічної обробки зразків з інструментальної сталі Р6М5.

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		31

3. Розробити методику та план проведення експериментальних робіт.
4. Дослідити структуру та фізико-механічні властивості зміцнених зразків.
5. Розробити моделі зміни твердості в залежності від температури і тривалості обробки струмами високої частоти, а також від вмісту азоту в поверхневому шарі зразків.
6. Промоделювати зростання глибини азотованого шару сталі Р6М5, як функції температури та часу азотування.
7. Перевірити модель шляхом порівняння розрахованої глибини азотованого шару з експериментально визначеною при різних температурах та тривалості азотування.

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		32

2 ВИДИ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ, ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКА

2.1 Процеси ХТО

Хіміко-термічною обробкою (ХТО) називається термічна обробка, що полягає в поєднанні термічного та хімічного впливів на метали та сплави з метою зміни хімічного складу, структури та властивостей поверхневого шару. Застосовують такий вид обробки у разі, коли виникає необхідність отримання твердого, зносостійкого поверхневого шару деталі при збереженні в'язкості серцевини. ХТО широко застосовують для зміцнення деталей машин у багатьох галузях промисловості [19].

ХТО стали зводиться до дифузійного насичення її поверхневого шару неметалами (вуглецем, азотом, бором, кремнієм тощо) або металами (алюмінієм, хромом тощо) у процесі витримки в активному середовищі за певної температури. Насичення поверхневого шару відбувається при нагріванні деталі до певної температури в середовищі, що активно виділяє елемент, що насичує, і витримці від цієї температури. Існуючі методи ХТО можна розділити на такі групи: насичення з твердої фази, насичення рідкої фази і насичення газової (парової) фази.

ХТО містить три процеси, які послідовно відбуваються [18].

1. Дисоціація вихідних речовин з утворенням дифузного елемента в атомарному стані поблизу поверхні оброблюваних деталей або безпосередньо на поверхні.

2. Адсорбція атомів на поверхню металу з утворенням хімічних зв'язків між іонами насичувального елемента та основного металу, тобто захоплення поверхнею металу атомів насичувального елемента.

3. Дифузія адсорбованих атомів від поверхні вглиб металу, що обробляється.

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		33

Процес дифузії можливий тільки при розчинності дифузного елемента в металі, що обробляється.

В результаті ХТО утворюється дифузійний шар, на поверхні якого концентрація дифузного елемента найбільша, і знижується в міру віддалення від поверхні вглиб металу.

В результаті такої обробки утворюється дифузійний шар, який відрізняється від вихідного шару за хімічним складом, структурою та властивостями. Концентрація дифузного елемента зменшується від поверхні вглиб металу. Матеріал деталі під дифузійним шаром з складом, що не змінився, прийнято називати серцевиною.

Кількісно процес дифузії характеризується коефіцієнтом дифузії [18]

$$D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}},$$

де D_0 – коефіцієнт, що залежить від виду кристалічної структури;

Q – енергія активації; R – газова стала, $R = 8,3$ Дж/(моль · К);

T – абсолютна температура.

Ефективною товщиною називають товщину дифузійного шару до прикордонної дифузійної лінії, що характеризує гранично допустимі значення властивостей (наприклад, певної твердості).

Тривалість ХТО визначається необхідною глибиною дифузійного шару. Необхідно відзначити, що при постійних параметрах температури збільшення глибини шару в часі описується параболічним законом, тобто чим більше товщина вже наявного дифузійного шару, тим менше він збільшується за однаковий проміжок часу.

Слід розуміти, що ХТО змінює хімічний склад поверхневого шару, а істотна зміна властивостей (твердості, зносостійкості, корозійної стійкості тощо) зазвичай відбувається після подальшої термічної обробки.

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		34

У табл. 2.1 та 2.2 коротко описані режими основних видів хіміко-термічної обробки та дана характеристика властивостей поверхневих шарів сталевих деталей, підданих цим видам ХТО [18, 19].

2.2 Режими основних видів хіміко-термічної обробки

Залежно від насичувального елемента процесу ХТО можна поділяти на однокомпонентні (цементация, азотування, борування, силікування, алітування, хромування) та багатокомпонентні (нітроцементация, ціанування, хромоалітування, хромосилування тощо).

ХТО широко використовують для отримання вищезгаданих властивостей деталей машин. Однак найбільш широке промислове застосування отримали переважно традиційні процеси насичення: цементация, азотування, нітроцементация, ціанування. Борування, алітування, хромування, силікування та інше застосовують значно рідше.

Сучасні науковці продовжують активно вивчати способи ХТО, що реалізуються при дії на поверхню концентрованими потоками енергії.

Порівняльний аналіз основних видів та режимів ХТО подано в таблиці 2.1 [18].

Порівняння властивостей поверхневих шарів деталей, підданих основним видам ХТО, подано в таблиці 2.2 [19].

Серед усього різноманіття способів ХТО слід виділити технологію азотування, яка вигідно відрізняється від інших технологій простотою реалізації та економічністю.

Зазначимо, що традиційний процес азотування має суттєві недоліки: неможливість регулювання складу та товщини зміцненого шару, велика тривалість дифузійного насичення, неможливість отримання шару однакової товщини по всій поверхні, що обробляється, деталей складної конфігурації.

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		35

Таблиця 2.1 – Основні види та режими хіміко-термічної обробки

Вид ХТО	Насичуючий елемент	Середовище	Параметри процесу		Термічне оброблення
			Температура, °C	Середня тривалість, год	
Цементация	C	Цементация в твердому карбюризаторі (деревний вугіль і активатори): $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ $2CO \rightarrow CO_2 + C_{ат}$ $C_{ат} \rightarrow Fe_\gamma \rightarrow \text{аустеніт Fe(C)}$	910 – 950	6 – 14	Для деталей, від яких вимагається тільки поверхнева твердість: гартування від цементаційного нагріву (900 – 950 °C або з підохолодженням до 820 – 840 °C), низький відпуск (150 – 200 °C). При підвищених вимогах до структури і властивостей деталі: загартування від температури 850 – 900 °C, низький відпуск 150 – 200 °C. При надвисоких вимогах до механічних властивостей: 1-е гартування 850 – 900 °C (для здрібнювання структури серцевини і усунення цементинної сітки на поверхні), 2-е гартування 750 – 800 °C, низький відпуск 150 – 200 °C
		Газова цементация (газові суміші, які містять CO, CH ₄ ін.): $2CO \rightarrow CO_2 + C_{ат}$ $C_{ат} \rightarrow Fe_\gamma \rightarrow \text{аустеніт Fe(C)}$ або $CH_4 \rightarrow$ $\rightarrow 2H_2 + C_{ат}$	910 – 950	6 – 12	

Вид ХТО	Насичуючий елемент	Середовище	Параметри процесу		Термічне оброблення
			Температура, °C	Середня тривалість, год	
Азотування	N	В дисоційованому аміаку NH ₃ : $2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + 2\text{N}_{\text{ат}}$	500 – 520 або дво ступінчатє 500 – 520, 540 – 560	До 60	Попереднє термічне оброблення: гартування і високий відпуск.
		Іонне азотування в гліючому розряді в розрідженій азотовміщуючій атмосфері (NH ₃ або N ₂)	470 – 580	1 – 24	
		Азотування в рідких середовищах (теіфер-процес): в розплавлених ціаністих солях (85 % солі, які містять 40 % KCNO, 60 % NaCN і 15 % NO ₂ CO ₃ або 55 % карбаміду (NH ₂) ₂ CO і 45 % Na ₂ CO ₃), через які пропускають сухе повітря	570	0,5 – 3,0	

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
------	------	----------	--------	-----

МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ

Арк.

37

Вид ХТО	Насичуючий елемент	Середовище	Параметри процесу		Термічне оброблення
			Температура, °C	Середня тривалість, год	
Нітро-цементация	C + N	Газове середовище з навуглержуючого газу (CO, CH ₄ та ін.) і аміаку NH ₃	840 – 850	4 – 10	Гартування безпосередньо з печі відразу після ХТО, рідше повторного нагріву, низький відпуск 160 – 180 °C
Ціанування	C + N	Середньо температурне ціанування в розплавлених солях, які містять NaCN: 2NaCN + O ₂ → 2NaCNO; 2NaCNO + O ₂ → Na ₂ CO ₃ + CO + 2N _{ar} ; 2CO → CO ₂ + C _{ar} ; N _{ar} → Fe _γ ; C _{ar} → Fe _γ	820 – 860	0,5 – 2,5	Гартування від ціаністої ванни, низький відпуск 180 – 200 °C
		Високотемпературне ціанування в розплавлених ціаністих солях: BaCl ₂ + 2NaCN → 2NaCl + Ba(CN) ₂ ; Ba(CN) ₂ → BaCN ₂ + C _{ar} ; BaCN ₂ + O ₂ → BaO + CO + N _{ar} ; 2CO → CO ₂ + C _{ar} ; C _{ar} → Fe _γ ; N _{ar} → Fe _γ .	930 – 950	1,5 – 6,0	

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
------	------	----------	--------	-----

МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ

Арк.

38

Вид ХТО	Насичуючий елемент	Середовище	Параметри процесу		Термічне оброблення
			Температура, °C	Середня тривалість, год	
Борування	В	Електроліз бури (Na ₂ B ₄ O ₇ · 10H ₂ O)	930 – 950	2 – 6	За необхідності гартування 840 – 860 °C і відпуск 200 °C
		Газове борування в середовищі діборана (B ₂ H ₆) або трихлористому борі (BCl ₃) в суміші з воднем	850-900	2 – 6	Гартування бажано проводити від Температури борування або від більш низьких температур з попереднім підолоджуванням. При виконанні гартування як самостійної операції борування деталі нагрівають під гартування в добре розкислених соляних ваннах, оскільки нагрів під гартування в печі з повітряним середовищем неприпустимий
Силікування	Si	Газове силікування (в печі з обертальними ретортами засипають деталі та шматки феросиліцію або карбїду кремнію. Через реторти пропускають хлор, який взаємодіє з кремнієм і утворює SiCl ₄)	1000	2 – 4	Гартування 840 °C, високий відпуск

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
------	------	----------	--------	-----

MPTAM 24 23608. 000 ПЗ

Арк.

39

Вид ХТО	Насичуючий елемент	Середовище	Параметри процесу		Термічне оброблення
			Температура, °С	Середня тривалість, год	
Алутування	Al	В порошокподібних сумішах (фероалюмінію, окису алюмінію та хлористого алюмінію)	900 – 1000	3 – 12	Дифузійний відпал 1150 °С протягом 5 – 6 год (для зниження крихкості алітованого шару)
		В розплавленому алюмінію з додаванням заліза	700 – 800	0.75 – 1.50	
Хромування	Cr	В порошокподібних сумішах	1000	6 – 15	Гартування, відпуск 200 – 230°С

Таблиця 2.2 – Властивості поверхневих шарів деталей, підданих основним видам ХТО

Вид ХТО	Товщина шару, мм	Фази	Властивості поверхневих шарів	Примітка
Цементация	0,5 – 2,0	До ТО: перліт + Fe ₃ C (карбід); після ТО:	Висока твердість (58 – 62 HRC) та зносостійкість після ТО (твердість	Крупнозерниста структура (наслідок перегріву). Збільшення межі контактної втиривалості

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
------	------	----------	--------	-----

МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ

Арк.

40

Вид ХТО	Товщина шару, мм	Фази	Властивості поверхневих шарів	Примітка
		мартенсит + карбіди	серцевини 25 – 35 HRC для легованих сталей і менше 20 HRC для вуглецевих). Теплостійкість (збереження твердості при високих температурах) до 200 – 225 °С	
Азотування	0,3 – 0,6	ε-фаза (Fe ₃ N) → γ'-фаза (Fe ₄ N) → α-фаза (азотистий ферит) + γ'-фаза → α-фаза (від поверхні до серцевини)	Висока твердість, зносостійкість, теплостійкість до 450 – 500 °С	Підвищені межа витривалості, втомна міцність, корозійна стійкість (атмосфера, вода, пара)
Нітроцементация	0,25 – 1,50	До ТО: перліт + карбонітридна фаза Fe ₃ (CN); після ТО – мартенсит	Висока твердість (60 – 63 HRC) і зносостійкість (після гартування та низького відпуску), корозійна стійкість. Одержання високої твердості та	При одночасній дифузії вуглецю й азоту прискорюється дифузія вуглецю. Мілкозерниста структура. Підвищена межа витривалості

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
------	------	----------	--------	-----

МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ

Арк.

41

Вид ХТО	Товщина шару, мм	Фази	Властивості поверхневих шарів зносостійкості поверхневого шару, збільшення витривалості	Примітка
Ціанування	0,1 – 2,0	Після ТО на поверхні – азотистий мартенсит, в серцевині – тростит	Висока твердість (63 – 65 HRC) і зносостійкість	При середньо температурному ціануванні товщина шару – 0,15 – 0,35 мм, при високо температурному ціануванні – 0,5 – 2,0 мм. Підвищена межа витривалості, менша деформація и жолоблення деталей складної форми. Недолік – отруйність цианістких солей (спеціальні заходи щодо охорони праці)
Борування	0,1 – 0,2	FeB (на поверхні) і Fe ₂ B	Найбільша зносостійкість (1800 – 2000 HV), зносостійкість, головним чином,	Окалінностійкість до 800 °С, висока корозійна стійкість в агресивних середовищах, теплостійкість і

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
------	------	----------	--------	-----

MPTAM 24 23608. 000 ПЗ

Арк.

42

Вид ХТО	Товщина шару, мм	Фази	Властивості поверхневих шарів абразивна	Примітка
Силікування	0,5 – 1,0	Твердий розчин кремнію в α -залізі	Низька твердість (200 – 300 HV) і значна пористість, після просочення маслом при 170 – 200 °C має підвищену зносостійкість	Підвищення корозійної стійкості в морській воді та різних кислотах, жаростійкості молибдену
Алітування	0,2 – 1,0	Твердий розчин алюмінію в α -залізі	Твердість до HV 500, висока зносостійкість	Підвищення корозійної стійкості, кислотостійкості, окалинностійкості (до 850 °C). Недолік процесу – налипання алюмінію на поверхню деталей
Хромування	0,15 – 0,20	Карбиди хрому (Fe, Cr) ₇ C ₃ і (Fe, Cr) ₂₃ C ₆	Висока твердість (HV 1200 – 1300) і зносостійкість	Підвищення корозійної стійкості, кислотостійкості, окалинностійкості (до 850 °C), жаростійкості

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
------	------	----------	--------	-----

МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ

Арк.

43

Аналіз сучасної літератури показав [20, 21], що в галузі технології азотування спостерігається тенденція пошуку нових високоефективних способів впливу на робочу поверхню інструменту з метою інтенсифікації дифузійного насичення та підвищення якості одержуваних поверхневих шарів.

Розроблено та доводиться до технологічної досконалості метод азотування в низькотемпературній плазмі тліючого розряду – іонне азотування [20]. Використання електричних розрядів у вихідних газових середовищах дозволяє активізувати перетворення не тільки в газовому середовищі поблизу оброблюваної поверхні, а й у твердому матеріалі, що насичується.

Відомо, що при азотуванні металів і сплавів процес отримання насичувального елемента в активному стані – іонізаційний, зумовлений утворенням іонів у робочому просторі, особливо поблизу поверхні інструмента, що обробляється. Тому завдання багаторазового збільшення числа актів іонізації та розширення технологічних можливостей процесу іонного азотування є актуальним.

2.3 Хіміко-термічна обробка з нагріванням СВЧ

Щоб процес хіміко-термічної обробки виробів пройшов швидше, слід звертати увагу на такі фактори: склад та активність газового середовища, температура обробки, особливості структури аустеніту.

Нагрів струмами високої частоти (СВЧ) дозволяє суттєво скоротити швидкість обробки виробів під час проведення хіміко-термічної обробки. Так, наприклад, шар товщиною 0,8-1 мм при підвищенні температури цементації на 100-150 градусів, за допомогою нагріву СВЧ можна отримати за 30-40 хвилин, у той час як нагрівання в печі вимагає обробки 1,5-2 години. Використання нагріву СВЧ дозволяє легко подолати всі температурні межі, яких слід дотримуватись при здійсненні пічного нагріву [18].

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		44

Нагрів СВЧ дає можливість здійснення хіміко-термічної обробки в газовому, твердому або рідкому середовищах, а також у розплавах солей тощо. Нагрівання СВЧ дає можливість прискорення цементації в твердому карбюризаторі в 5-6 разів.

Газова цементація з використанням природного газу та нагріву СВЧ дає можливість отримання на сталі 18ХГГ цементований шар розміром 0,8-1,0 мм за 45-60 хвилин. Можливість програмування процесу обробки дозволяє досягти кращих результатів при використанні цього методу хіміко-термічної обробки.

Газова нітроцементація та нагрівання СВЧ дають можливість отримання нітроцементованого шару товщиною 0,35-0,5 мм всього за 40 хвилин на сталях 30 та 30ХГГ за умови використання природного газу та аміаку при нагріванні в температурі 930-950 градусів С.

При необхідності проведення хіміко-термічної обробки в рідкому середовищі, індуктор і виріб необхідно розміщувати в холодному рідкому середовищі, яке дисоціюватиме на нагрітій поверхні виробу, тим самим забезпечуючи насичення поверхні дифузійними елементами парогазової сорочки. Як правило, такий метод обробки застосовують при цементації деталей зі сталей 10 в 65% розчині метилового спирту, нагрітого до температури 950 градусів С. Витримка проводиться протягом 15 хвилин. Товщина цементованого шару виходить у межах 0,38 мм.

Високочастотна нітроцементація в суміші кальцинованої та кухонної солей з додаванням 30% синьородистого калію дає можливість отримання дифузійного шару товщиною 0,15-0,20 мм за умови обробки під впливом температури 980-1000 градусів, витримуючи протягом 15 хвилин.

Нагрів СВЧ у хіміко-термічній обробці дає можливість підвищення продуктивності праці та покращення її умов за рахунок того, що процес обробки може бути повністю автоматизований, під контролем програмного забезпечення. При нагріванні СВЧ покращується якість оброблюваних виробів,

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		45

знижується собівартість обробки, і також звільняється чимала кількість площі в цехах, так як індукційна установка має компактні габарити [18].

2.4 Азотування швидкорізальної сталі Р6М5

Використання азотування як фінішного процесу обробки виробів дозволяє збільшити зносостійкість поверхні виробу в 2-3 рази, підвищити в 1,5-2 рази термін служби виробу, при цьому кінцева вартість виробу збільшується лише на 20-30% [18].

Азотування сталі Р6М5, підданої попередньому гартуванню, при температурі $\sim 350^{\circ}\text{C}$ протягом 2 годин дозволяє підвищити мікротвердість на поверхні з 9 до 15 ГПа і сформувати модифікований шар завтовшки ~ 90 мкм.

Азотування – це обробка сталі у процесі її нагрівання в середовищі високого вмісту аміаку. Внаслідок цього поверхня сталі насичується азотом і набуває наступних якостей [18]:

- 1) поліпшується зносостійкість деталей із металу за рахунок підвищення твердості поверхневого шару;
- 2) зростає витривалість міцності сталевих виробів;
- 3) оброблений матеріал набуває стійкого антикорозійного захисту, який зберігається при контакті з водою, повітрям і пароповітряним середовищем.

Азотований шар має високий показник твердості без додаткової термообробки. Крім того, після азотування об'єм оброблюваної деталі залишається практично незмінним. На відміну від цементаційного процесу, його можна застосувати до готових виробів, які пройшли термічне загартування з високим відпуском та відшліфовані до остаточних форм. Після азотування деталі повністю готові до чистового полірування та іншої обробки. Азотуванню зазвичай піддаються деталі, що працюють на тертя в агресивних середовищах та при високих температурах.

Зміцнення різального інструменту методом низькотемпературного іонно-вакуумного азотування здійснюється в Подільському науковому фізико-

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		46

технологічному центрі (<https://nauka.khmnu.edu.ua/podilskyj-naukovyj-fizyko-tehnologichnyj-czentr/>).

Одним із завдань розвитку сучасного машинобудування є підвищення терміну служби металорізальних інструментів (свердл, мітчиків тощо), що часто призводить до втоми. Тому різальні інструменти, перш за все, повинні бути зносостійкими, міцними, мати високу теплостійкість, низький коефіцієнт тертя поверхневої зони.

Нині відсутні універсальні інструментальні матеріали, які б забезпечили високу працездатність різального інструменту при різноманітному характері умов його експлуатації. Область застосування сучасних інструментальних матеріалів визначається їх фізико-механічними властивостями – наприклад, швидкорізальні сталі характеризуються високими властивостями міцності, але мають порівняно невисоку твердість і теплостійкість, а різальна кераміка, навпаки, має високі значення твердості і теплостійкості, але володіє низькими властивостями міцності.

Так само, при свердлінні та нарізанні різьблення у малих глибоких отворах відбувається налипання в'язкого матеріалу (алюмінію, титану).

Комплексно покращити експлуатаційні властивості різального інструменту можна за допомогою різних методів поверхневої хіміко-термічної обробки (ХТО) металів.

Іонне азотування є найбільш ефективним методом ХТО, який забезпечує поліпшення комплексу властивостей поверхні, що зміцнюється: твердість, зносостійкість, протизадирні властивості, теплостійкість, корозійну стійкість і втомну міцність. Таке азотування – це малодеформаційний процес, тобто після зміцнення деталі мають малі зміни геометричних параметрів, оскільки процес проводиться за нормальної температури 400 – 600 0С і супроводжується фазовими перетвореннями [21].

У порівнянні з існуючими процесами ХТО (пічне та каталітичне азотування, рідинне ціанування, цементация та ін.) іонне азотування має такі переваги:

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		47

- ресурсозбереження за рахунок різкого скорочення електроенергії в 4 – 6 разів та робочих газів у 50 – 100 разів;
- підвищення продуктивності, зниження трудомісткості та собівартості обробки у 3 – 4 рази;
- екологічна чистота, нешкідливість та безвідходність процесів;
- універсальність, автоматизація та безінерційність обладнання.

В результаті іонного азотування різальних інструментів (фрез, свердл, мітчиків, протяжок тощо) покращуються їх різальні властивості, підвищується зносостійкість та продуктивність.

Азотована поверхня інструменту, що володіє зниженим коефіцієнтом тертя і поліпшеними антифрикційними властивостями, забезпечує легше відведення стружки, а також запобігає її налипанню на різальні кромки і утворення зносу лунок, що дає можливість збільшити подачу і швидкість різання.

З 2007 року Подільський науковий фізико-технологічний центр ХНУ на постійній основі проводить спільні роботи з відпрацювання та впровадження промислової технології іонно-вакуумного азотування (ІВА), технології безводневого азотування (БВА) в тліючому розряді різального та штампового інструменту.

Висновки до розділу

Розробка нових та вдосконалення існуючих методів зміцнення інструментальної сталі, є одним з низки актуальних напрямків у галузі матеріалознавства. Проведений літературний огляд, вказує на те, що процес ХТО дозволяє значною мірою підвищити експлуатаційні характеристики виробів. Однак багато технологій з підвищення фізико-механічних властивостей вимагають величезних витрат на спеціальне обладнання та розробку технології з їх досягнення.

					<i>MPTAM 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		48

3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІЦНЕННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ЗІ СТАЛІ Р6М5 ІОННИМ АЗОТУВАННЯМ

Наводимо результати дослідження щодо зміцнення різального інструменту, проведеного під час переддипломної практики в лабораторіях металознавства кафедри ТАМ і лабораторіях Подільського наукового фізико-технологічного центру ХНУ.

3.1 Експериментальний підбір оптимальних режимів обробки

Науковцями кафедри ТАМ та інженерами Подільського наукового фізико-технологічного центру ХНУ відпрацьовано різні режими іонно-плазмової обробки для інструменту виконаного зі сталі Р6М5.

Результати обробки контролювалися металографічними дослідженнями. Аналіз даних дозволив підібрати оптимальні режими обробки, у яких відбувається формування якісного, рівномірного азотованого шару глибиною ($h_m = 10 - 80$ мкм) і поверхневої твердості (≥ 900 HV).

На рисунку 3.1 подано фотоілюстрацію проведених експериментальних досліджень до операції іонно-вакуумного азотування, під час іонно-вакуумного азотування та після зміцнювального процесу.

Азотування проводили в середовищі азоту і водню при температурі 400 – 450 °С з ізотермічною витримкою 15 – 30 хв. на установці ION-25I виробництва фірми “IONITECH”.

У таблиці 3.1 наведено значення поверхневої мікротвердості деталей із сталі Р6М5 до та після режиму ІВА.

На рисунках 3.2 – 3.5 наведено мікроструктуру досліджуваних деталей після режиму іонно-вакуумного азотування.

У таблиці 3.2 наведено значення глибини азотованого шару на деталях.

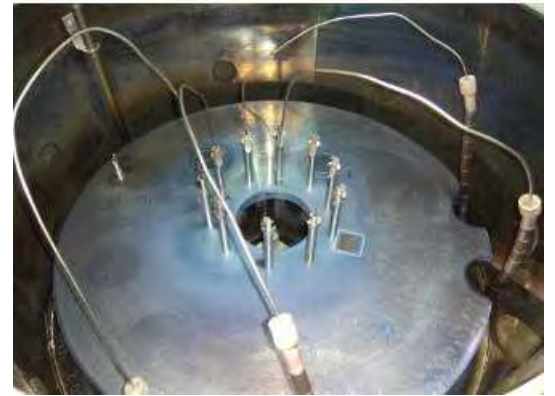
					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		49



а



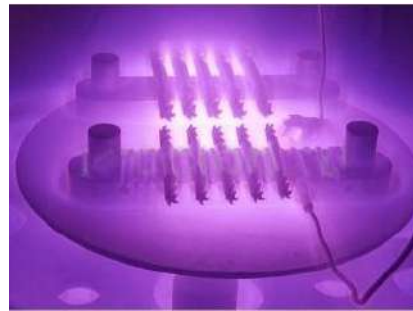
б



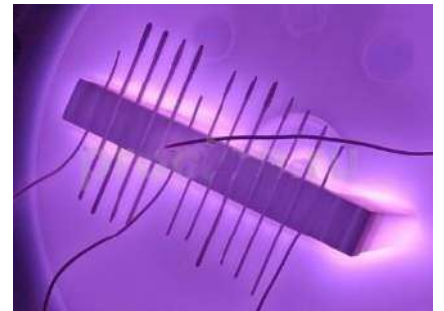
в



г



д



е



ж



з



і

Рисунок 3.1 – Різальний інструмент, що зміцнюється:

а, б, в – до зміцнення; г, д, е – під час зміцнення; ж, з, і – після зміцнення

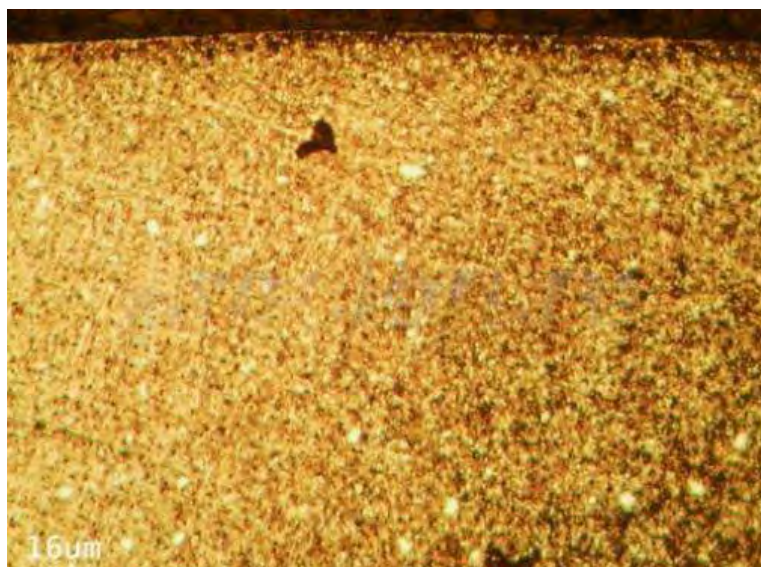
					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		50

Таблиця 3.1 – Поверхнева мікротвердість металорізального інструменту до та після зміцнення

Деталь	Марка сталі	Твердість до зміцнення, кгс/мм ²	Твердість після режиму ІВА, кгс/мм ²
Свердло Ø1,6	P6M5	700 – 750	950 – 1000
Свердло Ø2,5	P6M5	700 – 750	1000 – 1050
Свердло Ø3,3	P6M5	700 – 750	950 – 1050
Фреза Ø6,0	P6M5	700 – 750	1000 – 1050



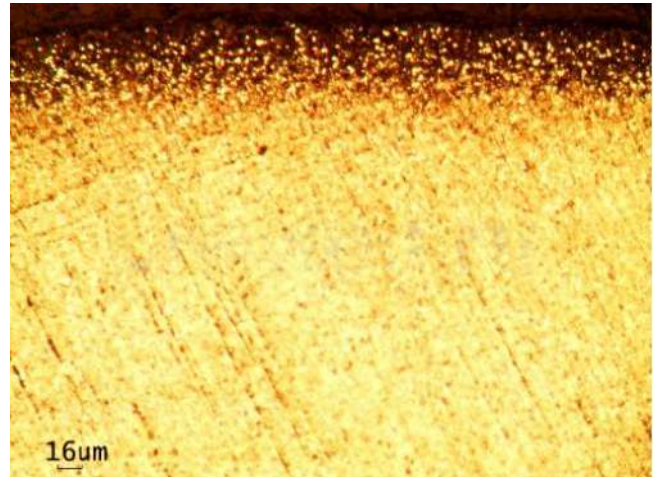
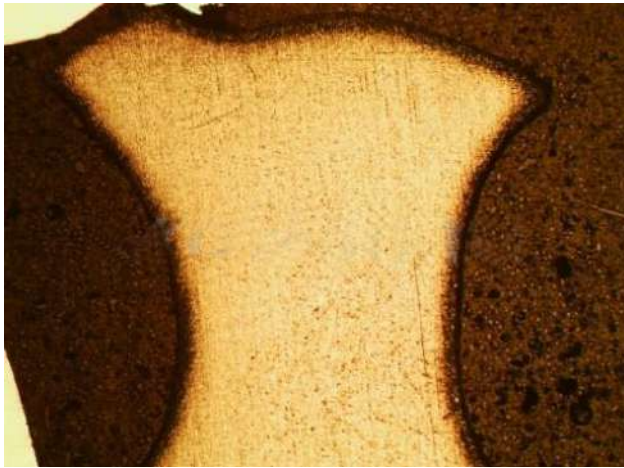
Збільшення в 50 разів



Збільшення в 200 разів

Рисунок 3.2 – Мікроструктура азотованого шару деталі "Свердло Ø1,6" на сталі P6M5. Глибина мікроструктури (h_m): 15 – 20 мкм

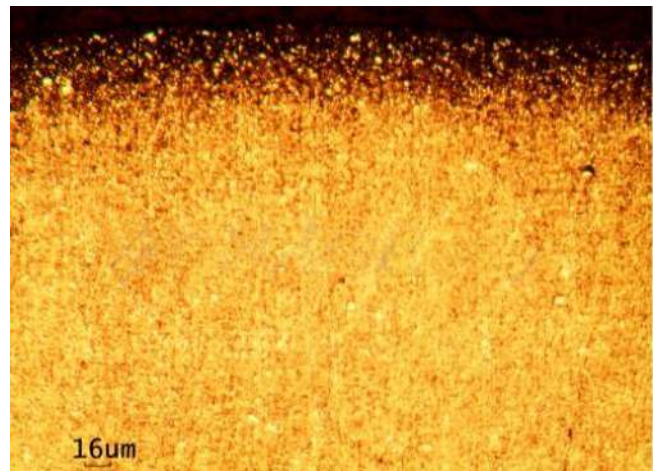
					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		51



Збільшення в 50 разів

Збільшення в 200 разів

Рисунок 3.3 – Мікроструктура азотованого шару деталі "Свердло Ø2,5" на сталі Р6М5. Глибина мікроструктури (h_m): 40 – 45 мкм

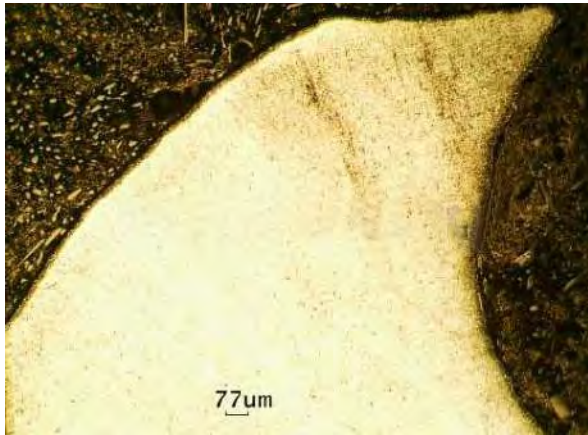


Збільшення в 50 разів

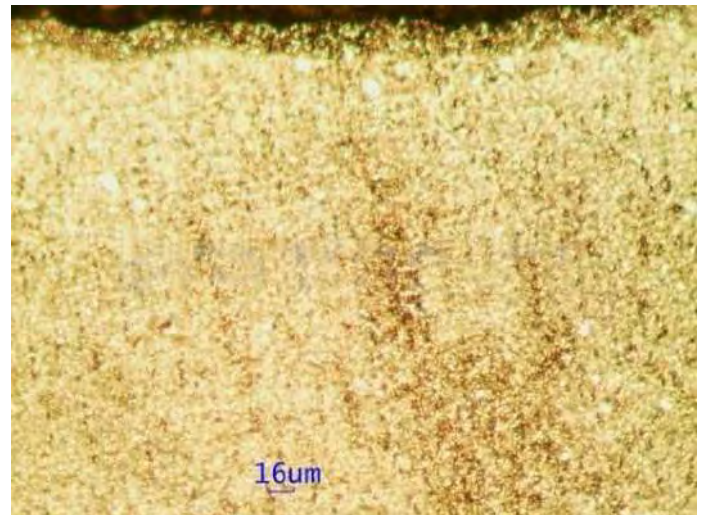
Збільшення в 200 разів

Рисунок 3.4 – Мікроструктура азотованого шару деталі "Свердло Ø3,3" на сталі Р6М5. Глибина мікроструктури (h_m): 35 – 40 мкм.

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		52



Збільшення в 50 разів



Збільшення в 200 разів

Рисунок 3.5 – Мікроструктура азотованого шару деталі "Свердло Ø6,0" на сталі Р6М5. Глибина мікроструктури (h_m): 35 – 40 мкм

Таблиця 3.2 – Глибина азотованого шару на деталях із сталі Р6М5

	Свердло Ø1,6	Свердло Ø2,5	Свердло Ø3,3	Фреза Ø6,0
Глибина шару, мкм	15-20	40-45	35-40	15-20

Проведені роботи зі зміцнення різального інструменту із сталі Р6М5 методом низькотемпературного короткочасного іонно-вакуумного азотування є успішними. Відзначається збільшення поверхневої твердості в 1,5 рази (950 – 1050 кгс/мм²) та зносостійкості інструменту у кілька разів, а також, що важливо, зниження налипання в'язкого матеріалу при свердлінні та нарізанні різблення, що підтверджено виробничими випробуваннями. На даний момент продовжуються розширені експлуатаційні випробування інструменту, зміцненого методом іонно-вакуумного азотування.

3.2 Вплив азотування на фізико-механічні властивості інструменту зі сталі Р6М5

3.2.1 Зносостійкість інструменту зі сталі Р6М5

Дослідження зносостійкості сталі Р6М5 проводилося в лабораторії матеріалознавства кафедри ТАМ на дослідних різцях розміром $40 \times 20 \times 4$ мм. Дослідні різці та фрези виготовлялися за такою технологією.

1. Кування здійснювалося за температури від 1050 – 1100 до 880 – 900 °С. Охолодження після кування – на повітрі.

2. Відпал проводився за температури 820 – 850 °С. Твердість після відпалу НВ 230 - 250.

3. Гартування проводилося з попереднім нагріванням до 830 - 850 °С. Остаточне нагрівання до температури 1220 – 1240 °С, охолодження – в маслі.

При термічній обробці соляна ванна розкислялася бурою або фтористим магнієм, оскільки наявність у молібденній сталі збільшує її чутливість до безвуглероджування. Для усунення безвуглеродженого шару, що утворився під час кування, збільшували припуски на механічну обробку на 10-15%. Після гартування дослідний інструмент піддавався триразовому відпуску при 540 °С з витримкою протягом 1 год. Твердість після відпуску HRC 63-66.

Загартований інструмент піддавався шліфуванню та заточуванню: дослідні різці та ножі – на плоскошліфувальному, а фрези – на потиличному та заточувальному верстатах. Щоб виключити перегрів та не допустити зміни мікроструктури леза різців та ножів, заточування проводили по 10 – 15 шт у щільно стиснутому пакеті. Охолодження здійснювалося безлужною охолоджувально-змащувальною рідиною з поверхнево-активними речовинами. Прийнята технологія заточування повністю унеможлилювала припали леза інструменту.

4. Дослідні різці та інструменти азотувалися в середовищі дисоційованого аміаку при 520 °С протягом 15 хв. Для виключення утворення окисної плівки

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		54

нагрівання до температури 300 °С здійснювалось в потоці аміаку. При охолодженні різців подача аміаку припинялася при 300 °С з метою отримання підвищеної твердості азотованого шару. Ступінь дисоціації аміаку за робочої температури становила 30 – 40%. Твердість азотованого інструменту HV5 становила 1120 – 1170 при навантаженні 5 кгс. Азотовані різці заточувалися по задній грані. Усі різці після заточування доводилися алмазною пастою на чавунному притирі.

Зносостійкість дослідних різців визначали на експериментальній фрезерній установці з автоматичною подачею. Різець закріплювався у ножову головку діаметром 200 мм. Фрезерування проводилося за таких параметрів: кут різання $\delta = 65^\circ$; задній кут $\alpha = 20^\circ$ (швидкість різання $V = 52\text{ м/с}$; подача $i_z = 0,2$ мм/об; вид різання – відкрите торцеве фрезерування соснових рейок з перетином 50×10 мм, вологістю 8 – 10%.

За критерій величини зношування приймали збільшення радіуса затуплення леза різця залежно від фактичного шляху різання деревини. Розмір затуплення визначали шляхом свинцевих зліпків. Розмір радіусу затуплення вимірювався за допомогою мікроскопа МІМ-7 у світлі, що проходить. Висвітлення зліпків проводилося гостронаправленим пучком світла від освітлювача ОІ-24, який встановлювався над предметним столиком мікроскопа. Застосування гостронаправленого пучка світла дозволило при фотографуванні отримати мінімальну кількість півтіней від зліпка. Крім того, на цьому мікроскопі досліджувалася кількість утворених викрошувань на лезі різця.

Результати досліджень стійкості дослідних різців від фактичного шляху різання наведено на рисунку 3.6.

Дослідження показали, що товщина азотованого шару має перевищувати 25 – 40 мкм. Збільшений азотований шар призводить до крихкості кінчика леза. Стійкість азотованих різців значно вища, ніж неазотованих. Крім того, є істотна відмінність у характері зносу азотованих та неазотованих різців. Особливо ця відмінність помітна у початковий період зносу. "Зона приробітку" кривої

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		55

первісного зносу азотованих різців більш плавна і виражена значно слабше, ніж неазотованих. Очевидно, це пояснюється тим, що процес азотування значно знижує напруження в дефектних поверхневих шарах, що виникають при заточенні інструменту. На лезі неазотованих різців після десяти метрів різання з'являються викрощини та зношування кромки леза.

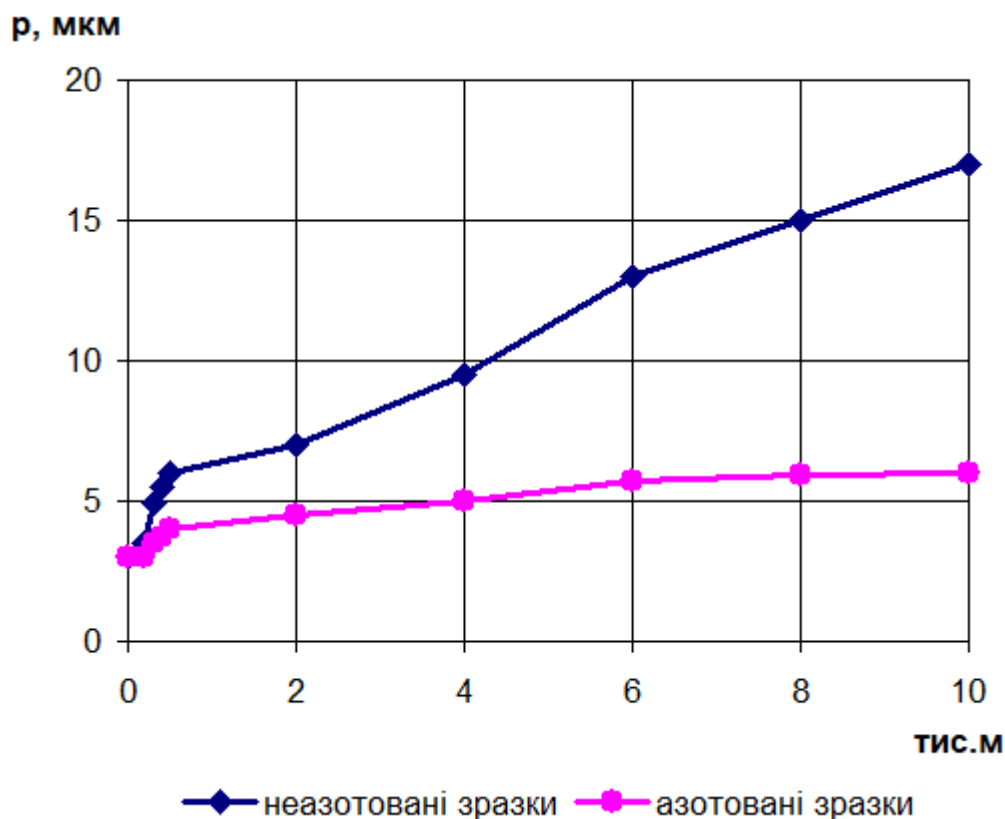


Рисунок 3.6 – Залежність затуплення різців зі сталі Р6М5 від шляху різання

3.2.2 Теплостійкість інструменту зі сталі Р6М5

Зношування в перші секунди роботи різця, мабуть, відбувається за рахунок нагрівання ріжучої кромки в зоні різання до високих температур, що перевищують теплостійкість сталі [18].

Для перевірки цього припущення проведено дослідження на теплостійкість азотованої та неазотованої сталі Р6М5. Для визначення

Теплостійкість азотованої сталі значно вища, ніж неазотованої.

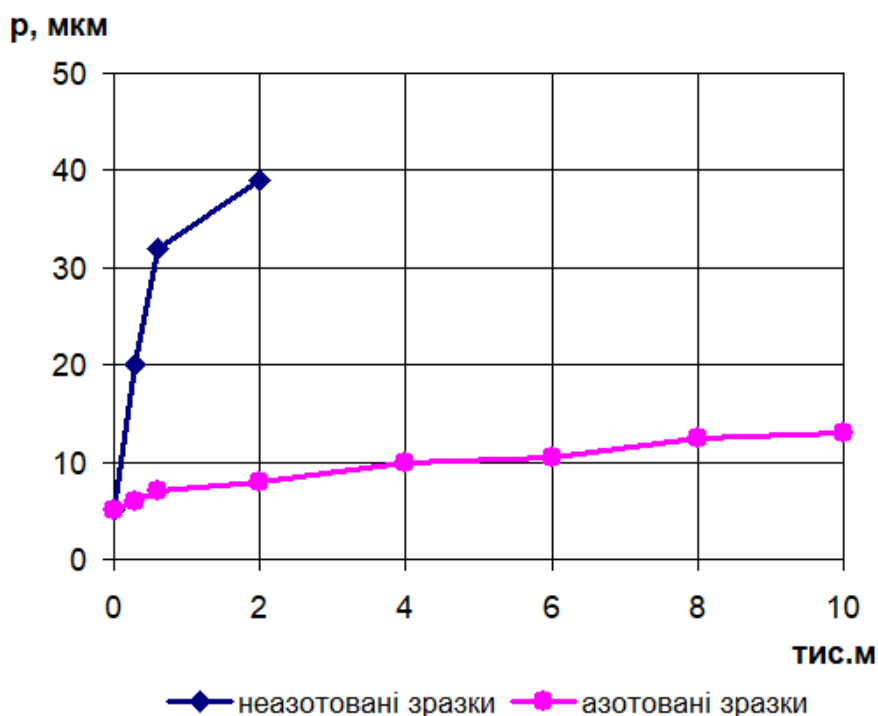


Рисунок 3.8 – Залежність затуплення різця зі сталі Р6М5 від шляху різання

3.3 Вплив різних режимів іонного азотування на формування поверхневого зміцненого шару швидкорізальної сталі Р6М5

Дослідження проводили на зразках швидкорізальної сталі Р6М5 розміром 15×10 мм. Ця сталь застосовується для виготовлення всіх видів різального інструменту, інструменту для вирубки та штампування, має підвищену схильність до безвуглерожування. Для азотування використовували пуансони, що пройшли термообробку: гартування 1200 °С, відпуск при 350 °С/1 год., 560 °С/1 год. і 630 °С/1 год.

Азотування проводили в установці ІОН-50, в Подільському науковому фізико-технологічному центрі ХНУ, в атмосфері дисоційованого аміаку при тиску 1,0-1,6 кПа. Нагрів проводився зі швидкістю 500 град/годину за рахунок енергії плазмового розряду, збуджуваного між корпусом установки і зразками.

Зразки встановлювалися на столі, який служив катодом установки. Тривалість азотування складала 4, 8 та 16 годин. Контроль температури здійснювався термопарою ХА, встановленою на столі зі зразками.

Для дослідження розподілу мікротвердості за товщиною поверхневого шару зразки розрізали за допомогою відрізного круга, після чого готували шліф зрізу за стандартною методикою [20]. Для виявлення структури використовували 4% розчин HNO_3 у етиловому спирті [20].

Мікротвердість вимірювали за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 за стандартною методикою [20], з навантаженням 0,98 Н. Вимірювання проводилися за діагоналями відбитка. Розрахунок мікротвердості проводили за такою формулою:

$$HV = 1.8544 \cdot \frac{m \cdot g}{d^2}$$

де m – маса вантажу при вдавлюванні (0,1 кг), g – прискорення вільного падіння ($9,81 \text{ м/с}^2$), d – середній розмір діагоналей відбитка пірамідки.

Металографічний аналіз структури експериментальних зразків, досліджених за допомогою електронного мікроскопа СММ-2000.

Надалі проводилася обробка результатів вимірювань із побудовою апроксимуючої кривої. Коефіцієнт достовірності апроксимації при обробці протягом 16 год – $R^2 = 0,9465$, протягом 8 год – $R^2 = 0,9231$, протягом 4 год – $R^2 = 0,5819$, без азотування – $R^2 = 0,5819$.

Проведено аналіз фазового складу на поверхні азотованих шарів за допомогою багатоцільового рентгенівського дифрактометра ДРОН-3М.

В результаті проведених досліджень було виявлено, що азотування має вплив на вміст легуючих елементів початкового зразка (рисунок 3.9). В результаті 8-годинного азотування відбулося зменшення легуючих елементів в результаті їх випаровування.

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		59

Час ізотермічної витримки процесу іонного азотування значно впливає на глибину модифікованого шару сталі Р6М5. Результати вимірювання мікротвердості подані на рисунку 3.10.

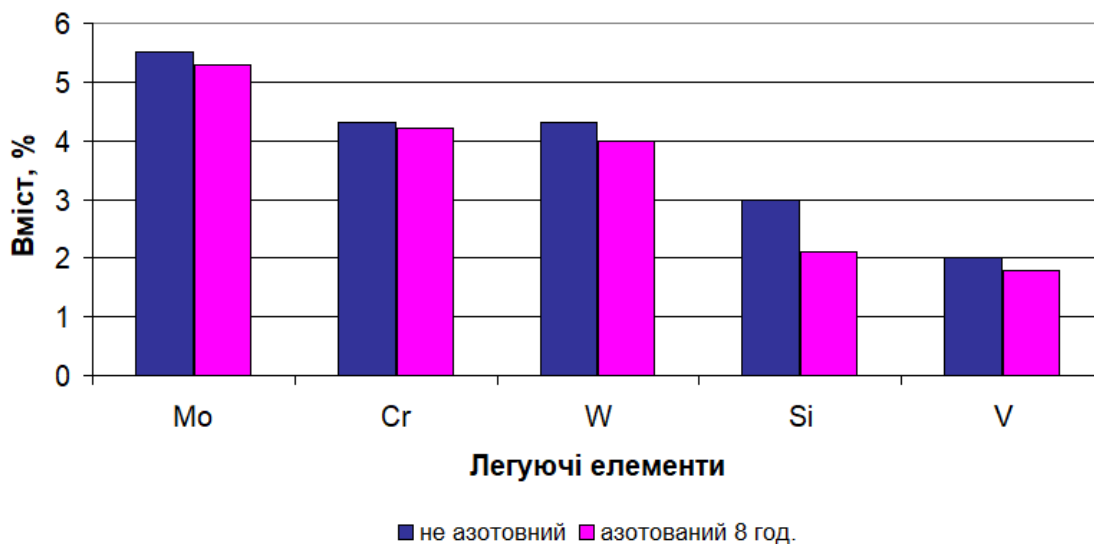


Рисунок 3.9 – Зміна вмісту легуючих елементів початкового зразка та при 8 годинах азотування

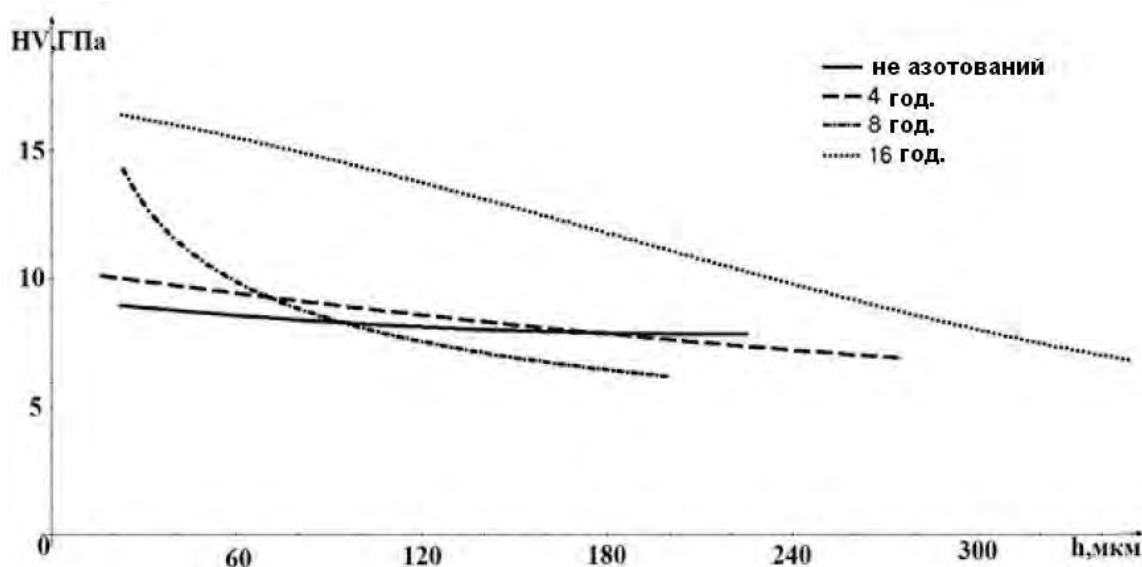


Рисунок 3.10 – Розподіл мікротвердості за перерізом шліфу сталі Р6М5

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ

Арк.

60

З графіка видно, що мікротвердість сталі поблизу поверхні досягає 17 ГПа для зразків, азотованих за час витримки 8 і 16 годин.

Мікротвердість зразка, що не зазнавав азотування, практично не змінюється при віддаленні від краю і становить 8-9 ГПа, що відповідає мікротвердості заданої сталі після гартування та відпуску.

Дифузія азоту в глибину сталі при іонному азотуванні інтенсифікується за рахунок трьох процесів: активації газової фази, збільшення ступеня адсорбції та коефіцієнта дифузії. Позитивні іони азоту в електростатичному полі розряду, що тліє, набувають швидкість, спрямовану по нормалі до поверхні деталі. Енергія іона у 3000 разів перевищує його енергію при пічному азотуванні. У приповерхневому шарі товщиною до 50 мкм відбуваються складні фізико-хімічні процеси, що призводять до підвищення густини дислокацій.

Для зразка азотованого при витримці 4 год. мікротвердість збільшується поблизу поверхні до 10-11 ГПа, а глибина азотованого шару, що має мікротвердість 9-10 ГПа, становить 20-40 мкм, швидкість дифузії азоту становить близько 5 мкм/год. Зниження мікротвердості відбувається плавно, що свідчить про незначну дифузію атомів азоту на глибину кількох десятків мікрометрів.

Низьку твердість поверхні при іонному азотуванні протягом 4 год. можна пояснити незначною швидкістю утворення нітридів у напруженому приповерхневому шарі сталі, отриманому при гартуванні. Незважаючи на те, що за літературними даними [20] формування шару при іонному азотуванні завершується за короткий час, висока дефектність поверхні може перешкоджати проникненню азоту вглиб зразка та утворенню нітридної фази.

При азотуванні протягом 8 годин спостерігається збільшення мікротвердості практично вдвічі (до 14-15 ГПа) на глибині до 20 мкм від поверхні і різкіший її спад углиб зразка. Глибина азотованого шару (з мікротвердістю 8-10 ГПа) становить 60-80 мкм, що говорить про збільшення швидкості дифузії азоту до 10 мкм/год. При такій тривалості витримки,

					<i>MPTAM 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		61

ймовірно, відбувається відпуск поверхневого шару, що призводить до збільшення швидкості дифузії азоту вглиб зразка та утворення твердої ϵ -фази (Fe_xN), тобто нітриду змінного складу з гексагональною щільноупакованою решіткою металевих атомів [18,19]. Її утворення підтверджується РФА: якісний аналіз показав наявність трьох основних фаз Fe_4N - 55%; Fe_3N - 35%; Fe ОЦК - 10%.

Для зразка азотованого при витримці 16 год. мікротвердість збільшується поблизу поверхні до 16-17 ГПа, а глибина азотованого шару, що має мікротвердість 9-12 ГПа, становить 200-250 мкм, що говорить про збільшення швидкості дифузії азоту до 15 мкм/ч.

В результаті азотування відбувається зменшення параметра ОЦК ґратки заліза з 2.8772 до 2.8753 А. Швидкість дифузії зростає прямо пропорційно логарифму часу азотування (рисунок 3.11).

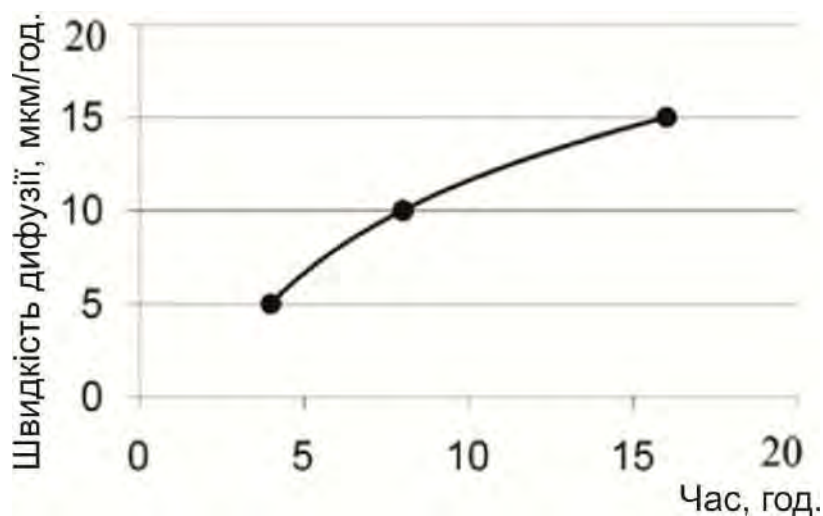
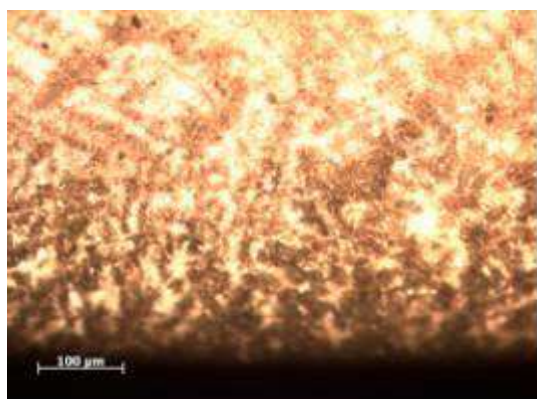


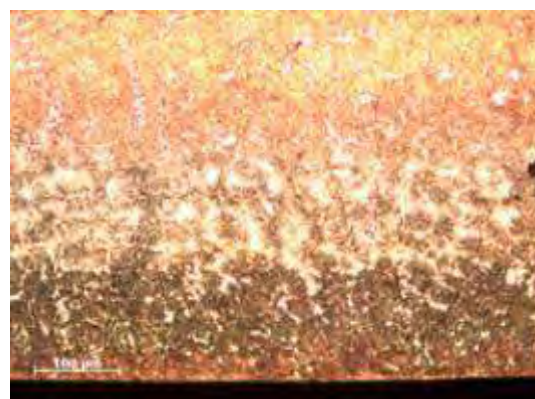
Рисунок 3.11 – Залежність швидкості азотування від часу витримки

На травлених шліфах видно, що азотований шар відрізняється за кольором від неазотованого матеріалу, внаслідок того, що травлення азотованого шару відбувається активніше, ніж травлення неазотованої частини матеріалу (рисунок

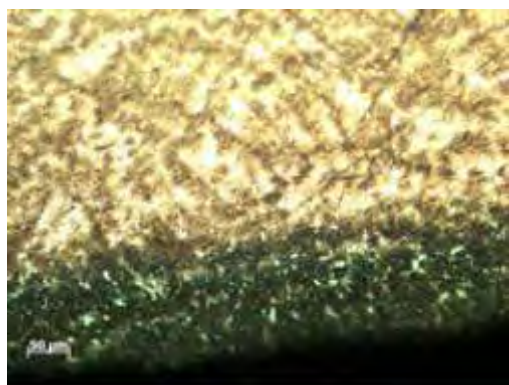
3.12). Таким чином, утворення фаз, що містять нітриди, знижує стійкість корозійного матеріалу.



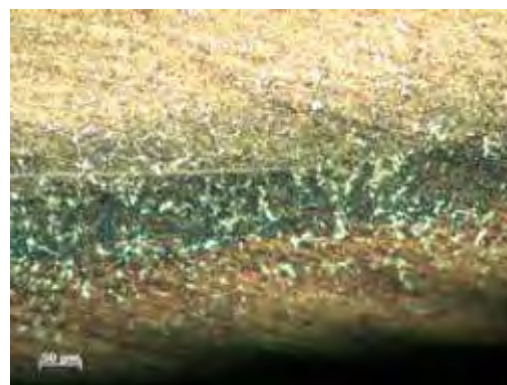
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.12 – Структури зразків сталі Р6М5 з різною тривалістю азотування (після травлення, збільшення 200 разів): а) не азотований; б) азотування 4 год.; в) азотування 8 год.; г) азотування 16 год.

Мікрофотографія шліфу азотованого протягом 8 год. зразка Р6М5 з нанесеними відбитками показана на рисунку 3.13.

У цьому розділі наведено оцінку мікротвердості модифікованого шару сталі Р6М5, азотованої при 500 °С та з різною тривалістю ізотермічної витримки.

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		63



Рисунок 3.13 – Вимірювання мікротвердості

При часі азотування 4 години мікротвердість незначно відрізняється від мікротвердості неазотованого зразка і становить близько 10 ГПа. Швидкість дифузії азоту становить 5 мкм/год, а глибина азотованого шару 20-40 мкм. При 8 годинах азотування мікротвердість приповерхневого шару значно збільшується і досягає 15 ГПа, що пояснюється утворенням ϵ -фази. При 16 годинах азотування мікротвердість досягає 17 ГПа. Швидкість дифузії дорівнює 15 мкм/год, а глибина азотованого шару становила 200-250 мкм.

Азотований шар на травленому шліфі має більш темне забарвлення, імовірно внаслідок зниження корозійної стійкості азотованого матеріалу.

Висновки до розділу

Наведено результати дослідження щодо зміцнення різального інструменту, проведеного під час переддипломної практики в лабораторіях металознавства кафедри ТАМ і лабораторіях Подільського наукового фізико-технологічного центру ХНУ.

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		64

Процес азотування зразків із швидкорізальної сталі в камері призводить до помітного зміцнення поверхневого шару зразків. Також встановлено, що в результаті термохімічної обробки на поверхні виробу утворюються нітриди металів, що мають високу твердість. На твердість поверхневого шару має вплив температура та тривалість витримки зразків. Діапазон температур для ХТО становив від 1100 °С до 1400 °С при незмінному часі витримки при заданій температурі. За отриманими даними твердості можна зробити висновок, що висока твердість (> 20 ГПа) спостерігається при температурному діапазоні 1250-1400 °С. Ця температура є оптимальною підвищення фізико-механічних властивостей швидкорізальної сталі марки Р6М5.

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		65

4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КІНЕТИКИ НАГРІВУ ТА НАРОЩЕННЯ АЗОТОВМІСНОГО ШАРУ ПРИ ХІМІКО-ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СТАЛІ P6M5

4.1 Методи моделювання процесів, пов'язаних з термічною та хіміко-термічною обробкою матеріалів

У цій роботі розглядаються методи моделювання процесів, пов'язаних із термічною та хіміко-термічною обробкою матеріалів. Методи моделювання класифікуються на дві основні групи: фізичні та статистичні. Фізичні методи засновані на фундаментальних законах і теоріях, тоді як статистичні застосовуються у випадках з недостатньою інформацією про процес та за необхідності аналізу великих обсягів даних. Особлива увага в сучасних дослідженнях [22] приділяється використанню методів інтелектуального аналізу даних та штучних нейронних мереж для моделювання нелінійних процесів.

Що важливо для практичного використання інструментів підтримки технологічних процесів, це те, що їх можна використовувати в режимі реального часу. Необхідно контролювати процес у реальному режимі та усувати при виявленні будь-яких порушень за допомогою автоматичного проектування та ініціювання поправок. Це вимагає використання швидких алгоритмів і методів розрахунку, і основною метою цього підрозділу дослідження є систематизація методів моделювання при хіміко-термічній обробці. Wołowicz E. [22] при моделюванні хіміко-термічної обробки (ХТО) дає підстави для класифікації методів моделювання на дві окремі групи: фізичні та статистичні. Кожна група має свої власні сфери застосування (рис. 4.1). Методи постійно вдосконалюються та застосовуються для моделювання різних процесів та кореляцій, як при виробництві первинного матеріалу, так і за його подальшої обробки методами матеріалознавства.

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		66

Однак, коли знання про процес є неповним, традиційні методи аналізу даних та аналітичний підхід є недостатніми. Це стосується ситуацій, коли необхідний аналіз великого обсягу даних і необхідно враховувати ряд параметрів, які можуть істотно впливати на особливості процесу або оброблюваний елемент. Крім того, як і у випадку нерівноважних процесів, впливи між параметрами процесу і характеристиками виробу, що обробляється, невідомі, і ризиковано робити припущення про тип їх взаємозв'язку один з одним (наприклад, про те, що вони лінійні). Такі випадки вимагають гнучкого підходу та використання "інтелектуальних" методів навчання. Отже, методи, широко відомі як методи інтелектуального аналізу даних чи, у ширшому сенсі, методи KDD (Knowledge Discovery in Databases – виявлення відомостей у базах даних), стають дедалі популярнішими; вони включають використання методів інтелектуального аналізу даних, а також методів, пов'язаних з базами даних [22].

Узагальнюючи методи моделювання, можна сказати, вибір моделі залежить від поставленого завдання. Традиційні методи можуть бути успішними при моделюванні явищ, які добре відомі та описуються аналітичними рівняннями Фіка. За умови правильного вибору граничних умов звичайні моделі охоплюють весь спектр параметрів. Однак, правильний вибір коефіцієнтів має ключове значення для коректності моделі.

Явища, які можуть бути описані математичними рівняннями, можуть бути оброблені з допомогою статистичних методів, включаючи методи інтелектуального аналізу даних (data mining).

4.2 Підбір температурних режимів азотування методом скінченних елементів

Використання моделювання методом скінченних елементів процесу хіміко-термічної обробки зразків з інструментальної сталі має на меті встановлення температурної області з ефективною дифузією азоту в інструмент

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		68

Чинник	Значення				
напруженості електричного поля					
Частота струму	105000 – 110000 Гц				
Кількість витків індуктора та тип їх з'єднання (послідовний або паралельний)	3 послідовний				
Кількість шарів витків	1				
Взаємна індуктивність, яка визначається геометрією системи індуктор – зразок і, зокрема, величиною зазору між ними	Індуктор: зовнішній діаметр мідної трубки 6,4 мм при товщині стінки 0,7 мм; внутрішній діаметр індуктора 20 мм. Кварцова камера трубчастого типу: внутрішній діаметр 20 мм при товщині стінки 1,5 мм; довжина 180 мм. Зразок – циліндричний				
Діелектричні втрати в ізоляційних матеріалах, наприклад повітрі, воді, що охолоджує індуктор, і матеріалах футеровки (або муфеля) індуктора, в якому розташовується зразок, що нагрівається, а також тримача зразка і електроізоляції струмопровідних металевих частин за їх наявності	Не враховуються, оскільки конвективна тепловіддача або втрати на випромінювання, істотно перевищують діелектричні втрати.				
2. Електрофізичні характеристики матеріалів, що застосовуються					
Електропровідність індуктора і зразка, що нагрівається	Таблиця 4.2				
Відносна магнітна проникність, за якою матеріали поділяють на магнітні та немагнітні, тобто. у яких величина відносної магнітної проникності μ	$\mu \gg 1$ і $\mu = 1$ відповідно Таблиця 4.2				
3. Теплофізичні параметри матеріалів					
Коефіцієнт теплопровідності	Таблиця 4.3				
Питома теплоємність	Таблиця 4.3				
МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ					
					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	70

Чинник	Значення
Щільність матеріалу	Таблиця 4.3
Об'ємна щільність тепловиділення	$0 - 6,850 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^3$
Коефіцієнти тепловіддачі при кондуктивному і конвективному теплообміні	71 %
Коефіцієнт випромінювання (коефіцієнт випромінювальної здатності)	
4. Просторово-часові параметри	
Тривалість комп'ютерного моделювання	400 с
Крок розрахункових точок	10 с

Таблиця 4.2 – Значення коефіцієнтів для електрофізичних властивостей матеріалів системи індуктор – камера – зразок

№ з/п	Матеріал компонента	Відносна магнітна проникність, μ , Гн/м	Коефіцієнт електропровідності σ , Ом/м
1	Електротехнічна мідь (індуктор)	1	58×10^6
2	Дистильована Вода	1	0
3	Кварцове скло	1	0
4	Інструментальна сталь (Р6М5)	1	$4,2 \times 10^6$
5	Азот	1	0

Деякі з зазначених характеристик змінюються залежно від зміни температури, тому для швидкозмінних процесів, зокрема, нагріву СВЧ, характеристики задаємо їх середніми величинами в аналізованому температурному діапазоні. Є необхідність також враховувати фазові переходи у твердому стані сплаву, які впливають на електро- та теплофізичні параметри сталі. До прикладу, для швидкокорізальних сталей зміна типу кристалічної ґратки з α -модифікації (гексагональна щільноупакована ґратка) в γ -модифікацію (гранецентрована ґратка) відбувається при температурі 1250 – 1300 °С.

						МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат			71

Врахуємо те, що у структурі швидкорізальних сталей містяться вторинні карбіди, які розчиняються в α -модифікації в широкому інтервалі температур.

Таблиця 4.3 – Значення коефіцієнтів для теплофізичних властивостей матеріалів системи індуктор – камера – зразок

№ з/п	Матеріал компонента	Коефіцієнт теплопровідності, λ , Вт/К·м	Питома теплоємність, С, Дж/кг·К	Щільність матеріалів, ρ , кг/м ³
1	Електротехнічна мідь (індуктор)	387	390	8940
2	Дистильована Вода	0,64	4178	996
3	Кварцове скло	1,38	1052	2201
4	Інструментальна сталь марки Р6М5	26	440	8200
5	Азот	0,055	1050	1,21

Крім того, розчинення карбідів визначається як температурою процесу, так і їх типом. За нижчих температур (950 – 1000 °С) розчиняється карбід $M_{23}C_6$, що насичує аустеніт хромом, вуглецем і частково ванадієм, а також підвищується твердість.

Розчинення основного карбиду M_6C відбувається при нагріві 1050 – 1300 °С. Це дозволяє ввести в аустеніт W (до 6 – 7 %), Cr (0,5 – 0,8 %) і V (1%), які присутні в карбіді. Відмінною рисою нагріву СВЧ швидкорізальної сталі є те, що при нагріванні в середовищі азоту відбувається взаємодія газу з поверхнею металу. В результаті чого точка переходу фази α -Fe в γ -Fe зміщується в область більш високих температур [25].

II етап – постановка задачі при моделюванні процесів, що відбуваються під час нагрівання струмами високої частоти (СВЧ). Основним завданням моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) є визначення: температурного поля в зоні знаходження азотовмісного середовища (в експерименті технічно неможливо визначити таку температуру); кінетики

									Арк.
									72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ				

нагріву та змін температурних полів на поверхні камери для подальшого зіставлення результатів моделювання з експериментальними даними.

Вхідними даними для моделювання є:

- геометричні розміри циліндричного зразка, що нагрівається;
- температура ХТО (планується проводити процес азотування інструментальної сталі за нормальної температури до 900 – 1100 °С);
- програмне забезпечення та методика для розрахунку температурних та електромагнітних полів.

III етап: побудова спрощеної геометричної моделі системи індуктор – камера – зразок, визначення граничних умов, характеристик матеріалів (рисунок 4.2). Модель індуктора має три витки; зовнішній діаметр мідної трубки 64 мм при товщині стінки 07 мм. Охолоджувальна рідина – дистильована вода. Кварцова камера трубчастого типу служить муфелем та електроізоляційним матеріалом між індуктором та зразком. Її внутрішній діаметр перевищує діаметр зразка та становить 20 мм при товщині стінки 1,5 мм; довжина 180 мм. Циліндричний металевий зразок розташований у центрі всієї системи.

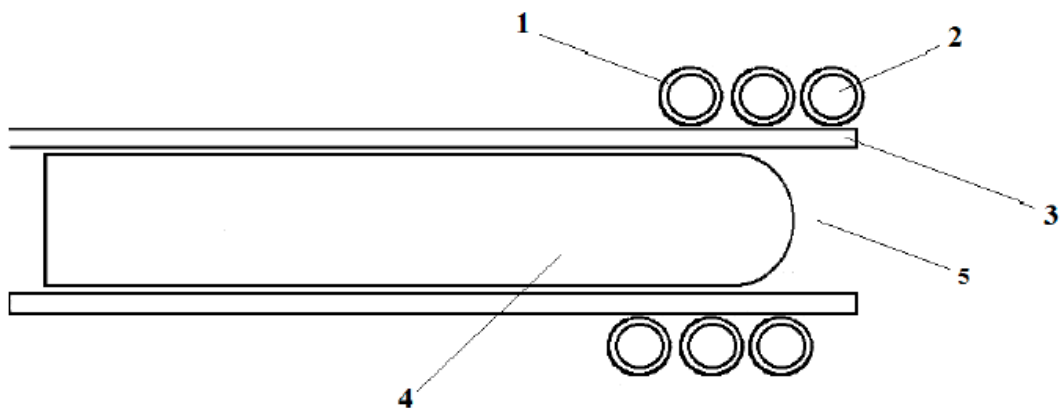


Рисунок 4.2 – Геометрична модель камери для ХТО, що міститься в індукторі:

1 – індуктор; 2 – вода; 3 – кварцова трубка;

4 – зразок з швидкорізальної сталі Р6М5; 5 – азотовмісне середовище

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		73

Геометрична модель розбита сіткою скінченних елементів (рисунок 4.3). За цією сіткою програмою автоматично розраховуються вихідні параметри: температура, тепловиділення, щільність струму.

Для математичної моделі вхідними даними є електро- та теплофізичні властивості матеріалів системи індуктор – камера – зразок (електротехнічна мідь, дистильована вода, кварцове скло, інструментальна сталь марки Р6М5, азот).

Граничні умови задачі електродинаміки: нульова величина дотичної напруги на зовнішній поверхні металевого зразка та внутрішній поверхні трубчастого індуктора; на межі розрахунку потенціалу вектор магнітного поля та фазовий зсув дорівнюють нулю.

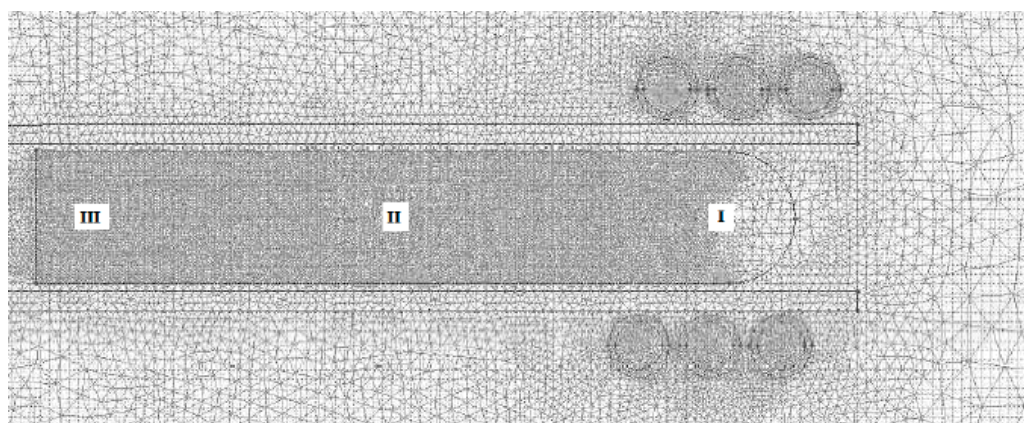


Рисунок 4.3 – Модель камери для ХТО

із створеною сіткою скінченних елементів:

I – робоча зона зразка; II – середина хвостовика зразка; III – хвостовик зразка

Для задачі теплопровідності (нестационарної теплопередачі) даними є: коефіцієнт теплопровідності; питома теплоємність; густина матеріалу. У моделі враховано залежність коефіцієнта теплопровідності та питомої теплоємності від температури [26] для мітки «Інструментальна сталь». Вхідні параметри, підібрані експериментальним шляхом, сила струму індукторі становила 3,1 кА, а частота струму 108000 Гц.

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		74

Тривалість комп'ютерного моделювання становила 400 с.; крок розрахункових точок 10 с. Визначивши момент початку виходу температури на стаціонарний режим, можна стверджувати, що знайдена величина сили струму буде достатньою для нагрівання виробу до заданої температури.

IV етап: розв'язання задачі електродинаміки та теплопровідності для системи індуктор – камера – зразок при обробці СВЧ – визначення характеру розподілу та графічний розв'язок у вигляді карт ліній щільності струмів та об'ємної щільності тепловиділення.

V етап – аналіз розв'язку. Для заданих параметрів моделі електродинаміки отримано: найбільша щільність струму ($0,7 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$) досягається на зовнішній частині індуктора, яка знаходиться ближче до камери, що нагрівається (рисунок 4.4) (тонкими лініями показані ізотерми рівня магнітного потенціалу); на поверхні зразка спостерігається підвищена густина струму ($2 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$), що пояснюється скін-ефектом при проникненні змінного магнітного поля вглиб зразка; оскільки провідність азоту, дистильованої води і кварцу в розрахунках не враховується, то в компонентах системи, що розглядаються, маємо нульове значення щільності струму. Таким чином, можна припустити, що під дією вихрових струмів зразок, що знаходиться в центральній частині камери, буде сильно нагріватися (рисунок 4.4).

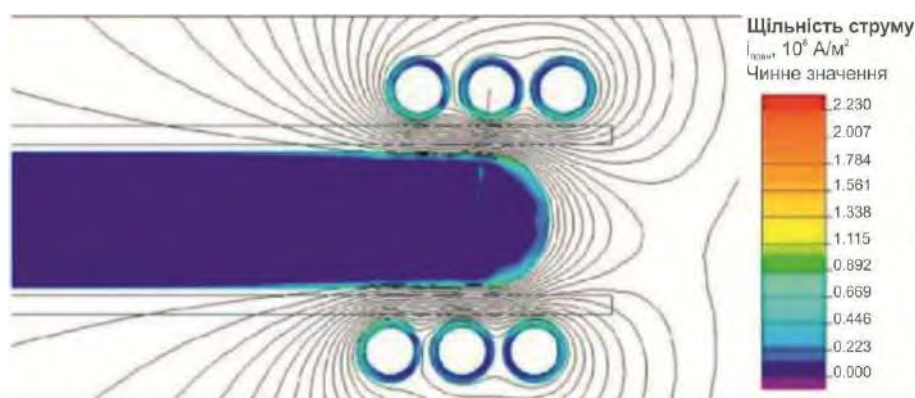


Рисунок 4.4 – Розподіл щільності струму при силі струму 3,1 кА у системі індуктор – камера – зразок у прикінцевий момент часу

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		75

Мета теплового розрахунку – визначення об’ємної щільності тепловиділення: найбільша кількість тепла ($6,3 \cdot 10^9 \text{Вт/м}^3$) виділяється на поверхні зразка (спостерігається почастішання ліній тепловиділень, що говорить про виникнення скін-шару) та в центральній зоні камери в азотовмісному середовищі, де міститься зразок. На рисунку 4.5 у кінцевий момент часу видно, що кількість тепловиділення на поверхневому шарі зразка на порядок вища, ніж усередині камери.

Така нерівномірність тепловиділення пов’язана з особливістю процесу індукційного нагрівання СВЧ (понад 100 кГц). Очевидно, високе тепловиділення в азотовмісному середовищі пов’язане з перевипромінюванням змінного поля всередину системи, що нагрівається.

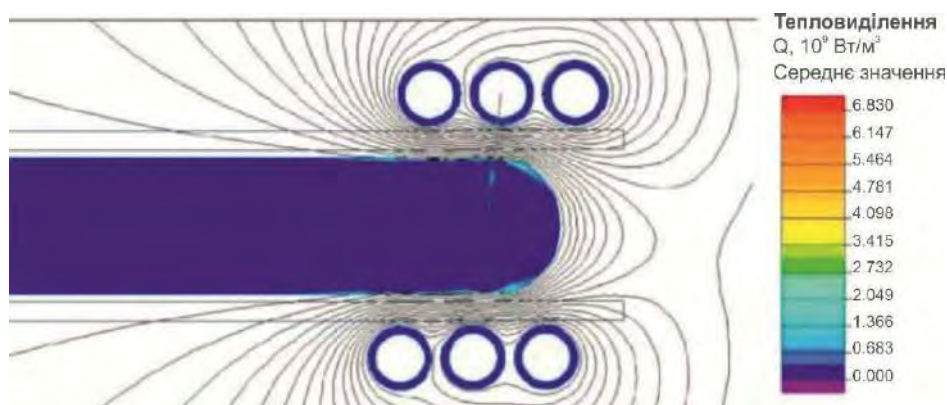


Рисунок 4.5 – Модель щільності тепловиділення у системі індуктор – камера – зразок в кінцевий момент часу при силі струму 3,1 кА

При вибраних значеннях сили струму та фіксованої частоти на індукторі, а також зазначених початкових та граничних умовах з урахуванням теплових втрат на конвекцію та випромінювання розв’язання задачі теплопровідності є картами розподілу температури, зокрема, в кінцевий момент часу (рисунок 4.6).

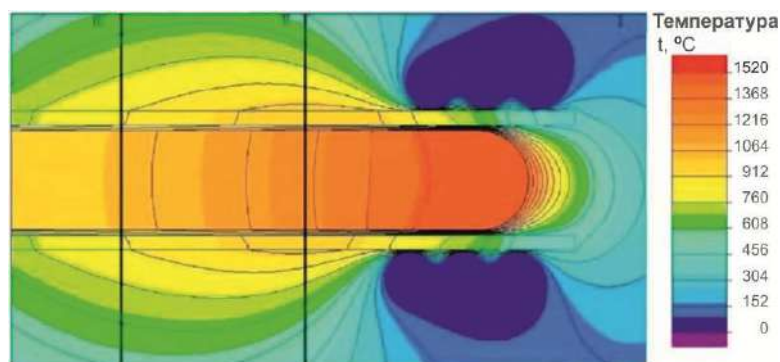


Рисунок 4.6 – Модель розподілу температури у системі індуктор – камера – зразок при силі струму 3,1 кА в кінцевий момент часу

Розв’язання задачі теплопровідності для системи, що розглядається, при заданій силі струму індуктора показує, що температура поверхневого шару зразка перевищує температуру плавлення. Проте в експерименті таке явище не спостерігається. Таким чином, при нагріванні матеріалу крім відомих теплових втрат на конвекцію та випромінювання діє тепловий стік іншої природи. Ймовірно, що при нагріванні зразка відбуваються процеси утворення нових фаз (хімічних сполук – оксидів, нітридів та твердих розчинів впровадження кисню в метал) та зміна структури (зростання кристалічних зерен) [18].

Розв’язання задачі тепловиділення з урахуванням теплових втрат на процеси ХТО має вигляд параболічних кривих з ділянками насичення. Найбільший інтерес становлять графіки для периферії зразка у сфері максимальної напруженості поля (у центрі котушки індуктора) (рисунок 4.7, крива I).

Крива I характеризується значно більшою швидкістю нагріву до максимальної температури. Різниця температур суттєво збільшується при нагріванні понад 30 с, а різниця стаціонарної температури між кривими моделювання та експерименту не перевищувала 30-50 °С.

Таким чином, в ході моделювання МСЕ були отримані розв’язки задач електродинаміки та теплопровідності для системи індуктор – камера – зразок,

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		77

які описують кінетику нагріву при операції ХТО зразка зі швидкорізальної сталі.

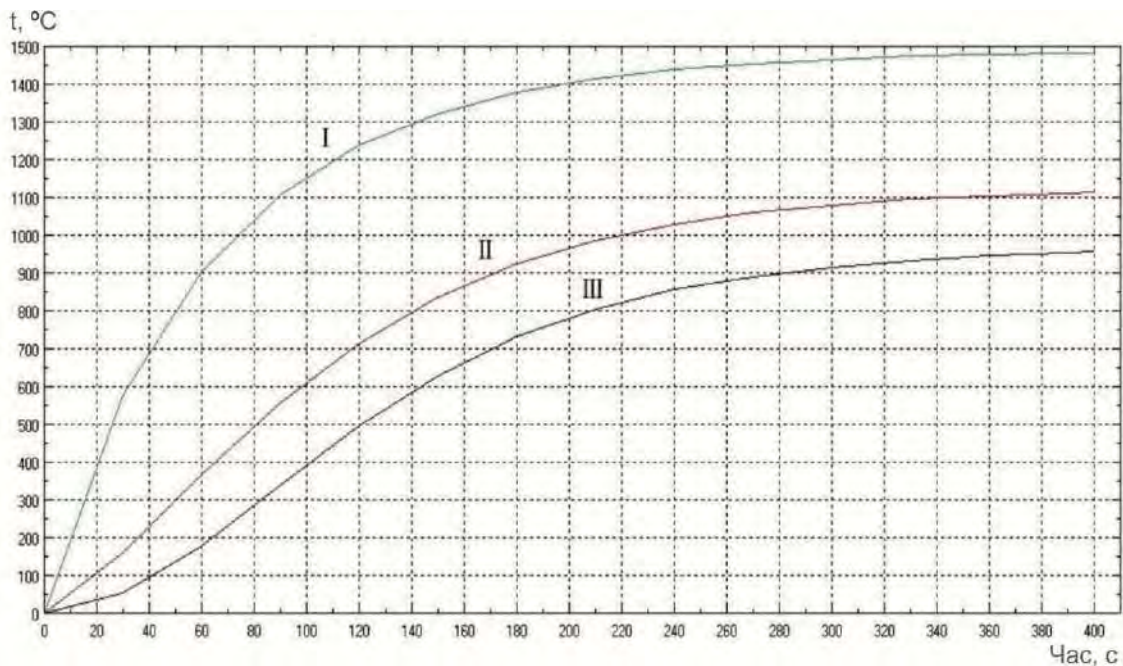


Рисунок 4.7 – Графік кінетики нагріву системи індуктор – камера – зразок при силі струму 3,1 кА:

- I – крива залежності у робочій зоні зразка;
- II – крива залежності у середині хвостовика зразка;
- III – крива залежності на кінці хвостовика

Причинами, що впливають, при цьому були сила струму на індукторі, зміни тепло- та електрофізичних властивостей сталі та теплових втрат, викликаних конвекцією, випромінюванням, процесом азотування сталевого зразка. Отримані результати теплових і температурних полів показують, що при нагріванні максимальна температура зразка, що обробляється 1470 °C досягається при струмі 3,1 кА. Найбільший градієнт швидкості нагрівання ділянок зразка у моделюванні становить 400 °C, а при виході на режим витримки різниця температур не перевищувала 200 °C.

обрано навантаження 100 гс, оскільки за менших навантажень на індентор розмір відбитків замалий, що не дозволяло виміряти його розміри. При вищих навантаженнях відбувалося руйнування покриттів. Час витримки під навантаженням становило 15 с. Нанесення уколів проводилося від краю зразків до їхнього центру. Кожен наступний вимір твердості проводився на відстані не менше ніж 40 мкм, що відповідає близько 5 найбільших довжин діагоналей попереднього відбитка.

За отриманими результатами твердості визначено регресійну залежність і побудовано її графік, який показує залежність твердості покриттів від глибини виміру. За отриманими результатами лабораторного процесу ХТО можна зробити висновок, що найменша твердість спостерігається на глибині 880 мкм (приблизно 1 мм), що відповідає 450 HV. Збільшення твердості відбувається при русі до краю зразка, на глибині 40 мкм (0,04 мм) отримано максимальне значення твердості, що становить 1370 HV (рисунок 4.9).

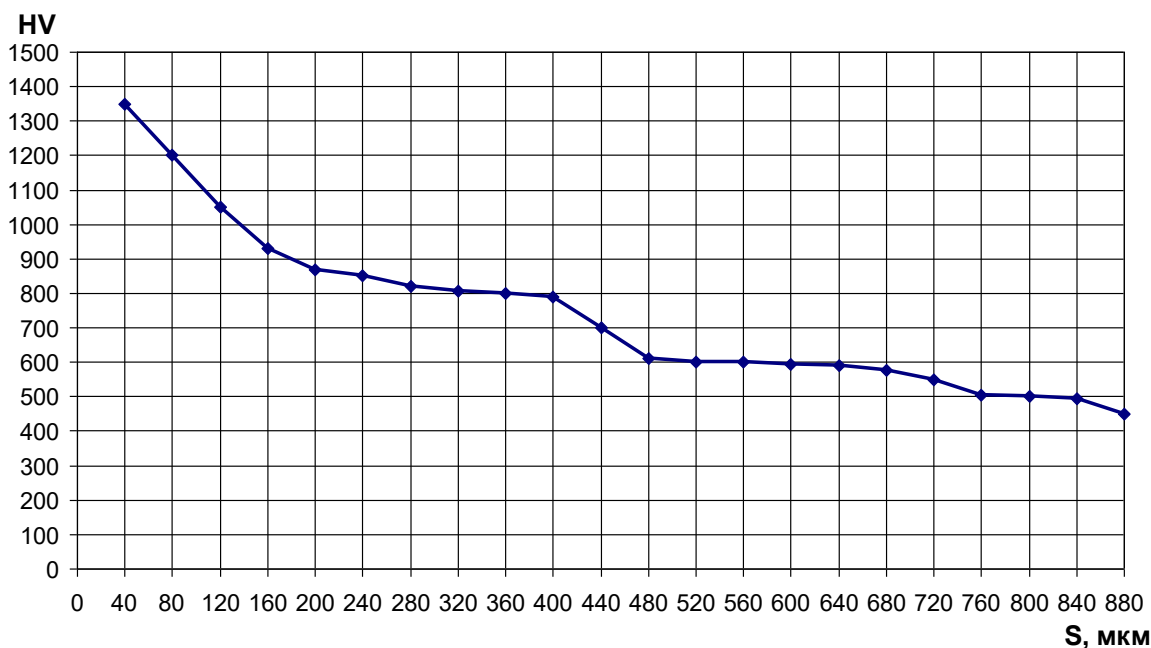


Рисунок 4.9 – Графік залежності твердості зразків, отриманих у лабораторних умовах, від глибини вимірювання (навантаження на індентор Віккерса склало 100гс)

Виходячи з отриманих даних можна дійти висновку, що різке зниження твердості відбувається на інтервалі 40 – 240 мкм, мабуть це пов'язані з фазовими перетвореннями всередині зразка. З цього випливає, що одержаний зміцнений шар має товщину 0,05 – 0,1 мм.

4.3 Математичне моделювання росту азотованого шару сплаву Р6М5

Метою цього розділу роботи є створення математичної моделі зростання глибини азотованого шару сплаву Р6М5 як функції температури та часу азотування та перевірки адекватності моделі шляхом порівняння розрахованої глибини азотованого шару з експериментальною товщиною азотованого шару при різних температурах азотування та тривалості азотування.

Математичну модель було розроблено на основі моделі, розробленої для азотування чистого заліза Хоссейні та ін. (2007) [27]. Модель Хоссейні була доповнена підмоделлю процесу дифузії плазмового азотування швидкорізальної сталі. Математичну модель перевіряли з різними параметрами азотування на основі експериментальних даних, описаних у розділі 3 цієї роботи, щоб дослідити, чи підходить математична модель для прогнозування глибини азотованого шару швидкорізальної сталі іонно-плазмовим азотуванням і газовим азотуванням. При перевірці модель уточнювалась і перевірялась повторно. Відповідно до Білліона і Хендрі (1985) [28], очікувана структура зростання азотованого шару для швидкорізальної сталі Р6М5 має вигляд, як на рисунку 4.10.

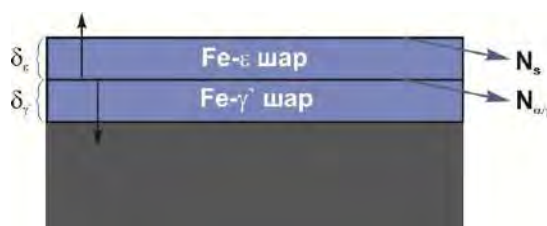


Рисунок 4.10 – Структура росту азотованого шару, сформована на інструментальній сталі [28]

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		82

4.3.1 Математична модель прогнозування товщини азотованого шару

Підхід до побудови математичної моделі базується в основному на першому законі Фіка для процесу азотування, який можна виразити у вигляді рівняння (4.1):

$$J_i = -D_i \frac{\partial N_i(x,t)}{\partial x}, \quad (4.1)$$

де $i = \varepsilon$ і γ' .

Отже, перший закон Фіка для дифузії азоту в ε -фазі дає наступний вираз:

$$J_\varepsilon = -D_\varepsilon \frac{\partial N_\varepsilon(x,t)}{\partial x} \quad (4.2)$$

де J_ε – це потік азоту, D_ε – коефіцієнт дифузії азоту, а N_ε – концентрація азоту в ε -фазі.

Правило збереження маси для складених шарів виразимо рівнянням (4.3), яке одержали на основі аналізу результатів дослідження [29]:

$$W_\varepsilon \frac{d\varepsilon}{dt} = [J_\varepsilon - J_{\gamma'}]x = \lambda_\varepsilon \quad (4.3)$$

Оскільки фактична концентрація невідома, наступне припущення про рівновагу прийнято для системи Fe-N (відповідно до чистого заліза (рисунок 4.8)), оскільки Fe є основним елементом в інструментальній сталі та має значний вплив на початковому етапі, граничні умови можна виразити наступним чином:

І максимальна концентрація азоту в нітридах ε -Fe_{2,3}N досягає 11,14 мас.%, якщо прийняти його за Fe₂N із вмістом азоту 33,33 ат.%. Концентрація азоту в

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		83

нітриді Fe_{2-3}N зменшується до мінімального значення 7,71 мас.% поблизу межі розділу γ' , коли вважаємо, що це Fe_3N , включаючи 25,0 ат.% N;

II концентрація азоту в γ' нітриді приблизно дорівнює 5,9 мас.%, якщо прийняти стехіометричну сполуку Fe_4N з 20 ат.% N. За даними літератури [30] концентрація знаходиться в діапазоні від 5,76 до 5,90 мас. %.

Тому, враховуючи граничні умови I та II, концентрацію азоту на межі розділу між шарами ε та γ' можна виразити у вигляді рівнянь 4.5 та 4.6:

$$N_{\varepsilon/\gamma'} \approx 7,71 \text{ мас.}\% \quad (4.5)$$

$$N_{\gamma'/\varepsilon} \approx 5,91 \text{ мас.}\% \quad (4.6)$$

З іншого боку, зростання складних шарів відбувається за параболічним законом (4.7):

$$\lambda_i = b_i \sqrt{t} \quad , \text{ де } i = \varepsilon \text{ і } \gamma', \quad (4.7)$$

де λ_i – товщина i -го шару, b_i – константа швидкості росту, t – час азотування.

Диференціюванням рівняння (4.7) одержимо вираз (4.8):

$$\frac{d\lambda_i}{dt} = \frac{b_i}{2\sqrt{t}} \quad , \text{ де } i = \varepsilon \text{ і } \gamma'. \quad (4.8)$$

4.3.2 Розрахунок товщини шару $\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$

Беручи до уваги рівняння (4.3), (4.7) і (4.8), одержимо:

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		84

$$\frac{0.9b_{\varepsilon}}{\sqrt{t}} = [J_{\varepsilon} - J_{\gamma'}]x = \lambda_{\varepsilon} \quad (4.9)$$

Розподіл концентрації азоту в ε -шарі, розрахований в літературі [29] і має вигляд рівняння (4.10):

$$N_{\varepsilon} = N_s + \frac{7.712 - N_s}{\operatorname{erf}\left(\frac{\lambda_{\varepsilon}}{2\sqrt{tD_{\varepsilon}}}\right)} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{tD_{\varepsilon}}}\right) \quad (4.10)$$

де N_s – концентрація азоту на поверхні зразка, як показано в тривимірних шкалах залежності товщини ε -нітриду від K_{ε} та часу азотування при постійній температурі азотування, 550 °C [27].

Спростивши вираз після підстановки (4.10) в (4.2) одержимо вираз для наближеного визначення потоку азоту на межі розділу між ε та γ' - шарами у вигляді рівняння (4.11):

$$J_{\varepsilon} \Big|_{x=\lambda_{\varepsilon}} \approx 3.4 \frac{D_{\varepsilon}}{\lambda_{\varepsilon}} \quad (4.11)$$

З іншого боку, розподіл концентрації азоту в шарі γ' можна розрахувати за рівнянням (4.12), а вихідний потік азоту – за рівнянням (4.13) [27].

$$N_{\gamma'} = \frac{0.14\lambda_{\varepsilon} + 5.9\lambda_{\gamma'}}{\lambda_{\gamma'}} - \frac{0.28\sqrt{tD_{\gamma'}}}{\lambda_{\gamma'}} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{tD_{\gamma'}}}\right) \quad (4.12)$$

$$J_{\gamma'} = 0.14 \frac{D_{\gamma'}}{\lambda_{\gamma'}} \quad (4.13)$$

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		85

4.3.3 Розрахунок товщини шару нітриду γ'

Для розрахунку товщини шару нітриду γ' беремо до уваги концентрацію азоту на поверхні згідно з рівнянням (4.2).

Аналогічно до процесу розрахунку шару $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ одержимо рівняння для товщини шару нітриду γ' у вигляді (4.14):

$$\lambda_{\gamma'} \approx 0.5 \left[-(b_{\epsilon} + 0.02\sqrt{D_{\alpha}}) + \sqrt{(b_{\epsilon} + 0.02\sqrt{D_{\alpha}})^2 + 0.2D_{\gamma'}} \right] \cdot \sqrt{t} \quad (4.14)$$

Коефіцієнти дифузії розраховуємо за підходом Карабельчикової [27]:

$$D_{\epsilon} = 2.1 \times 10^{-8} \exp \left[\frac{-93517 \frac{J}{mol}}{8.314T \frac{J}{mol.K}} \right] \quad (4.15)$$

Як згадувалося раніше, математична модель росту загального азотованого шару інструментальної сталі повинна враховувати товщину γ' нітриду та товщину шару $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$.

4.3.4 Розрахунок загальної товщини азотованого шару

Таким чином, загальна товщина азотованого шару під поверхнею є сумою товщин шару γ' нітриду та шару $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$. Загальна товщина шару нітриду буде:

$$\lambda = \lambda_{\gamma'} + \lambda_{\epsilon},$$

де $\lambda_{\gamma'}$ – обчислюється за формулою (4.14), а λ_{ϵ} – за формулою (4.16):

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат					86

$$\lambda_z = \sqrt{(4D_z - 0.2D_y)t} \quad . \quad (4.16)$$

4.3.5 Результати порівняння теоретичної (змодельованої) і емпіричної товщини азотованого шару інструментальної сталі Р6М5

Щоб перевірити достовірність одержаної математичної моделі порівняємо розраховану товщину нітридних шарів із фактичною експериментальною товщиною на основі експериментів, проведених в лабораторії матеріалознавства кафедри ТАМ та Подільського наукового фізико-технологічного центру ХНУ.

В результаті порівняння теоретичної (змодельованої) і емпіричної товщини азотованого шару інструментальної сталі Р6М5 одержали: найбільша різниця в розрахунковій глибині порівняно з експериментальною (зафіксованою) для азотованого шару сталі Р6М5 становить до 8 мкм. Це вказує на те, що за математичною моделлю досить точно можна спрогнозувати глибину азотованого шару.

Щодо газозотованої сталі Р6М5 максимальна різниця між виміряною та розрахованою азотованою товщиною склала 0,037 мм, інші значення різниць містяться в діапазоні від 0,015 до 0,019 мм.

Таким чином, це показує, що математична модель добре узгоджується з експериментальними даними.

Висновки по розділу

1. Моделювання МСЕ та розв'язання самоузгодженої крайової задачі електродинаміки та теплопровідності в системі індуктор – камера – зразок сприяє наочному уявленню та адекватному аналізу стаціонарних та динамічних станів об'єкта, що вивчається. Отримані розв'язки задач електродинаміки та теплопровідності для системи індуктор – камера – зразок, які описують кінетику

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		87

нагріву при операції ХТО зразка зі швидкорізальної сталі Р6М5. Встановлено, що щодо поверхні зразка в ділянках робочої частини зразка спостерігається підвищена температура, і вона вище температури решти поверхні на 200 - 300 °С, що підтверджується реальними експериментами. При значенні струму 3,1 кА, найбільший градієнт швидкості нагрівання зразків у моделюванні і реальному експерименті становила 400 °С, а при виході на режим витримки різниця температур не перевищувала 200 °С.

2. Проведено аналітичне моделювання очікуваної глибини азотованого шару інструментальної сталі Р6М5. Одержали, що найбільша різниця в розрахунковій глибині порівняно з експериментальною (зафіксованою) для азотованого шару сталі Р6М5 становить до 8 мкм для іонноазотованих зразків та 0,037 мм для газоазотованих зразків. Це вказує на те, що за математичною моделлю досить точно можна спрогнозувати глибину азотованого шару.

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		88

ВИСНОВКИ

На автосервісі зі сталі Р6М5 можуть використовуватися такі інструменти:

1. Свердла – для свердління металевих частин з високою точністю.
2. Різці – для точіння та обробки деталей на токарних верстатах.
3. Фрези – для обробки поверхонь і створення канавок у металі.
4. Ножі для різання – для обрізки та підгонки металевих елементів.
5. Мітчики і плашки – для нарізання різьби на металевих деталях.

Ці інструменти використовують для ремонту й обробки металевих компонентів автомобілів, адже сталь Р6М5 добре витримує навантаження та високу температуру під час експлуатації.

Визначено, що традиційні методи поверхневої обробки, зокрема гартування, дозволяє значно змінювати властивості деталей. Однак цими методами, у багатьох випадках, неможливо досягти високих результатів, оскільки вони не дозволяють проводити комплексну обробку поверхні. Тому для забезпечення високої якості деталей та інструменту, їх довговічності та зниження металомісткості необхідне застосування методів хіміко-термічної обробки (ХТО). При цьому підвищується твердість, міцність втоми, опір зносу, антикорозійні та ерозійні властивості, а також кислотна і розжарювальна стійкість.

У цій роботі розглядаються методи моделювання процесів, пов'язаних із термічною та хіміко-термічною обробкою матеріалів. Методи моделювання класифікуються на дві основні групи: фізичні та статистичні. Фізичні методи засновані на фундаментальних законах і теоріях, тоді як статистичні застосовуються у випадках з недостатньою інформацією про процес та за необхідності аналізу великих обсягів даних.

Для підтвердження правильності підібраних температурних режимів (900 - 1100 ° С) азотування проведено моделювання методом скінченних елементів.

Моделювання розподілу фізичних полів дозволило:

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		89

1) встановити оптимальну силу струму індуктора, за допомогою якого будуть дотримуватися підібрані теплові режими;

2) одержати візуальне уявлення локального прогріву робочої зони обробки зразку;

3) провести адекватний аналіз стаціонарних та динамічних станів об'єкта, що вивчається.

4) одержати розв'язки задач електродинаміки та теплопровідності описують кінетику нагріву при операції хіміко-термічної обробки зразка з інструментальної сталі марки Р6М5 з урахуванням таких впливових факторів, як: сила струму на індукторі, зміна тепло- та електрофізичних властивостей сталі та теплових втрат на конвекцію, випромінювання при процесі азотування;

5) встановити, що на поверхні зразка в ділянках його робочої частини спостерігається підвищена температура, і вона вище температури решти поверхні на 200 - 300 °С;

6) визначити, що при значенні струму 3,2 кА, найбільший градієнт швидкості нагрівання зразків у моделюванні 400 °С, а при виході на режим витримки різниця температур не перевищувала 200 °С;

7) визначити, що поправка щодо врахування теплових втрат залежить від сили струму і температури, тобто, чим вища температура, тим більші втрати виникають в системі, що нагрівається. Починаючи з початкового моменту нагрівання теплові втрати швидко збільшуються до 1500 °С, після цієї точки спостерігається незначне зростання теплових втрат;

8) встановити, що процес термохімічної обробки зразків з швидкорізальної сталі в камері призводить до помітного зміцнення поверхневого шару зразків;

9) встановити, що в результаті термохімічної обробки на поверхні виробу утворюються нітриди металів, що мають високу твердість. На твердість поверхневого шару впливала температура та тривалість витримки зразків. Діапазон температур для ХТО становив від 1100 °С до 1400 °С при незмінному

					<i>МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		90

часі витримки при заданій температурі. За отриманими даними твердості можна зробити висновок, що висока твердість (> 20 ГПа) спостерігалась при температурному діапазоні 1250-1400 °С. Ця температура є оптимальною для підвищення фізико-механічних властивостей швидкорізальної сталі марки Р6М5.

Встановлена закономірність у градієнтах температур є важливим чинником, оскільки при реальному експерименті неможливо визначити дійсну температуру в робочій зоні камери.

Аналітичне моделювання глибини азотованого шару інструментальної сталі Р6М5 дозволило спрогнозувати очікувану товщину азотованого шару при газовому та іонному азотуванні швидкорізальної сталі. Одержані прогнозні значення порівняли з відповідними значеннями для експериментальних зразків. Отримали, що найбільша різниця в розрахунковій товщині порівняно з експериментальною (зафіксованою) для азотованого шару сталі Р6М5 становить до 8 мкм для іонноазотованих зразків та 0,037 мм для газоазотованих зразків. Це вказує на адекватність побудованої прогностичної моделі.

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		91

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

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

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

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.133>.

3 1 ДСТУ 10902:2008 Свердла спіральні з циліндровим хвостовиком. Середня серія. Основні розміри (ГОСТ 10902-77, IDT)

4 ДСТУ 4010:2008 — Свердла спіральні з циліндровим хвостовиком. Коротка серія. Основні розміри (ГОСТ 4010 77, IDT) [br] НД чинний: від 2008 07 01 Зміни: (1 XI 82); (2 VII 88) Технічний комітет: Мова: Ru Метод прийняття: Підтвердження Кількість сторінок: 23 Код ...

5 ДСТУ ГОСТ 2092:2008 — Свердла спіральні подовжені з конічним хвостовиком. Основні розміри (ГОСТ 2092 77, IDT) [br] НД чинний: від 2008 07 01 Зміни: (1 XI 82) Технічний комітет: Мова: Ru Метод прийняття: Підтвердження Кількість сторінок: 4 Код НД згідно з ДК 004: 230 ; ...

6 ДСТУ ГОСТ 3266:2008 — Мітчики машинно-ручні. Конструкція та розміри (ГОСТ 3266 81, IDT) [br] НД чинний: від 2008 07 01 Зміни: (1 VIII 2000) Технічний комітет: Мова: Ru Метод прийняття: Підтвердження Кількість сторінок: 55 Код НД згідно з ДК 004: 25. 50 ...

7 25.100.50 - Мітчики, різьбонарізні плашки ГОСТ 2248 80 ГОСТ 2287 88 ГОСТ 3266 81 ГОСТ 3449 84 ГОСТ 6227 80 ГОСТ 6228 80 ГОСТ 6951 72

8 25.100.20 - Фрези ГОСТ 1336 77 Фрези різьбові гребінчасті. Технічні умови Натомість ГОСТ 1336 62 ГОСТ 1695 80 Фрези цільні торцеві, насадні, дискові тристоронні та дискові пазові. Технічні умови Натомість ГОСТ 1695 67 ГОСТ 2679 93 (ISO 2296 72) ...

9 25.100.40 - Пилки ГОСТ 4047 82 Пилки дискові сегментні для металу. Технічні умови Замість ГОСТ 4047 52 ГОСТ 6645 86 Полотна ножівкові для

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		92

металу. Технічні умови Натомість ГОСТ 6645 68 ГОСТ 18210 72 Пилки дискові сегментні для легких сплавів.… ...

10 25.100.99 — Інші різальні інструменти ГОСТ 5392 80 Різці зубостругові для прямозубих конічних коліс. Технічні умови Замість ГОСТ 5392 64 ГОСТ 6762 79 Довб'яки зуборізні чистові для валів та отворів шліцевих з'єднань з евольвентним профілем.… ...

11 ДСТУ ГОСТ 10046:2008 — Різці довбіжні зі швидкорізальної сталі. Конструкція та розміри (ГОСТ 10046 72, IDT) [br] НД чинний: від 2008 07 01 Зміни: Технічний комітет: Мова: Ru Метод прийняття: Підтвердження Кількість сторінок: 9 Код НД згідно з ДК 004: 25.100.99 ...

12 ДСТУ ГОСТ 18874:2008 — Різці токарні прорізні та відрізні із швидкорізальної сталі. Конструкція та розміри (ГОСТ 18874 73, IDT) [br] НД чинний: від 2008 07 01 Зміни: (1 IV 81); (2 III 85) Технічний комітет: Мова: Ru Метод прийняття: Підтвердження Кількість сторінок: 4… ...

13 ДСТУ ГОСТ 18878:2008 — Різці токарні прохідні прямі із пластинами із твердого сплаву. Конструкція та розміри (ГОСТ 18878 73, IDT) [br] НД чинний: від 2008 07 01 Зміни: (1 VI 81); (2 II 85) Технічний комітет: Мова: Ru Метод прийняття: Підтвердження Кількість сторінок:… ...

14 77.140.35 — Інструментальні сталі ГОСТ 4405 75 Смуги гарячекатані та ковані з інструментальної сталі. Сортаменти. Натомість ГОСТ 4405 48 ГОСТ 19265 73 Прутки та смуги зі швидкорізальної сталі. Технічні умови Натомість ГОСТ 5952 63, ГОСТ 9373 60 ГОСТ 23522 79 ...

15 Швидкорізальна сталь P6M5, P18. URL: <https://atomsteel.com/type-steels/high-speed.html> (дата звернення: 15.11.2024).

16 Мохорт А.В., Чумак М.Г. Термічна обробка металів. Київ: Вид-во Либідь, 2002. 512 с.

17 Власенко А.М. Матеріалознавство та технологія металів : підручник для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти / А.М. Власенко. — Київ : Літера ЛТД, 2019. -224 с.

					МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		93

18 Сушко О. В. Прикладне матеріалознавство: підручник для вищих навчальних закладів III-IV ступенів акредитації / О.В. Сушко та ін. - <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/7209>

19 Бузило В.І. Матеріалознавство : навч. посіб. / В.І. Бузило, В.П. Сердюк, М 34 А.В. Яворський, О.А. Гайдай / М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2021. – 243 с .

20 Каплун В. Г. Ионное азотирование в безводородных средах: монография / В. Г. Каплун, П. В. Каплун. – Хмельницький: ХНУ, 2015. – 318 с.

21 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.

22 Wołowiec E. Methods of data mining for modelling of low-pressure heat treatment / Journal of Achievements in Materials and Manufacturing // Engineering. 2017. V. 85. № 1. P. 31–40.

23 Sharma G.K., Pant P., Jain P.K., Kankar P.K., Tandon P. (2022). Numerical and experimental analysis of heat transfer in inductive conduction based wire metal deposition process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 236, no. 5, pp. 2395-2407.

24 Bao L., Wang B., You X., Li H., Gu Y., Liu W. (2020). Numerical and experimental research on localized induction heating process for hot stamping steel sheets. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 151, art. no. 119422.

25 Xiaohu D., Dong-ying Ju, Min L. (2017). Finite Element Modeling and Experimental Verification of Nitriding Process in S30C Steel. Materials Research. 20. 10.1590/1980-5373-mr-2016-0531.

26 Ткаченко І. Г., Антоненко, Н. М., & Морозов, Ю. В. (2020). Плоска задача теплопровідності для багатосарової основи з неідеальним тепловим контактом між шарами. Computer Science and Applied Mathematics, (1), 93-99.

					<i>MPTAM 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		94

27 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.

28 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.

29 Manuel E., Antonio J., Cenicerros 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.

30 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.

					<i>MPTAM 24 23608. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		95



МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛОТРАТУ У КАМЕРІ ПРИ АЗОТУВАННІ

Колісник Р. В.¹, Драв І. В.², Бабак О. П.³, Вичевка А. А.⁴
 Хмельницький національний університет, Україна
 E-mail: ¹r.kolisnik@knu.edu.ua, ²idrav@knu.edu.ua,
³babak@knu.edu.ua, ⁴vychevka@knu.edu.ua

Застосування різноманітних типів зносостійких та антифрикційних покриттів дає можливість збільшити термін служби та надійність роботи деталей машин та інструментів [1, 2]. Дифузійні шари, отримані за допомогою азотування, є цікавими із погляду технологічності процесу. Цей метод хіміко-термічної обробки (ХТО) може проводитись у різних агрегатних станах робочого середовища, а виробі після азотування не потребують додаткової термічної обробки. Процес азотування дозволяє отримати покриття із високими фізико-механічними властивостями [3].

Метод газового азотування відрізняється простотою виконання, легкістю регулювання будови та складу дифузійного шару, можливістю автоматизації процесу [4]. Газове азотування із застосуванням індукційного нагрівання проводять у герметичній неметалевій камері, яка міститься в індукторі. Збільшення продуктивності процесу азотування подає в утворенні та оновленні активних атомів азоту локально біля оброблюваної поверхні. Активізація азоту прискорюється під впливом високочастотного електромагнітного поля [5].

Використання моделювання методом скінчених елементів процесу ХТО зразків з інструментальної сталі має на меті встановлення температурної області ефективного дифузії азоту в зразок. Моделювання розподілу фізичних полів дозволяє також встановити оптимальну швидкість струму індуктора, за допомогою якого будуть дотримуватись певні теплові режими; візуальне уявлення локального прогріву зразка при обробці його робочої зони [6].

У статті визначено основні етапи моделювання та надано аналіз результатів комп'ютерного моделювання процесу хіміко-термічної обробки зразків з інструментальної сталі.

I етап моделювання – визначення основних характеристик системи індуктор – камера – зразок. Швидкість та рівномірність нагріву до необхідної температури залежить від великої кількості змінних факторів. Основні фактори можна згрупувати як електричні; електро- та теплофізичні; просторово-часові [7].

II етап – постановка задачі при моделюванні процесів, що відбуваються під час нагрівання струмами високої частоти (ТВЧ). Основним завданням моделювання методом скінчених елементів (МСЕ) є визначення: температурного поля в зоні знаходження азотовмісного середовища (в експерименті технічно неможливо визначити таку температуру); кінетики нагріву та змін температурних полів на поверхні камери для подальшого зіставлення результатів моделювання з експериментальними даними.

Вхідними даними для моделювання є:

- геометричні розміри циліндричного зразка, що нагрівається;
- температура ХТО (планується проводити процес азотування інструментальної сталі за температури до 900 – 1100 °С) [8];
- програмне забезпечення та методика для розрахунку температурних та електромагнітних полів [7].

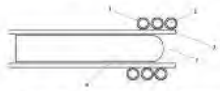


Рис. 1. Геометрична модель камери для ХТО, яка міститься в індукторі:
 1 – індуктор; 2 – вода; 3 – кварцова трубка; 4 – зразок із швидкокорозійної сталі; 5 – азотовмісне середовище



Рис. 2. Модель камери для ХТО із створеною сіткою СЕ:
 I – робоча зона зразка;
 II – середня хвостовика зразка;
 III – хвостовик зразка

III етап: побудова спрощеної геометричної моделі системи індуктор – камера – зразок (рис.1), визначення граничних умов, характеристик матеріалів. Модель індуктора має три витки: зовнішній діаметр мідної трубки 64 мм при товщині стінки 0,7 мм. Охолоджувальна рідина – дистильована вода. Кварцова камера трубчастого типу є муфелем та електроізоляційним матеріалом між

індуктором та зразком. Її внутрішній діаметр перевищує діаметр зразка та становить 20 мм при товщині стінки 1,5 мм, довжина 180 мм. Металевий зразок розташований у центрі системи.

Розбиття геометричної моделі сіткою скінчених елементів (рис. 2) дає можливість автоматично розрахувати вихідні параметри: температуру, тепловиділення, густина струму [9].

Для математичної моделі початковими даними є електро- та теплофізичні властивості матеріалів системи індуктор – камера – зразок (мідь (1), вода (2), кварц (3), інструментальна сталь марки Р6М5 (4), азот (5)) [8]. Граничні умови задачі електродинаміки: нульова величина дотичної напруги на зовнішній поверхні металевого зразка та внутрішній поверхні трубчастого індуктора; на межі розрахунку потенціалу вектор магнітного поля та фазовий зсув дорівнюють нулю.

Для задачі теплопровідності (нестационарної теплопередачі) даними є: коефіцієнт теплопровідності; питома теплоємність; густина матеріалу. У моделі врахована залежність коефіцієнта теплопровідності та питомої теплоємності від температури [8] для мітки «Інструментальна сталь». Вхідними параметрами, підібраними експериментальним шляхом, є: сила струму на індукторі 3,1 кА, а частота струму 108000 Гц. Тривалість комп'ютерного моделювання становить 400 с; крок розрахункових точок 10 с. Визначивши момент початку виходу температури на стаціонарний режим, можна стверджувати, що знайдена величина сили струму буде достатньою для нагрівання виробу до заданої температури.

IV етап: розв'язання задачі електродинаміки та теплопровідності для системи індуктор – камера – зразок при обробці ТВЧ – визначення характеру розподілу та графічний розв'язок у вигляді карт ліній густини струмів та об'ємної густини тепловиділення.

V етап – аналіз розв'язків. Для заданих параметрів моделі електродинаміки отримано: найбільша густина струму ($0,7 \cdot 10^8$ А/м²) досягається на зовнішній частині індуктора, яка знаходиться ближче до камери, що нагрівається; на поверхні зразка спостерігається підвищення густини струму ($2 \cdot 10^8$ А/м²), що пояснюється скін-ефектом при проникненні змінного магнітного поля вглиб зразка; оскільки провідність азоту, дистильованої води і кварцу в розрахунках не враховується, то в дію цих компонентів системи майже нульове значення густини струму. Таким чином, можна припустити, що під дією вихрових струмів зразок, що міститься в центральній частині камери, буде сильно нагріватися (рис. 3, тонкими лініями показані біотермічні рівня магнітного потенціалу).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

Метою теплового розрахунку є визначення об'ємної густини тепловиділення. Одержали: найбільша кількість тепла ($6.3 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^3$) виділяється на поверхні зразка (спостерігається почастищення ліній тепловиділень, що говорить про виникнення шкі-шару) та в центральній зоні камери в азотовмісному середовищі, де міститься зразок. З рис. 4 на прикінцевому моменті часу видно, що кількість тепловиділення на поверхневому шарі зразка на порядок вища, ніж усередині камери. Така нерівномірність тепловиділення пов'язана з особливостями процесу індукційного нагрівання ТВЧ (повнад 100 кГц). Очевидно, високе тепловиділення в азотовмісному середовищі пов'язане з перевипромінюванням змінного поля всередину системи, що нагрівається.



Рис. 3. Розподіл густини струму у системі індуктор – камера – зразок при силі струму 3,1 кА у прикінцевий момент часу



Рис. 4. Розподіл об'ємної густини тепловиділення у системі індуктор – камера – зразок при силі струму 3,1 кА у прикінцевий момент часу

Для заданих значень сили струму та фіксованої частоти на індукторі, зазначених початкових та граничних умов з урахуванням теплових втрат на конвекцію та випромінювання розв'язками задачі теплопровідності є карти розподілу температури, зокрема, на прикінцевому моменті часу (рис. 5). Цей розв'язок показує, що температура поверхневого шару зразка перевищує температуру його плавлення. Однак, в експерименті таке явище не спостерігається. Таким чином, при нагріванні матеріалу крім відомих теплових втрат на конвекцію та випромінювання діє тепловий стік іншої природи. Ймовірно, що при нагріванні зразка відбуваються процеси утворення нових фаз (хімічних сполук – оксидів, нітридів та твердих розчинів проникнення кисню в метал) та зміна структури (зростання кристалічних зерен) [8].

Розв'язок задачі тепловиділення з урахуванням теплових втрат на процеси ХТО має вигляд параболічних кривих з ділянками насичення. Найбільший інтерес становлять графіки для периферії зразка в області максимальної напруженості поля (у центрі котушки

індуктора) (рис. 6, крива I). Крива I характеризується значно більшою швидкістю нагріву до максимальної температури.

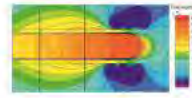


Рис. 5. Модель розподілу температури у системі індуктор – камера – зразок при силі струму 3,1 кА у прикінцевий момент часу

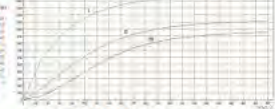


Рис. 6. Графіки кінетики нагріву системи індуктор – камера – зразок при силі струму 3,1 кА: I – крива залежності у робочій зоні зразка; II – крива залежності у середній хвостовика зразка; III – крива залежності на кінці хвостовика

Таким чином, в ході моделювання МСЕ отримані розв'язки задач електродинаміки та теплопровідності для системи індуктор – камера – зразок, які описують кінетику нагріву при операції ХТО зразка зі швидкорізальної сталі. Основними впливовими чинниками в моделі є: сила струму на індукторі, зміни тепло- та електрофізичних властивостей сталі та теплових втрат, викликаних конвекцією, випромінюванням, процесом азотування сталевого зразка. Встановлено, що на поверхні зразка в ділянках його робочої зони спостерігається підвищення температури на 200 – 300 °С. При струмі 3,1 кА досягається максимальна температура (1470 °С) і найбільший градієнт швидкості нагрівання цієї ділянки зразка (400 °С). При нагріванні теплові втрати збільшуються до 1500 °С, після цієї точки спостерігається незначне зростання теплових втрат.

Література

1. Shepelenko I. (2021). Technological factors influence on the anti-fretting coatings quality. *Problems of Tribology*, 26(2/100), 50–57.
2. Mortimer J., Rudnev V., Clowes D., Shaw B. (2019) Intricacies of Induction Heating of Wires, Rods, Ropes & Cables. *Wire Forming Technology International*, 1/2019, pp. 46-50.
3. Toboła D., Brostow W., Czechowski K., Rusek P. (2017). Improvement of wear resistance of some cold working tool steels. *Wear*. Vol. 382-383. P. 29 – 39.

Колісник Р. В., Драч І. В., Бабак О. П., Вичавка А. А. (2024). Моделювання процесів електродинаміки та тепловтрат у камері при азотуванні. Збірник праць XIX Міжнародної наукової конференції "Сучасні досягнення в науці та освіті", 29 вересня - 6 жовтня 2024 р., м. Нетанія (Ізраїль). – Хмельницький : ХНУ, С. 79 – 84. <https://elar.khmnmu.edu.ua/handle/123456789/16894>



									Арк.
									97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	MPTAM 24 23608. 000 ПЗ				

Додаток Б

Презентаційний матеріал

Кафедра трибології, автомобілів
і матеріалознавства

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КІНЕТИКИ НАГРІВУ ПРИ ХІМІКО-ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СТАЛІ Р6М5

Виконав : студент групи МТВАм-23-1
Роман Колісник

Керівник : д.т.н., доцент Ілона Драч

Об'єкт дослідження – процеси термохімічної обробки інструментальної сталі в азотовмісному середовищі.

Предмет дослідження – моделювання процесів кінетики нагріву та нарощення азотовмісного шару при хіміко-термічній обробці інструментальної сталі Р6М5.

Мета дослідження – визначення залежності глибини азотованого шару і поверхневої твердості від значень температури і тривалості хіміко-термічної обробки сталі при азотуванні.

2

Завдання дослідження :

- 1) аналіз існуючих технологій, що покращують експлуатаційні властивості виробів;
- 2) моделювання методом скінченних елементів термічних режимів процесу хіміко-термічної обробки зразків із швидкорізальної сталі;
- 3) розробка методики і плану проведення експериментальних робіт та дослідження структури і фізико-механічних властивостей зміцнених зразків;
- 4) розробка залежностей зміни твердості від температури і тривалості обробки струмами високої частоти, а також від вмісту азоту в поверхневому шарі зразків;
- 5) моделювання зростання глибини азотованого шару сталі Р6М5, як функції температури та часу азотування. Перевірка моделі шляхом порівняння розрахованої глибини азотованого шару з експериментально визначеною при різних температурах та тривалості азотування.

3

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ

Арк.

98

Результати аналізу предметної області

1. Інструменти зі швидкорізальної сталі використовують для ремонту й обробки металевих компонентів автомобілів, адже сталь Р6М5 добре витримує навантаження та високу температуру під час експлуатації.
2. Процес азотування зразків із швидкорізальної сталі призводить до помітного зміцнення поверхневого шару.
3. Встановлено, що в результаті термохімічної обробки на поверхні зразку утворюються нітриди металів, що мають високу твердість.
4. На твердість поверхневого шару має вплив температура та тривалість витримки зразків.
5. Методи моделювання процесів, пов'язаних з термічною та хіміко-термічною обробкою матеріалів, класифікуються на дві основні групи: фізичні та статистичні. Фізичні методи засновані на фундаментальних законах і теоріях, тоді як статистичні застосовуються у випадках з недостатньою інформацією про процес та за необхідності аналізу великих обсягів даних.

4

Моделювання розподілу фізичних полів методом скінченних елементів

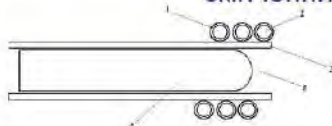


Рис. 1. Геометрична модель камери для ХТО, яка міститься в індукторі:
1 – індуктор; 2 – вода; 3 – кварцова трубка; 4 – зразок із швидкорізальної сталі; 5 – азотовмісне середовище



Рис. 2. Модель камери для ХТО із створеною сіткою СЕ:
I – робоча зона зразка;
II – середина хвостовика зразка;
III – хвостовик зразка

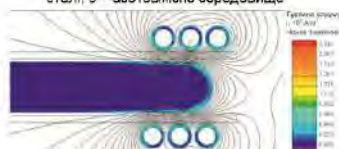


Рис. 3. Розподіл густини струму у системі індуктор – камера – зразок при силі струму 3,1 кА у прикінцевий момент часу

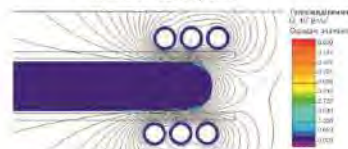


Рис. 4. Розподіл об'ємної густини тепловиділення у системі індуктор – камера – зразок при силі струму 3,1 кА у прикінцевий момент часу

5

Результати моделювання розподілу фізичних полів методом скінченних елементів

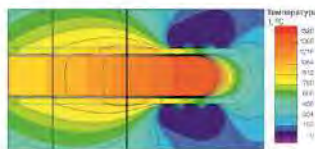


Рис. 5. Модель розподілу температури у системі індуктор – камера – зразок при силі струму 3,1 кА у прикінцевий момент часу

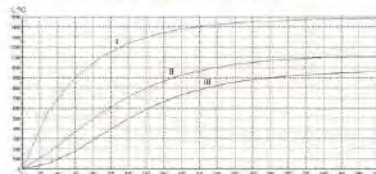


Рис. 6. Графіки кінетики нагріву системи індуктор – камера – зразок при силі струму 3,1 кА: I – крива залежності у робочій зоні зразка; II – крива залежності у середині хвостовика зразка; III – крива залежності на кінці хвостовика

-отримані розв'язки задач електродинаміки та теплопровідності для системи індуктор – камера – зразок;
-встановлено, що на поверхні зразка в ділянках його робочої зони спостерігається підвищення температури на 200 – 300 °С. При струмі 3,1 кА досягається максимальна температура (1470 °С) і найбільший градієнт швидкості нагрівання цієї ділянки зразка (400 °С);
-при нагріванні теплові втрати збільшуються до 1500 °С, після цієї точки спостерігається незначне зростання теплових втрат.

6

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

MPTAM 24 23608. 000 ПЗ

Арк.

99

Результати верифікації моделі розподілу фізичних полів

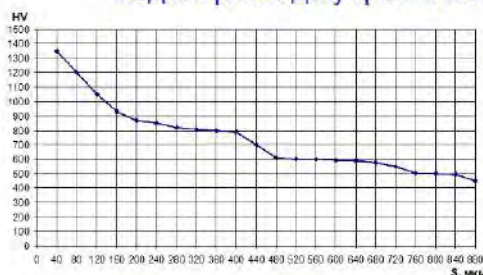


Рис. 7 Графік залежності твердості зразків, отриманих у лабораторних умовах, від глибини вимірювання (навантаження на індентор Віккерса складо 100гс)

- Діапазон температур для ХТО становив від 1100 °С до 1400 °С при незмінному часі витримки при заданій температурі.
- За отриманими даними твердості можна зробити висновок, що висока твердість (> 20 ГПа) спостерігається при температурному діапазоні 1250-1400 °С.
- Ця температура є оптимальною для підвищення фізико-механічних властивостей швидкорізальної сталі марки Р6М5.

7

Математичне моделювання росту азотованого шару сплаву Р6М5



Перший закон Фіка для дифузії азоту:

$$J_i = -D_i \frac{\partial N_i(x,t)}{\partial x}$$

де $i = \alpha, \gamma$.

Загальна товщина шару нітриду:

$$\lambda = \lambda\gamma' + \lambda\epsilon,$$

Рис. 8 – Структура росту азотованого шару, сформована на інструментальній сталі

$$\lambda_\alpha = \sqrt{(4D_\alpha - 0.2D_\gamma)t}$$

$$\lambda_\gamma \approx 0.5 \left[-(b_\alpha + 0.02\sqrt{D_\alpha}) + \sqrt{(b_\alpha + 0.02\sqrt{D_\alpha})^2 + 0.2D_\gamma} \right] \sqrt{t}$$

де J_i – це потік азоту, D_i – коефіцієнт дифузії азоту, а N_i – концентрація азоту в i -фазі

Результати порівняння теоретичної (змодельованої) і емпіричної товщини азотованого шару інструментальної сталі Р6М5: найбільша різниця в розрахунковій товщині порівняно з експериментальною (зафіксованою) для азотованого шару сталі Р6М5 становить до 8 мкм для іонноазотованих зразків та 0,037 мм для газозазотованих зразків.

8

Висновки

Моделювання розподілу фізичних полів методом скінченних елементів дозволило:

- 1) встановити оптимальну силу струму індуктора, за допомогою якого будуть дотримуватися підібрані теплові режими;
 - 2) одержати візуальне уявлення локального прогріву робочої зони обробки зразку;
 - 3) провести адекватний аналіз стаціонарних та динамічних станів об'єкта, що вивчається:
 - модель має за основу розв'язки задач електродинаміки та теплопровідності для системи індуктор – камера – зразок, які описують кінетику нагріву при операції ХТО зразка зі швидкорізальної сталі;
 - в моделі враховано: силу струму на індукторі, зміни тепло- та електрофізичних властивостей сталі та теплові втрати, викликані конвекцією, випромінюванням, процесом азотування сталевого зразка;
 - отримані результати теплових і температурних полів показують, що при нагріванні максимальна температура зразка, що обробляється, 1470 °С досягається при струмі 3,1 кА; найбільший градієнт швидкості нагрівання ділянок зразка у моделюванні становить 400 °С, а при виході на режим витримки різниця температур не перевищувала 200 °С;
- Експериментально встановлено**, що на твердість поверхневого шару має вплив температура та тривалість витримки зразків: висока твердість (> 20 ГПа) спостерігається при температурному діапазоні 1250 - 1400 °С. Ця температура є оптимальною для підвищення фізико-механічних властивостей швидкорізальної сталі марки Р6М5.
- Аналітичне моделювання глибини азотованого шару інструментальної сталі Р6М5** дозволило спрогнозувати очікувану товщину азотованого шару при газовому та іонному азотуванні швидкорізальної сталі.

9

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
------	------	----------	--------	-----

МРТАМ 24 23608. 000 ПЗ

Арк.

100