

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Оксана ГАПОНОВА

« ___ » _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності _____ 132 Матеріалознавство
освітньо-професійної програми _____ «Прикладне матеріалознавство»

на тему: «Дослідження закономірностей і механізмів формування тонких модифікованих шарів у сталях при іонно-плазмовому азотуванні»

Здобувача групи _____ МТ.м-21/2 _____ Хвостенка Ростислава Олександровича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Ростислав ХВОСТЕНКО

Керівник _____
доцент кафедри ПМ і ТКМ,
к.ф.-м.н., доц. Тетяна ГОВОРУН _____

Нормоконтроль _____
доцент кафедри ПМ і ТКМ
к.т.н., доц. Андрій ДЕГУЛА _____

Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра «Прикладне матеріалознавство та технології конструкційних матеріалів»
зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ О. П. Гапонова

«__» _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Хвостенку Ростиславу Олександровичу

1. Тема проекту (роботи) Дослідження закономірностей і механізмів формування тонких модифікованих шарів у сталях при іонно-плазмовому азотуванні затверджена наказом по університету від “09” листопада 2023 р.№ 1254-VI

2. Термін здачі студентом закінченого проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) зразки сталей Р6М5 та Р6М5К5 для проведення досліджень модифікування їх поверхонь при іонно-плазмовому азотуванні

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

1. Аналіз джерел за темою диплома.

2. Загальна методика та основні методи досліджень.

3. Експериментальні дослідження та узагальнення результатів механізмів формування тонких модифікованих шарів у сталях при іонно-плазмовому азотуванні.

4. Економічна частина.

5. Охорона праці, довкілля та техніка безпеки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Матеріал для захисту оформлено у вигляді презентації. Креслення відсутні.

6. Консультанти з проекту (роботи), із значенням розділів проекту, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці, довкілля і техніка безпеки	Говорун Т. П.	06.11.2023	08.12.2023
Економічна частина	Берладір Х. В.	06.11.2023	11.12.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пор.	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз джерел за темою диплома	Листопад 2023	Виконано
2	Загальна методика та основні методи досліджень	Листопад 2023	Виконано
3	Експериментальні дослідження та узагальнення результатів механізмів формування тонких модифікованих шарів у сталях при іонно-плазмовому азотуванні	Листопад 2023	Виконано
4	Економічна частина	Листопад 2023	Виконано
5	Охорона праці, довкілля, та техніка безпеки	Грудень 2023	Виконано

7. Дата видачі завдання _____

Студент _____

(підпис)

Керівник проекту _____

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Хвостенко Ростислав Олександрович. Дослідження закономірностей і механізмів формування тонких модифікованих шарів у сталях при іонно-плазмовому азотуванні. – Рукопис.

Робота на здобуття кваліфікації магістра зі спеціальності 132 – Матеріалознавство. – Сумський державний університет, Суми, 2023.

В роботі було досліджено вплив тонких модифікованих шарів у сталях Р6М5 та Р6М5К5 при іонно-плазмовому азотуванні, проаналізовано структурно-фазовий склад покриттів залежно від умов отримання, визначено основні властивості покриттів після іонно-плазмового азотування, охарактеризовано передумови і можливості застосування тонких модифікованих нітридних покриттів.

Дослідження дозволило розширити розуміння процесів формування тонких модифікованих шарів у сталей Р6М5 і Р6М5К5 під час іонно-плазмового азотування, що відкриває перспективи для подальших досліджень у цій області з метою оптимізації технологій обробки сталей для підвищення їхньої міцності та зносостійкості.

Детальне вивчення процесів формування модифікованих шарів та властивостей матеріалів покриттів дозволить подальшу оптимізацію технологічних процесів і покращення якості кінцевих продуктів з використанням сталей Р6М5 і Р6М5К5. Дані дослідження можуть слугувати основою для подальших досліджень у галузі покращення металевих виробів та розвитку високоефективних інноваційних технологій. Це може знайти практичне застосування в різних промислових секторах, де вимагаються високоякісні матеріали з покращеними властивостями.

Ключові слова: швидкорізальна сталь, іонно-плазмово азотування, мікроструктура, мікротвердість, твердість, зносостійкість.

ABSTRACTS

Khvostenko Rostyslav Oleksandrovysh. Study of regularities and mechanisms of formation of thin modified layers on steel during ion-plasma nitriding.

Qualifying paper for obtaining the qualification of master's degree in the specialty 132 – materials science. – Sumy State University, Sumy, 2023.

The paper investigated the effect of thin modified layers in P6M5 and P6M5K5 steels during ion-plasma nitriding, analyzed the structural-phase composition of coatings depending on the conditions of production, determined the main properties of coatings after ion-plasma nitriding, characterized the prerequisites and possibilities of using thin modified nitride coatings.

The study made it possible to expand the understanding of the processes of formation of thin modified layers in P6M5 and P6M5K5 steels during ion-plasma nitriding, which opens up prospects for further research in this area with the aim of optimizing steel processing technologies to increase their strength and wear resistance.

A detailed study of the processes of formation of modified layers and properties of coating materials will allow further optimization of technological processes and improvement of the quality of final products using P6M5 and P6M5K5 steels. The research data can serve as a basis for further research in the field of improvement of metal products and the development of highly effective innovative technologies. This can find practical applications in various industrial sectors where high-quality materials with improved properties are required.

Keywords: high-speed steel, ion-plasma nitriding, microstructure, microhardness, hardness, wear resistance.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить в собі 97 сторінок, у тому числі 23 рисунків, 13 таблиць, бібліографії із 42 джерел на 4 сторінках.

Метою роботи є дослідження особливостей структуро- і фазоутворення швидкорізальних сталей під час іонно-плазмового азотування для визначення режимів поверхневої обробки, що забезпечує підвищення довговічності інструменту.

Об'єктом дослідження є тонкі модифіковані шари на сталях Р6М5 і Р6М5К5, отримані іонно-плазмовим азотуванням.

Предметом дослідження є особливості процесу формування тонких модифікованих шарів на сталях Р6М5 і Р6М5К5 при проведенні іонно-плазмового азотування.

Методи дослідження. У дослідженні використовуються наступні методи аналізу структури, зокрема металографічний аналіз, рентгенівська дифракція та рентгеноструктурний аналіз, мікроскопія поверхні, вимірювання мікротвердості, механічні та трибологічні властивості отриманих шарів.

Наукова новизна полягає в наступному. Дослідження показали, що оптимальна товщина покриття становить близько 25-40 мікрон, що забезпечує необхідну стійкість до зношування. Аналіз мікроструктури показав однорідну структуру покриття без виявлених дефектів, що підтверджує високу якість отриманих шарів. Після іонно-плазмового азотування мікротвердість поверхні сталей Р6М5 і Р6М5К5 зростає і складає 10 - 12 ГПа. Основним фактором, що впливає на підвищення мікротвердості сталей Р6М5 і Р6М5К5, є утворення азотистого мартенситу і дисперсного нітриду Fe_4N (γ' -фаза), а також формування дрібнодисперсних включень зміцнювальних фаз у поверхневих шарах.

Ключові слова: швидкорізальна сталь, іонно-плазмове азотування, мікроструктура, мікротвердість, твердість, зносостійкість.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1	14
АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДИПЛОМА	14
1.1 Актуальність дослідження механізмів формування тонких модифікованих шарів у сталей при іонно-плазмовому азотуванні.....	14
1.2 Класифікація методів зміцнення поверхні в контексті іонно-плазмового азотування сталей.....	15
1.3 Вакуумні методи отримання покриттів для вивчення тонких модифікованих шарів у сталях при іонно-плазмовому азотуванні: коротка характеристика.....	18
1.3.1 Радіочастотне магнетронне напилення для формування тонких модифікованих шарів у сталях при іонно-плазмовому азотуванні.....	21
1.3.2 Іонно-променевий метод для формування тонких модифікованих шарів у сталях при іонно-плазмовому азотуванні.....	24
1.3.3 Плазмово-дуговий метод для формування тонких модифікованих шарів у сталях при іонно-плазмовому азотуванні.....	30
1.3.4 Метод розпилення в іонно-плазмовому середовищі для формування тонких модифікованих шарів у сталях під час іонно-плазмового азотування	33
1.3.5 Термічне напилення у газовому розряді для формування тонких модифікованих шарів у сталях під час іонно-плазмового азотування	35
1.4 Характеристики і властивості покриттів, отриманих методом фізичного осадження з парової фази (PVD) для дослідження формування тонких модифікованих шарів у сталях при іонно-плазмовому азотуванні.....	36
1.5 Вплив нітридних покриттів на формування тонких модифікованих шарів у сталях під час іонно-плазмового азотування.....	38
Висновки	40
РОЗДІЛ 2	41
ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	41
2.1 Матеріали для проведення дослідження.....	41
2.2 Способи поліпшення поверхневого шару швидкорізальних сталей	46
2.3 Опис технологічного процесу іонного азотування та специфікація обладнання	47
2.4 Установка для іонно-плазмового азотування.....	49
2.5 Методики досліджень	51

2.5.1 Металографічний аналіз	51
2.5.2 Методика визначення мікротвердості.....	52
2.5.3. Методика визначення фазового складу	53
2.5.4 Визначення триботехнічних властивостей сталей.....	54
Висновки	56
РОЗДІЛ 3	57
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МЕХАНІЗМІВ ФОРМУВАННЯ ТОНКИХ МОДИФІКОВАНИХ ШАРІВ У СТАЛЯХ ПРИ ІОННО-ПЛАЗМОВОМУ АЗОТУВАННІ.....	57
3.1 Критерії відбору та оцінки покриттів для аналізу формування тонких модифікованих шарів у сталей під час іонно-плазмового азотування	57
3.2 Види матеріалів покриттів та їх властивості при формуванні тонких модифікованих шарів на сталях під час іонно-плазмового азотування	60
3.3.1 Дослідження структури, морфологічних особливостей та рентгеноструктурний аналіз азотованих покриттів у процесі формування тонких модифікованих шарів на високолегованих сталях Р6М5 і Р6М5К5 під час іонно-плазмового азотування	62
3.3.2 Вплив різних параметрів процесу нанесення покриттів шляхом іонно-плазмового азотування на мікротвердість сталей Р6М5 і Р6М5К5	69
3.3.3 Аналіз зносу та тертя азотованих покриттів при формуванні тонких модифікованих шарів у сталей під час іонно-плазмового азотування	76
3.3.4 Систематизація результатів досліджень покриттів та їх впливу на формування тонких модифікованих шарів у сталях Р6М5 і Р6М5К5 під час іонно-плазмового азотування	78
Висновки	81
РОЗДІЛ 4	84
ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	84
Висновки	86
РОЗДІЛ 5	87
ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ	87
5.1 Загальні заходи з охорони праці	87
5.2 Вимоги до особистого захисту працівників	88
5.3 Вимоги до професійної підготовки працівників.....	88
5.4 Контроль за використанням захисних засобів	89

5.5 Значення безпеки та екологічної відповідальності в індустрії.....	90
Висновки	92
ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	94

ВСТУП

В сучасній промисловості постійно зростає потреба у поліпшенні механічних та фізико-хімічних властивостей сталевих матеріалів для забезпечення їх тривалої та ефективної експлуатації у вимогливих умовах.

Одним із прогресивних методів для досягнення цієї мети є іонно-плазмове азотування, яке дозволяє формувати тонкі модифіковані шари на поверхні сталі з метою покращення властивостей.

Успішне застосування іонного азотування в різних галузях промисловості, таких як автомобільна, аерокосмічна, медична та виробництво інструментів, підтверджує його важливість для забезпечення високої якості, надійності та тривалості служби металевих виробів. Іонно плазмове азотування є передовою технологією поверхневого зміцнення сталей. Порівняно з іншими способами хіміко-термічної обробки, іонні технології дають змогу розв'язувати задачі зміцнення деталей та інструментів на принципово новому технічному рівні.

Актуальність досліджень. Дослідження має важливе значення у вирішенні проблеми покращення механічних та трибологічних властивостей інструментальних швидкорізальних сталей Р6М5 і Р6М5К5 через оптимізацію процесу іонно-плазмового азотування та дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень. Це може знайти практичне застосування в різних промислових секторах, де вимагаються високоякісні матеріали з покращеними властивостями.

Це дослідження також має важливе значення для розширення наукового розуміння процесів, що відбуваються під час іонно-плазмового азотування сталей та їх впливу на властивості матеріалів. Результати цієї роботи можуть знайти практичне застосування у вдосконаленні технологій обробки та покращенні характеристик сталевих матеріалів для широкого спектра промислових застосувань.

Об'єктом дослідження є тонкі модифіковані шари на сталях Р6М5 і Р6М5К5, отримані іонно-плазмовим азотуванням.

Предметом дослідження є особливості процесу формування тонких модифікованих шарів на сталях Р6М5 і Р6М5К5 при проведенні іонно-плазмового азотування.

Метою роботи є дослідження особливостей структуро- і фазоутворення швидкорізальних сталей під час іонно-плазмового азотування для визначення режимів поверхневої обробки, що забезпечує підвищення довговічності інструменту.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити **наступні завдання**:

- вивчити процеси формування тонких модифікованих шарів у сталях Р6М5 і Р6М5К5 під час іонно-плазмового азотування;
- провести аналіз структурно-фазових перетворень у сталях під час іонно-плазмового азотування;
- оцінити вплив структурно-фазового стану модифікованих шарів на механічні та трибологічні властивості сталі Р6М5 і Р6М5К5.

Методи дослідження. У дослідженні використовуються наступні методи аналізу структури, зокрема металографічний аналіз, рентгенівська дифракція та рентгеноструктурний аналіз, мікроскопія поверхні, вимірювання мікротвердості, механічні та трибологічні властивості отриманих шарів.

Очікувані результати цього дослідження мають на меті виявлення нових знань щодо процесу формування тонких модифікованих шарів у сталей Р6М5 і Р6М5К5 під час іонно-плазмового азотування, а також встановлення зв'язку між структурно-фазовим станом цих шарів та механічними й трибологічними властивостями.

Сформована структура роботи передбачає розділи, присвячені теоретичним відомостям щодо процесу іонно-плазмового азотування та його впливу на сталі, огляду попередніх досліджень у цій галузі, методології дослідження, аналізу отриманих результатів та висновків, що випливають з проведених досліджень.

Після огляду літературних джерел та розгляду попередніх досліджень, у цій роботі буде проведений детальний аналіз отриманих результатів експериментів, який дозволив з'ясувати основні закономірності формування тонких

модифікованих шарів у сталях P6M5 і P6M5K5 під час іонно-плазмового азотування.

Очікується, що дане дослідження принесе нові уявлення про механізми дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень у матеріалах, що піддаються іонно-плазмовому азотуванню, зокрема вплив на інструментальні швидкорізальні сталі P6M5 і P6M5K5.

Структура роботи передбачає наступні розділи: у першому розділі надається огляд теоретичних аспектів іонно-плазмового азотування та важливості його застосування в промислових технологіях. Другий розділ присвячений характеристиці досліджуваних сталей P6M5 і P6M5K5, методології дослідження, включаючи опис використаних методів аналізу та експериментальних підходів.

У третьому розділі подаються результати проведеного дослідження, які проаналізовані та систематизовані з урахуванням попередніх наукових відомостей. У четвертому розділі дослідження була розглянута економічна частина, де висвітлюються економічні переваги або ефективність застосування виявлених закономірностей і механізмів. У п'ятому розділі розглянуто аспекти охорони праці, довкілля та техніки безпеки у контексті дослідження закономірностей формування тонких модифікованих шарів у сталях P6M5 і P6M5K5 при іонно-плазмовому азотуванні.

Наукова новизна полягає в наступному. Дослідження показали, що оптимальна товщина покриття становить близько 25-40 мікрон, що забезпечує необхідну стійкість до зношування. Аналіз мікроструктури показав однорідну структуру покриття без виявлених дефектів, що підтверджує високу якість отриманих шарів. Після іонно-плазмового азотування мікротвердість поверхні сталей P6M5 і P6M5K5 зростає і складає 10 - 12 ГПа. Основним фактором, що впливає на підвищення мікротвердості сталей P6M5 і P6M5K5, є утворення азотистого мартенситу і дисперсного нітриду Fe_4N (γ' -фаза), а також формування дрібнодисперсних включень зміцнювальних фаз у поверхневих шарах.

Особистий внесок: Дослідження включає особистий внесок у виявлення нових закономірностей, розробку та впровадження методів аналізу, а також

інтерпретацію результатів, що сприяє розвитку наукового розуміння та вирішенню практичних проблем.

Публікації та тези конференцій: Результати дослідження були представлені на конференції.

Структура й обсяг кваліфікаційної роботи магістра. Робота складається із вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел. Повний обсяг кваліфікаційної роботи магістра становить 97 сторінок, у тому числі 23 рисунків, 13 таблиць, бібліографії із 42 джерел на 4 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДИПЛОМА

1.1 Актуальність дослідження механізмів формування тонких модифікованих шарів у сталей при іонно-плазмовому азотуванні

Дослідження механізмів формування тонких модифікованих шарів у сталей при іонно-плазмовому азотуванні має важливе практичне значення для вирішення проблем зносу, корозії та інших аспектів експлуатації сталевих конструкцій, особливо в умовах агресивних середовищ [1].

Тому магістерська наукова робота має значний потенціал у цьому напрямку, оскільки зосереджується на дослідженні закономірностей та механізмів структурно-фазових перетворень у сталей під час іонно-плазмового азотування при низьких температурах. Це може виявитися корисним для покращення механічних, трибологічних та фізико-хімічних властивостей сталі Р6М5, зокрема її зносостійкості та міцності. З огляду на широке застосування сталей у різних галузях промисловості, включаючи машинобудування, автомобільну та авіаційну промисловість, виробництво інструментів, таке дослідження може мати практичне значення і стати основою для подальших технологічних розробок у цій галузі [2].

Такі дослідження допоможуть розширити розуміння процесів азотування сталей та його впливу на їх властивості, що може привести до покращення якості та тривалості експлуатації виробів з цих матеріалів.

Сталі марки Р6М5 і Р6М5К5 - найпоширеніші серед швидкорізальних сталей, що використовується для виготовлення різних типів ріжучого інструменту для обробки різних матеріалів, включаючи сталі, кольорові метали, сплави, чавун, дерево, композиційні матеріали тощо. Склад і властивості швидкорізальної сталі - високолеговані сталі з високим вмістом вольфраму, хрому, молібдену, кобальту, ванадію, де легуючі елементи визначають властивості сталі за рахунок утворення карбідів. Вміст кожного елемента впливає на різні властивості сталі, такі як твердість, теплостійкість, зносостійкість тощо. У підсумку, обробка різанням є

важливим і складним процесом, де вибір інструментальних матеріалів грає вирішальну роль [2].

Інструментальні матеріали повинні мати ряд характеристик, включаючи зносостійкість, твердість, міцність, теплостійкість, теплопровідність, теплоємність, а також сприятливі фрикційні та адгезійні властивості, щоб забезпечити ефективну обробку різанням. Номенклатура інструментальних матеріалів включає леговані і швидкорізальні інструментальні сталі, тверді сплави, різальну кераміку та надтверді матеріали, кожен з яких має свої переваги та обмеження в залежності від конкретного застосування. Швидкорізальна сталь, зокрема сталь марки Р6М5, володіє важливими властивостями для різання, включаючи міцність, зносостійкість, твердість і теплостійкість, що дозволяє використовувати її для обробки різних матеріалів у різних галузях промисловості [1].

Склад швидкорізальної сталі визначається високим вмістом легуючих елементів, таких як вольфрам, хром, молібден, кобальт, ванадій, які впливають на її властивості, включаючи твердість, теплостійкість і зносостійкість. Вибір легуючих елементів визначає компроміс між різними властивостями сталі в залежності від конкретних вимог до інструменту. Усі ці дослідження та вибори матеріалів мають важливе практичне значення для підвищення ефективності обробки різанням, тривалості інструментів і покращення якості виробів у різних галузях промисловості. Розуміння властивостей інструментальних матеріалів і їхніх змін може сприяти подальшим технологічним розробкам та інноваціям у цій галузі [2].

1.2 Класифікація методів зміцнення поверхні в контексті іонно-плазмового азотування сталей

Класифікація методів зміцнення поверхні в контексті іонно-плазмового азотування сталей може включати наступні підходи [3]:

Іонно-плазмове азотування: це самий основний метод зміцнення, який використовується для насичення сталі азотом, що покращує міцність і міцність матеріалу [3].

Термічне оброблення: після іонно-плазмового азотування може бути проведено термічне оброблення для стабілізації структури та отримання бажаних фазових перетворень [3].

Хімічне азотування: окрім іонно-плазмового азотування, існують інші методи азотування, такі як азотування в атмосфері аміаку, які можуть застосовуватися для зміцнення [3].

Вплив азотовмісних сполук: додавання спеціальних реагентів або азотовмісних сполук до процесу азотування може зміцнити ефективність і поліпшити якість шару азоту [3].

Оптимізація параметрів процесу: регулювання параметрів, таких як температура, час, тиск та інші, може впливати на якість і властивості шару азоту.

Механічне оброблення: після азотування може проводитися оброблення поверхні, таке як полірування або обробка, для поліпшення мікрорельєфу та покращення трибологічних властивостей [3].

Аналіз структурно-фазових змін: дослідження мікроструктури та фазових перетворень в матеріалі після азотування є важливою частиною дослідження і може включати методи, такі як мікроскопія, дифракція рентгенівських променів та спектроскопія [3].

Випробування механічних властивостей: дослідження механічних властивостей матеріалу, такі як міцність, твердість і стійкість до зношування, дозволяє оцінити ефективність зміцнення [4].

Трибологічне тестування: випробування на тертя та зношування допомагає визначити, наскільки добре азотований шар працює в умовах трибологічного навантаження.

Фізико-хімічний аналіз: дослідження хімічного складу і поведінки поверхні матеріалу може включати аналіз хімічного складу і поведінки азоту під час експлуатації [4].

Ці методи можуть використовуватися для досягнення мети щодо дослідження іонно-плазмового азотування та впливу структурно-фазового стану на властивості сталей P6M5 і P6M5K5 після цього процесу. Важливо провести

докладний аналіз результатів, щоб зрозуміти закономірності і механізми перетворень та їх вплив на матеріал. Докладний аналіз іонно-плазмового азотування сталей P6M5 і P6M5K5 та його впливу на структурно-фазові та механічні властивості може включати наступні кроки та результати:

Вибір методу азотування: вибір конкретного методу іонно-плазмового азотування та параметрів процесу (температура, час, тиск тощо). Це важливо для отримання бажаних результатів.

Мікроструктурний аналіз: визначення мікроструктури азотованого шару сталі за допомогою мікроскопії, наприклад, скануючої електронної мікроскопії (SEM). Результати можуть вказувати на наявність азотованих фаз і їхню геометричну організацію.

Дифракція рентгенівських променів (XRD): дослідження структури кристалічних фаз у матеріалі після азотування. Вказує на зміни в кристалічній структурі і може допомогти визначити новоутворені фази.

Хімічний аналіз: визначення хімічного складу поверхні азотованого шару за допомогою методів, таких як рентгенівська флуоресценція (XRF) або енергетична дисперсійна рентгенівська спектроскопія (EDS). Це допоможе встановити концентрацію азоту та інших елементів в шарі [3].

Механічні випробування: визначення механічних властивостей сталі, таких як міцність, твердість, в'язкість і стійкість до зношування, які можуть бути значно покращені після азотування.

Трибологічні випробування: визначення зносостійкості та трибологічних властивостей шару під впливом тертя та зношування. Результати допоможуть в оцінці ефективності азотування для покращення трибологічних властивостей.

Фізико-хімічний аналіз зношених поверхонь: дослідження хімічного складу та поведінки азотованого шару після експлуатації для визначення стабільності та зносостійкості [4].

Порівняльний аналіз: порівняння результатів із зразком сталі без азотування для визначення впливу азотованого шару на властивості.

Цей аналіз допоможе зрозуміти закономірності та механізми дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень у сталей при іонно-плазмовому азотуванні та оцінити вплив цього процесу на властивості матеріалу сталей Р6М5 і Р6М5К5 при низькотемпературних умовах [3]. Це допоможе систематизувати отримані дані та легше зрозуміти вплив іонно-плазмового азотування на сталь Р6М5. Заключення дослідження іонно-плазмового азотування сталей Р6М5 і Р6М5К5 в контексті дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень має наступний вигляд:

1.3 Вакуумні методи отримання покриттів для вивчення тонких модифікованих шарів у сталях при іонно-плазмовому азотуванні: коротка характеристика

Вакуумні методи отримання покриттів можуть бути ефективними для вивчення тонких модифікованих шарів у сталей під час іонно-плазмового азотування. У цьому дослідженні [5] стосовно сталей Р6М5 і Р6М5К5 та іонно-плазмового азотування можна розглядати поєднання з іншими вакуумними методами для отримання покриттів.

Фізичне осадження з вакууму (PVD): цей метод дозволяє наносити тонкі покриття на поверхню матеріалу шляхом випаровування чи розпилення матеріалу в вакуумному середовищі. Це може допомогти у формуванні бар'єрних шарів та контролюванні структури покриття [5].

Імплантація іонів (ІІМ): цей метод включає впровадження іонів у поверхневий шар матеріалу, що дозволяє змінювати його хімічний склад та структуру. Він може бути використаний для модифікації поверхневих шарів сталі для досягнення бажаних властивостей.

Хіміко-плазмове осадження (CVD): цей процес використовує хімічні реакції в газовій фазі для відкладення тонких плівок на поверхню матеріалу. Він може бути корисним для отримання шарів з покращеними антикорозійними або термічними властивостями.

Електрофоретичне осадження (EPD): цей метод передбачає використання електричного поля для осадження частинок з розчину на поверхню матеріалу. Він може бути використаний для отримання тонких, однорідних покриттів з високою адгезією до основи.

Молекулярне плавлення або відкладення: цей метод використовує високу температуру для плавлення матеріалу, який потім відкладається на поверхню сталі. Він може бути корисним для отримання гладких, щільних та стійких до корозії покриттів [5].

Обираючи відповідний вакуумний метод, можна досягти бажаних характеристик та структури покриття для дослідження тонких модифікованих шарів сталей P6M5 і P6M5K5 під час іонно-плазмового азотування. Це дозволить вам докладніше дослідити вплив цих шарів на механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості матеріалу. Оптимальна товщина покриття для мого дослідження пов'язана з встановленням оптимального балансу між механічними властивостями шару та його зносостійкістю. Це вимагає уважного підходу до визначення параметрів, що впливають на товщину покриття, для забезпечення оптимальних характеристик покриття [6].

Хімічний склад покриття: важливо визначити, які елементи або сполуки будуть складовою частиною покриття та як це вплине на характеристики сталі.

Мікроструктура покриття: вивчення структури покриття є ключовим аспектом. Деякі методи можуть давати кристалічні, інші аморфні або гранульовані покриття.

Адгезія до основи: важливо враховувати, наскільки добре покриття сприймається матеріалом сталі та наскільки воно стійке.

Механічні властивості: вивчення механічних властивостей покриття, таких як твердість, міцність та еластичність, допоможе зрозуміти, як вони впливають на загальні характеристики матеріалу.

Трибологічні властивості: визначення зносостійкості, коефіцієнта тертя та інших параметрів трибологічної взаємодії між покриттям та основою сталі.

Фізико-хімічні властивості: дослідження хімічного складу та корозійної стійкості покриття [6].

Умови вакууму та процесу: важливо налагодити вакуумні умови та параметри процесу для досягнення бажаних характеристик покриття.

Обираючи конкретний метод, вам слід враховувати мету дослідження та підходи, які найкраще відповідають вашим цілям. Від цього залежатиме вдалий вибір методу та досягнення зазначених мет цього дослідження [6]. Продовжуючи розгляд вакуумних методів отримання покриттів для дослідження тонких модифікованих шарів сталей P6M5 і P6M5K5 під час іонно-плазмового азотування, можна зробити наступні висновки:

Застосування вакуумних методів, таких як фізичне осадження з вакууму (PVD), імплантація іонів (ІМ), хіміко-плазмове осадження (CVD), електрофоретичне осадження (EPD) та молекулярне плавлення або відкладення, може ефективно допомогти у формуванні тонких покриттів з бажаними властивостями на поверхні сталей P6M5 і P6M5K5.

У магістерській науковій роботі я планую дослідити та підтвердити важливість вибору оптимального вакуумного методу для отримання покриттів, а також проаналізувати його вплив на структурно-фазовий стан модифікованих шарів сталі P6M5. Далі метою є виявлення зв'язку між цими параметрами та механічними, трибологічними та фізико-хімічними властивостями цього матеріалу.

Рекомендації для майбутніх досліджень можуть включати глибше вивчення впливу різних вакуумних методів на формування покриттів з покращеними властивостями, оптимізацію умов процесу та подальший аналіз зв'язку між структурою покриття та його властивостями в різних умовах експлуатації. Це дозволить збільшити розуміння впливу вакуумних методів на модифіковані шари сталей P6M5 і P6M5K5 та допоможе в подальшій оптимізації процесу для отримання покриттів з покращеними властивостями для даного матеріалу [5].

1.3.1 Радіочастотне магнетронне напилення для формування тонких модифікованих шарів у сталях при іонно-плазмовому азотуванні

Це дослідження радіочастотного магнетронного напилення для формування тонких модифікованих шарів у сталей під час іонно-плазмового азотування має знаний потенціал для розуміння та оптимізації процесу зміцнення сталі Р6М5 [7].

Робота спрямована на вивчення впливу вакуумних методів на структурно-фазовий стан модифікованих шарів сталі Р6М5, а також на аналіз його впливу на механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості матеріалу. Метою є підтвердження важливості вибору оптимального вакуумного методу для отримання покриттів. Методологія дослідження: робота передбачає застосування радіочастотного магнетронного напилення для нанесення тонких покриттів на сталі Р6М5 під час іонно-плазмового азотування. Цей метод дозволяє забезпечити контроль над структурою та хімічним складом покриття з метою покращення властивостей матеріалу [7].

Закономірності дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень: дослідження націлене на аналіз закономірностей перетворень, які відбуваються в сталях під час іонно-плазмового азотування з використанням радіочастотного магнетронного напилення. Це включає в собі дослідження змін у структурі, фазовому складі та мікроструктурі модифікованих шарів з метою розуміння впливу цих процесів на властивості матеріалу [7].

Вплив на механічні властивості: дослідження також передбачає аналіз впливу структурно-фазового стану модифікованих шарів на механічні властивості сталі Р6М5. Це включає оцінку міцності, твердості, в'язкості та стійкості до зношування з метою розуміння зв'язку між мікроструктурою та механічними характеристиками матеріалу [8].

Результати дослідження можуть бути корисними для покращення властивостей матеріалу, зокрема механічних та трибологічних, і для розробки покращених сталевих виробів [7].

Ефективність радіочастотного магнетронного напилення: Результати дослідження свідчать про високу ефективність використання радіочастотного

магнетронного напилення для отримання тонких модифікованих шарів на поверхні сталі Р6М5 під час іонно-плазмового азотування [8].

Вплив на механічні властивості: Вивчення показало, що модифіковані шари, отримані за допомогою радіочастотного магнетронного напилення, призвели до покращення механічних властивостей, таких як твердість, міцність та стійкість до зношування [8].

Трибологічні характеристики: дослідження виявило, що шари, сформовані за допомогою радіочастотного магнетронного напилення, виявляють покращену зносостійкість та зменшення коефіцієнта тертя, що робить їх відмінним варіантом для виробництва деталей зі зниженим рівнем тертя. Фізико-хімічний аналіз: вивчення хімічного складу та корозійної стійкості модифікованих шарів підтверджує їх високу стійкість до корозії та покращену хімічну стабільність у порівнянні з вихідною сталлю Р6М5 [8].

Перспективи виробництва: дослідження вказують на перспективи використання радіочастотного магнетронного напилення для вдосконалення виробництва сталевих деталей з покращеними механічними, трибологічними та фізико-хімічними властивостями.

Робота [8] дозволяє усвідомити важливість застосування радіочастотного магнетронного напилення для формування тонких модифікованих шарів у сталей під час іонно-плазмового азотування (табл. 1.1). Це відкриває шлях до подальших досліджень у сфері вдосконалення процесів зміцнення сталі та розробки нових матеріалів з покращеними властивостями для різних галузей промисловості [8].

Ця таблиця відображає вплив радіочастотного магнетронного напилення на ключові властивості шарів сталі Р6М5. Результати підтверджують, що цей метод забезпечує формування однорідних, стійких та високоякісних покриттів, які покращують механічні, трибологічні та корозійні характеристики матеріалу.

Отримані результати демонструють важливість цього методу у вдосконаленні властивостей матеріалу, що може мати значущі наслідки для різних галузей промисловості. Нижче наведено основні висновки вашої роботи:

Таблиця 1.1

Основні параметри та характеристики модифікованих шарів сталі Р6М5 [8]

Параметр	Характеристика
Товщина шару	3-5 мікрон
Хімічний склад	Збагачення азотом та карбідами металів
Мікроструктура	Густа, однорідна, з високим ступенем адгезії
Механічні властивості	Підвищена твердість, міцність та в'язкість
Трибологічні властивості	Зменшення коефіцієнта тертя, покращена зносостійкість
Корозійна стійкість	Висока стійкість до корозії

Ефективність радіочастотного магнетронного напилення: Дослідження підтвердило високу ефективність використання радіочастотного магнетронного напилення для отримання тонких модифікованих шарів на поверхні сталі Р6М5 під час іонно-плазмового азотування.

Покращення механічних властивостей: Встановлено, що застосування цього методу сприяє підвищенню твердості, міцності та в'язкості сталі Р6М5, що робить її більш стійкою до механічних впливів та зносу [8].

Підвищення трибологічної стійкості: Модифіковані шари, отримані за допомогою радіочастотного магнетронного напилення, виявили покращену зносостійкість та зменшення коефіцієнта тертя, що підвищує їхню придатність для застосування у виробництві деталей зі зниженим рівнем тертя.

Стійкість до корозії: Дослідження підтвердило високу корозійну стійкість модифікованих шарів, що вказує на їхню здатність витримувати агресивні середовища та підвищує їхню тривалість експлуатації.

Отже ця робота є важливим внеском у сферу досліджень зміцнення сталей і відкриває шлях для подальших досліджень у сфері вдосконалення процесів формування покриттів для покращення властивостей матеріалів [8].

1.3.2 Іонно-променеви́й метод для формування тонких модифікованих шарів у сталях при іонно-плазмовому азотуванні

Мета роботи - дослідження процесу іонно-плазмового азотування та його впливу на сталі, зокрема, на сталі Р6М5 і Р6М5К5 [9].

Основні завдання дослідження включають:

Вивчення процесу іонно-плазмового азотування: ретельний аналіз принципів та технічних аспектів цього методу. Визначення параметрів, таких як температура, тиск та склад азотувального середовища, які використовуються для модифікації сталі.

Дослідження дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень: аналіз процесів, які відбуваються у сталі під час азотування, зокрема зміни в її структурі та фазовому складі. Встановлення закономірностей, що регулюють ці перетворення.

Оцінка впливу на механічні властивості: визначення, як зміни в структурі та фазовому складі сталі, спричинені азотуванням, впливають на механічні характеристики, такі як міцність, твердість та витривалість [9].

Аналіз впливу на трибологічні властивості: вивчення, як зміни в структурі та фазовому складі сталі впливають на трибологічні характеристики, такі як зносостійкість та коефіцієнт тертя.

Оцінка впливу на фізико-хімічні властивості: дослідження впливу модифікованих шарів на хімічну стійкість та інші фізико-хімічні властивості сталі [9].

Проведення експериментів та аналіз результатів: проведення експериментів і збір даних для підтвердження або спростування гіпотез щодо впливу іонно-плазмового азотування на сталь Р6М5. Аналіз отриманих результатів і підведення підсумків.

Виявлення практичних застосувань: розгляд можливостей практичного застосування отриманих результатів і рекомендацій для поліпшення властивостей сталей Р6М5 і Р6М5К5.

Через високі втрати енергії, що відбуваються під час перетворення тепла в механічну енергію, теплові електростанції мають невеликий коефіцієнт корисного використання (ККД), що становить не більше 45 %, дизельні двигуни – 30 %, а бензинові – 20 %.

Особливої уваги заслуговують методи отримання тонких плівок багатокомпонентних оксидних електродних матеріалів та електролітів, зокрема магнетронне розпилення та електронно-променева плазма (ЕПП). Використання вакуумно-плазмових методів дозволяє забезпечити необхідні хімічний склад та механічну міцність покриття, що є ключовими для ефективної роботи паливних елементів [9]. Наприклад, дослідження, проведені з використанням методу атомно-іонного плазмового розпилення (AIP), показали можливість створення газонепроникних тонкоплівкових покриттів з оксидів електроліту та пористих електродів, що можуть бути використані для створення експериментальних зразків комірок твердотільних оксидних паливних елементів (SOFC) [10].

В подальших дослідженнях ці методи можуть використовуватися для оптимізації та покращення технологій виробництва паливних елементів, що дозволить зробити значний внесок у підвищення ефективності та стабільності енергетичних пристроїв на основі тонкоплівкових твердооксидних паливних елементів (рис. 1.1-1.3) [9, 10].



Рисунок 1.1 - Схеми отримання електричної енергії [9]



Рисунок. 1.2 - Тонкоплівковий варіант твердооксидного паливного елемента [10]

Схему шарів одиничного ПЕ з електролітом на основі цератів барію показано на рисунку 1.3.

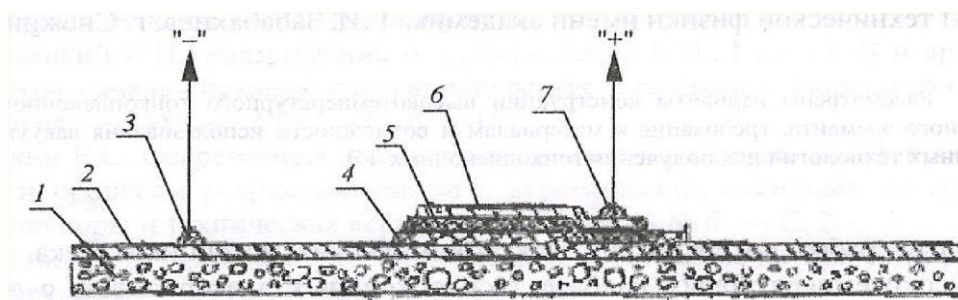


Рисунок 1.3 - Ескіз одиничного ПЕ: 1 – несуча основа; 2- струмознімання; 3, 7 – токовиводи; 4 – катод; 5 – твердий електроліт; 6 – анод. [9]

Робота [9] включає дослідження і розробку тонкоплівкових композиційних матеріалів (рис. 1.4) для застосування в сонячних елементах та паливних елементах. Основні відомості включають:

Використання методів вакуумного дугового розпилення для отримання активованих нікелевих та нікелево-хромових покриттів для експериментальних SOFC-елементів

Зазначення властивостей покриттів, таких як товщина, склад, адгезія і мікротвердість.

Опис процесу нанесення тонкоплівкових покриттів на електроліт VSN, анод Ni+VSN та струмоприймачі.

Результати стендових випробувань тонкоплівкових сонячних елементів в діапазоні температур від 600 до 900 °С.

Отримані результати щодо максимальної вихідної потужності сонячних елементів в діапазоні температур від 600 до 900 °С.

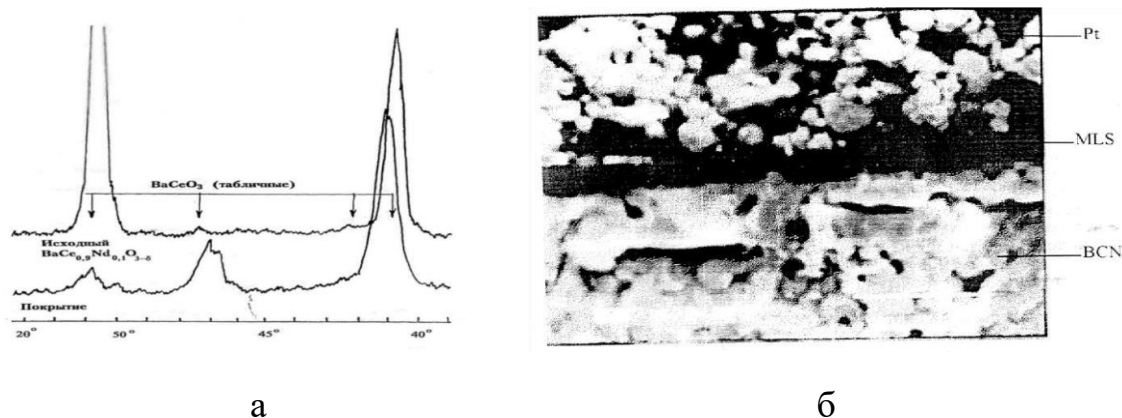


Рисунок 1.4 - Дослідження BSCN зразків: (а) – порівняльні дифракційні спектри BSCN в покриттях і розпилюємих мішенях; (б) – растрова мікроскопія зламу дослідного зразка (BSCN (основа) – MLS (покриття) – Pt (впечена паста), x3300) [9]

Дослідження [9] підтверджує, що розвиток тонкоплівкових композиційних матеріалів може привести до зниження робочої температури і сприяти створенню нових конструкцій для паливних елементів і сонячних елементів.

Іонно-променеви́й метод для формування тонких модифікованих шарів у сталей при іонно-плазмовому азотуванні є важливим процесом в області матеріалознавства [10]. Дослідження закономірностей та механізмів дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень у сталей при низькотемпературному ($T < 550$ °С) іонно-плазмовому азотуванні допомагає визначити оптимальні умови для отримання бажаних властивостей в сталі Р6М5. Аналіз впливу структурно-фазового стану модифікованих шарів на механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості (табл. 1.2) також є ключовим для забезпечення якості та довговічності матеріалу [10].

Додатково, дослідження закономірностей та механізмів дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень у сталей при низькотемпературному іонно-плазмовому азотуванні може включати [10]:

Таблиця 1.2

Іонно-променеий метод для формування тонких модифікованих шарів у сталей при іонно-плазмовому азотуванні [10]

Параметр	Опис
Газовий склад атмосфери	Суміш газів, що містить азот та інші реактивні гази, відповідно до вимог специфікації
Температура процесу	Температура, яка забезпечує оптимальну швидкість азотування та формування шару
Тиск атмосфери	Оптимальний тиск, необхідний для забезпечення ефективного проникнення азоту у поверхневий шар
Час обробки	Час, необхідний для досягнення бажаної глибини та властивостей шару
Тип іонно-променевого обладнання	Специфікація обладнання, що використовується для процесу азотування
Метод контролю якості	Методи, за допомогою яких контролюється якість та властивості утвореного шару
Товщина утвореного шару	Оптимальна товщина шару для досягнення бажаних механічних та фізико-хімічних властивостей

Визначення швидкості дифузії азоту в матеріалі.

Аналіз впливу температури на склад та мікроструктуру утвореного шару.

Вивчення впливу присутності домішок на процес азотування та властивості шару.

Визначення властивостей дифузійно-контрольованих фаз та структур утвореного шару.

Аналіз впливу структурно-фазового стану модифікованих шарів на механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості для сталі Р6М5 може включати:

Випробування на міцність та визначення мікротвердості шару .

Трибологічні тести для визначення зносостійкості та коефіцієнта тертя.

Спектроскопічний аналіз для вивчення структури та складу утвореного шару [9].

Кореляція між структурою шару та його хімічним складом з фізико-хімічними властивостями, такими як корозійна стійкість та хімічна активність.

Товщина струмознімальних покриттів для нікелевого струмознімача (3,8 - 4,2) мкм, для нікель-хромового (4,3 - 4,7) мкм, мікротвердість для нікелевих покриттів 1450 МН/м², для нікель-хромових – 4550 МН/м².

Проведено дослідження і розроблені експериментальні технології нанесення тонких шарів електроліту BCN, анодів Ni + BCN і струмознімачів з Ni і Ni + Cr вакуум-плазмовими методами (рис. 1.5) [10].

На основі вищевказаних даних і досліджень можна зробити висновок, що досягнуті результати у розробці тонкоплівкових композиційних матеріалів відкривають перспективні можливості для ефективного використання їх у високотемпературних паливних елементах та сонячних елементах. Методи вакуумного дугового розпилення продемонстрували високу ефективність у формуванні активованих нікелевих та нікелево-хромових покриттів з потрібними властивостями, такими як оптимальна товщина, склад, адгезія і мікротвердість.

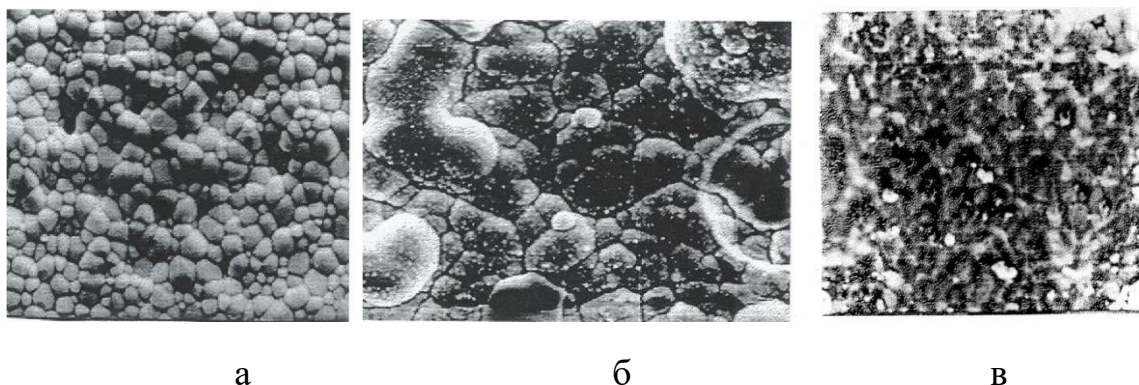


Рисунок 1.5 - Морфологія поверхні: (а) – електроліта BCN, (б) – шару Ni-BCN, (в) – покриття Ni-Cr на аноді Ni-BCN, x1500 [10]

Результати стендових випробувань сонячних елементів в широкому діапазоні температур свідчать про високу стабільність та ефективність цих нових матеріалів навіть при високих температурах, що відкриває шлях до подальших досліджень та реалізації в практичних застосуваннях [9]. Найбільш обіцяючим є той факт, що розроблені тонкоплівкові композиційні матеріали дозволяють знизити робочу температуру, що в свою чергу забезпечує енергоефективність та стійкість пристроїв, що використовують ці матеріали. Це дає підстави для подальших досліджень та впровадження нових конструкцій паливних елементів та сонячних елементів з використанням цих тонкоплівкових композиційних матеріалів, що обіцяє більш стабільну та ефективну роботу при різних умовах застосування.

1.3.3 Плазмово-дуговий метод для формування тонких модифікованих шарів у сталях при іонно-плазмовому азотуванні

Плазмово-дуговий метод є ефективним способом формування тонких модифікованих шарів у сталей під час іонно-плазмового азотування. Дослідження закономірностей та механізмів дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень у сталей при низькотемпературному ($T < 550$ °C) іонно-плазмовому азотуванні є важливим для розуміння процесів, які відбуваються під час формування шару [11].

Аналіз впливу структурно-фазового стану модифікованих шарів на механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості сталей P6M5 і P6M5K5 допомагає встановити оптимальні умови для покращення її властивостей.

При використанні плазмово-дугового методу для формування тонких модифікованих шарів у сталей при іонно-плазмовому азотуванні, деякі ключові аспекти та параметри, які можуть бути включені для дослідження, такі:

Оптимальний склад газової суміші для досягнення бажаної хімічної реакції та швидкості азотування.

Параметри енергії плазми та її вплив на структуру та властивості утвореного шару.

Вивчення температурного профілю під час процесу азотування для оптимізації температурних умов формування шару.

Мікроструктурний аналіз утворених шарів для вивчення присутності фаз, змін розмірів зерен, аморфізації та інших структурних аспектів [11].

Визначення механічних властивостей шару, таких як мікротвердість, міцність та зносостійкість.

Трибологічні випробування для визначення зносостійкості та коефіцієнта тертя утворених шарів.

Корозійні тести для визначення стійкості утворених шарів до корозії та інших агресивних середовищ.

Дослідження зазначених аспектів дозволить отримати більш глибоке розуміння процесів, які відбуваються під час плазмово-дугового іонно-плазмового азотування та їх вплив на властивості сталей P6M5 і P6M5K5 [11].

Також, для повного дослідження плазмово-дугового методу формування тонких модифікованих шарів у сталей при іонно-плазмовому азотуванні, деякі додаткові аспекти, які можуть бути включені, включають:

Спектроскопічний аналіз для вивчення хімічного складу утвореного шару та виявлення можливих дефектів.

Мікроструктурний аналіз для вивчення фазового складу та морфології шару на мікро та нанорівнях.

Дифузійні дослідження для визначення швидкості дифузії азоту в матеріалі та її залежності від температури та часу обробки.

Електронно-мікроскопічні дослідження для вивчення механізмів росту шару та його взаємодії з основним матеріалом.

Аналіз елементарних деформацій та змін структури матеріалу під час обробки для визначення впливу процесу на міцність та пластичність матеріалу.

Експериментальне встановлення оптимальних параметрів процесу, які забезпечать найвищу якість та ефективність модифікації шару для сталей P6M5 і P6M5K5.

Дослідження довговічності та стабільності утворених шарів під час експлуатації в різних умовах [12].

Ці аспекти важливі для повного розуміння впливу плазмово-дугового методу на структуру та властивості сталей Р6М5 і Р6М5К5, а також для розробки оптимальних умов обробки, які дозволять досягти найкращих результатів в термінах механічних, трибологічних та фізико-хімічних властивостей. Враховуючи ці аспекти дослідження, можна значно покращити та оптимізувати процес плазмово-дугового іонно-плазмового азотування для сталей Р6М5 і Р6М5К5.

Додатково до вищезазначених аспектів, для ретельного аналізу плазмово-дугового методу формування тонких модифікованих шарів у сталей при іонно-плазмовому азотуванні, необхідно враховувати такі фактори:

- моделювання процесу азотування для визначення оптимальних параметрів та прогнозування механізмів формування шару з урахуванням теплових, хімічних та фізичних аспектів; [12].

- порівняння з іншими методами поверхневої модифікації для визначення конкурентних переваг плазмово-дугового методу у відношенні до ефективності та вартості;

- оцінка екологічного впливу процесу з точки зору енергозбереження та екологічної безпеки.

Загальне дослідження цих аспектів дозволяє отримати більш повне уявлення про ефективність та можливості плазмово-дугового методу у формуванні тонких модифікованих шарів у сталей при іонно-плазмовому азотуванні.

Отже у роботі було проаналізовано плазмово-дуговий метод для формування тонких модифікованих шарів у сталях при іонно-плазмовому азотуванні. Дослідження закономірностей та механізмів дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень у сталей при низькотемпературному іонно-плазмовому азотуванні свідчить про важливість правильного контролю процесу для досягнення бажаної мікроструктури та властивостей шару [12].

Аналіз впливу структурно-фазового стану модифікованих шарів на механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості для сталей Р6М5 і Р6М5К5

свідчить про великий потенціал покращення міцності, зносостійкості та корозійної стійкості цього матеріалу за умови оптимальної обробки.

1.3.4 Метод розпилення в іонно-плазмовому середовищі для формування тонких модифікованих шарів у сталях під час іонно-плазмового азотування

Мета роботи - дослідження методів іонно-плазмового розпилення для формування тонких модифікованих шарів на сталях процесом іонно-плазмового азотування при низьких температурах ($T < 550$ °C) та аналіз впливу структури і фазового стану цих модифікованих шарів на механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості сталі Р6М5. Огляд літератури включає аналіз попередніх досліджень щодо іонно-плазмового азотування та вивчення структурно-фазових перетворень в сталі Р6М5 та їх впливу на властивості [14].

У експериментах було використано метод іонно-плазмового розпилення для азотування сталі Р6М5 при низьких температурах, контролюючи параметри процесу і записуючи результати.

Далі було проведено аналіз мікроструктури та фазового складу, оцінено механічні та трибологічні властивості, а також здійснено фізико-хімічний аналіз для з'ясування взаємодії структури шару з навколишнім середовищем.

Після обробки даних було проаналізовано результати та отримано висновки про вплив іонно-плазмового азотування на сталь Р6М5 при низьких температурах, а також розглянути можливі механізми впливу структурно-фазових перетворень на властивості матеріалу [13].

Ці дослідження дозволять краще зрозуміти процеси, що відбуваються під час іонного та плазмового азотування та їх вплив на властивості сталі Р6М5, (рисунок 7) що може бути корисним для подальшого вдосконалення матеріалу та його застосування для вирішення конкретних технологічних завдань.

Розширення дослідження: Ідентифікування нових можливостей для використання іонно-плазмового азотування у виробництві сталі Р6М5 та аналіз його ефективності у різних умовах [14].

Моделювання процесів: використання математичного моделювання для більш точного розуміння та передбачення структурних та фазових змін, які відбуваються під час іонно-плазмового азотування сталі Р6М5.

Порівняння з іншими методами: порівняння ефективності та результатів іонно-плазмового азотування з іншими методами поверхневого зміцнення сталі Р6М5, такими як карбідкування, нітрування тощо.

Оцінка економічної доцільності: проаналізовано економічні переваги та обмеження іонно-плазмового азотування в порівнянні з іншими методами обробки сталі Р6М5.

Перспективи застосування: розглянуто можливості використання модифікованих шарів у сталі Р6М5 для конкретних технічних застосувань, таких як інструменти для обробки металу, абразивні матеріали тощо.

Під час експериментальних досліджень було встановлено, що іонно-плазмове азотування викликає формування стійких та міцних модифікованих шарів на поверхні сталі Р6М5. Аналіз мікроструктури та фазового складу шарів показав, що вони мають густу нитчасту структуру з високим вмістом азоту, що сприяє покращенню твердості та стійкості до зношування [13].

Механічні та трибологічні випробування підтвердили покращення механічних властивостей сталі Р6М5 після іонно-плазмового азотування, зокрема збільшення міцності та зносостійкості. Фізико-хімічний аналіз показав, що модифіковані шари мають підвищену стійкість до корозії та окислення.

Математичне моделювання процесів іонно-плазмового азотування підтвердило його ефективність і вказало на можливості його оптимізації для отримання бажаних властивостей з урахуванням економічних факторів.

Загалом, результати дослідження свідчать про потенціал іонно-плазмового азотування як ефективного методу для покращення властивостей сталей Р6М5 і Р6М5К5, що може знайти широке застосування в інженерних та промислових сферах [14].

Рекомендації щодо оптимізації процесу і його стандартизації можуть бути важливими для подальшого впровадження цього методу у виробництво з метою

поліпшення якості та ефективності сталей Р6М5 і Р6М5К5 у різних технічних додатках.

1.3.5 Термічне напилення у газовому розряді для формування тонких модифікованих шарів у сталях під час іонно-плазмового азотування

Дослідження присвячене аналізу використання термічного напилення у газовому розряді для формування тонких модифікованих шарів у сталей в процесі іонно-плазмового азотування. В основі дослідження лежить аналіз закономірностей та механізмів дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень, що відбуваються в сталях під час низькотемпературного ($T < 550$ °С) іонно-плазмового азотування. Додатково, проведено аналіз впливу структурно-фазового стану отриманих модифікованих шарів на механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості для сталі Р6М5 [15].

В ході цього дослідження було встановлено, що термічне напилення у газовому розряді може бути ефективним методом для формування тонких модифікованих шарів у сталей, сприяючи покращенню їхніх механічних властивостей та стійкості до зношування [15]. Дослідження механізмів дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень дозволило краще зрозуміти процес формування цих шарів та фактори, які впливають на їхні властивості.

Аналіз структурно-фазового стану модифікованих шарів дозволив визначити основні компоненти та структурні особливості, які визначають їхні механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості. Встановлено, що оптимальні параметри процесу термічного напилення можуть забезпечити досягнення найвищої ефективності та якості отриманих шарів.

Це дослідження відкриває широкі можливості для подальших досліджень у галузі інженерії матеріалів та обробки поверхонь сталей. Отримані результати можуть бути використані для покращення якості та ефективності сталі Р6М5 у різноманітних технічних застосуваннях, включаючи інструменти для обробки металу та інші високонавантажені додатки.

Більш детальний аналіз ефективності та переваг застосування термічного напилення у газовому розряді для формування модифікованих шарів у сталей під час іонно-плазмового азотування може відкрити нові можливості для оптимізації процесу та покращення якості отриманих шарів.

Порівняння результатів дослідження з аналогічними дослідженнями в інших галузях обробки поверхонь та модифікації сталей може допомогти у визначенні конкурентоспроможності та переваг даного методу [16].

Загалом, дане дослідження відкриває нові перспективи для вдосконалення технологій обробки матеріалів та поліпшення якості сталі Р6М5 для високонавантажених умов роботи. Його результати можуть бути використані для покращення ефективності та довговічності різноманітних конструкцій та пристроїв, що використовують дану сталь.

У даному дослідженні було показано, що термічне напилення у газовому розряді є ефективним методом для формування тонких модифікованих шарів у сталей під час іонно-плазмового азотування. Дослідження закономірностей та механізмів дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень у сталей при низькотемпературному іонно-плазмовому азотуванні дозволило краще розуміти процеси, що відбуваються в матеріалі під час даного виду обробки.

Аналіз впливу структурно-фазового стану модифікованих шарів на механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості для сталі Р6М5 свідчить про покращення твердості, стійкості до зношування та корозії. Оптимальні параметри процесу термічного напилення були визначені, що дозволяє досягнення найвищої ефективності обробки та якості отриманих шарів [15, 16].

1.4 Характеристики і властивості покриттів, отриманих методом фізичного осадження з парової фази (PVD) для дослідження формування тонких модифікованих шарів у сталях при іонно-плазмовому азотуванні

Покриття, отримані методом фізичного осадження з парової фази (PVD), є тонкими шарами матеріалу, що мають високу якість та низький рівень деформації, що дозволяє їм ефективно застосовуватися для формування модифікованих шарів

у сталей під час іонно-плазмового азотування. Деякі характеристики і властивості таких покриттів включають: [17]:

Твердість: покриття, отримані за допомогою методу PVD, зазвичай мають високу твердість, що дозволяє покращити механічні властивості базового матеріалу.

Стійкість до зношування: покриття можуть володіти високою стійкістю до зношування, що робить їх ефективними для застосування у вимогливих умовах експлуатації.

Корозійна стійкість: деякі PVD-покриття можуть мати підвищену стійкість до корозії, що робить їх особливо корисними для застосування в умовах, де матеріал піддається агресивному середовищу.

Трибологічні властивості: покриття PVD можуть мати високу стійкість до зношування при терті, що робить їх ефективними для застосування в деталях, які піддаються інтенсивному тертю або трибологічному зношуванню [17].

Дослідження закономірностей та механізмів дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень у сталей при низькотемпературному іонно-плазмовому азотуванні дозволить краще розуміти взаємодію між покриттям та базовим матеріалом, аналіз впливу структурно-фазового стану модифікованих шарів на механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості для сталі P6M5K5 допоможе визначити оптимальні умови застосування цих покриттів для покращення властивостей сталі в конкретних умовах експлуатації [18].

Дослідження впливу структурно-фазового стану модифікованих шарів на механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості для сталі P6M5 може виявити ключові фактори, які визначають оптимальні параметри та умови формування цих шарів. Крім того, порівняння характеристик та властивостей покриттів, отриманих методом PVD, з результатами інших методів обробки поверхонь може допомогти визначити переваги та обмеження кожного з методів у контексті використання в конкретних умовах. Розгляд можливостей стандартизації та оптимізації параметрів процесу формування покриттів методом PVD може бути корисним для

практичного впровадження цих технологій у виробництво та забезпечення стабільної якості отриманих покриттів [18].

Рекомендації щодо оптимізації параметрів процесу та можливості його стандартизації можуть бути важливими для практичного впровадження цих досліджень у промисловість та виробництво.

1.5 Вплив нітридних покриттів на формування тонких модифікованих шарів у сталях під час іонно-плазмового азотування

Наукове дослідження націлене на аналіз впливу нітридних покриттів на процес формування тонких модифікованих шарів у сталей під час іонно-плазмового азотування [19].

Основною метою є виявлення закономірностей та механізмів дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень у сталей при низькотемпературному ($T < 550$ °C) іонно-плазмовому азотуванні.

Дослідження також спрямоване на аналіз впливу структурно-фазового стану отриманих модифікованих шарів на механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості, зокрема для сталей P6M5 і P6M5K5 [19].

Потенційні аспекти, які можуть бути включені до цього дослідження, включають, але не обмежуються, наступне:

Аналіз впливу структурно-фазових перетворень на властивості сталей P6M5 і P6M5K5, зокрема міцність, твердість та стійкість до зношування.

Вивчення механізмів і процесів, які відбуваються під час іонно-плазмового азотування, для розуміння фундаментальних аспектів цього процесу.

Оцінка впливу нітридних покриттів на коефіцієнт тертя та зносостійкість сталей P6M5 і P6M5K5.

Вивчення корозійної стійкості отриманих модифікованих шарів.

В цілому, це дослідження може допомогти розкрити потенційні нові застосування та вдосконалення для сталей P6M5 і P6M5K5 за рахунок розуміння та оптимізації процесу іонно-плазмового азотування [19].

Аналіз даних: систематичний аналіз даних для встановлення зв'язків між параметрами процесу, характеристиками отриманих шарів та їх властивостями. Це може включати структурний аналіз за допомогою мікроскопії, спектроскопії та інших методів. Оцінка впливу: оцінка впливу нітридних покриттів на формування шарів, а також їхні властивості та порівняння з базовим матеріалом сталі Р6М5 [20].

Висновки та пропозиції: формулювання висновків щодо впливу іонно-плазмового азотування на сталь Р6М5, рекомендації щодо можливих практичних застосувань, а також перспектив для подальших досліджень.

Роль нітридних покриттів: нітридні покриття виявилися важливими для формування шарів з покращеними механічними та фізико-хімічними властивостями, зокрема щодо міцності, твердості та стійкості до зношування.

Дифузійно-контрольовані структурно-фазові перетворення: дослідження підтверджує наявність дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень під час іонно-плазмового азотування, що приводить до утворення специфічних структур з покращеними властивостями [19].

Вплив структурно-фазового стану на властивості: структурно-фазовий стан модифікованих шарів безпосередньо впливає на механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості сталі Р6М5, підкреслюючи значимість оптимізації процесу для досягнення найкращих результатів. Практичні застосування: отримані результати відкривають перспективи для застосування сталей Р6М5 і Р6М5К5 з модифікованими шарами для виробництва високоефективних компонентів у вимогливих умовах, де вимагаються підвищена міцність, стійкість до зношування та корозійна стійкість [20].

Висновки

У розділі розглянуто актуальність дослідження механізмів формування тонких модифікованих шарів у сталей під час іонно-плазмового азотування та класифікацію різних методів зміцнення поверхні в контексті цього процесу. Визначення характеристик і властивостей покриттів, отриманих різними методами фізичного осадження з парової фази, також становить важливу частину дослідження.

З метою цього дослідження для сталі Р6М5 було застосовано іонно-плазмово азотування при низькотемпературних умовах ($T < 550$ °С) для формування тонких модифікованих шарів. Висвітлено вплив нітридних покриттів на структурно-фазовий стан отриманих шарів та їхні властивості, зокрема механічні, трибологічні та фізико-хімічні.

Усі проаналізовані роботи, присвячені різним методам отримання покриттів, включаючи вакуумні методи, радіочастотне магнетронне напилення, іонно-променевий метод, плазмово-дуговий метод, метод розпилення в іонно-плазмовому середовищі, термічне напилення у газовому розряді та метод фізичного осадження з парової фази (PVD), надають обґрунтування для вибору оптимального методу для даного дослідження.

Тому метою цієї магістерської наукової роботи є актуальна тема щодо розкриття закономірностей та механізмів дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень у сталей під час іонно-плазмового азотування, а також оцінка впливу структурно-фазового стану модифікованих шарів на їхні властивості для покращення ефективності та довговічності сталі Р6М5 в різних умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали для проведення дослідження

Обробка різанням є складним і дорогим процесом, який характеризується значною працездатністю і значними витратами металу [21]. Існує велика кількість ріжучого інструменту (PI), які відрізняються розмірами, продуктивністю, ступенем автоматизації, що забезпечує виконання обробки різанням різними способами на усіх типах виробництва [22]. Найбільш поширеним для виготовлення PI є швидкорізальна сталь, яка поєднує комплекс експлуатаційних властивостей таких як високу міцність, зносостійкість, твердість, теплостійкість (~ 600°C), а також має підвищений опір до пластичної деформації [3]. Швидкорізальні сталі широко застосовують для ріжучих інструментів, що працюють в умовах значного навантаження і нагрівання робочих крайок. Інструмент зі швидкорізальних сталей має досить високу стабільність властивостей, що особливо важливо в умовах гнучкого автоматизованого виробництва. Працездатність інструментів простої форми з масивною різальною кромкою під час безперервного точіння лімітується вторинною твердістю, теплостійкістю і зносостійкістю. Для інструментів складної форми, тонколезвійних, а також для інструментів, що використовуються при переривчастому точенні, більшого значення набувають міцність і в'язкість швидкорізальної сталі. Підвищення тієї чи іншої властивості, що досягається внаслідок зміни хімічного складу сталі, а також режимів загартування і відпуску, часто супроводжується зниженням інших показників. Наприклад, при підвищенні вторинної твердості і теплостійкості спостерігається, як правило, зниження міцності і в'язкості сталі [22].

Швидкорізальні сталі - найбільш використовувані для ріжучих інструментів. Вони поєднують високу теплостійкість (600-650 °C залежно від складу та обробки) з високими твердістю (до HRC 68-70), зносостійкістю за підвищених температур і підвищеним опором пластичній деформації. Швидкорізальні сталі дають змогу

підвищити швидкість різання в 2-4 рази порівняно зі швидкостями, застосовуваними під час обробки інструментами з вуглецевих і легованих інструментальних сталей [21].

Високі ріжучі властивості швидкорізальних сталей забезпечуються легуванням сильними карбідоутворювальними елементами (вольфрамом, молібденом, ванадієм), елементами, що підвищують температуру ($\alpha \rightarrow \gamma$)-перетворення (кобальтом, алюмінієм), та застосуванням спеціальної термічної обробки, яка полягає в загартуванні за високих температур (1200-1300 °C) і відпустці, яка спричинює дисперсійне твердіння. Для швидкорізальних сталей основним є карбід M_6C . Для отримання високих теплостійкості і твердості досить велика частка карбіду, що розпадається, повинна бути переведена під час загартування у твердий розчин (аустеніт, мартенсит), що насичує його вуглецем, вольфрамом, молібденом, ванадієм, хромом. Подальший відпуск при температурах 550-560 °C підвищує твердість до максимальних значень внаслідок виділення дисперсних карбідів і розпаду залишкового аустеніту [23-25].

Залежно від хімічного складу, а отже, і рівня основних властивостей швидкорізальні сталі поділяють на сталі нормальної та підвищеної теплостійкості (продуктивності). Якщо вміст ванадію не перевищує 2 %, їх відносять до швидкорізальних сталей нормальної теплостійкості (продуктивності). Це сталі P18, P9, P6M5. Швидкорізальні сталі з більш високим вмістом ванадію, а також додатково леговані кобальтом відносять до сталей підвищеної теплостійкості (P12Ф3, P6M5Ф3, P18K5Ф2, P9K5, P6M5K5, P9M4K8 тощо). Порівняно зі сталями нормальної продуктивності високованадієві сталі підвищеної продуктивності мають здебільшого підвищену зносостійкість через наявність високотвердого карбіду типу MC , а сталі, які містять кобальт, - більш високі вторинну твердість, теплостійкість і теплопровідність. Інтенсивно розвивається група низьколегованих швидкорізальних сталей із сумарним вмістом вольфраму і молібдену, що не перевищує 5-6 %. Інструменти зі швидкорізальних сталей цієї групи призначені переважно для обробки незміцнених сталей і чавунів, а також кольорових металів

і сплавів. Стійкість інструментів із цих сталей під час обробки вищевказаних груп матеріалів близька до стійкості інструментів зі сталі P6M5 [23-25].

Швидкорізальні сталі належать до сталей ледебуритного класу. Надлишкові карбідні швидкорізальних сталей входять до складу евтектики, що утворюється на кордонах зерен аустеніту або δ -фериту. Залежно від хімічного складу, а отже, і рівня основних властивостей швидкорізальні сталі поділяють на сталі нормальної та підвищеної теплостійкості (продуктивності). Якщо вміст ванадію не перевищує 2%, їх відносять до швидкорізальних сталей нормальної теплостійкості (продуктивності). Це сталі P18, P9, P6M5. В роботі будемо проводити дослідження для сталі нормальної теплостійкості P6M5 [23].

В таблицях наведено хімічний склад сталей марки P6M5 і P6M5K5 (табл. 2.1) та механічні властивості (табл. 2.2) швидкорізальної сталі марки P6M5.

Таблиця 2.1

Хімічний склад швидкорізальних сталей P6M5 та P6M5K5, % [24]

Марка сталі	Масова частка елементів (не більше), %												
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	W	V	Co	Cu	Fe
P6M5	0.82-	0,2	0.2	0.6	до 0.025	до 0.03	3.8	4.8	5.5	1.7	до 0.5	до 0.25	~80
	0,9	-	-				4.4	-	-	-			
P6M5K5	0.86	0.2	0.2	до 0.6	до 0.03	до 0.03	3.8	4.8	5.7	1.7	4.7 - 5.2	до 0.25	~75
	-	-	-					-	-	-			
	0.94	0.5	0.5				4.3	5.3	6.7	2.1			

Таблиця 2.2

Механічні властивості сталі P6M5 [24]

Твердість після гартування та відпусків, HRC	Червоностійкість HRC 58, °C
63 – 65	620

Сталь марки P6M5 є найпоширенішою з усіх груп швидкорізальних сталей, обсяг її виробництва становить 80 % від загального виробництва швидкорізальних сталей. Перевагою сталі P6M5 в тому, що з неї можливо виготовляти майже будь-які типи РІ (свердла, різці, фрези та ін.), які використовуються для обробки сталей,

кольорових металів і сплавів, чавунів, дерева, композиційних та інших матеріалів [23].

Швидкорізальні сталі з більш високим вмістом ванадію понад 2%, а також додатково леговані кобальтом відносять до сталей підвищеної теплостійкості (P12Ф3, P6M5Ф3, P18K5Ф2, P9K5, P6M5K5, P9M4K8 та ін.). У роботі будемо проводити дослідження для сталі підвищеної теплостійкості P6M5K5 (табл. 2.3-2.6), що застосовується для обробки високоміцних нержавіючих і жароміцних сталей і сплавів в умовах підвищеного розігріву ріжучої кромки.

Таблиця 2.3

Твердість сталі P6M5K5 [24]

Стан поставки, режими термообробки	HRC _δ (HВ)
Прутки та смуги відпалені Зразки. Гартування 1230 °С, масло. Відпуск (2-х або 3-х кратний) 550 °С, 1 год.	До (269) Більш. 65

Таблиця 2.4

Механічні властивості сталі P6M5K5 у стані поставки (після відпалу)
при 20 °С [24]

$\sigma_{0,05}$ (МПа)	$\sigma_{0,2}$ (МПа)	σ_B (МПа)	δ_5 (%)	ψ %	$\sigma_{сж0,2}$ (МПа)	$\sigma_{сж}$ (МПа)	ϵ (%)	Tк (МПа)	γ (%)	КСУ (Дж / см ²)
240 (5)	510 (20)	850 (30)	12 (1)	14 (1)	520 (13)	2720 (80)	54 (1,5)	590 (18)	60 (1,4)	18 (1)

Таблиця 2.5

Механічні властивості сталі P6M5K5 у стані поставки за 20 °С [24]

$\sigma_{0,05}$ (МПа)	σ_B (МПа)	$\sigma_{сж0,2}$ (МПа)	$\sigma_{сж}$ (МПа)	Tк (МПа)	$\sigma_{изг}$ (МПа)	КСУ (Дж / см ²)
2340	2050	3100	3750	1820	3000	25

Таблиця 2.6

Червоностійкість сталі P6M5K5 [24]

Температура, °C	Час, ч	HRC
630	4	59
Шліфувальність - хороша		

Основні властивості досліджуваних швидкорізальних сталей у стані поставки наведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7

Основні властивості досліджуваних швидкорізальних сталей у стані постачання [24]

Сталь	ρ , г/м ³	Ac ₁	Ar ₁	Температура, С, ковки	Температура, С, відпалу	НВ, МПа, не більше	Мас. частка карбідної фази, %
P6M5	8,1	815	730	1160-850	840-860	2550	22
P6M5K5	8,2	840	765	1160-850	840-860	2690	23
Примітка. Після кування охолодження в колодязях при 750-800 °C. Після витримки при 840-880 °C охолодження зі швидкістю 30-40°C/год до 720-740 °C, витримка не менше 4 год, охолодження зі швидкістю 50°C/год до 600 °C, далі на повітрі.							

Таблиця 2.8

Режими остаточного термічного оброблення і властивості досліджуваних швидкорізальних сталей нормальної та підвищеної теплостійкості (продуктивності) [24]

Сталь	T, гартування, °C	T, відпуску, °C	HRC	$\sigma_{н}$, МПа	Теплостійкість (HRC 58), °C
P6M5	1200-1230	540-560	63-65	3200-3600	620
P6M5K5	1210-1240	540-560	64-66	2600-3000	630

Режими остаточного термічного оброблення і властивості досліджуваних швидкорізальних сталей нормальної і підвищеної теплостійкості (продуктивності) наведено в таблиці 2.8.

Дослідження впливу іонно-плазмового азотування на структуру і властивості швидкорізальних сталей Р6М5 та Р6М5К5 проводили після стандартної термічної обробки, яка включала ізотермічний відпал в інтервалі температур 840 – 870 °С, охолодження до 740 – 750 °С, витримка не менше 1-1,5 год. в печі, охолодження до 600 °С в печі і далі на повітрі, гартування з підігрівом в інтервалі температур 1200-1230 °С, охолодження в маслі, відпуск 3-х кратний при 540-560 °С, охолодження на повітрі.

Швидкорізальні сталі представляють собою високолеговані сталі з високим вмістом вольфраму, хрому, молібдену, кобальту, ванадію. Легуючі елементи визначають властивості швидкорізальної сталі за рахунок утворення 30 карбідів, а вуглець є джерелом утворення карбідів [25].

Підвищення твердості, теплостійкості і зносостійкості забезпечують карбіди вольфраму, але при цьому знижуються міцність, та збільшується ціна сталі. Тому, для заміни вольфраму вводиться молібден, який, в свою чергу, знижує карбідну неоднорідність, підвищує в'язкість, міцність, схильність до окислення і чутливість до знеуглецювання. Хром впливає на підвищення загартовуваності, покращує оброблюваність різанням сталі перед гартуванням. Ванадій підвищує зносостійкість, твердість, теплостійкість, знижує в'язкість. Необхідність більшого вмісту ванадію і кобальту збільшує ціну сталей тому, з урахуванням цих умов, більш розповсюдженою є сталь марки Р6М5 [25].

2.2 Способи поліпшення поверхневого шару швидкорізальних сталей

Якість інструменту значною мірою визначається властивостями поверхневого шару. У процесі термічної обробки або в результаті шліфування за недотримання технологічних режимів властивості поверхневого шару можуть істотно знижуватися (зокрема, внаслідок знеуглецювання або надмірного нагрівання під час шліфування). Найефективніше властивості поверхневого шару

можуть бути підвищені внаслідок хіміко-термічного оброблення, оскільки зростають твердість, теплостійкість, стійкість проти корозії, у низці випадків зменшується коефіцієнт тертя [11].

Хіміко-термічна обробка доцільна для інструментів, що зберігають поліпшений шар після переточування повністю (різьбові та черв'ячні фрези, довб'яки, протяжки, фасонні різці, мітчики та ін.) або частково (свердла, зенкери). Вибір способу хіміко-термічної обробки обумовлений не тільки вимогами, що висуваються до поверхневого шару, а й температурою, за якої виконують цю обробку, і теплостійкістю сталі. Найбільш універсальними та ефективними методами зміцнення поверхневого шару інструментів зі швидкорізальних сталей є рідке ціанування, карбонітрація, іонне азотування та вакуумно-плазмове нанесення зносостійких покриттів [11].

2.3 Опис технологічного процесу іонного азотування та специфікація обладнання

Технологічний процес іонного азотування передбачає кілька основних етапів, які включають підготовку деталей, введення азоту, обробку та охолодження. Нижче наведено докладний опис цих етапів:

1. Підготовка деталей:

Перший етап включає підготовку деталей або виробів, які піддаються іонному азотуванню. Це включає в себе очищення поверхні від бруду, оливи, фосфатування або інші методи для підготовки поверхні. Чиста поверхня допомагає забезпечити якісне азотування та максимальний контакт азоту з металом.

2. Вакуумна камера:

Після підготовки деталей вони розміщуються у вакуумній камері, де відбуватиметься процес іонного азотування. Вакуумна камера створює низький тиск, зазвичай в межах 1×10^{-3} до 1×10^{-6} атмосферного тиску.

3. Підігрівачі:

Вакуумна камера обладнана підігрівачами, які піднімають температуру деталей до вимогливих значень, зазвичай в діапазоні 500 °C – 1100 °C. Висока

температура необхідна для того, щоб іони азоту могли проникнути в поверхню металу.

4. Газоподача:

Під час підвищеної температури газоподача системи регулює подачу азоту або аміаку в вакуумну камеру. Гази розпадаються під впливом розряду, генеруючи азотові іони (N^+) та азотові атоми (N), які потім вторгаються в поверхню металу.

5. Розрядна система:

Розрядна система, зазвичай розряд від катода, використовується для стимулювання газового розряду. Це призводить до виділення електронів та утворення іонів азоту, які будуть використовуватися для азотування.

6. Охолодження:

Після завершення іонного азотування деталі охолоджуються. Швидке охолодження може включати в себе витягання деталей з вакуумної камери та охолодження їх у спеціальних резервуарах.

7. Фінальна обробка:

Зазвичай після охолодження відбувається фінальна обробка, така як полірування або спеціальна обробка поверхні для видалення окислів або надлишкового матеріалу.

Ці основні етапи процесу іонного азотування дозволяють покращити металеві вироби, надаючи їм більшу міцність, стійкість до корозії та зносу.

В іонному азотуванні, як і в багатьох інших процесах обробки металів, управління структурними змінами та властивостями матеріалу має велике значення. Розглянемо докладний огляд питань, пов'язаних з управлінням властивостями матеріалу під час іонного азотування:

Керування товщиною шару азоту: Управління товщиною шару азоту на поверхні металу є критичним аспектом іонного азотування. Це важливо для досягнення конкретних механічних та хімічних властивостей. Керування товщиною шару досягається регулюванням параметрів процесу, таких як час і температура.

Вплив газу і тиску: Тип газу, який використовується під час іонного азотування, а також тиск у вакуумній камері мають суттєвий вплив на властивості отриманого азотного шару. Різні гази можуть призводити до різних структурних змін у матеріалі.

Температурний режим і час обробки: Температура вакуумної камери та час обробки є критичними факторами. Високі температури сприяють глибшому проникненню азоту та формуванню більш стійкого шару. Час обробки визначає товщину шару та характер змін в структурі матеріалу.

Розрядна система і потужність: Розрядна система впливає на структурні зміни в матеріалі шляхом стимулювання газового розряду. Потужність розряду і інтенсивність електричного струму регулюються для досягнення бажаних властивостей матеріалу.

Визначення кінцевих властивостей: Остаточні властивості матеріалу залежать від багатьох факторів, включаючи склад вихідного матеріалу, параметри обробки та мету застосування. Важливо враховувати ці параметри при плануванні іонного азотування для досягнення бажаних результатів.

Управління властивостями матеріалу в іонному азотуванні вимагає точного контролю параметрів процесу та ретельного вивчення впливу різних факторів на структуру та властивості матеріалу. Цей підхід дозволяє підвищити міцність, стійкість до корозії та зносу матеріалу, роблячи його ідеальним для конкретних застосувань у промисловості.

2.4 Установа для іонно-плазмового азотування

Азотування проводили в установці НГВ-6,6/7И1. Основними вузлами установки є реакційна камера, шафа із пристроєм електроживлення, блок, що керує електронною апаратурою, установка для приготування газу, система відкачування газу. Загальний вигляд установки для іонного азотування типу НГВ-6,6/7И1 наведено на рисунку 2.1 а. Деталі поміщають у камері в підвішеному стані (рис. 2.1 б). У камерах передбачають оглядові вікна [21].

Основні характеристики установки:

- Встановлена потужність, кВ·А – 67
- Розміри робочого простору, мм: діаметр x висота - 600x600
- Кількість нагрівальних камер – 1.

Деталі розміщують у камері в підвішеному стані або ставлять на плиту біля нижнього днища. Як кільце у верхнього днища, на якому підвішують деталі, так і плита в нижнього днища, укріплені на днищах через герметичні ізолятори. Вони є струмопідводами негативного потенціалу до деталей і разом із деталями є катодом розряду. Як анод використовують власне камеру.



Рисунок 2.1 - Загальний вигляд установки для іонного азотування типу НГВ-6,6/БИ1 (а) і розташування деталей у камері (б) [21]

Можлива також установка додаткових анодів. Це особливо важливо під час оброблення внутрішніх поверхонь довгих труб. Під час азотування внутрішньої порожнини труби анод розташовують коаксіально всередині труби. Послідовність операцій під час проведення і технологічного циклу така. Деталі, що піддаватимуть азотуванню, встановлюють у камеру, підключають до негативного електрода, герметизують камеру, відкачують повітря до тиску $1,4 \cdot 10^2$ Па, продувають камеру

робочим газом упродовж 5–15 хв за тиску $13 \cdot 10^2$ Па. Потім відкачують камеру до тиску 26–52 Па, подають на електроди напругу і збуджують тліючий розряд. Після оброблення поверхні упродовж 5–60 хв за 24 режимом катодного розпилення напругу знижують із 1100–1400 В до робочої (450–900 В), а тиск підвищують до $(1,3–13) \cdot 10^2$ Па. Робоча температура процесу (470–580 °С) досягається за 15–30 хв. Швидкість нагрівання визначається розміром поверхні і масою деталей. Після ізотермічної витримки деталі охолоджують до кімнатної температури під вакуумом. Під час підготовки деталей до азотування вони проходять такий самий технологічний ланцюжок, як і за звичайного газового процесу. Також необхідно враховувати збільшення геометричних розмірів. Рекомендується затупляти гострі кромки і задирки, що дозволить уникнути їх перегрівання і оплавлення. Захист поверхні від азотування досягається гальванічними покриттями (наприклад, нікелевими товщиною 10–15 мкм) і застосуванням екранів. Оскільки в зазорі менше ніж 1 мм тліючий розряд не виникає, то щоб унеможливити утворення шару на екранованих поверхнях, досить покрити поверхню, що захищається, металевим або діелектричним екраном, встановити гайки, гвинти, втулки тощо [21].

2.5 Методики досліджень

2.5.1 Металографічний аналіз

Для вивчення структури досліджуваних зразків була застосована оптична металографія. Металографічний аналіз було проведено за допомогою оптичного світлового мікроскопу МІМ-7. Він дозволяє роздивлятись при збільшенні непрозорі тіла у відбитому від поверхні металевого зразка світлі на відміну від біологічних мікроскопів, в яких вивчають прозорі тіла в прохідному світлі [26].

Для дослідження мікроструктури було приготовано мікрошліф для мікроаналізу. Полірування здійснювалося на шліфувальному диску, обтягнутому фетром, попередньо промитому і вимоченому у воді протягом 1-2 годин. При поліруванні застосовували обертові круги, обтягнені сукном. Вода із завислими часточками абразивного матеріалу окису хрому наносилася на поверхню

полірувального зразка, яка полірувалася завдяки легкому притискуванню до обертового полірувального круга. При поліруванні зразок повільно обертало навколо осі, перпендикулярної до площини полірування. Після полірування зразок мав дзеркальну поверхню, вільну від рисок при дослідженні його при будь-якому збільшенні мікроскопа. Далі, з метою виявлення структури, шліфи зазнавали травлення. Для травлення використовувався 4% спиртовий розчин азотної кислоти. Готовий зразок був промитий водою і висушений в струмені теплого повітря [26].

2.5.2 Методика визначення мікротвердості

Мікротвердість, разом із втомною міцністю та стійкістю до зношування, вважається однією з найбільш розповсюджених механічних характеристик металів і сплавів. Випробування на мікротвердість має відмінності від інших методів визначення механічних властивостей, бо відрізняється високою чутливістю та швидкістю проведення випробувань, що дозволяє мінімізувати витрати на їхню підготовку [27].

Для вимірювання мікротвердості зразків сталей використовувався прилад ПМТ-3, з навантаженнями на індентор $P = 1 \text{ Н}$ та витримкою при цьому навантаженні протягом 10 секунд. В літературі доступні детальні відомості щодо методу визначення мікротвердості матеріалів, а також про мікроструктурні зміни, які відбуваються під час проведення випробувань, і фізичної природи процесів мікроідентифікації. Під час вимірювання мікротвердості використовувався правильний чотиригранний алмазний індентор з кутом при вершині між протилежними гранями 136° , аналогічно методу визначення твердості за Віккерсом. Кількість вимірювань на один зразок становила не менше 20. При проведенні випробувань дотримувалися таких вимог: відстань від центру відбитка до краю повинна бути не менше подвійного розміру відбитка; відстань між центрами сусідніх відбитків повинна перевищувати розмір відбитка більше ніж у 3 рази; мінімальна товщина шару повинна перевищувати глибину відбитка не менше ніж у 10 разів [28].

2.5.3. Методика визначення фазового складу

Фазовий склад і структурний стан досліджували методом рентгенівської дифракції на дифрактометрі ДРОН-3М, принцип дії якого базується на явищі дифракції рентгенівських променів під час пошарового аналізу поверхні зразка в мідному $K_{\alpha 1}$ -випромінюванні. Зйомку здійснювали за точковим режимом із кроком сканування $\Delta(2\theta) = 0,05-0,2^\circ$ і тривалістю накопичення імпульсів у кожній точці 20-40 с. У всіх дифрактометрах передбачена можливість монохроматизації характеристичного рентгенівського випромінювання, а в дифрактометрах із пропорційними або сцинтиляційними лічильниками – можливість селективної реєстрації квантів дифрагованого рентгенівського випромінювання з певною енергією [29].

Серед рентгенівських дифрактометрів загального призначення найпростішим є ДРОН-3М. Дифрактометр ДРОН-3М призначений для виконання широкого кола рентгеноструктурних досліджень монокристалів та полікристалів різних матеріалів. Застосування спеціальних приставок уможливорює проведення досліджень з охопленням області кутів, починаючи з 12 хвилин; у температурних інтервалах від +20 до +2000 °С та від +20 до -180 °С [29].

Основними частинами дифрактометра ДРОН-3М є фактично рентгенівський апарат, гоніометричний блок, блок автоматичного управління, електронно-обчислювальний пристрій, пристрій виведення інформації [29].

Забезпечений рентгенівський апарат призначений для отримання рентгенівських променів і складається з рентгенівської трубки, блоків, що оберігають обслуговуючий персонал від ураження електричним струмом, а рентгенівську трубку від навантаження (наприклад, від оплавлення анода при відключенні охолодження). Анод рентгенівської трубки та генератор високовольтного джерела живлення охолоджуються проточною водою з витратою не менше ніж 3 л/хв [29].

Гоніометричний блок розташований на плиті і включає гоніометр ГУР-5, рухомий кронштейн з механізмом юстування і знімним кожухом рентгенівської трубки і спеціальний захист оператора від рентгенівського випромінювання.

Гоніометр призначений для точного вимірювання кутів повороту досліджуваного зразка та лічильника квантів щодо первинного пучка рентгенівських променів і складається з наступних вузлів [29]:

- корпуси з розміщеною в ньому кінематичною схемою, що забезпечує роздільне або спільне обертання зразка та лічильника вручну або електродвигуна;
- обертається навколо осі гоніометра утримувача зразка або спеціальної приставки;
- обертового навколо тієї ж осі кронштейна лічильника;
- системи відліку кутів повороту зразка та лічильника з оптичним проектором;
- системи щілин з боку рентгенівської трубки та перед лічильником.

Крім того, в гоніометричному блоці можуть бути розміщені пристосування для монохроматизації падаючого або дифрагованого випромінювань [29].

2.5.4 Визначення триботехнічних властивостей сталей

Випробування на зносостійкість в умовах тертя ковзання проводили на машині СМЦ-2 за схемою “ролик-ролик“, методика випробування на якій стандартизована. Машина для випробування матеріалів на тертя і зношування СМЦ-2 (рис. 2.1) призначена для вивчення процесу тертя і зносу, антифрикційних властивостей матеріалів під час тертя ковзання і тертя кочення [30].



Рисунок 2.2 Машина для випробування матеріалів на тертя і зношування СМЦ-2 [30]

Основні технічні дані машини СМЦ-2 наведено нжче.

1. Частота обертання вала нижнього зразка 300, 500, 1000 об/хв.
2. Допустима похибка частоти обертання вала нижнього зразка від вимірюваної величини 10%.
- 3 Число розрядів лічильника числа обертів вала нижнього зразка 6.
4. Номінальна ціна одиниці найменшого розряду лічильника сумарного числа обертів 100 об.
5. Максимальний момент тертя 15.
6. Межі вимірювання моменту тертя від 1,5 до 15 .
7. Допустима похибка вимірювання моменту тертя (при перевірці в режимі статичного навантаження) від вимірюваної величини .
8. Навантаження на зразки від 200 до 5000 Н.
9. Допустима похибка прикладання навантаження від вимірюваної величини .
10. Споживана потужність 2,2 кВт.
11. Живлення від трифазної мережі 380 V, 50 Гц.

Принцип дії машини полягає в стиранні пари зразків притиснутих один до одного з силою. В нашому випадку один ролик обертався, а другий був нерухомим, що дозволило моделювати тертя ковзання при різних умовах. В якості матеріалу контртіла в усіх випадках застосовували сталь Р6М5, та Р6М5К5 термооброблену до твердості 63...65 НРС. Швидкість ковзання становила $V = 1-4$ м/с, навантаження $P = 1-4$ МПа, шлях тертя $S = 50-200$ м. Після випробувань зразки промивали спиртом, сушилися і зважувалися на електронних вагах ВА 200 з точністю до четвертого знаку після коми при температурі 20 °С. Коефіцієнт тертя визначали протягом перших 200 с тертя (в момент припрацювання) і підраховували середнє значення [30].

Висновки

Інструмент зі швидкорізальних сталей має досить високу стабільність властивостей, що особливо важливо в умовах гнучкого автоматизованого виробництва.

Сталь марки P6M5 є найпоширенішою з усіх груп швидкорізальних сталей, обсяг її виробництва становить 80 % від загального виробництва швидкорізальних сталей. Перевагою сталі P6M5 в тому, що з неї можливо виготовляти майже будь-які типи PI (свердла, різці, фрези та ін.), які використовуються для обробки сталей, кольорових металів і сплавів, чавунів, дерева, композиційних та інших матеріалів.

Швидкорізальні сталі з більш високим вмістом ванадію понад 2%, а також додатково леговані кобальтом відносять до сталей підвищеної теплостійкості (P12Ф3, P6M5Ф3, P18K5Ф2, P9K5, P6M5K5, P9M4K8 та ін.). У роботі будемо проводити дослідження для сталі підвищеної теплостійкості P6M5K5, що застосовується для обробки високоміцних нержавіючих і жароміцних сталей і сплавів в умовах підвищеного розігріву ріжучої кромки.

У дослідженні використовуються наступні методи аналізу структури, зокрема металографічний аналіз, рентгенівська дифракція та рентгеноструктурний аналіз, мікроскопія поверхні, вимірювання мікротвердості, що дозволяють оцінити структурно-фазові перетворення, механічні та трибологічні властивості отриманих шарів.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МЕХАНІЗМІВ ФОРМУВАННЯ ТОНКИХ МОДИФІКОВАНИХ ШАРІВ У СТАЛЯХ ПРИ ІОННО-ПЛАЗМОВОМУ АЗОТУВАННІ

3.1 Критерії відбору та оцінки покриттів для аналізу формування тонких модифікованих шарів у сталей під час іонно-плазмового азотування

Іонне азотування - це процес термічної обробки металевих виробів з метою покращення їхніх механічних та фізичних властивостей, зокрема міцності, твердості та стійкості до корозії. Процедура полягає в напусканні іонів азоту на поверхню металу, що призводить до утворення азотовмісного шару на поверхні виробу. Іони азоту, зазвичай у формі азоту, надходять на поверхню металу під впливом високої температури та вакууму.

Цей процес сприяє підвищенню зносостійкості і тривалості служби металевих деталей, особливо в галузях, де вимагається висока стійкість до тертя та корозії, таких як автомобільна промисловість, аерокосмічна техніка та виробництво інструментів. Важливість іонного азотування полягає в тому, що воно дозволяє покращити властивості металів без зміни їхньої загальної структури та форми, що забезпечує точність та збереження форми виробів.

Дослідження критеріїв відбору та оцінки покриттів для аналізу формування тонких модифікованих шарів у сталей під час іонно-плазмового азотування має на меті розробити систему оцінки ефективності та якості отриманих покриттів, а також встановити ключові критерії, які дозволять вибрати оптимальні параметри процесу для досягнення необхідних характеристик сталі Р6М5.

Іонне азотування широко відоме і як один з ефективних методів підвищення зносостійкості різального інструменту, виготовленого зі швидкорізальних сталей марки Р6М5, Р18, Р6М5К5, Р12Ф4К5 та ін.

Азотування підвищує зносостійкість інструменту і його теплостійкість. Азотована поверхня інструменту, що володіє зниженим коефіцієнтом тертя і поліпшеними антифрикційними властивостями, забезпечує більш легке відведення стружки, а також запобігає її налипанню на ріжучі кромки і утворенню лунок зносу, що дає можливість збільшити подачу і швидкість різання.

Оптимальною структурою азотованої швидкорізальної сталі є високоазотистий мартенсит, що не містить надлишкових нітридів. Зазначена структура забезпечується насиченням поверхні інструменту азотом за температури 480-520 °С у процесі короткочасного азотування (до 1 години).

У результаті іонного азотування різальних інструментів (фрез, свердел, мітчиків, протяжок тощо) поліпшуються їхні різальні властивості, підвищується зносостійкість і продуктивність.

Дослідження закономірностей та механізмів дифузійно-контрольованих структурно-фазових перетворень у сталях при низькотемпературному іонно-плазмовому азотуванні (при температурах менше 550 °С) передбачає аналіз процесів дифузії азоту, фазових перетворень у матеріалі, а також вивчення впливу цих перетворень на механічні та трибологічні властивості сталей Р6М5 і Р6М5К5.

Для повноти аналізу важливо провести дослідження впливу структурно-фазового стану модифікованих шарів на їхні механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості. Це передбачає тестування покриттів на міцність, твердість, адгезію, зносостійкість та корозійну стійкість, що дозволить оцінити їхню придатність для конкретних умов експлуатації.

Загальна мета цього дослідження полягає в забезпеченні підвищення якості та тривалості служби сталей Р6М5 і Р6М5К5 за допомогою оптимізації параметрів іонно-плазмового азотування та вивчення впливу отриманих шарів на різноманітні властивості матеріалу. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення технологічних процесів та розробки нових матеріалів з покращеними характеристиками для специфічних галузей промисловості (табл. 3.1).

Зазначені значення є загальними орієнтирами і можуть варіюватися в залежності від конкретних параметрів процесу азотування, якості вихідного матеріалу і вимог до кінцевого застосування сталей Р6М5 і Р6М5К5. Для конкретних досліджень і виробничих завдань важливо встановити точні параметри оцінки на основі вимог і специфікацій.

Таблиця 3.1

Критерії відбору та оцінки покриттів для аналізу формування тонких модифікованих шарів у сталей під час іонно-плазмового азотування.

Критерії відбору та оцінки покриттів	Параметри оцінки	Показники (приблизно)
Товщина покриття (мікрон)	Мінімальна товщина, що гарантує високу стійкість	5-20 мкм
Мікроструктура	Рівномірність, відсутність дефектів	Гомогенна структура без видимих дефектів
Фазовий склад	Вміст різних фаз, стабільність	Високий вміст азоту, стабільні фази
Механічні властивості	Міцність, твердість, еластичність	Міцність від 800 до 1200 МПа, твердість від 600 до 900 HV
Трибологічні характеристики	Зносостійкість, стійкість до тертя	Висока стійкість до тертя та зносу
Корозійна стійкість	Стійкість до корозії в різних середовищах	Висока стійкість до корозії в агресивних середовищах
Адгезія	Сила зчеплення покриття з базовим матеріалом	Висока адгезія без відколів

3.2 Види матеріалів покриттів та їх властивості при формуванні тонких модифікованих шарів на сталях під час іонно-плазмового азотування

У процесі іонно-плазмового азотування застосовуються різноманітні матеріали покриттів, які забезпечують різні властивості та характеристики кінцевого шару.

Серед найпоширеніших видів матеріалів покриттів варто виділити наступні.

Титанові сполуки: такі покриття відомі своєю високою міцністю та стійкістю до корозії, що робить їх популярними у виробництві авіаційних та автомобільних компонентів, де важлива легкість і міцність матеріалу.

Карбіди: покриття на основі карбідів, таких як вуглецеві карбіди або бориди, відомі своєю високою твердістю та зносостійкістю. Вони широко використовуються в виробництві інструментів та деталей, де важлива стійкість до зношування.

Нітриди: матеріали покриттів на основі нітрідів, зокрема алюмінієві та титанові нітриди, забезпечують високу корозійну стійкість та міцність. Вони застосовуються в виробництві аерокосмічної техніки та медичних інструментів.

Ковзні покриття: деякі матеріали покриттів спеціалізуються на покращенні трибологічних характеристик поверхні, забезпечуючи високу стійкість до тертя та зношування. Це особливо важливо в виробництві підшипників та інших механізмів, де зносостійкість має вирішальне значення.

Сталеві сплави з покриттями: деякі варіанти покриттів включають сталеві сплави з додаванням різноманітних елементів, які поліпшують механічні властивості поверхні, такі як твердість, міцність та стійкість до зношування.

Ці різноманітні матеріали покриттів використовуються для формування тонких модифікованих шарів на сталях під час іонно-плазмового азотування, забезпечуючи підвищену міцність, стійкість до корозії та зношування, а також поліпшення трибологічних властивостей поверхні.

Вибір конкретного матеріалу покриття залежить від вимог до кінцевого застосування високолегованих сталей P6M5 і P6M5K5 та конкретних умов експлуатації.

Керамічні покриття: деякі іонно-плазмові азотування використовують керамічні матеріали для створення покриттів з високою твердістю, термічною стійкістю та стійкістю до корозії. Ці покриття зазвичай застосовуються в умовах високих температур і агресивних середовищ, де вимагається висока стійкість матеріалу.

Полімерні покриття: деякі застосування іонного азотування включають полімерні покриття, які забезпечують не лише захист від корозії, а й мають властивості зменшення тертя та зношування. Вони часто використовуються у біомедичних додатках та інших спеціалізованих галузях.

Діелектричні покриття: у деяких випадках іонне азотування використовується для створення діелектричних покриттів, які забезпечують електричну ізоляцію та захист від корозії в електроніці та інших високотехнологічних додатках.

Нанокompatитні покриття: останнім часом нанокompatитні матеріали отримали значну популярність у сфері іонного азотування. Вони поєднують у собі переваги різних матеріалів, надаючи високу міцність, твердість та стійкість до зношування, що робить їх універсальними для багатьох промислових застосувань.

Ці види матеріалів покриттів відображають різноманітність та гнучкість технології іонно-плазмового азотування. Вибір конкретного типу покриття залежить від вимог до механічних, трибологічних та фізико-хімічних властивостей кінцевого продукту, а також від конкретного застосування у виробничому середовищі. Детальне вивчення властивостей та видів матеріалів покриттів важливо для оптимізації технологічних процесів та поліпшення характеристик кінцевих виробів.

3.3 Аналіз результатів експериментальних досліджень покриттів для розкриття механізмів формування тонких модифікованих шарів у сталях під час іонно-плазмового азотування

У зв'язку з дослідженням закономірностей і механізмів формування тонких модифікованих шарів у сталях під час іонно-плазмового азотування, важливо

проаналізувати вплив різних параметрів процесу на структурні та фізико-хімічні властивості отриманих шарів. Це включає вивчення впливу температури, часу обробки, газового середовища, концентрації азоту та інших факторів на товщину, мікроструктуру, фазовий склад та механічні характеристики покриттів.

3.3.1 Дослідження структури, морфологічних особливостей та рентгеноструктурний аналіз азотованих покриттів у процесі формування тонких модифікованих шарів на високолегованих сталях P6M5 і P6M5K5 під час іонно-плазмового азотування

Процеси азотування вивчали при використанні ріжучих пластин зі сталей P6M5 і P6M5K5 після стандартної термообробки (HRC 63-65). Глибину азотування і фазовий склад визначали за зміною мікротвердості (прилад ПМТ-3, навантаження 50 і 100 г) і пошаровим рентгенографуванням (ДРОН-3М, випромінювання ліній $\text{CuK}\alpha$). Після правильно проведеної термічної обробки сталі P6M5 та P6M5K5 повинні мати структуру мартенситу з рівномірно розподіленими дрібними і середньої величини карбідами (рис. 3.1).

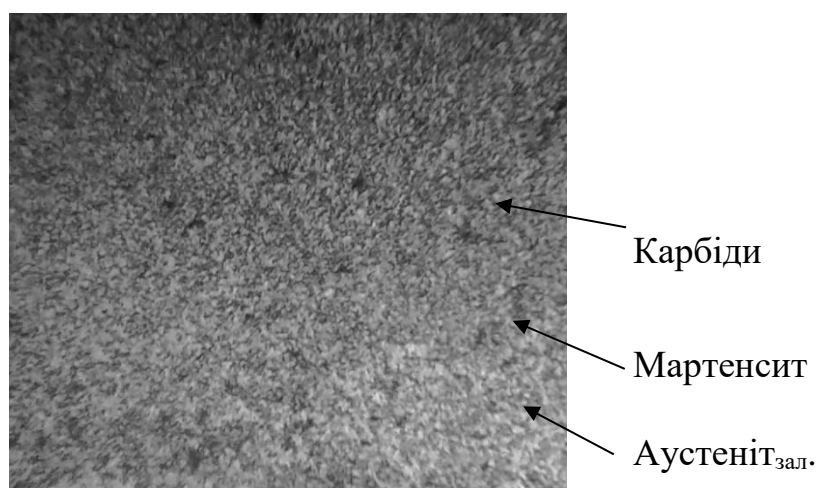
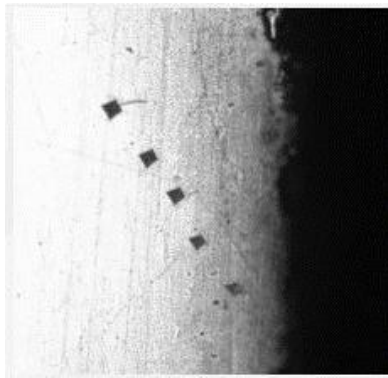
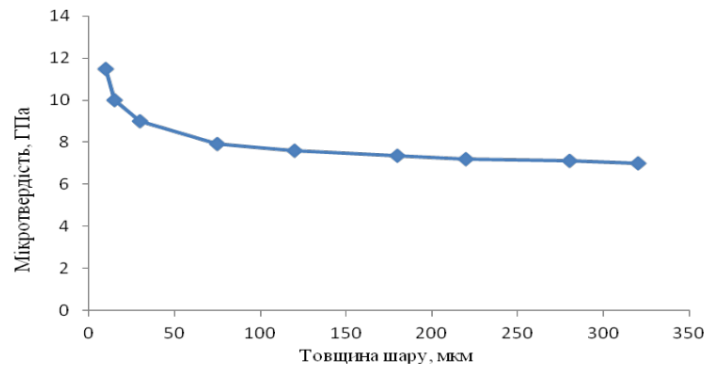


Рисунок 3.1 – Мікроструктура сталей P6M5 і P6M5K5 після термічної обробки (ізотермічний відпал, гартування з підігрівом, 2 відпуски), $\times 500$

Вимірювання мікротвердості по глибині дифузійної зони проводили на поперечному шліфі зразків (рис. 3.2).



а



б

Рисунок 3.2 - Вимірювання мікротвердості на зразку зі сталі Р6М5 після азотування (а) та мікротвердість азотованого шару (б)

Мікротвердість азотованого шару сталі Р6М5 досягає максимального значення в 10,5 ГПа, а потім зменшується до вихідного значення сталі (рис. 3.2).

Висока мікротвердість поверхневого шару сталі Р6М5 пояснюється формуванням азотистого мартенситу і дисперсного нітриду (фаз ϵ та γ'), а також наявністю високотвердих нітридів та карбонітридів легуючих елементів, таких як Мо, W, Cr, V. Структура азотованого поверхневого шару, яка має ці характеристики, сприяє високій стійкості до зносу та вдосконаленню експлуатаційних властивостей Р6М5.

Структуру сталі Р6М5 після іонного азотування за різного часу азотування представлено на рисунку 3.3.

На мікроструктурі зразків спостерігається темна дифузійна зона, що являє собою азотистий ферит з ОЦК-решіткою, причому зі збільшенням відстані розташування, зразка від магніту глибина азотованого шару зменшується, що відповідає результатам інших авторів [32].

Перехід від азотованого шару до основи (матриці) матеріалу плавний, що є однією з основних вимог до мікроструктури азотованої сталі, що відповідає результатам інших авторів [6].

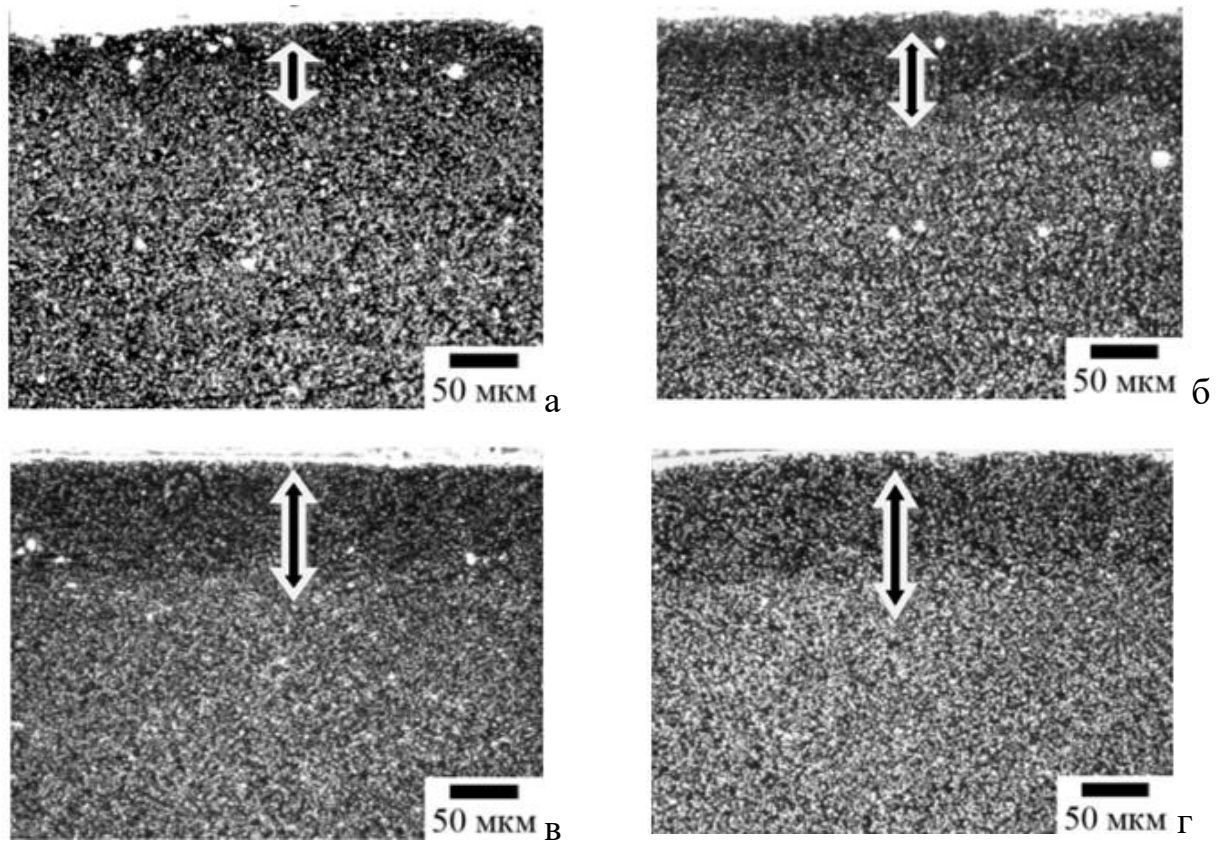


Рисунок 3.3 - Мікроструктура сталі Р6М5 після іонного азотування при температурі 500 °С за різного часу азотування: а - 30 хвилин; б - 40 хвилин; в - 60 хвилин; г - 80 хвилин

Результати вимірювань за різного часу азотування зведено у таблицю 3.2.

Таблиця 3.2

Механічні властивості зразків зі сталі Р6М5 після іонного азотування за різного часу азотування

Час азотування хвилини	30	40	60	80
Мікротвердість азотованого шару, НV	710	747	748	1050
Глибина азотованого шару, мкм	30	40	55	65

Порівняльний аналіз дифрактограм показує, що азотування при $P_N = 5 \cdot 10^{-2}$ Па і температурі 350 °С протягом 40 хвилин призводить до помітних змін фазового та структурного станів. Зміщення дифракційного максимуму (110) Fe в область малих кутів відбиття свідчить про утворення твердого розчину азоту в залізі та появу слідів $Fe_{2-3}N$. Тенденція посилюється з підвищенням температури азотування.

Зміни фазового складу поверхні сталі Р6М5 наведено на рис. 3.4 і 3.5.

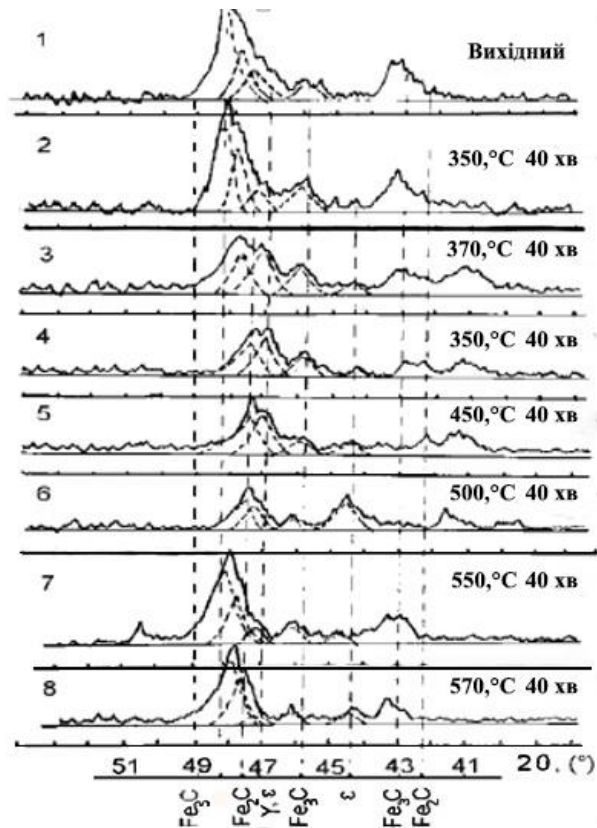


Рисунок 3.4 - Фрагменти дифрактограм сталі Р6М5, азотованої протягом 40 хвилин за різних температур: 1 - вихідний стан; 2 - 8 - обробка при температурах 350 - 570°С; 2θ - кути відбиття рентгенівських променів

Для зразків, азотованих в інтервалі температур 450 - 500 °С на глибині проникнення рентгенівських променів, виявляється шар ϵ -фази. За більш високих температур азотування (550 - 570 °С) нітридні фази на поверхні не створюються в помітних кількостях, і збільшення мікротвердості зумовлене головним чином утворенням твердого розчину азоту в залізі.

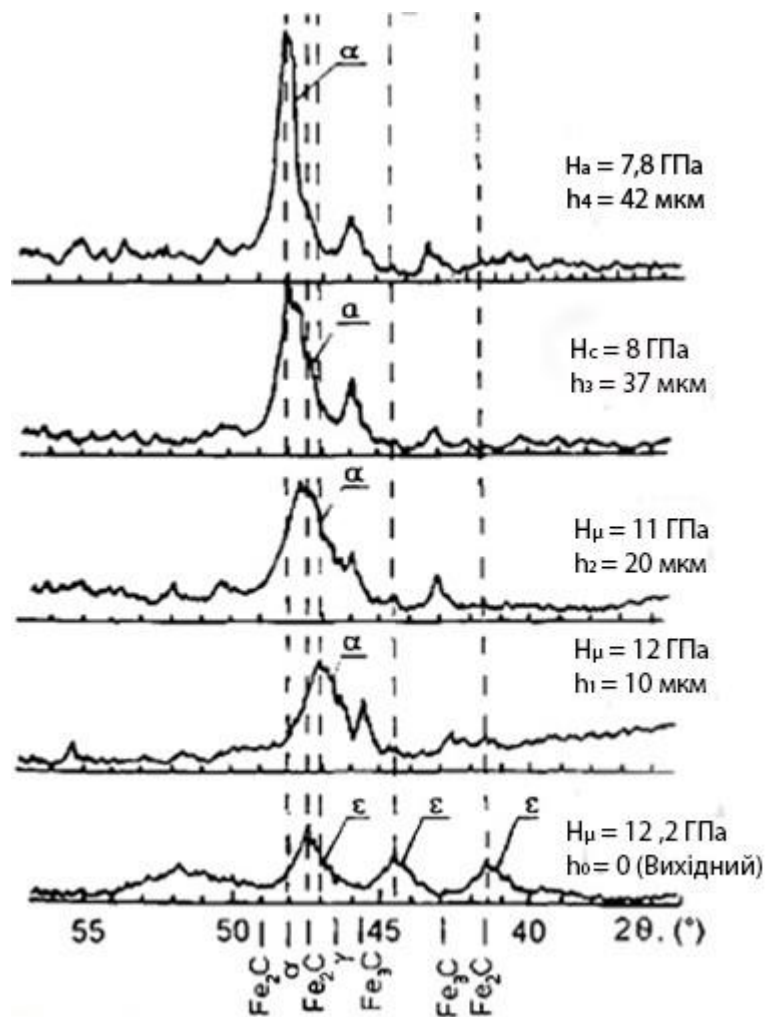


Рисунок 3.5 - Фрагменти дифрактограм, знятих для азотованої сталі Р6М5 на різній глибині

Пошаровий рентгенівський аналіз дає типову картину зміни фазового складу за глибиною (рис. 3.5). У приповерхневій зоні на глибині проникнення рентгенівських променів (~ 3 мкм) існує азотований шар, що складається з Fe_{2-3}N і Fe_4N .

У міру стравлювання шарів залишаються нижчі нітриди та твердий розчин із різною концентрацією азоту. Дифракційний максимум (110) зміщується в бік більших кутів відбиття і наближається до значення, що відповідає вихідному стану Р6М5 на глибині ~ 40 мкм.

Оптимальною структурою азотованої швидкорізальної сталі Р6М5К5 (рис. 3.6) є високоазотистий мартенсит, який не містить надлишкових нітридів.

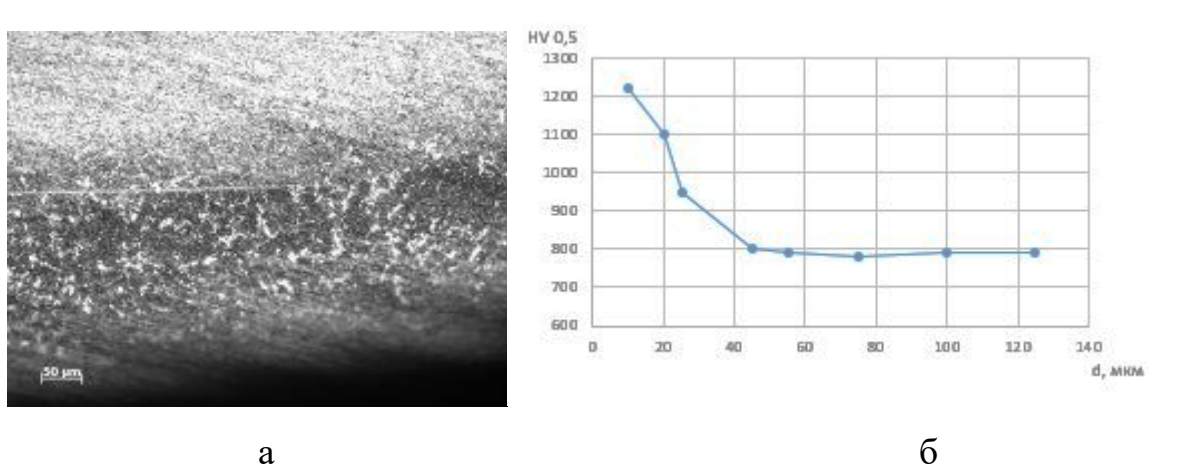


Рисунок 3.6 - Мікоструктура поверхневого зміцненого шару швидкорізальної сталі Р6М5К5 після іонного азотування (а) і розподіл мікротвердості за глибиною азотованого шару (б)

Зазначена структура забезпечується насиченням поверхні інструменту зі сталі Р6М5К5 азотом за температури 480-520 °С у процесі короткочасного азотування (до 1 години). При цьому формується зміцнений шар глибиною 20-40 мкм з мікротвердістю поверхні 1000-1200 HV_{0,5} за твердості серцевини 800-900 HV (рис. 3.6), а стійкість інструменту після іонного азотування збільшується в 2-8 разів залежно від його типу і виду оброблюваного матеріалу.

Головною перевагою іонного азотування інструменту зі сталі Р6М5К5 є можливість отримання тільки дифузійного зміцненого шару, або шару з монофазним нітридом Fe₄N (γ' -фаза) на поверхні, на відміну від класичного газового азотування в аміаку, де нітридний шар складається з двох фаз - γ' + ϵ , що є джерелом внутрішніх напружень на межі розділу фаз і спричиняє крихкість та відшаровування зміцненого шару під час експлуатації. що є джерелом внутрішніх напружень на межі розділу фаз і спричиняє крихкість та відшаровування зміцненого шару під час експлуатації.

На рисунку 3.7 показані рентгенівські рентгенограми сталі Р6М5К5 до і після азотування, виконані методом рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі ДРОН-3М в CuK _{α} - випромінюванні. Рентгеноструктурний аналіз показав, що у

вихідному стані, тобто після стандартної термічної обробки, структура сталі Р6М5К5 має мартенсит (α -фаза) і карбіди M_6C , MC .

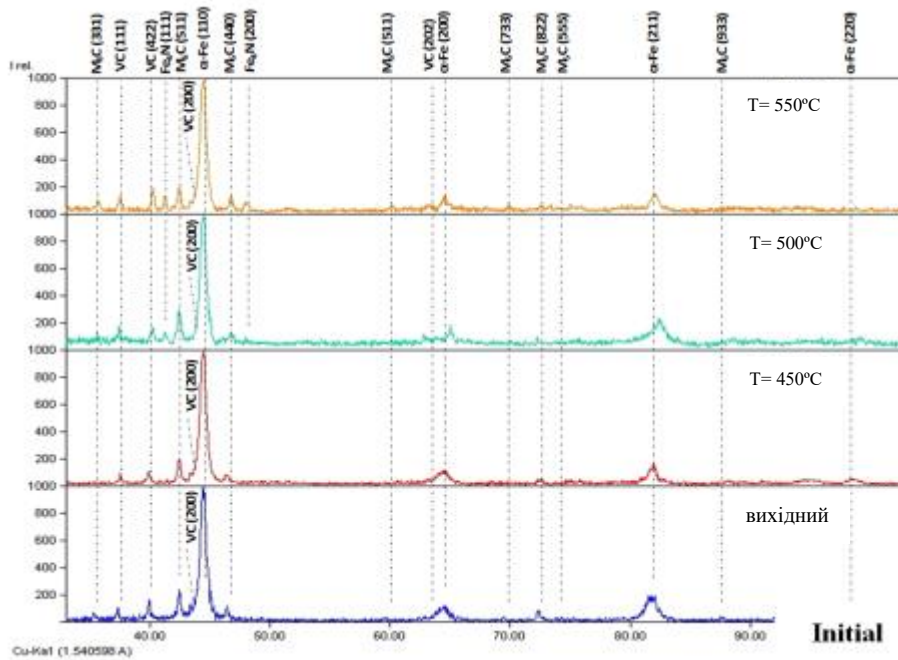


Рисунок 3.7 - Рентгенівські рентгенограми сталі Р6М5К5 до та після азотування

Після процесу азотування відбувається розширення, зменшення інтенсивності інтенсивності та зсув у бік менших кутів Бреґа дифракційної лінії (110) α - фази, що свідчить про утворення α - фази, що свідчить про утворення твердого розчину азоту в залізі, тобто зони внутрішнього азотування, що зазначено і в інших авторів [34]. На дифракційних профілях зразків сталі Р6М5К5, азотованих при $T = 500^\circ C$ і $T = 550^\circ C$, виявлено інтерференційні лінії Fe_4N - фази.

Як відомо із [34], основними легуючими елементами швидкорізальної сталі Р6М5К5 є вольфрам, молібден, ванадій, кобальт та хром. Ці елементи утворюють в сталі особливі карбіди: M_6C - на основі вольфраму і молібдену, MC - на основі ванадію та $M_{23}C_6$ - на основі хрому. Рентгеноструктурний аналіз показує, що в структурі сталі присутні карбіди M_6C і MC , але карбіди $M_{23}C_6$ відсутні (рис. 3.7). У деяких дослідженнях є вказівки на те, що в структурі сталі Р6М5К5 після стандартної термообробки що після стандартної термічної обробки структура сталі

P6M5K5 містить лише частинки карбиду M_6C . Очевидно, це пов'язано з малою об'ємною часткою карбідів карбідів MC і схожістю цих частинок з матрицею, яка не може їх виявити їх.

Запропонована конфігурація карбиду M_6C знаходиться між формулами $Fe_3(W,Mo)_3C$ - $Fe_4(W,Mo)_2C$ [34]. Іншими словами, крім атомів молібдену та вольфраму в карбідах M_6C може бути до $2/3$ атомів заліза від загальної кількості атомів металу. Крім того, атоми хрому і ванадію можуть розчинятися, заміщуючи атоми заліза.

У результаті проведених досліджень з'ясовано, що іонно-плазмове азотування впливає на структурні властивості сталей P6M5 і P6M5K5. Тривалість процесу ізотермічної витримки значно впливає на глибину та мікротвердість модифікованого шару. Збільшення тривалості азотування сприяє формуванню більш стійкого та міцного шару, змінюючи структурно-фазові властивості сталі.

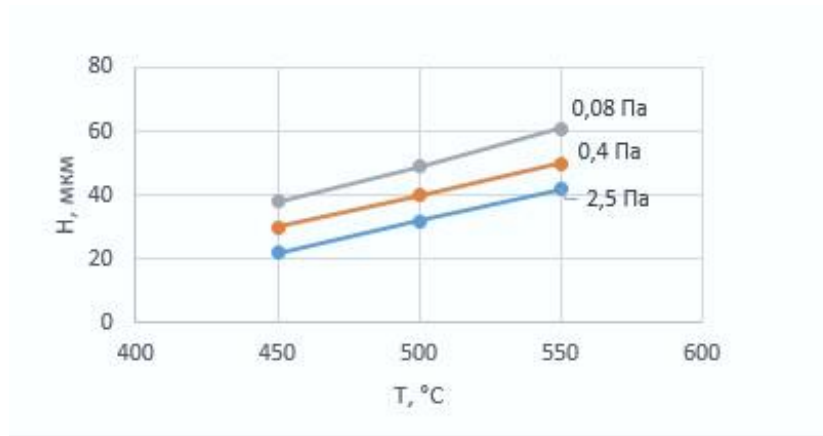
Аналіз результатів показав, що склад легуючих елементів також зазнав змін під час процесу азотування. Це свідчить про складний механізм взаємодії азоту з поверхнею сталі та утворення стійких нітридних фаз.

Важливість контролю тривалості та умов азотування для досягнення оптимальних властивостей матеріалу сталей P6M5 і R6M5K5 підкреслюється в цих дослідженнях. Результати підтверджують, що іонно-плазмове азотування може бути ефективним методом покращення властивостей сталі і використовується для підвищення міцності та стійкості до зношування.

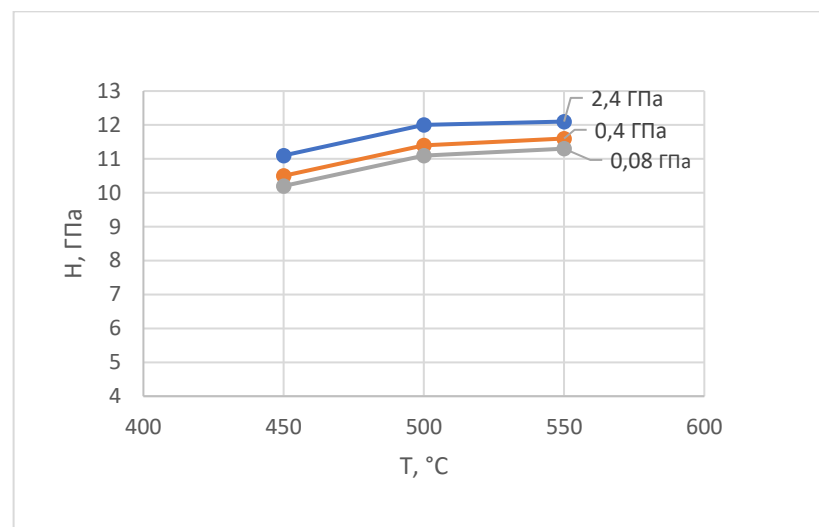
Додаткові дослідження можуть бути спрямовані на детальніший аналіз механізмів взаємодії азоту з поверхнею сталі, а також вивчення впливу інших параметрів процесу, таких як температура, тиск та склад газової суміші, на формування структурно-фазових шарів.

3.3.2 Вплив різних параметрів процесу нанесення покриттів шляхом іонно-плазмового азотування на мікротвердість сталей P6M5 і P6M5K5

Експерименти з визначення залежності товщини та мікротвердості азотованого шару від температури показали такі результати (рис. 3.8).



а



б

Рисунок 3.8 - Залежність товщини (а) і мікротвердості (б) азотованого шару Р6М5 від температури при різних тисках азоту; час азотування 40 хв.

Напруга на зразках була від'ємною, і її величина регулювалася за підтримання заданої температури в межах 150-200 В. Із графіків видно, що за інших рівних умов зі збільшенням тиску азоту швидкість азотування знижується, а мікротвердість зростає. Характер розподілу мікротвердості по товщині залежно від температури азотування показано на рисунку 3.9.

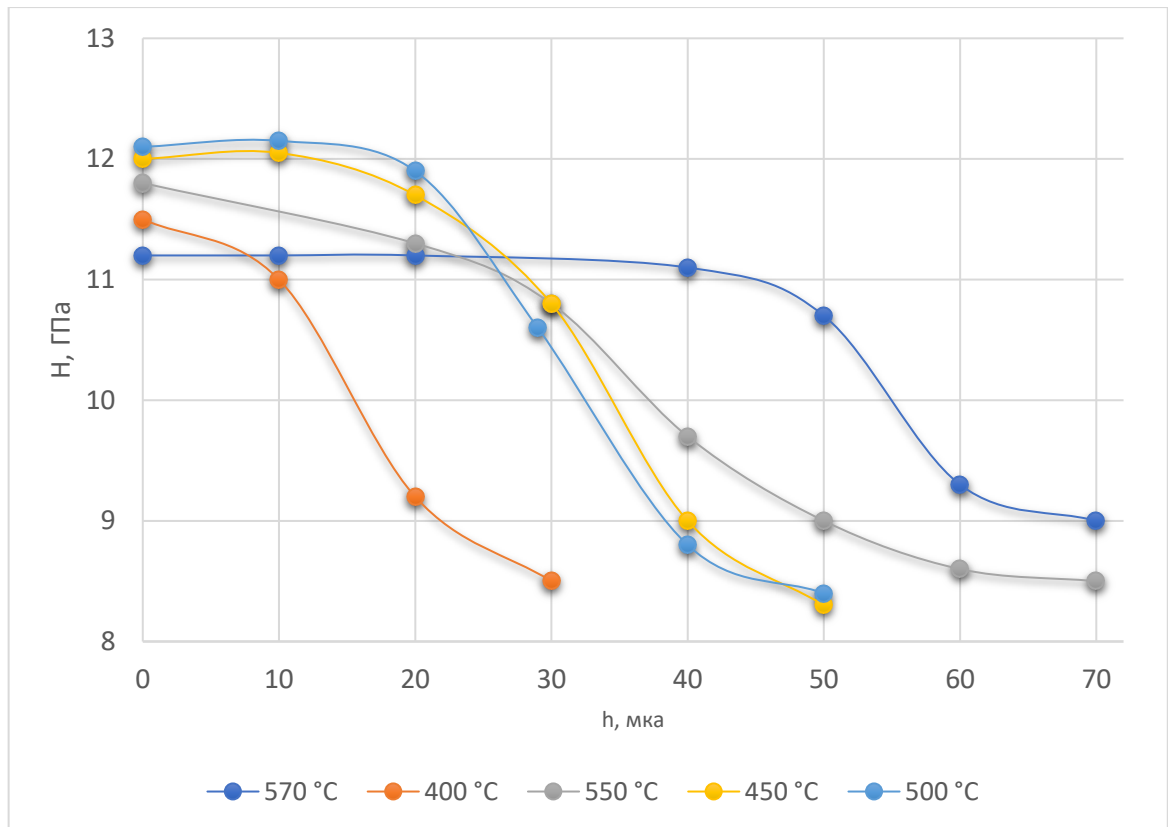


Рисунок 3.9 - Розподіл мікротвердості (Н) за глибиною (h) сталі Р6М5 за різних температур: час $t = 40$ хвилин; $P_{N_2} = 5 \cdot 10^{-2}$ Па

Із рисунка 3.9 видно, що мікротвердість верхніх шарів, отриманих за температури 570 °C, менша, ніж азотованих за нижчих температур, за рахунок розпаду ϵ -фази, що характеризується вищою твердістю, ніж твердий розчин азоту в залізі.

На рисунку 3.10 представлено мікроструктуру модифікованого поверхневого шару зразків зі сталі Р6М5К5, азотованих при температурах 450°C, 500°C та 550°C протягом 40 хвилин. Видно, що на поверхні спостерігається темний травлений азотований шар (що представляє собою азотний мартенсит). При цьому зона темного травлення плавно переходить в підкладку. Товщина азотованого шару в середньому становить 25-40 мкм і збільшується з підвищенням температури азотування, що є цілком закономірним.

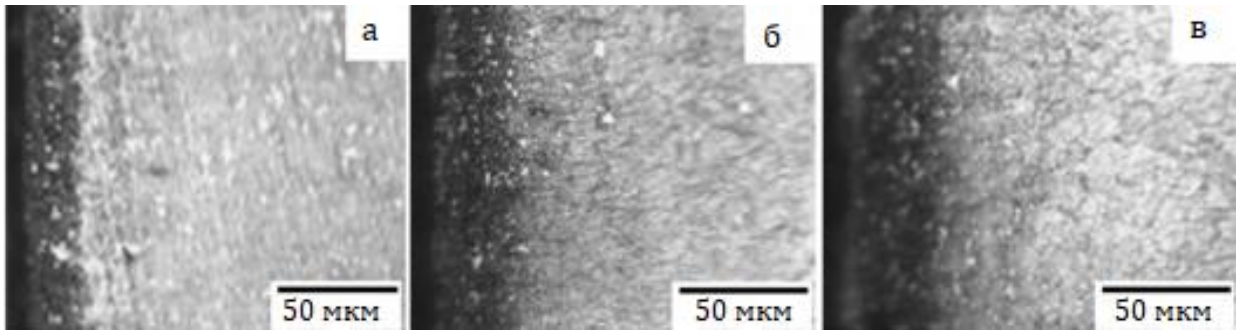


Рисунок 3.10 - Результати мікроструктурного аналізу сталі Р6М5К5

На рисунку 3.11 показано залежність мікротвердості поверхні шару сталі Р6М5К5 від температури азотування та розподіл мікротвердості за глибиною азотованого шару.

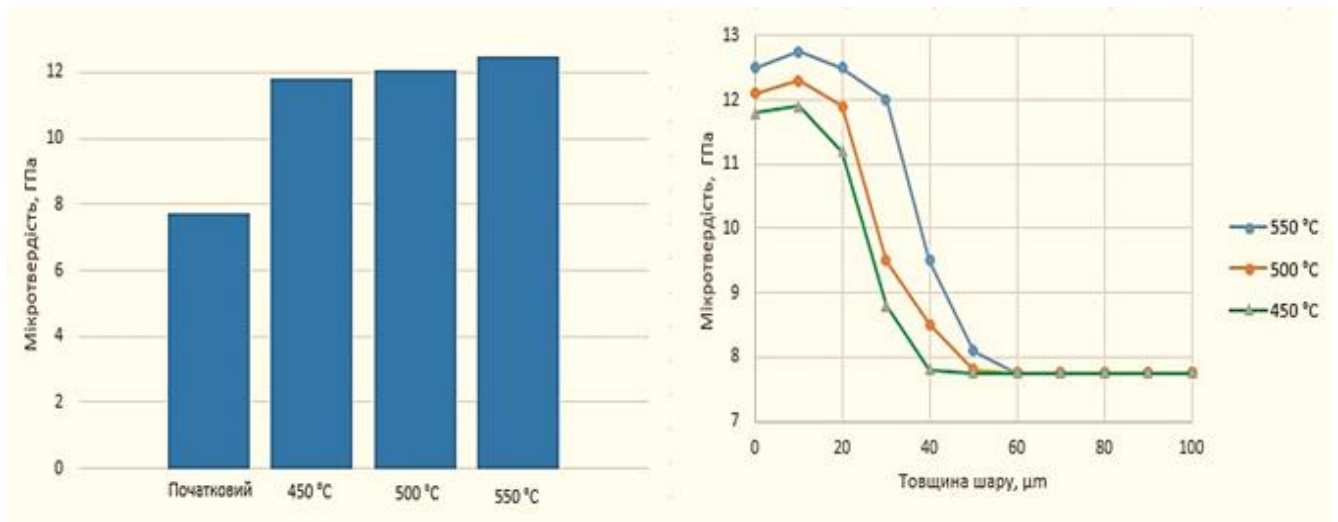


Рисунок 3.11 - Результати аналізу мікротвердості сталі Р6М5К5

Мікротвердість поверхні після азотування зростає в (1,5-1,6) разів. Видно значне збільшення мікротвердості біля поверхні оброблених сталевих зразків. Характер перехідної зони має плавний перехід від зміцненого шару до підкладки, при цьому мікротвердість підкладки при цьому мікротвердість підкладки суттєво не змінюється. Максимальна мікротвердість в залежності від температури азотування температури зростає. Це пов'язано зі структурно-фазовим станом поверхні модифікованого шару. Як показали рентгеноструктурні та електронно-мікроскопічні дослідження, структурно-фазовий стан модифікованого шару сталі Р6М5К5 змінюється залежно від від температури азотування. Так, при азотуванні

при $T = 500^{\circ}\text{C}$ і $T = 550^{\circ}\text{C}$, нітрид Fe_4N (γ' -фаза), утворюється на поверхні сталі Р6М5К5 поряд з азотистим мартенситом. Але при $T = 550^{\circ}\text{C}$ на поверхні сталі утворюються дрібнодисперсні частинки із середнім розміром $\sim 0,1$ мкм.

Іонно-плазмове азотування свердел зі сталі Р6М5К5 призводить до комплексного поліпшення характеристик робочих поверхонь деталей: підвищується твердість, зносостійкість, як наслідок поліпшуються адгезійні властивості, знижується коефіцієнт тертя.

Залежно від марки сталі та техпроцесу обробки, азотовані поверхні можуть набувати додаткової корозійної стійкості. Загалом, обробка методами іонного азотування призводить до багаторазового продовження ресурсу експлуатації свердел.

Результати металографічного дослідження сталі Р6М5К5 після режимів іонного азотування наведені в таблиці 3.3 та на рисунку 3.12.

Таблиця 3.3

Характеристики азотованого шару на сталі Р6М5К5

Свердло	Ø 1,85
Поверхнева мікротвердість, НV 0.1, кгс	1000 - 1090
Глибина шару за мікротвердістю, нм, мкм	25 - 50
Глибина шару за мікротвердістю, нс, мкм	46

У процесі іонного азотування на поверхні свердел, виготовлених зі сталі Р6М5К5, формується дифузійний шар, твердість якого в 3 - 4 рази вища за твердість основи.

Оброблена поверхня має високі антифрикційні властивості, зносо- і задиростійкість. Твердість і глибина азотованого шару на деталях-свідках має такі характеристики: Свердло Ø1,85 зі сталі Р6М5К5: поверхнева твердість 1000 - 1090 НV0,1; глибина шару за мікротвердістю 46 мкм (рис. 3.12).

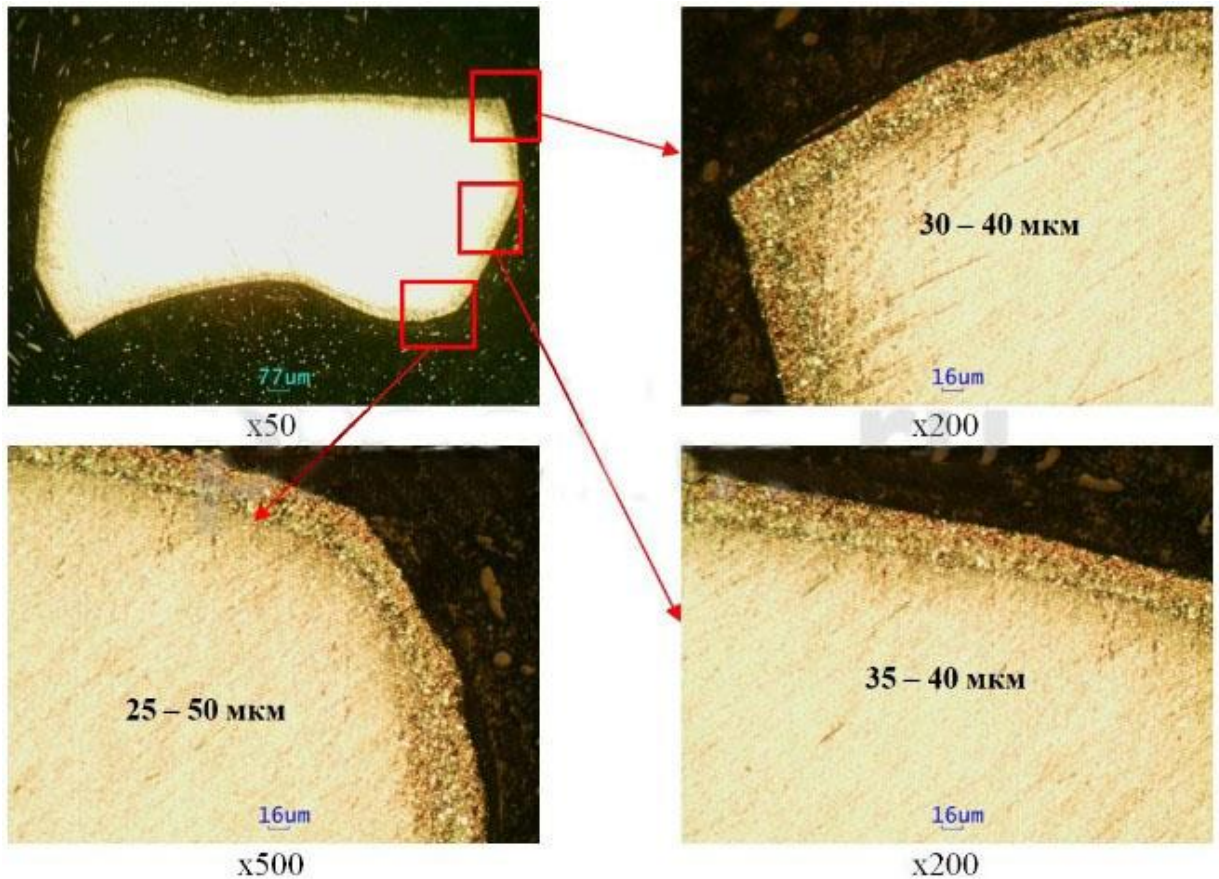


Рисунок 3.12 – Мікроструктура азотованого шару деталі-свідка "Свердло $\varnothing 1,85"$ зі сталі P6M5K5

Графік розподілу мікротвердості по глибині азотованого шару на деталі-свідку "Свердло $\varnothing 1,85"$ зі сталі P6M5K5 наведено на рисунку 3.13.

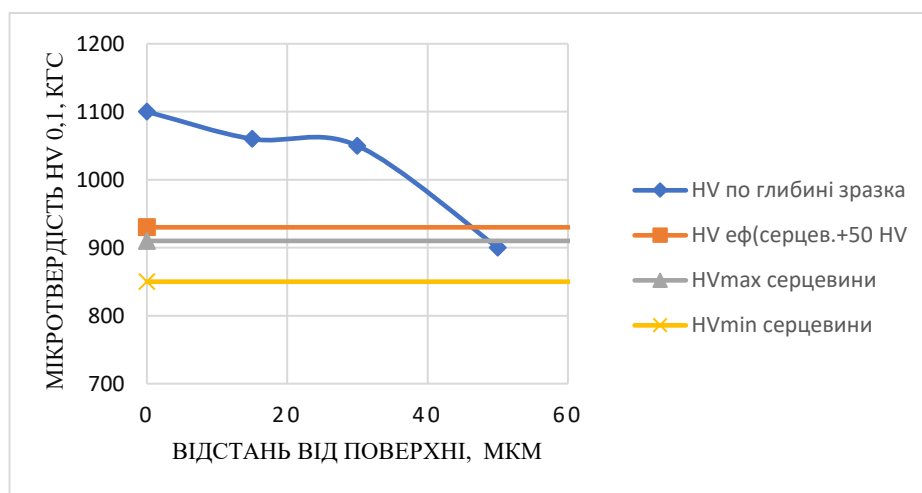


Рисунок 3.13 - Графік розподілу мікротвердості за глибиною азотованого шару на деталі-свідку "Свердло $\varnothing 1,85"$ зі сталі P6M5K5

У результаті проведених досліджень було виявлено, що температура і час ізотермічної витримки процесу іонного азотування має значний вплив на глибину модифікованого шару сталей P6M5 і P6M5K5.

Дифузія азоту в глибину сталі під час іонного азотування інтенсифікується завдяки трьом процесам: активації газової фази, збільшенню ступеня адсорбції та коефіцієнта дифузії. Позитивні іони азоту в електростатичному полі тліючого розряду набувають швидкості, спрямованої по нормалі до поверхні деталі. Енергія іона в 3000 разів перевершує його енергію при пічному азотуванні.

Значний вплив на мікротвердість та швидкість дифузії азоту має температура і тривалість азотування.

На основі мікроскопічних та рентгеноструктурних досліджень можна стверджувати що висока твердість азотованого шару швидкорізальної сталі пов'язана з утворенням азотистого мартенситу і γ' -фази, а також відділенням дрібнодисперсних включень зміцнюючих фаз. Слід зазначити, що формування дифузійного шару з азотистого мартенситу в поверхневих шарах позитивно вплине на працездатність різального інструменту, виготовленого зі швидкорізальної сталі. Це пов'язано з тим, що нітриди заліза мають вищу теплоємність порівняно з залізом. Це створює сприятливі умови для запобігання температурних спалахів на поверхні ріжучого інструменту.

Аналіз результатів експериментальних досліджень покриттів дозволяє краще розуміти механізми формування тонких модифікованих шарів у сталях P6M5 і P6M5K5 під час іонно-плазмового азотування. Це важливий внесок у нашу здатність оптимізувати процеси обробки і поліпшити властивості матеріалів для різноманітних застосувань

У майбутньому, можливо, буде корисно розширити ці дослідження, зосередившись на впливі інших параметрів обробки та вивченні додаткових властивостей модифікованих шарів, таких як трибологічні та фізико-хімічні характеристики. Це дозволить глибше розуміти поведінку матеріалу під час експлуатації та допоможе удосконалити процеси обробки для досягнення бажаних результатів.

Ці результати мають важливе значення для промислових застосувань, де вимагаються висока міцність, твердість та стійкість до зносу. Процес іонно-плазмового азотування демонструє значущий потенціал для покращення властивостей на сталях Р6М5 і Р6М5К5 шляхом формування тонких модифікованих шарів з підвищеними механічними та структурними характеристиками.

3.3.3 Аналіз зносу та тертя азотованих покриттів при формуванні тонких модифікованих шарів у сталей під час іонно-плазмового азотування

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

Результати дослідження вказують на важливість вивчення тривалості азотування та його впливу на мікротвердість та структуру азотованого шару сталі Р6М5. Поступове збільшення тривалості процесу сприяє формуванню більш щільної структури та вищої мікротвердості, що робить його більш стійким до зносу та корозії.

Триботехнічні випробування сталі Р6М5 у вихідному стані та після іонно-плазмового азотування 1 год в умовах тертя ковзання проводили на машині тертя СМЦ-2. Результати випробувань наведені на рисунках 3.14-3.15.

Випробування на зносостійкість сталі Р6М5 в умовах тертя ковзання без змащення показали, що зносостійкість сталі в даних умовах випробувань залежить, в більшій мірі, від швидкості ковзання та навантаження: при збільшенні швидкості ковзання збільшується знос майже в 1,5 рази, а при збільшенні навантаження знос збільшується в 2 рази. Тобто іонно-плазмове азотування зменшує знос сталі Р6М5.

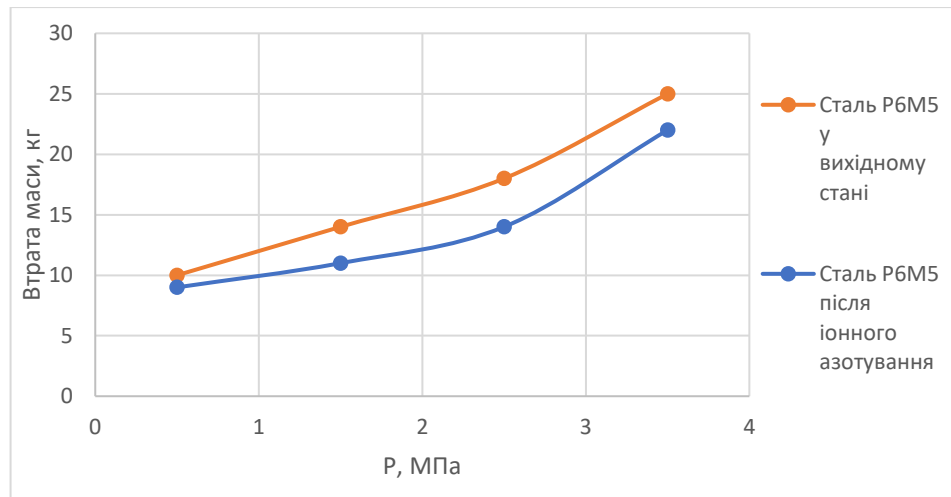


Рисунок 3.14 - Залежність величини зносу сталі Р6М5 від швидкості ковзання

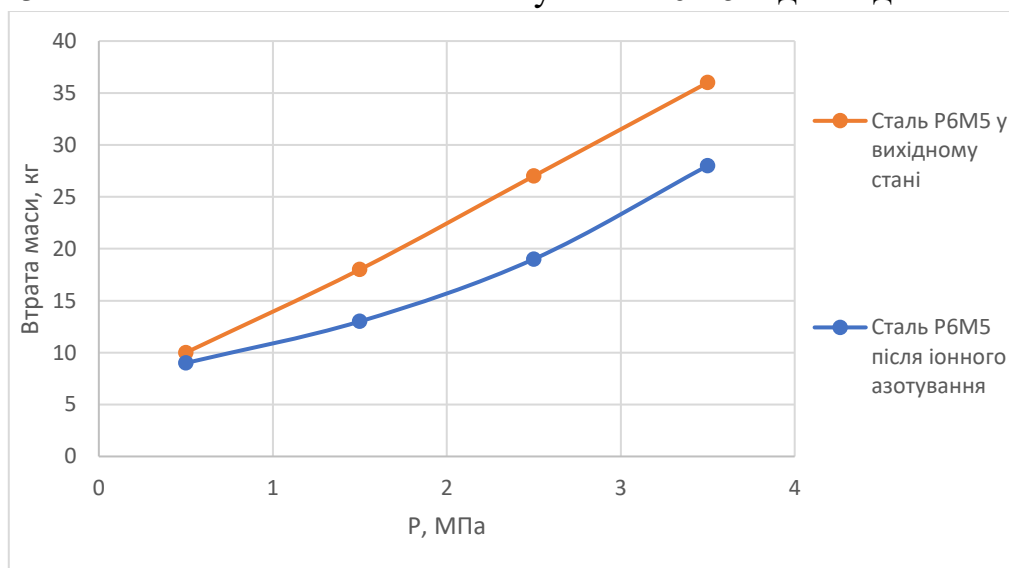


Рисунок 3.15 - Залежність величини зносу сталі Р6М5 від навантаження

Під час іонного азотування підвищується твердість поверхні та зносостійкість усіх марок швидкорізальних сталей і сплавів, а глибина азотованого шару залежить від фазового складу сталей - з ростом кількості карбідів у швидкорізальній сталі глибина азотованого шару поступово зменшується: слабкіше в сталей, які не містять кобальт, помітніше в кобальтових сталей [35].

Зносостійкість при різанні інструментом з азотованої швидкорізальної сталі залежить від кількості карбідної фази в сталі, збільшуючись у міру її зростання. Таким чином, для забезпечення високої зносостійкості інструменту зі швидкорізальної сталі необхідно не тільки усунути наявність надлишкових фаз, а й сформувати за короткочасного насичення азотистий мартенсит із максимальною

азотонасиченістю, високими напруженнями стиснення і пластичними властивостями.

Результати даного дослідження демонструють значний потенціал іонно-плазмового азотування для покращення властивостей сталей Р6М5 і Р6М5К5. Зокрема, виявлено, що збільшення тривалості азотування призводить до змін у структурі матеріалу, формування більш щільних шарів з високою мікротвердістю та стійкістю до корозії. Дані результати важливі для розробки більш міцних та стійких до зносу матеріалів для різноманітних промислових застосувань.

3.3.4 Систематизація результатів досліджень покриттів та їх впливу на формування тонких модифікованих шарів у сталях Р6М5 і Р6М5К5 під час іонно-плазмового азотування

Дослідження зосереджувались на вивченні закономірностей і механізмів формування тонких модифікованих шарів у сталі за умов низькотемпературного азотування, а також на аналізі впливу структурно-фазового стану модифікованих шарів на механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості матеріалу.

Зокрема, у теоретичному аспекті, механізм іонно-плазмового азотування в сталях ґрунтується на процесі дифузії азоту в метал. Цей процес включає активацію газової фази, збільшення ступеня адсорбції та коефіцієнта дифузії. Висока енергія іонів азоту в електростатичному полі розряду сприяє їх проникненню в метал, що призводить до утворення щільної дислокаційної структури в приповерхневому шарі.

Основними компонентами газового вакуумного дугового розряду є іони молекулярного азоту N_{2+} , нейтральні атоми азоту N і збуджені молекули азоту в різних метастабільних станах. Збуджені молекули азоту під час зіткнення з поверхнею зразка втрачають енергію збудження (відбувається дезактивація метастабільного стану), і в процесі азотування ці молекули не беруть участі. Іони молекулярного азоту N_{2+} володіють значною кінетичну енергію в результаті прискорення в електричному полі розрядного проміжку і беруть участь у нагріванні підкладки і розпиленні її поверхні, збільшуючи шорсткість.

Сполуки Fe-N мають малу термодинамічну міцність. Наприклад, енергія утворення молекули Fe₂N $\Delta G_f = 21$ кДж/моль, температура розпаду 500 °С; для порівняння у молекули CrN відповідно $\Delta G_f = 94,3$ кДж/моль і 1600 °С, а в молекули Mo₂N - $\Delta G_f = 45,7$ кДж/моль і 800 °С. Тому під час бомбардування прискореними частинками одночасно з утворенням сполук Fe-N відбувається їхня дисоціація, і, таким чином, посилюється генерація атомарного азоту. На поверхні підкладки утворюється шар нітридів заліза, співвідношення ϵ - і γ' -фаз у якому залежить, зокрема, від парціального тиску азоту, температури підкладки та інтенсивності бомбардування (густини та енергії потоку частинок). Зі збільшенням температури підкладки процес дисоціації сполук Fe-N посилюється, зростає частка γ' -фази, яка, як і ϵ -фаза, зникає в міру подальшого підвищення температури, що відповідає результатам інших авторів [34].

На рисунку 3.16 наведено діаграму стану Fe-N, з якої видно, що ϵ -фаза розпадається за температури близько 500 °С, γ' -фаза - близько 700 °С [31].

Відповідно до діаграми системи Fe-N фазовий склад азотованого шару складається з таких зон: $\epsilon \rightarrow \epsilon + \gamma \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha + \gamma \rightarrow \alpha \rightarrow$ вихідна структура, де γ' – мартенсит Fe₄N. Результати аналізів вказують на те, що у поверхневому шарі сталей P6M5 і P6M5K5, який був азотований, утворюються такі фази, як Fe₂₋₃(N,C), Fe₄(N,C), (Fe,W)₄(C,N), CrN. Азотований шар складається з двох основних зон: дифузійного підшару (α), який представляє собою внутрішню зону азотування, та поверхневої зони мартенситу ($\epsilon + \gamma' - \gamma'$), що включає в себе сполуки.

Фаза ϵ є твердим розчином на основі мартенситу Fe₂₋₃N, а фаза γ' - це складова мартенситної зони, що складається з твердого розчину на основі мартенситу Fe₄N. Під час азотування також утворюються леговані фази ϵ і γ' [34].

Метод іонно-плазмового азотування дає змогу отримати шари, в яких практично відсутні нітриди заліза, а є тільки твердий розчин азоту в ньому, що дуже важливо при подальшому нанесенні покриттів. Умови азотування дають змогу в широких межах змінювати параметри процесу азотування і за певних температур,

тисків і складів технологічних газів отримувати азотовані шари необхідного складу. Мікротвердість азотованих шарів становить 10 - 12 ГПа.

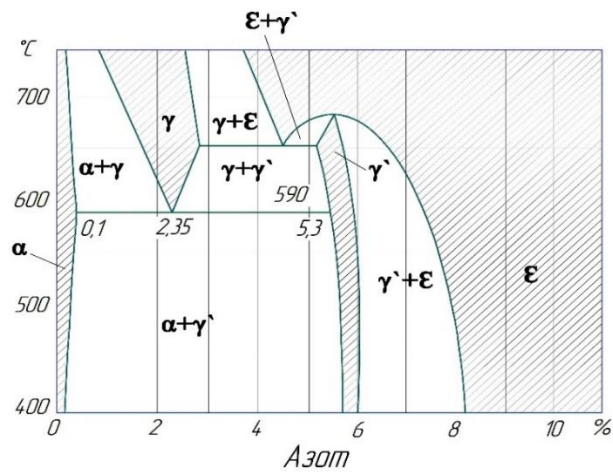


Рисунок 3.16 – Діаграма стану залізо–азот; заштриховані однофазні області [31]

Головною перевагою іонного азотування інструменту є можливість отримання азотистого мартенситу і дисперсного нітриду Fe_4N (γ' -фаза) на поверхні, на відміну від класичного газового азотування в аміаку, де нітридний шар складається з двох фаз - $\gamma' + \epsilon$, що є джерелом внутрішніх напруг на межі розділу фаз і спричиняє крихкість і відшарування зміцненого шару під час експлуатації.

Важливим фактором, який впливає на процес азотування, є температура. Низькі температури сприяють утворенню більш щільних структур та більш глибокому проникненню азоту, що призводить до утворення більш твердих шарів. Однак важливо враховувати, що підвищення температури може спричинити зміну структури та властивостей матеріалу, що відповідає результатам інших авторів [33].

Структурно-фазовий стан модифікованих шарів також впливає на механічні, трибологічні та фізико-хімічні властивості матеріалу. Утворення нітридів та інших сполук підвищує корозійну стійкість матеріалу, що робить його більш стійким до агресивного середовища та зносу.

Висновки

В третьому розділі "Експериментальні дослідження та узагальнення результатів механізмів формування тонких модифікованих шарів у сталей при іонно-плазмовому азотуванні" проведено комплексне дослідження процесу формування тонких модифікованих шарів у сталей під час іонно-плазмового азотування з використанням різноманітних критеріїв оцінки покриттів.

При дослідженні закономірностей і механізмів формування тонких модифікованих шарів на сталях Р6М5 та Р6М5К5 під час іонно-плазмового азотування, отримано наступне:

1. Процес іонно-плазмового азотування є ефективним методом для покращення модифікування структури та покращення механічних властивостей сталей Р6М5 і Р6М5К5 шляхом формування азотовмісного шару на її поверхні, причому при низьких температурах, які дозволяють використовувати його для зміцнення термооброблених швидкорізальних сталей як фінішну обробку.

2. Змінюючи параметрів процесу, можна керувати товщиною модифікованого шару, його фазовим і структурним станом. товщину модифікованого шару, його фазовий і структурний стан, механічні властивості, що важливо при розробці процесів для конкретних зміцнюваних інструментів, що експлуатуються в різних умовах.

3. Встановлено, що мікроструктура сталей Р6М5 і Р6М5К5 у вихідному стані, тобто, після стандартної термічної обробки, складається з загартованого мартенситу та твердих карбідів M_6C , MC з діаметром сферичної форми. Проведений рентгеноструктурний аналіз показав, що карбіди M_6C оптимально поєднуються з фазою Fe_3W_3C , а карбід типу MC відповідає фазі VC .

4. Дослідження показали, що оптимальна товщина покриття становить 25-40 мікрон, що забезпечує необхідну міцність та стійкість до зношування. Аналіз мікроструктури показав однорідну структуру покриття без виявлених дефектів, що підтверджує високу якість отриманих шарів.

5. Встановлено, що після іонно-плазмового азотування поверхні сталей Р6М5 і Р6М5К5, утворюється модифікований шар, що представляє собою азотистий

мартенсит. Фазовий склад модифікованого шару змінюється залежно від температури азотування. Так, наприклад, при азотуванні при $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ утворюється мартенсит Fe_4N (γ' -фаза), поряд з азотистим мартенситом на поверхні сталі Р6М5 утворюється нітрид Fe_4N (γ' -фаза). Але при $T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$, на поверхні сталі Р6М5К5 утворюються дрібні частинки із середнім розміром $\sim 0,1$ мкм.

6. Після іонно-плазмового азотування поверхні сталей Р6М5 і Р6М5К5 мікротвердість її поверхневого шару (залежно від структурно-фазового стану) зростає і становить 10 - 12 ГПа. Основним фактором, що впливає на підвищення мікротвердості сталей Р6М5 і Р6М5К5, є утворення азотистого мартенситу і дисперсного нітриду Fe_4N (γ' -фаза), а також формування дрібнодисперсних включень зміцнювальних фаз у поверхневих шарах.

6. Отримані результати свідчать про високу стійкість покриття до тертя та зношування, що робить його ефективним у вимогливих умовах експлуатації. Азотована поверхня інструменту, що володіє зниженим коефіцієнтом тертя і поліпшеними антифрикційними властивостями, забезпечує легше відведення стружки, а також запобігає її налипанню на ріжучі кромки і утворення зносу лунок, що дає можливість збільшити подачу і швидкість різання.

7. Виявлено, що властивості матеріалів покриттів мають значущий вплив на утворення структурних та морфологічних особливостей шарів, аналіз яких підтвердив важливість розуміння механізмів цього процесу. Результати дослідження структурних властивостей, рентгеноструктурний аналіз та аналіз зносу та тертя азотованих покриттів дозволили виявити вплив певних параметрів на якість формування тонких модифікованих шарів.

8. При дослідженні виявлено, що збільшення тривалості азотування призводить до глибшого проникнення азоту у внутрішні шари матеріалу, що веде до формування більш стійкого шару зі зміненими структурно-фазовими властивостями. Внаслідок цього, механічні характеристики сталі значно покращуються, забезпечуючи високу міцність та стійкість до зношування.

9. Аналіз результатів експериментів показав, що глибина азотованого шару та його мікротвердість прямо залежать від часу азотування. Це підтверджує важливість контролю тривалості процесу для досягнення оптимальних властивостей матеріалу. При цьому необхідно забезпечити оптимальні умови експлуатації, що враховували б зміни мікроструктури в матеріалі після азотування.

10. Результати дослідження свідчать про ефективність іонно-плазмового азотування для покращення властивостей сталей Р6М5 і Р6М5К5, забезпечуючи високу міцність, стійкість до зношування та корозії, а також надійність в умовах високого тертя.

11. Систематизація отриманих даних у цьому розділі дозволила зробити висновки щодо оптимальних умов процесу азотування, які сприятимуть покращенню властивостей сталей за рахунок утворення високоякісних модифікованих шарів з необхідними фізико-хімічними характеристиками. Отже, дослідження дозволило розширити розуміння процесів формування тонких модифікованих шарів у сталей під час іонно-плазмового азотування, що відкриває перспективи для подальших досліджень у цій області з метою оптимізації технологій обробки сталей для підвищення їхньої міцності та зносостійкості.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

У сучасному машинобудівному виробництві знаходить широке застосування підвищення експлуатаційних характеристик деталей із застосування підвищення експлуатаційних характеристик деталей із конструкційної сталі за рахунок обробки поверхні. Такі методи як іонно-плазмове азотування в тліючому розряді дають змогу за рахунок поверхневого зміцнення підвищується надійність і збільшується термін служби деталей, що працюють у найрізноманітніших служби деталей, що працюють у найрізноманітніших умовах.

Оцінка економічної ефективності результатів науково-дослідної кваліфікаційної магістерської роботи виконується для виявлення доцільності їх впровадження. Економічний ефект визначається за різницею зведених витрат початкового (базового) рівня і рівня, що досягається після впровадження у виробництво результатів роботи. Дослідження, виконане в кваліфікаційній магістерській роботі, дозволяє зробити висновок про практичну можливість заміни сталі Р6М5К5 при виробництві виробів на дешевшу сталь Р6М5 з подальшою термічною обробкою виробів. Річна потреба народного господарства у виробках даного виду на кінець впровадження визначена, виходячи із завдань розроблення у розмірі 150 тис. т. [36]

Середня витрата сталі на 1 т виробів становить 1,3 т, оптова ціна сталі групи Р6М5К5 – 270 грн, Р6М5 – 100 грн. Оптова ціна відходів сталі Р6М5К5 – 100 грн, Р6М5 – 80 грн.

Витрати на сталь Р6М5К5 з розрахунку на 1 т виробів з урахуванням вартості реалізованих відходів становитимуть:

$$1,3 \cdot 270 - 0,3 \cdot 85 = 325,5 \text{ грн.}$$

Ті самі витрати на сталь Р6М5:

$$1,3 \cdot 100 - 0,3 \cdot 80 = 106 \text{ грн.}$$

Додаткові поточні витрати на термічну обробку виробів із сталі Р6М5 взяті за фактичними даними про собівартість термічної обробки з аналогічним режимом

у розмірі 30 грн/т. Таким чином, зниження собівартості виробництва одного виробу при заміні сталі Р6М5К5 на сталь Р6М5 становитиме:

$$C = 325,5 - (106 + 30) = 189,5 \text{ грн.}$$

Заміна групи сталей потребує капітальних вкладень в будівництво термічних підрозділів, які взяті, виходячи з даних проєктних організацій про питомі капітальні вкладення в аналогічні термічні цехи, такими, що дорівнюють 155 грн/т.

Витрати на проведення досліджень, дослідно-промислове випробування й інші витрати, пов'язані з підготовкою до передачі результатів дослідження для впровадження у виробництво, взяті орієнтовно за даними науково-дослідних установ даного профілю у розмірі 100 тис. грн або $100:150 = 0,67$ грн на 1 тону виробів.

Єдиний нормативний коефіцієнт порівняльної економічної ефективності використання в народному господарстві техніки, що ніде раніше не застосовувалася, і технології, дорівнює 0,15.

Таким чином, відповідно до формули (2) орієнтовно економічний потенціал науково-дослідної роботи на останній рік впровадження розроблення буде дорівнювати:

$$E_{Pr} = [189,5 - 0,15 - (155 + 0,67)] \cdot 150 = 5 \text{ млн } 52 \text{ тис. грн.}$$

Через відсутність необхідної інформації в розрахунку економічного потенціалу роботи не знайшли відображення такі економічні результати її використання в народному господарстві: зміна витрат на виробництво в результаті зміни витратного коефіцієнта металу і технологічності його обробки. Технологічність сталей Р6М5 вища, що повинно привести до додаткового зниження витрат на виробництво; зменшення потреби в імпорті сировини для виплавки сталей Р6М5К5.

Висновки

У результаті виконання НДР було розраховано економічний потенціал, який реалізується у міру впровадження у виробництво.

Економічний потенціал науково-дослідної роботи вимірний максимальним економічним ефектом, який може бути одержаний при повному впровадженні результатів роботи.

Дослідження, виконане в кваліфікаційній магістерській роботі, дозволяє зробити висновок про практичну можливість заміни сталі Р6М5К5 при виробництві виробів на дешевшу сталь Р6М5 з подальшою термічною обробкою виробів.

Оцінка економічної ефективності результатів роботи магістра проводиться для визначення обґрунтованості впровадження її результатів. Економічний вигідний ефект визначається як різниця між агрегованими витратами на початковому (базовому) рівні і рівнем, який досягається після впровадження виробництва результатів досліджень.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

5.1 Загальні заходи з охорони праці

Відповідно до Закону України «Про охорону праці» власник розробляє (за участю профспілок) і реалізує комплексні заходи для досягнення встановлених нормативів безпеки, гігієни праці та виробничого середовища підвищення існуючого рівня охорони праці, профілактики виробничого травматизму, профзахворювань та аварій. Комплексні заходи є основою для складання розділу «Охорона праці» у колективному договорі, в якому обумовлена сума коштів з фонду охорони праці підприємства на їх виконання [37].

Організаційні заходи: проведення навчання та інструктажів з охорони праці, виробничої санітарії, пожежної безпеки; робота щодо професійного відбору; здійснення контролю за дотриманням працівниками вимог інструкцій з охорони праці [38].

Технічні заходи: модернізація технологічного, піднімально-транспортного обладнання, перепланування, розміщення обладнання; впровадження автоматичного та дистанційного керування виробничим обладнанням [39].

Санітарно-виробничі заходи: придбання або виготовлення пристроїв, які захищають працюючих від дії електромагнітних випромінювань, пилу, газів, шуму тощо; улаштування нових і реконструкція діючих вентиляційних систем, систем опалення, кондиціонування; реконструкція та переобладнання душових, гардеробних тощо [39].

Медико-профілактичні заходи: придбання молока, миючих та знешкоджуючих засобів; організація профілактичних медичних оглядів; організація лікувально-профілактичного харчування [38].

5.2 Вимоги до особистого захисту працівників

В іонному азотуванні, як і в будь-якому іншому технологічному процесі, важливо дотримуватися високих стандартів безпеки та мати належний особистий захист для працівників. Вимоги до особистого захисту працівників можуть варіюватися в залежності від конкретних умов та ризиків, але основні вимоги зазвичай включають такі:

Захист від високої температури: Оскільки іонне азотування вимагає високих температур, працівники повинні бути обладнані захистом від тепла. Це може включати в себе спеціальний одяг, включаючи захисні костюми та рукавиці, які витримують високу температуру [37].

Захист від вакууму: Робота в вакуумній камері може бути небезпечною для здоров'я, і працівники повинні мати спеціальний особистий захист для запобігання втраті атмосферного тиску, який включає в себе пристрої дихального захисту та скафандри [38].

Захист від розряду: Розрядна система використовується для стимулювання газового розряду, і працівники повинні бути захищені від можливого електричного розряду. Це включає в себе використання захисного одягу та електроізоляційних матеріалів [37].

Захист від хімічних речовин: Газоподача системи може включати в себе хімічні речовини, які потрібно вдихати або контактувати з шкірою. Протиотруйні респіратори, спеціальні рукавиці та захисний одяг можуть бути необхідними для захисту від хімічних впливів [38].

Ці вимоги до особистого захисту покликані забезпечити безпеку працівників під час проведення іонного азотування та запобігти можливим ризикам, пов'язаним з високою температурою, вакуумом, розрядами та хімічними речовинами [37].

5.3 Вимоги до професійної підготовки працівників

Підготовка працівників, які займаються іонним азотуванням, має бути детальною та професійною, оскільки процес вимагає специфічних навичок і знань. Ось деякі вимоги до професійної підготовки працівників у цьому контексті:

Освіта для процесу іонного азотування: Професійні працівники повинні проходити навчання та набирати досвід у проведенні іонного азотування. Це включає в себе навчання щодо роботи з вакуумним обладнанням, розрядними системами та вимогами безпеки [41].

Знання матеріалів: Розуміння властивостей різних металів і сплавів є важливим, оскільки процес іонного азотування може впливати на їхні властивості. Професійні працівники повинні знати, які матеріали найкраще піддаються обробці та для яких застосовань [40].

Навички управління обладнанням: Робота з вакуумним обладнанням, розрядними системами та іншими пристроями вимагає вміння правильно їх налаштувати і контролювати [41].

Знання вимог безпеки: Працівники повинні бути повністю обізнані з вимогами безпеки, пов'язаними з іонним азотуванням, і вміти діяти в небезпечних ситуаціях [41].

Підготовка до екстрених ситуацій: Професійні працівники мають бути підготовлені до дій в екстрених ситуаціях, таких як аварії чи викиди газу. Вони повинні знати процедури евакуації та реагування на надзвичайні події [41].

Вимоги до професійної підготовки працівників у галузі іонного азотування є суворими і вимагають від працівників знань, навичок та відповідальності. Глибока професійна підготовка є ключем до забезпечення безпеки та якості виробництва в цій галузі [41].

5.4 Контроль за використанням захисних засобів

Контроль за використанням захисних засобів є обов'язковим в умовах іонного азотування, оскільки цей процес включає в себе ризики для здоров'я працівників. Нижче наведені важливі аспекти контролю за використанням захисних засобів:

Поставка та перевірка захисних засобів: Роботодавець має забезпечити належні захисні засоби для всіх працівників, які займаються іонним азотуванням.

Це включає в себе спеціальний одяг, рукавиці, захисні окуляри або маски, а також інше обладнання в залежності від конкретних умов роботи [39].

Проведення інструктажу: Всі працівники повинні бути наділені необхідними знаннями про використання захисних засобів та їхніх функцій. Інструктаж має включати правила користування захисними засобами, способи їхнього зберігання та обслуговування [41].

Система контролю та обліку: Роботодавець повинен вести систему контролю та обліку використання захисних засобів [40].

Контроль доступу до робочих зон: Забороняти доступ до робочих зон без належного захисного обладнання та одягу, а також перевіряти працівників при вході та виході з виробничих приміщень [41].

Аудит та оцінка дотримання: Проводити регулярні аудити та оцінки дотримання правил використання захисних засобів для виявлення недоліків та удосконалення системи безпеки [39].

Забезпечення ефективного контролю за використанням захисних засобів є важливою частиною забезпечення безпеки працівників в процесі іонного азотування. Дотримання цих вимог сприяє запобіганню можливим ризикам та збереженню здоров'я та безпеки працівників [39].

5.5 Значення безпеки та екологічної відповідальності в індустрії

Безпека та екологічна відповідальність в індустрії є критично важливими аспектами, які мають широкий вплив на різні сфери діяльності. Ці аспекти мають велике значення, як для самих підприємств, так і для суспільства загалом. Ось декілька ключових моментів, які підкреслюють значення безпеки та екологічної відповідальності в індустрії:

Здоров'я та безпека працівників: Забезпечення безпеки працівників є пріоритетом для будь-якого підприємства. Правильна організація робочих місць, надання необхідних захисних засобів та навчання працівників правилам безпеки допомагають уникнути травм та захворювань [38].

Законодавство та регулювання: Безпека та екологічна відповідальність регулюються законодавством та нормами, які обов'язкові для виконання. Порушення цих норм може призвести до санкцій, а також збитків для репутації підприємства [42].

Мінімізація ризиків: Забезпечення безпеки та екологічної відповідальності допомагає уникнути ризиків та аварій, які можуть призвести до втрати людського життя, матеріальних збитків та екологічних катастроф [40].

Покращення репутації: Підприємства, які відзначаються високими стандартами безпеки та екологічної відповідальності, здобувають позитивну репутацію в очах споживачів та інвесторів. Це сприяє підвищенню довіри та конкурентоспроможності [42].

Збереження природних ресурсів та навколишнього середовища: Екологічна відповідальність передбачає зменшення негативного впливу виробництва на природу. Це допомагає зберегти навколишнє середовище та природні ресурси для майбутніх поколінь [41].

Дотримання соціальних стандартів: Забезпечення безпеки та екологічної відповідальності включає в себе і соціальну відповідальність перед спільністю. Підприємства можуть активно брати участь у соціальних ініціативах та благодійних діях, що покращують якість життя громад [42].

Інновації та ефективність: Забезпечення безпеки та екологічної відповідальності може стимулювати розвиток нових технологій та інновацій, що сприяє підвищенню ефективності виробництва [38].

Усі ці фактори підкреслюють важливість безпеки та екологічної відповідальності в індустрії. Вони впливають на рішення підприємств, їхню репутацію та стосунки зі спільністю. Поєднання дотримання вимог законодавства, соціальної відповідальності та здорового господарювання допомагає забезпечити успішну та стійку діяльність підприємств у сучасному світі.

Висновки

Іонне азотування є важливим технологічним процесом, який використовується в різних галузях промисловості для покращення властивостей металевих матеріалів. Проте цей процес також може включати ризики для здоров'я працівників та негативний вплив на навколишнє середовище, якщо не дотримуватися відповідних заходів безпеки та охорони навколишнього середовища.

Охорона праці під час іонного азотування є важливою для запобігання травм та захворювань серед працівників. Правильний вибір та використання захисного обладнання є критичним для забезпечення їхньої безпеки.

Іонне азотування практично не призводить до викидів небезпечних речовин, які мають потенційно негативний вплив на природні ресурси та навколишнє середовище. Забезпечення виправданості інженерних рішень та використання сучасних методів для зменшення впливу на природу є дуже важливим.

Працівники, які займаються іонним азотуванням, повинні мати належну професійну підготовку та знання щодо використання захисних засобів та вимог безпеки.

Регулярний контроль та моніторинг процесу іонного азотування є важливими для виявлення можливих ризиків та недоліків, а також для забезпечення відповідності всім нормам та стандартам.

Підприємства, що використовують іонне азотування, повинні приділяти особливу увагу екологічній відповідальності та здійснювати заходи для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Ефективна охорона праці та навколишнього середовища під час іонного азотування є критично важливою для забезпечення безпеки працівників та мінімізації негативного впливу на довкілля. Дотримання всіх вимог та стандартів, ретельна професійна підготовка, ефективний контроль та впровадження заходів екологічної відповідальності допомагають забезпечити успішну та безпечну роботу в галузі іонного азотування.

ВИСНОВКИ

1. Дослідження механізмів формування тонких модифікованих шарів у сталей при іонно-плазмовому азотуванні має важливе практичне значення для вирішення проблем зносу, корозії та інших аспектів експлуатації сталевих конструкцій, особливо в умовах агресивних середовищ.

2. Дослідження показали, що оптимальна товщина покриття становить близько 25-40 мікрон, що забезпечує необхідну міцність та стійкість до зношування. Аналіз мікроструктури показав однорідну структуру покриття без виявлених дефектів, що підтверджує високу якість отриманих шарів. Після іонно-плазмового азотування поверхні сталей P6M5 і P6M5K5 мікротвердість її поверхневого шару зростає і склала 10 - 12 ГПа. Основним фактором, що впливає на підвищення мікротвердості сталей P6M5 і P6M5K5, є утворення азотистого мартенситу і дисперсного нітриду Fe_4N (γ' -фаза), а також формування дрібнодисперсних включень зміцнювальних фаз у поверхневих шарах.

3. Отримані результати свідчать про високу стійкість покриття до тертя та зношування, що робить його ефективним у вимогливих умовах експлуатації. Азотована поверхня інструменту, що володіє зниженим коефіцієнтом тертя і поліпшеними антифрикційними властивостями, забезпечує легше відведення стружки, а також запобігає її налипанню на ріжучі кромки і утворення зносу лунок, що дає можливість збільшити подачу і швидкість різання.

4. Економічний потенціал науково-дослідної роботи виміряний максимальним економічним ефектом, який може бути одержаний при повному впровадженні результатів роботи.

5. Ефективна охорона праці та навколишнього середовища під час іонного азотування є критично важливою для забезпечення безпеки працівників та мінімізації негативного впливу на довкілля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Швець. С. В. Металорізальні інструменти : навчальний посібник. Суми: Сумський державний університет, 2019. 272 с..
2. Залога В. О., Гончаров В. Д., Залога О. О. Сучасні інструментальні матеріали у машинобудуванні: навч. посіб. Суми, 2013. 371 с.
3. Застосування йонно-плазмового термоциклічного азотування для підвищення зносостійкості високолегованої сталі / Ляшенко Б.А. та ін. Вісник ЖДТУ. 2015. Вип. №3. С. 28 – 33.
4. Дискретні покриття на різальному інструменті / Антонюк В.С. та ін. Зміцнювальні технології та покриття. 2007. №1. С 138-143.
5. Панфілов. Ю Нанесення тонких плівок у вакуумі. "Технології в електронній промисловості, 2007. № 3. С. 76-80.
6. Петров І.П., "Вакуумні методи обробки матеріалів: сучасні досягнення": Київ, 2010. 56 с.
7. Ковальчук І., "Іонно-плазмове азотування в металургії: технології та перспективи": Київ, 2015. 85 с.
8. Іванова М., "Вплив процесу радіочастотного магнетронного напилення на властивості тонких шарів у сталей", Матеріали та технології, , № 2, с. 78-91,
9. Sürer, M. G. State of art of hydrogen usage as a fuel on aviation / European Mechanical Science. 2018. P. 20–30
10. Fernandes M. D. and oth. Bistrizki SOFC-APU systems for aircraft: International Journal of Hydrogen Energy. 2018. P. 16311–16333.
11. Калашников А.С. Технологія виготовлення зубчастих коліс: Машинобудування, Київ. 2004. 479 с
12. Kindrachuk M. V., Dushek Yu. Ya., Luchka M. V. Evolution of the structure and properties of eutectic coatings during friction. National Aviation University, Kyiv, 1995. 321 p.
13. Smith, R. "Ion Plasma Nitriding: Processes and Applications." Materials Science Review, 2022, pp. 45-62.

14. Johnson, A. Fundamentals of Steel Modification through Plasma Nitriding." *Journal of Materials Engineering*, 2021, pp. 112-125.
15. Garcia, M. Characterization of Nitride Coatings on Steels: A Comparative Study / *Surface and Coatings Technology*, Germany. 2020, pp. 78-94.
16. Liu, X. and Wang, Q. "Structural and Tribological Properties of Ion-Plasma Nitrided Steels / *Tribology International*. China. 2019, pp. 32-47.
17. Rakhadilov B. "Mechanical Behavior of Plasma Nitrided Steel R6M5." *Materials Science and Engineering*, Kazakhstan, 2018, pp. 74-89.
18. Huan, C. Diffusion-Controlled Phase Transformations in Steel during Low-Temperature Nitriding." *Journal of Applied Physics*, 2017. Vol. 22, № 3. pp. 55-68.
19. Petrov, V. Tribological Analysis of Nitrided Steel Surfaces., India, 2016, pp. 102-117.
20. ASTM International. Standard Test Methods for Physical and Chemical Analysis of Nitrided Steels. ASTM E2938-21, ASTM International, West Conshohocken, US, 2021. 56 p.
21. Говорун Т. П., Берладір Х. В. Іонно-плазмове азотування сталей і сплавів» із дисципліни «Наукові основи вибору матеріалів і прогресивних зміцнюючих технологій. Методичні вказівки до лабораторної роботи: Суми, СумДУ. 2019. 29 с.
22. Загребельний В. В., Лабунець В.Ф, Богач Я.В Дослідження триботехнічних характеристик швидкорі-зальної сталі Р6М5 з комбінованим покриттям. Київ: Національний авіаційний університет. 2017, с. 80–84.
23. Labunets V. F. Improve the stability of the cutting tool of steel R6M5 with wearresistant coatings / V. F. Labunets, V. V. Zagrebelniy // *Aviation in the XXI-st century : Safety in Aviation and Space Technologies*, 19–21 september, 2016 Kyiv, Ukraine : proceedings the seventh world congress. Kyiv: NAU, 2016. P. 1.4.41–1.4.46
24. ДСТУ 8781:2018 Виливки зі сталі. Загальні технічні умови [Чинний від 2018 -11-15]. Київ, 2018. 41 с. (Інформація та документація)
25. Руденко Л.Ф. Леговані сталі та сплави : навч. посіб. / Л. Ф. Руденко, Т. П. Говорун. Суми : Сумський державний університет, 2012. 171 с.

26. Калініна Т.В., Буря О.І. Металографічний аналіз металів та сплавів: метод. Вказівки. Дніпродзержинськ, 2015. 16 с.
27. Дегула А. І , Говорун Т. П., Харченко Н. А. Визначення твердості матеріалів: метод. вказівки. Суми : СумДУ, 2022. 23 с.
28. Дегула А. І , Говорун Т. П. Технологічні випробування металів: метод. вказівки. Суми : СумДУ, 2022. 16 с.
29. Будова рентгенівського дифрактометра ДРОН-3М. веб-сайт. URL: <https://poznayka.org/s54663t1.html> (дата звернення: 02.11.2023).
30. Кравець А.М., Кравець В.Г., Афанасов Г.М. Дослідження протизношувальних властивостей мастильних матеріалів за допомогою машини тертя СМЦ-2: метод. вказівки. Харків : УкрДАЗТу, 2011. 32 с.
31. Говорун Т. П. , Берладір.Х.В. Іонно-плазмове азотування сталей і сплавів: метод. вказівки. Суми : Сумський державний університет, 2019. 29 с.
32. Kuksenova L.I., Polyakov S.A., Alekseeva M.S., Rubtsov S.V Increasing the service life of gears based on the choice of technologies for strengthening the working surfaces of teeth / Bulletin of scientific and technical development, Poland, 2019 pp. 11-22.
33. ASTM E384 - 22 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. US. 2022 pp. 1-15.
34. Rakhadilov, B.K. Kurbanbekov Sh.R., Kilishkhanov M.K. Kenesbekov A.B. Changing the structure and phasestates and the microhardness of the R6M5 steel surface layer after electrolytic-plasma nitriding - East Kazakhstan State University , 2018, 261 p.
35. Говорун Т. П. Матеріалознавство та технологія матеріалів (у схемах і завданнях): навч. посіб. / Т. П. Говорун, О. П. Гапонова, С. В. Марченко. Суми : Сумський державний університет, 2020. 163 с..
36. Види економічної ефективності наукових досліджень. Веб-сайт. URL:https://studwood.net/957781/filosofiya/vidy_ekonomicheskoy_effektivnosti_nauchnyh_issledovaniy (дата звернення: 12.11.2023)

37. Буділов В.В, Рамазанов К.Н., Вафін Р.К. Вплив перехрещених електричного та магнітного полів на іонне азотування в тліючому розряді. 2011, с. 40-42.

38. Основні тенденції формування професійної захворюваності в Україні (2001 - 2010 рр.) за даними Державної санітарно-епідеміологічної служби України повідомлення N 01.03/3540, 29.12.2011,. Веб-сайт. URL: <http://zakon.nau.ua/doc/?uid=1041.48598.0> (дата звернення: 15.11.2023)

39. Стан травматизму у 2021 р. за даними державної служби гірничого нагляду та промислової безпеки України. Веб-сайт. URL:<http://dnop.gov.ua/index.php/uk/operativna-informatsiya/travmatizm> (дата звернення: 15.11.2023)

40. Аналіз динаміки та стану виробничого травматизму у промисловості за перше півріччя 2012 року України. Веб-сайт. URL: http://archive.nbuv.gov.ua/portal/natural/Vchnu_tekh/2012_5/06lub.pdf

41. Стрижко Л.С., Є.П. Потоцький, та ін. Безпека життєдіяльності в металургії: Підручник для вузів/За ред. Стрижко Л.С. М.: Металургія, Київ, 1996. 416 с.

42. Аналіз страхових нещасних випадків на виробництві та профзахворювань за 2012 рік за даними Фонду соціального страхування від нещасних випадків на виробництві та професійних захворювань України. Веб-сайт. URL: <http://www.social.org.ua/view/3015> (дата звернення: 16.11.2023) .