

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії транспорту та архітектури

Кафедра галузевого машинобудування та агроінженерії

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

На тему: Зносостійкість карбоазотованої сталі 12ХН3А

Освітній ступінь: Магістр

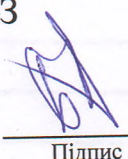
Галузь знань: G Інженерія, виробництво та будівництво

Спеціальність: G11 Машинобудування (за спеціалізаціями)

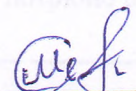
Предметна спеціальність/спеціалізація: Технологічні машини та обладнання

Освітня програма: Технологічні машини та обладнання харчових виробництв

Шифр: 25.01.00.00.000 ПЗ

Виконав здобувач 2-го курсу групи МАХВм-24-1  Підпис **Артем БОЙКО**


Керівник: д.т.н., професор

 Підпис

Мирослав СТЕЧИШИН

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії

 Підпис

Андрій МАРТИНЮК

Дата

Хмельницький, 2025

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота спрямована на вивчення зносостійкості сталі марки 12ХН3А після карбоазотування — хіміко-термічного методу, який дозволяє суттєво зміцнити поверхневі шари матеріалу. Ця сталь широко застосовується для виготовлення високонавантажених деталей машин і механізмів, що функціонують у складних умовах інтенсивного тертя, контактних навантажень та абразивного зношування. Підвищення експлуатаційної надійності таких компонентів є однією з ключових задач сучасного машинобудування, а також харчової та агропромислової галузей, що вимагає впровадження ефективних технік зміцнення поверхонь. У роботі обґрунтовано застосування карбоазотування як перспективного технологічного процесу для підвищення експлуатаційних характеристик сталі 12ХН3А. Висвітлено фізико-хімічні аспекти насичення поверхні вуглецем і азотом, механізми формування дифузійного шару, а також їх вплив на мікроструктуру, фазовий склад і рівень залишкових напружень у поверхневих зонах. Детально розглянуто, як легувальні елементи структури сталі сприяють зміцненню поверхневого шару і забезпечують її високу витривалість до зношування та втоми. Експериментальна частина дослідження включала випробування карбоазотування за різноманітними температурними режимами із наступною термічною обробкою. Оцінювались параметри мікротвердості поверхневих шарів, глибина дифузійного шару і характер структурних змін у зоні насичення. Зносостійкість вивчалася на основі трибологічних тестів за умов сухого та граничного тертя, що дозволило встановити залежність інтенсивності зношування від параметрів проведеного карбоазотування. На основі отриманих даних було проведено порівняльний аналіз між зносостійкістю карбоазотованої сталі 12ХН3А та аналогічної сталі після традиційної термічної обробки. Доведено, що застосування карбоазотування значно знижує інтенсивність зношування, забезпечує підвищення поверхневої твердості та стабільність трибологічних показників під час експлуатації.

Результати роботи підтверджують ефективність методу як надійного способу збільшення довговічності машинних деталей. Практичне значення дослідження полягає в можливості використання отриманих результатів для оптимізації процесу карбозотування деталей машин, що працюють у критичних умовах зношування. Запропоновані технологічні рішення можуть бути впроваджені на підприємствах харчової та агропромислової галузей, а також у загальному машинобудуванні, де це сприятиме покращенню показників функціональної надійності та довговічності вузлів і механізмів техніки.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток машинобудування, харчової, агропромислової та переробної промисловості характеризується зростанням вимог до надійності, довговічності та експлуатаційної безпеки машин і механізмів. Переважна більшість відмов обладнання пов'язана зі зношуванням поверхонь деталей, що працюють в умовах тертя, ударних і циклічних навантажень, підвищених температур та агресивних робочих середовищ. У зв'язку з цим проблема підвищення зносостійкості конструкційних матеріалів залишається однією з ключових у сучасному матеріалознавстві та технології машинобудування.

Особливу увагу в цьому контексті приділяють сталям, які використовуються для виготовлення відповідальних деталей – зубчастих коліс, валів, втулок, кулачків, елементів приводів і вузлів тертя. Однією з таких сталей є легована конструкційна сталь 12ХНЗА, яка поєднує достатню міцність серцевини з можливістю ефективного поверхневого зміцнення. Завдяки вмісту хрому та нікелю дана сталь добре реагує на хіміко-термічну обробку, що робить її перспективною для застосування в умовах інтенсивного зношування.

Знос деталей машин не лише знижує їх експлуатаційні характеристики, але й призводить до збільшення витрат на ремонт, технічне обслуговування та простої обладнання. Особливо це актуально для харчового та агропромислового обладнання, де надійність вузлів тертя безпосередньо впливає на стабільність технологічних процесів і безпеку продукції. У зв'язку з цим підвищення зносостійкості деталей шляхом удосконалення технологій поверхневого зміцнення є важливим науково-практичним завданням.

Одним з ефективних методів підвищення зносостійкості сталей є карбоазотування – різновид хіміко-термічної обробки, що передбачає одночасне насичення поверхні сталі вуглецем і азотом. У результаті такої обробки формується дифузійний шар із підвищеною твердістю,

зносостійкістю та втомною міцністю при збереженні в'язкої та міцної серцевини. Порівняно з цементацією або азотуванням, карбоазотування дозволяє досягти кращого поєднання механічних і трибологічних властивостей поверхневого шару.

Незважаючи на широке застосування карбоазотування в промисловості, питання впливу режимів цієї обробки на зносостійкість конкретних марок сталей, зокрема сталі 12ХН3А, потребують подальших досліджень. Це пов'язано з необхідністю оптимізації параметрів процесу з урахуванням умов експлуатації деталей, характеру навантажень та вимог до ресурсу роботи.

Мета і завдання дослідження. Метою магістерської роботи є дослідження зносостійкості карбоазотованої сталі 12ХН3А та встановлення закономірностей впливу режимів карбоазотування на структуру, мікротвердість і трибологічні характеристики поверхневих шарів.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено розв'язання таких завдань:

- проаналізувати сучасний стан досліджень у галузі зносостійкості сталей та методів хіміко-термічної обробки;
- розглянути фізико-хімічні основи процесу карбоазотування та механізми формування зміцненого дифузійного шару;
- дослідити структурно-фазові перетворення в поверхневих шарах сталі 12ХН3А після карбоазотування;
- визначити мікротвердість і глибину дифузійного шару залежно від режимів обробки;
- провести трибологічні випробування та оцінити зносостійкість карбоазотованих зразків;
- здійснити порівняльний аналіз зносостійкості сталі після карбоазотування та традиційної термічної обробки;
- сформулювати практичні рекомендації щодо застосування карбоазотування для підвищення ресурсу деталей машин.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є процеси зношування деталей машин, виготовлених зі сталі 12ХН3А, в умовах тертя та контактних навантажень.

Предметом дослідження є зносостійкість, мікроструктура та механічні характеристики поверхневих шарів карбоазотованої сталі 12ХН3А залежно від режимів хіміко-термічної обробки.

Методи дослідження

У магістерській роботі використано комплекс теоретичних та експериментальних методів дослідження. Теоретична частина базується на аналізі науково-технічної літератури, нормативних документів і сучасних досліджень у галузі матеріалознавства та трибології. Експериментальні дослідження включають проведення карбоазотування за різних режимів, металографічний аналіз структури, вимірювання мікротвердості та трибологічні випробування з метою визначення інтенсивності зношування.

Наукова новизна та практичне значення

Наукова новизна роботи полягає у встановленні закономірностей впливу режимів карбоазотування на зносостійкість та структурний стан поверхневих шарів сталі 12ХН3А. Отримані результати розширюють уявлення про механізми підвищення зносостійкості легованих сталей при хіміко-термічній обробці.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для оптимізації технологічних режимів карбоазотування деталей машин, що експлуатуються в умовах інтенсивного зношування. Запропоновані рекомендації можуть бути використані у харчовому, агропромисловому та загальному машинобудуванні з метою підвищення надійності та довговічності обладнання.

1. КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ СУКУПНОГО ДИФУЗІЙНОГО НАСИЧЕННЯ ПОВЕРХНІ МЕТАЛІВ АЗОТОМ І ВУГЛЕЦЕМ

Деталі машин, які піддаються впливу значних контактних циклічних навантажень і згинальних деформацій, зазвичай проходять процеси хіміко-термічної обробки для зміцнення (ХТО). Одним із перспективних рішень у промисловості є технології, що передбачають комбіноване насичення поверхні металу вуглецем та азотом. Використання таких методів дозволяє отримати високоякісні дифузійні шари з мінімальною деформацією деталей у процесі обробки. Систематизація методів поєднаного дифузійного насичення металевих поверхонь азотом і вуглецем наведена на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 - Методи сукупного дифузійного насичення поверхні металів азотом і вуглецем

1.1. Газова нітроцементация

Нітроцементация є процесом хіміко-термічної обробки, що передбачає одночасне поверхневе насичення сталі вуглецем і азотом у газоподібному середовищі. Залежно від температурного режиму, нітроцементация поділяється на три типи: низькотемпературну (520–600 °С), середньотемпературну (650–750 °С) та високотемпературну (750–1050 °С). Процес високотемпературної нітроцементации є ефективною альтернативою традиційній цементации завдяки дещо нижчим робочим температурам. Під час нітроцементации, як і в процесі цементации, хіміко-термічна обробка зазвичай комбінується з гартуванням, що проводиться безпосередньо після досягнення необхідної температури. У результаті формується поєднаний процес нітроцементации та гартування. У деталях, що піддаються такій обробці, утворюється поверхневий шар товщиною близько 1 мм, який складається з мартенситу. У цьому шарі містяться розчинені вуглець і азот, які проникли під час дифузії в процесі нітроцементации. Використовувані сталі та методи розташування деталей під час високотемпературної нітроцементации аналогічні тим, що застосовуються при цементации. Завдяки високому вмісту азоту в поверхневому шарі, його зносостійкість перевершує аналогічний показник шару після звичайної цементации. Детальна інформація про параметри високотемпературної нітроцементации наведена в таблиці 1.1. Нітроцементуючі атмосфери умовно класифікуються на три групи: - газові атмосферні суміші, утворені шляхом поєднання носійного газу з вуглеводнями та аміаком; - середовища, що створюються на базі аміаку та вуглеводнів; - атмосферні сполуки, отримані методом піролізу рідких речовин.

Таблиця 1.1 – Характеристики методів нітроцементзації (по Мінкевичу, Лахтіну, Помею, Бирку, Лунтену, Пренозілу)

Середовище нітроцементзації (склад, %)	Темпера-тура, °С	Час, год	Глибина шару, мм	Примітка
Ендогаз (70 % – 80 %) + природний газ (5 % – 7 %) + NH ₃ (2,5 % – 5 %)	740 – 750	5 – 8	0,5 – 1,0	Для зубчатих коліс; загартування від температур нітроцементзації, відпуск при температурі від 150 °С до 170°С
(25 % – 50 %) Na ₂ CO ₃ , (25 % – 50 %) NaCl + (20 % – 25 %) NaCN	720 – 760	до 1	0,35	
50 % BaCl ₂ , 40 % NaCl + ~10 % NaCN	740 – 800	до 4	до 1	
> 30 % BaCl ₂ , < 40 % BaCO ₃ , < 30 % NaCl, до 7 % NaCN	850	до 5	до 2	
~80 % NaCl, ~10 % KCl, до 3 % K ₄ Fe(CN) ₅	720 – 750	–	–	Неотруйні ванни
20 % K ₄ Fe(CN) ₅ , 60 % вугілля, 10 % BaCO ₃	1150	30 с	0,15	Нітроцементация в пасті при індукційному нагріванні
CO (30 %), H ₂ (43 %), N ₂ (25 %), CH ₄ (1 %), NH ₃ (1 %)	600	24	0,2	Сталь з 0,35 % С
CO (35 %), H ₂ (12 %), N ₂ (40 %), CH ₄ (13 %)	500	10	0,4	–
NH ₃ (50 %), пропан (50 %)	550 – 630	4	0,1	Технічно чисте залізо
Ендогаз (50 %) + NH ₃ (50 %)	560	3	0,5	Сталь 45, загартована в маслі
Ендогаз (50 %) + NH ₃ (50 %)	560	2	~ 0,5	
(25 % – 35 %) NaCN	550	до 3	0,4	
(25 % – 40 %) KCNO	570	до 3	0,4	

Незалежно від групи нітроцементуюча атмосфера складається з наступних компонентів:



Атмосфери на основі газу-носія з додаванням вуглеводнів і аміаку є найпоширенішим типом середовищ для нітроцементатації. У ролі газу-носія здебільшого застосовують ендотермічний газ (ендогаз), а також азот або екзотермічний газ, очищений від діоксиду вуглецю (CO_2) і вологи. Газ-носії розбавляє вуглеводні й аміак, сприяючи зменшенню швидкості їх термічної дисоціації, а також стабілізує метан, який є головним джерелом вуглецю під час насичення сталі. На практиці перевагу зазвичай віддають ендогазу. Оскільки ендогаз є нестабільною системою, йому потрібен постійний контроль та корекція складу. У сучасних ендогенераторах це контролюється за допомогою аналізу точки роси ендогазу. Хімічний склад ендогазу в сучасних генераторах такий: монооксид вуглецю (CO) 18–23 %, водень (H_2) 38–45 %, азот (N_2) 33–36 %, метан (CH_4) менше 0,2 %, кисень (O_2) менше 0,2 %, діоксид вуглецю (CO_2) менше 0,2 %. Для створення нітроцементуючої атмосфери на основі ендогазу в нього додають певну кількість метану або пропан-бутану, а також аміаку. Кількість цих компонентів залежить від умов процесу нітроцементатації, зокрема температури, площі поверхні оброблюваних деталей, а також швидкості циркуляції атмосфери в печі. Атмосфери на основі вуглеводнів і аміаку є найдоступнішим і економічно вигідним типом нітроцементуючих середовищ. Для карбюризації використовують газоподібні речовини (природний газ, пропан тощо) або рідкі компоненти (гас, піробензол, нафта тощо). Такі атмосфери утворюються безпосередньо у робочій зоні печі за умов температурного режиму нітроцементатації. Їхнім недоліком є утворення сажі. Цей ефект можна пом'якшити шляхом збільшення кількості аміаку, однак у цьому разі існує ризик перенасичення азотом нітроцементованого шару, що може негативно вплинути на його властивості. Пропорції ключових

складників нітроцементуючої атмосфери підбираються індивідуально залежно від обладнання та умов обробки. Найчастіше використовуються такі склади атмосфери: 33 % пропану + 56 % NH₃, 10 % пропану + 80 % NH₃, 500 см³/год гасу + 120 л/год NH₃, 500 см³/год нафти + 150 л/год NH₃. Нітроцементуюча атмосфера із рідких засобів формується під час подачі в піч рідин, які при певній температурі розкладаються з виділенням активних вуглецю та азоту. Такі рідини отримують шляхом змішування азотовмісних компонентів, як-от скипидар, ацетон чи етиловий спирт. Наприклад, у Чехії розроблено спеціальні нітроцементуючі рідини з включенням пиридину та аніліну. Як носій у складі цементуючих рідин використовується тераль-суміш, яка складається з 40 % скипидару, 30 % ацетону та 30 % спирту. Приклади складів атмосфери на основі тераль-сумішей: 1) 70 % тералю + 20 % пиридину; 2) 60 % тералю + 30 % аніліну.

Таблиця 1.2 – Склади нітроцементуючих середовищ, які утворюються із суміші тералю з пиридіном або аніліном [12]

t, °C	Номер суміші	CO ₂ , %	Склад атмосфери, %		
			CO	H ₂	CH ₄
750	1	0,1	26 – 30	50 – 55	7 – 12
	2	0,1	26 – 30	50 – 55	7 – 11
740	1	0,15	26 – 30	50 – 55	8 – 13
	2	0,15	26 – 30	50 – 55	8 – 11
720	1	0,25	35 – 27	46 – 52	12 – 15
	2	0,25	25 – 27	47 – 52	11 – 15

У сучасній вітчизняній практиці нітроцементация часто здійснюється з використанням триетаноламіну – рідини маслянистої текстури, яка має жовто-коричневий відтінок. Ця сполука характеризується молекулярною масою 148, температурою кипіння 226 °C та в'язкістю 0,2 Па при температурі 20 °C, а її хімічна формула (C₂H₄OH)₃N. Одною з важливих переваг застосування

триетаноламіну у процесі нітроцементациї є те, що сажа в печі не утворюється, адже надлишок вуглецю вступає у реакцію з киснем, що присутній у молекулярній структурі триетаноламіну, і перетворюється на оксид вуглецю. Варто зазначити, що середовища, які застосовуються для проведення нітроцементациї, мають нижчі окиснювальні властивості порівняно з газовою цементациєю. Згідно з дослідженнями Лахтіна, проведення нітроцементациї не викликає зниження прогартуваності, допоки вміст азоту у цементованому шарі становить менше ніж 0,1 %. Однак за підвищення цього показника до понад 0,4 % може виникати так звана "темна складова", яка негативно впливає на властивості матеріалу, зокрема призводить до зменшення його утомної міцності. Як демонструють дані таблиці 1.1, високотемпературна нітроцементация здійснюється також у ваннах. Застосування соляних ванн забезпечує значно швидший процес нагрівання у порівнянні з газовим середовищем, що дозволяє скоротити час обробки. З метою уникнення використання токсичних солей, ведеться активний пошук альтернативних матеріалів, таких як червона кров'яна сіль. Окрім того, в літературі згадується про можливість проведення високотемпературної нітроцементациї із застосуванням спеціальних паст. У цьому випадку після нанесення пасти на поверхню виконується індукційне нагрівання до температури 1150 °С. Вже через 30 секунд на поверхні формується нітроцементований шар товщиною до 0,15 мм. Розглядаючи нітроцементацию при середніх температурах у поєднанні із загартуванням, можна відзначити, що отриманий шар набуває багатофазної структури. Його зовнішня частина є мартенситною зоною, яка поступово переходить у ферито-карбідну або перлітну основну структуру матеріалу. Причиною уникнення мартенситної зони є зміни температури α - γ -перетворення під впливом насичення шару азотом. Уже при порівняно низьких температурах цього процесу відбувається утворення аустеніту, а при подальшому загартуванні завершується мартенситним перетворенням. Основні параметри нітроцементациї при середніх температурах систематизовано у таблиці 1.2. Нітроцементация при низьких температурах є

доволі поширеною технологією обробки матеріалів і має широке застосування у промисловості. Розвиток цього методу розпочався з азотування металеві стрічки і супроводжувався поєднанням азотування та цементації внаслідок використання ціанідів. Характерною особливістю таких процесів є те, що вони базуються на α - γ -перетворенні в системах залізо-азот; водночас у шарі не утворюється аустеніт. У результаті обробки формуються шари, що складаються з карбонітридів та дифузійної зони з підвищеним вмістом азоту й вуглецю. У цьому аспекті цей вид нітроцементації.

1.2 Ціанування

Ціанування — процес одночасного насичення поверхневого шару деталей вуглецем і азотом. Для цього застосовують два основні методи: рідинний і газовий. Цей процес доцільно використовувати для поверхневого зміцнення невеликих за розмірами деталей із шаром, товщина якого за технічними вимогами не перевищує 0,5 мм. Особливо ефективним є ціанування для дрібних елементів, адже воно має переваги над іншими методиками. Завдяки високій швидкості нагрівання в розплавлених солях забезпечується оперативне проникнення азоту й вуглецю в сталь, а рівномірний нагрів у рідкому середовищі мінімізує деформацію деталей. Крім того, поверхня продуктів після обробки стає досить чистою, і їм не потрібна подальша доробка. Ця технологія підходить як для вуглецевих, так і для легованих сталей із вмістом вуглецю в межах 0,2–0,4 %, що трохи більше, ніж у сталях, призначених для цементації. Після процедури ціанування зазвичай проводять безпосереднє гартування з того ж нагріву. Повторний нагрів для гартування небажаний, адже це спричиняє втрату азоту у верхньому шарі (деазотування). Після гартування обов'язково виконується низький відпуск, щоб стабілізувати властивості деталі. Залежно від температурного режиму розрізняють високотемпературне та низькотемпературне ціанування в рідких

середовищах. Високотемпературний метод відбувається за температур до 720–750 °С, при цьому товщина сформованого шару залежить від тривалості процесу (0,5–1,5 год) і коливається в межах 0,2–0,5 мм. У деяких випадках для отримання шару товщиною до 2 мм температуру підвищують до 850 °С. Проте за таких умов концентрація азоту зменшується, а отриманий шар за характеристиками стає подібним до цементованого. Перевага цього способу полягає в значному скороченні тривалості процесу, що робить його кращим варіантом у порівнянні з цементациєю. Низькотемпературне ціанування проводять у межах температур 520–580 °С. Протягом 1–3 год формується шар товщиною від 0,05 до 0,15 мм. Ключова перевага ціанування в рідких середовищах — висока швидкість процесу. Це зумовлено швидким нагріванням у рідині та високою хімічною активністю ціаністих ванн.

Таблиця 1.3 – Склади ванн для низькотемпературного ціанування

Номер ванни	Склад ванни, %					t, °С	Швидкість виснаження активної солі, %/Год
	Активна сіль		Неактивна сіль				
	NaCN	K ₄ Fe(CN) ₅	Na ₂ CO ₃	NaCl	КОН		
1	50	–	32	17	–	515	0,5
2	30	–	45	25	–	535	0,5
3	–	80	–	–	10	500	1,25
4	–	65	–	–	25	480	0,5

Під час процесу ціанування використовують спеціальні розплави, до складу яких входять солі як активного, так і неактивного типу. У таблицях 1.3 та 1.4 наведено докладні склади ванн, які є найбільш поширеними для проведення ціанування у низькотемпературних, середньотемпературних та

високотемпературних режимах. Зокрема, ціансплав ГПХ, що застосовується як активне середовище у технологічному процесі, містить у своєму складі такі компоненти: від 43 % до 47 % $\text{Ca}(\text{CN})_2$, близько 2 % – 3 % CaCN_2 , в межах 14 % – 15 % CaCl_2 , солі NaCl у концентрації 30 % – 35 %, а також близько 4 % – 5 % елементарного вуглецю (C) та близько 0,7 % CaF_2 . Високотемпературне ціанування зазвичай використовується для обробки невеликих деталей, таких як шестерні малого модуля, пальці, гайки, шайби та інші подібні елементи. Підбір оптимального складу ванни визначається переважно необхідною товщиною насиченого шару, який утворюється на поверхні деталей під час процесу. Перед завантаженням деталей у ванну з ціанистими солями необхідно попередньо підігріти їх до температурного діапазону від 350 °С до 500 °С. Цей технологічний етап є важливим, оскільки він дозволяє мінімізувати ризик виникнення деформацій або короблення деталей, покращити ефективність роботи ціанистої ванни, а також запобігти небажаного витоку солей. Останнє явище може статися через контакт вологи з розплавом у ванні. Для досягнення максимальної ефективності під час виконання ціанування важливо враховувати ряд факторів, таких як правильний підбір компонентів ванни, суворе дотримання температурного режиму і ретельна підготовка деталей до процесу. Усі ці аспекти є ключовими для одержання стабільних і якісних результатів при поверхневій обробці металевих виробів.

Таблиця 1.4 – Склади ванн для середньотемпературного і високо-температурного ціанування

	Номер ванни	Склад ванни, %					
		Активна сіль		Неактивна сіль			
		NaCN	Ціансплав ГПХ	NaCl	BaCl_2	CaCl_2	Na_2CO_3
Се ред	1	50	–	25	–	–	15

	2	30	–	60	–	–	–
	3	30	–	40	–	–	30
	4	–	10	35	–	55	–
	5	–	10	45	45	–	–
Високотемпературне ціанування	5	50	–	15	35	–	–
	6	50	–	15	–	–	25
	7	10	–	40	50	–	–
	8	7	–	10	72	–	–
	10	–	10	25	–	55	–
	11	–	10	25	55	–	–

переваг ціанування досягається при безпосередньому загартуванні деталей із ціаністої ванни. Охолодження проводиться у воді чи маслі. Для зменшення короблення деталі рекомендується охолоджувати в гарячому маслі або лужній ванні при температурах від 170 °С до 200 °С.

Низькотемпературне ціанування в рідкому середовищі—це технологічний процес, що широко використовується для зміцнення поверхонь сталей різного призначення. Основною метою цієї обробки є значне підвищення таких характеристик, як твердість поверхні, зносостійкість, межа витривалості, теплостійкість і протизадирні властивості металу, що дозволяє значно збільшити довговічність деталей, які працюють в умовах високих навантажень і агресивних середовищ. Під час цього процесу в сталевий сплав дифундує переважно азот, тоді як проникнення вуглецю є мінімальним і зазвичай не перевищує глибини від 5 до 15 мікрометрів. У зоні, де утворюється дифузійний шар азоту і вуглецю, структура формується переважно із карбонітридів, таких як $Fe_2(N,C)$, $Fe_3(N,C)$ і $Fe_4(N,C)$, а також містить твердий

розчин азоту в α -фазі заліза. Глибина цього шару варіюється залежно від таких параметрів як температура процесу, його тривалість і хімічний склад сталі. Зокрема, товщина карбонітридного шару зазвичай знаходиться в межах 5–20 мікрометрів, а твердого розчину азоту—від 0,2 до 0,5 міліметра. Цей метод обробки має низку варіантів застосування і широко використовується для поверхневого зміцнення деталей машин та робочих інструментів, забезпечуючи їм високі експлуатаційні характеристики. Особливо популярною ця технологія є під назвами активованого азотування, м'якого азотування, а також у вигляді комерційно запатентованих процесів: Tenifer (Німеччина), Tufftriding (США, Англія) і Stronize (Японія). Завдяки низькотемпературному ціануванню мікротвердість поверхонь легованих сталей після обробки може досягати величин у діапазоні від 5000 до 7000 МПа, тоді як для вуглецевої сталі цей показник зазвичай становить від 3500 до 4000 МПа. Варто зазначити, що твердість карбонітридного шару залишається постійною по перерізу поверхні, в той час як мікротвердість зони твердого розчину азоту в α -зоні поступово зменшується разом зі збільшенням товщини. Утім, незважаючи на очевидні переваги методу, низькотемпературне ціанування має й певні недоліки. До них належать складність у регулюванні хімічного складу ванн для обробки, значні втрати тепла під час процесу, токсичність компонентів, які використовуються у цьому методі, а також висока вартість спеціальних солей. Ці чинники обмежують сферу застосування та потребують ретельного контролю й оптимізації технології для забезпечення економічної та екологічної ефективності.

1.3 Карбонітрація

Карбонітрація представляє собою процес хіміко-термічної обробки сталі в розплавах ціанатів. Сутність методу полягає у тому, що деталі піддають нагріву в розплавах ціанатів при температурах від 540 °С до 570 °С із витримкою для різального інструменту і деталей машин від 1 год до 3 год.

Як вихідні матеріали для отримання активного розплаву прийняті чисті ціанати. При цьому виявлено, що ціанат калію, який має температуру плавлення від 320 °С, являється більш придатний для ведення процесу карбонітрації при температурах від 540 °С до 560 °С, ніж ціанат натрію.

Застосування карбонітрації для обробки деталей забезпечує підвищення втомної міцності від 50 % до 70 %, різке підвищення опору зносу порівняно з цементацією, нітроцементацією, азотуванням та іншими методами обробки; мікронну точність виробів; різке зменшення часу операції обробки.

Процес карбонітрації простий, не потребує складного устаткування. Вартість обробки по методу карбонітрації незначна, вона складає біля 2 % вартості інструменту.

1.4. Борування

Борування є одним із найбільш ефективних методів хіміко-термічної обробки металів і сплавів, що застосовується з метою істотного підвищення твердості, зносостійкості та довговічності поверхонь деталей машин. Сутність процесу полягає в дифузійному насиченні поверхневих шарів металу бором при підвищених температурах, у результаті чого формуються надтверді боридні фази, здатні забезпечувати роботу деталей в умовах інтенсивного абразивного, адгезійного та ерозійного зношування.

Борування відоме з середини ХХ століття та на сьогодні активно використовується в машинобудуванні, гірничодобувній промисловості, металургії, сільськогосподарському та харчовому машинобудуванні. Особливо доцільним є його застосування для деталей, що працюють без мастила або в умовах наявності абразивних частинок, агресивних середовищ та підвищених температур. До таких деталей належать шнеки, ножі, штампи, прес-форми, клапани, втулки, зубчасті колеса та інші елементи вузлів тертя.

На відміну від традиційних методів поверхневого зміцнення, таких як цементація або азотування, борування дозволяє отримати значно вищу твердість поверхні — до 1700–2000 HV, що наближається до твердості

технічних керамік. Саме ця особливість зумовлює унікальні трибологічні властивості борованих поверхонь.

Процес борування базується на дифузії атомів бору в кристалічну ґратку металу при температурах, зазвичай, у діапазоні 700–1050 °С. Джерелом бору можуть бути тверді, рідкі або газоподібні середовища, які при нагріванні здатні виділяти активний бор. Атоми бору, маючи малий атомний радіус, легко проникають у поверхневі шари металу та взаємодіють з залізом або легувальними елементами з утворенням хімічно стійких боридів.

У сталях найчастіше формуються бориди заліза FeB та Fe₂B. Фаза FeB характеризується вищою твердістю, але є більш крихкою, тоді як Fe₂B має дещо меншу твердість, проте кращу тріщиностійкість. Залежно від режимів борування та хімічного складу сталі може формуватися однофазний або двофазний боридний шар. Оптимальним з точки зору експлуатаційних властивостей вважається формування переважно фази Fe₂B.

Кінетика росту боридного шару підпорядковується дифузійному закону та залежить від температури процесу, часу витримки, активності борвмісного середовища та складу основного металу. Легувальні елементи, такі як хром, нікель, молібден і ванадій, можуть впливати на швидкість дифузії бору та морфологію шару, утворюючи складні бориди.

Залежно від агрегатного стану борвмісного середовища розрізняють кілька основних способів борування.

Твердофазне (пастове або порошкове) борування здійснюється шляхом нагрівання деталей у контейнерах, заповнених борвмісними порошками або пастами. Цей метод є технологічно простим і широко застосовується в промисловості, однак потребує тривалого часу обробки та складний у забезпеченні рівномірності шару.

Газове борування передбачає використання газоподібних сполук бору. Воно забезпечує кращу рівномірність шару та контроль процесу, проте вимагає складного й дорогого обладнання та підвищених заходів безпеки.

Рідинне борування реалізується в розплавах солей, що містять бор. Метод дозволяє скоротити тривалість процесу, але має екологічні та корозійні обмеження.

Плазмове (іонне) борування є сучасним різновидом, при якому насичення бором відбувається в тліючому розряді. Воно характеризується високою керованістю процесу, меншою температурою обробки та можливістю формування рівномірних боридних шарів з мінімальними деформаціями деталей.

Борований шар має характерну голчасту або зубчасту морфологію, що забезпечує високу адгезію шару до основного металу. Товщина шару зазвичай становить від 20 до 300 мкм і залежить від режимів обробки. Мікротвердість боридних фаз значно перевищує твердість традиційно зміцнених поверхонь, що забезпечує різке зменшення інтенсивності зношування.

Крім високої зносостійкості, боровані поверхні характеризуються підвищеною корозійною та жаростійкістю, особливо в окисних і слабоагресивних середовищах. Водночас недоліком борування є підвищена крихкість поверхневого шару, що обмежує його застосування для деталей, які зазнають ударних навантажень.

До основних переваг борування належать надвисока твердість поверхні, значне підвищення зносостійкості, стабільність властивостей при підвищених температурах та довговічність зміцнених деталей. Борування дозволяє суттєво подовжити ресурс роботи деталей без зміни їх геометрії та конструкції.

Недоліками методу є висока крихкість боридного шару, складність механічної обробки після борування, а також порівняно висока енергоємність процесу. У зв'язку з цим борування часто застосовують у поєднанні з іншими методами зміцнення або для деталей, що працюють у специфічних умовах.

Сфери застосування борування охоплюють важке машинобудування, сільськогосподарську техніку, харчову промисловість, металорізальні інструменти та обладнання, що працює в умовах інтенсивного абразивного зношування. Перспективним напрямом є поєднання борування з плазмовими

та вакуумними технологіями для отримання оптимального комплексу механічних і трибологічних властивостей.

1.5. Дифузійне хромування

Дифузійне хромування є одним із ефективних методів хіміко-термічної обробки металів і сплавів, що застосовується з метою підвищення зносостійкості, корозійної стійкості та жароміцності поверхневих шарів деталей машин. Сутність методу полягає в насиченні поверхні металу атомами хрому за рахунок дифузійних процесів при підвищених температурах, у результаті чого формується легований поверхневий шар зі зміненим хімічним складом і структурою.

Дифузійне хромування широко застосовується в машинобудуванні, енергетичній, хімічній та харчовій промисловості для зміцнення деталей, що працюють в умовах інтенсивного зношування, підвищених температур, дії агресивних газових і рідких середовищ. На відміну від гальванічного хромування, дифузійне хромування забезпечує формування шару з високою адгезією до основного металу, що виключає відшарування покриття в процесі експлуатації.

Особливо доцільним є застосування дифузійного хромування для сталей та чавунів, які експлуатуються в умовах тертя без мастила, циклічних теплових навантажень та окисного середовища. До таких деталей належать вали, втулки, поршневі кільця, клапани, шнеки, елементи печей і теплообмінного обладнання.

Процес дифузійного хромування базується на дифузії атомів хрому в поверхневі шари металу при температурах, як правило, у межах 800–1100 °С. Джерелом хрому можуть бути тверді, газоподібні або парофазні сполуки, які при нагріванні утворюють активні атоми хрому. Під дією високої температури атоми хрому дифундують у кристалічну ґратку заліза, заміщуючи атоми заліза або утворюючи тверді розчини та карбіди хрому.

У сталях після дифузійного хромування формується поверхневий шар, збагачений хромом, у якому можуть утворюватися карбіди типу Cr_7C_3 та

Cr_{23}C_6 , що забезпечують підвищену твердість і зносостійкість. Одночасно з цим хром підвищує корозійну стійкість матеріалу за рахунок утворення захисної оксидної плівки на поверхні.

Кінетика росту хромованого шару визначається температурою процесу, тривалістю витримки, активністю хромовмісного середовища та хімічним складом сталі. Легувальні елементи, зокрема вуглець, молібден, ванадій і нікель, впливають на швидкість дифузії хрому та фазовий склад поверхневого шару.

Залежно від характеру хромовмісного середовища розрізняють кілька основних різновидів дифузійного хромування.

Твердофазне дифузійне хромування здійснюється шляхом нагрівання деталей у герметичних контейнерах, заповнених порошковими сумішами, що містять хром або його сполуки. Метод є відносно простим у реалізації та широко застосовується в промисловості, однак характеризується значною тривалістю процесу.

Газове дифузійне хромування базується на використанні газоподібних сполук хрому. Воно забезпечує більш рівномірний розподіл хрому в поверхневому шарі та кращий контроль процесу, проте потребує складного обладнання й суворого дотримання вимог безпеки.

Вакуумне та парофазне хромування є сучасними різновидами методу, які дозволяють знизити температуру процесу, мінімізувати окиснення поверхні та забезпечити високу якість зміцненого шару.

4. Структура та властивості хромованих дифузійних шарів

Дифузійно хромований шар має поступовий перехід концентрації хрому від поверхні до серцевини деталі, що забезпечує високу адгезію та знижує ризик утворення тріщин. Товщина шару зазвичай становить від 20 до 200 мкм і залежить від режимів обробки та складу матеріалу.

Твердість поверхневого шару після дифузійного хромування перевищує твердість основного матеріалу та може досягати 700–1200 HV. Хромовані поверхні характеризуються підвищеною зносостійкістю, корозійною та

жаростійкістю, що дозволяє використовувати їх у високотемпературних та агресивних середовищах. Водночас, порівняно з боруванням, дифузійне хромування забезпечує кращу пластичність поверхневого шару.

5. Переваги, недоліки та сфери застосування дифузійного хромування

Основними перевагами дифузійного хромування є висока адгезія зміцненого шару до основного металу, підвищена корозійна та жаростійкість, а також стабільність властивостей при тривалій експлуатації. Метод дозволяє суттєво подовжити ресурс роботи деталей без необхідності їх конструктивної зміни.

До недоліків методу належать високі температури процесу, що можуть призводити до деформацій деталей, а також значна тривалість обробки. Крім того, дифузійне хромування є енергоємним процесом і потребує ретельного контролю технологічних параметрів.

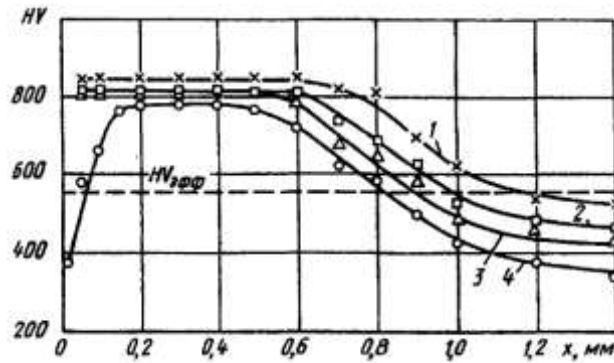
Дифузійне хромування широко застосовується для зміцнення деталей машин і обладнання в машинобудуванні, харчовій і хімічній промисловості, енергетиці та транспортній галузі. Перспективним напрямом розвитку є поєднання дифузійного хромування з іншими методами поверхневого зміцнення, зокрема азотуванням і плазмовими технологіями, з метою отримання оптимального комплексу експлуатаційних властивостей.

2. ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА ІОННА НІТРОЦЕМЕНТАЦІЯ

Деталі машин, які піддаються значним контактним циклічним навантаженням і навантаженням згину, зазвичай проходять процес хіміко-термічної обробки (ХТО) для зміцнення. Одним із перспективних напрямів у промисловості є застосування технологічного процесу, який передбачає одночасне насичення поверхні вуглецем і азотом. Застосування подібних методів дозволяє отримати дифузійні шари високої якості при мінімальних деформаціях деталей під час обробки. У світовій практиці все більшого поширення набуває метод високотемпературної іонної нітроцементациї, який проводиться при температурах від 750 °С до 850 °С. Цей метод успішно використовується у таких країнах, як Японія, Китай, США, Німеччина та

Росія. У Китаї процес проводять на установках для іонного азотування, де карбюризаторами служать аміак і етиловий спирт. Температура насичення варіюється в межах 740–750 °С. Після ХТО зразки гартують і відпускають. Завдяки іонній нітроцементації у Китаї зміцнювали шестерні та коробки передач тракторів зі сталі марки 20ХГТ, що призвело до отримання чудових результатів. Японські корпорації спільно з «Лінд» та «Юніон Карбід» розробили методи іонної нітроцементації, де як карбюризатор використовують суміш газів: азоту N₂ (40 %), водню Н₂ (40 %), двоокису вуглецю СО (20 %) і метану СН₄. У Німеччині в якості карбюризатора для цього методу застосовують суміш азоту N₂ (50 %) та бензолу (50 %). Суміш подається порціями у реакційну камеру відповідно до заданих режимів. Для досягнення оптимальної структури дифузійного шару і властивостей сталі необхідно ретельно регулювати швидкість подачі суміші та співвідношення азоту до газу, що містить вуглець. Недостатня кількість суміші призводить до зниження твердості та глибини шару, а надмірна подача спричиняє утворення сажі на поверхні зразка і зменшує швидкість росту шару. Завдяки оптимізації подачі газової суміші вдалося досягти високої швидкості формування нітроцементованого шару – товщина шару сталі 20Х2Н4А при температурі 750 °С складала до 0,55 мм за годину обробки, а за 4 години – понад 1,3 мм. У низці досліджень вивчався вплив складу газової суміші на твердість поверхні сталі та глибину дифузійного шару, отриманого методом нітроцементації в тліючому розряді. Процедура проводили для армко-заліза за температури 600 °С протягом п'яти годин. При сталій концентрації вуглецю на рівні 1,2 % у газовій суміші змінювали вміст азоту. Максимальна поверхнева твердість (HV 7500 МПа при навантаженні 10 Н) була досягнута при концентрації азоту 10 %. Глибина шару збільшувалася від 0,01 мм до 0,2 мм при підвищенні рівня азоту з 0 до 60 %. При постійному вмісті азоту 8,5 % найбільша твердість поверхні була зафіксована за концентрації вуглецю 0,25 %. При оптимальному співвідношенні компонентів газової суміші (0,25 % С і 8,5 % N₂) у сформованому шарі містилось 0,8 % вуглецю та 0,5 % азоту за масою.

Українські дослідники також приділяють увагу вивченню процесів високотемпературної нітроцементації в тліючому розряді. Серед них можна виділити таких науковців: Н.М. Рижова, М.Ю. Семенова (МГТУ імені Баумана), В.С. Григор'єва, Г.А. Солодкіна, С.А. Шевчука (ЕНІМС), Ю.М. Лахтіна, Я.Д. Когана, В.Н. Шапошникова та інших. У Науково-виробничому об'єднанні «ЕНІМС» розроблено дослідно-промислову установку, яка дозволяє здійснювати технологію іонної нітроцементації з термообробкою. Дослідження проводилися на сталях марок 20Х, 17ХГТ, 25ХГТ і 25ХГН. Експериментально випробовували різноманітний склад газової атмосфери, компоненти якої включали аміак та пропан-бутанову суміш (С₃Н₇ – С₄Н₁₀). У процесі випробувань встановлено, що після нітроцементації при стабільному рівні вуглецевого потенціалу, який визначається вмістом С₃Н₇ – С₄Н₁₀ у насичуючій атмосфері, концентрація вуглецю у поверхневому шарі може як не досягати необхідних параметрів, так і перевищувати їх. У другому випадку це зумовлює утворення карбонітридної «сітки» по межах зерен. Оптимальний результат отримано шляхом циклічної подачі газу, насиченого вуглецем, під час нітроцементації. У цьому процесі періоди насичення чергувалися з етапами дифузійного відпалу. Структура загартованих зразків сталей марок 17ХГТ, 25ХГТ і 25ХГМ представлена мартенситом та залишковим аустенітом у кількостях від 40 % до 50 %. Розподіл твердості у поперечному розрізі зміцненого шару показано на рисунку 1.1. Максимальні значення твердості для зміцнених шарів цих сталей становлять від 720 НV до 740 НV.




1 – 25XGM, 2 – 25XGT, 3 – 17XGT, 4 – 20X.

Рисунок 1.1 – Розподілення твердості по товщині шару після іонної нітроцементації при $t = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ (150 хв) і загартуванні

Дослідження виявили, що сталі, які містять хром у своєму складі, мають найвищу здатність утворювати нітриди та карбонітриди. Технологічні параметри, такі як склад газової суміші, тиск, температура та тривалість процесу зміцнення, найкраще проявляють свій вплив на характеристики дифузійного шару за умов одностадійної обробки. В умовах високотемпературної іонної нітроцементації основним процесом стає насичення поверхні вуглецем, тоді як концентрація азоту може легко контролюватися варіюванням температури та тривалості насичення. Зниження температури сприяє збільшенню вмісту азоту на поверхні, тоді як підвищення температури та тривалості процесу знижує його концентрацію на поверхні, але забезпечує більшу глибину проникнення азоту. Дослідження також показали, що при такому методі відсутнє насичення поверхні воднем і її окислення через низький парціальний тиск відповідних елементів у середовищі газорозрядної камери. Відсутність окислення є важливим фактором для підвищення міцності на згинання. Однак одностадійні режими часто призводять до перенасичення теплостійких сталей вуглецем і азотом, що є їхнім суттєвим недоліком. З іншого боку, цього можна уникнути у двохстадійних та циклічних режимах обробки, які мають перевагу для ефективного дифузійного насичення.

Двохстадійні режими включають етап активного насичення вуглецем з високим потенціалом (1,7–2,0%) протягом визначеного часу і подальший етап дифузійного вирівнювання при нижчому потенціалі (1,2–1,5%). Такий підхід дозволяє уникнути перенасичення поверхні вуглецем, сприяє збільшенню ефективної товщини шару та формуванню більш вираженої активної карбідної зони. Циклічні режими, які є логічним розвитком двохстадійних процесів, передбачають багатократне зміцнення атмосфери газового середовища шляхом регулювання вуглецевого потенціалу. Дослідження таких циклічних процесів іонної нітроцементатації проводилися в МДТУ ім. Баумана на сталі марки 20ХНЗМА. Обробка здійснювалася у спеціальній установці для іонної хіміко-термічної обробки із застосуванням газового середовища, що містило ацетилен, аміак і аргон. Дифузійне насичення виконували за різними варіантами ізотермічних і неізотермічних циклічних режимів. Іонна нітроцементатація проводилася за чотирма схемами: 1) одночасне насичення вуглецем і азотом при сталій температурі; 2) термоциклічна обробка перед насиченням з подальшим насиченням при постійній температурі; 3) насичення вуглецем і азотом із застосуванням термоциклічного режиму; 4) попередня термоциклічна обробка і насичення за схемою термоциклічного режиму. Щоб досягти рівномірного розподілу вуглецю в зоні дифузії, ацетилен подавався в камеру циклічно. Протягом стадії активного насичення вуглецевий потенціал іонізованої атмосфери становив 1,3–1,4%, а під час стадії дифузійного насичення – 0,8–1,0%. Подавання аміаку та аргону залишалось постійним протягом усього процесу.

Схема зміни температури t вуглецевого потенціалу показана на  рис. 1.2 і 1.3.

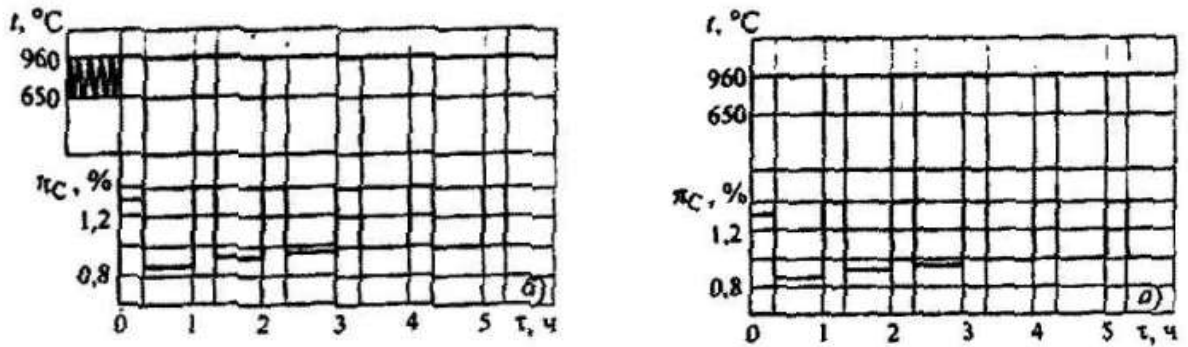


Рисунок 1.2 – Схема зміни температури і вуглецевого потенціалу для режимів 1 і 2 іонної нітроцементації

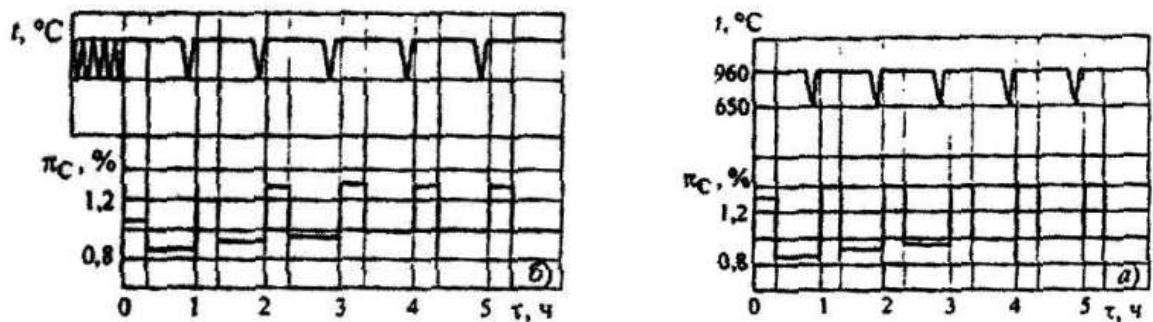


Рисунок 1.3 – Схема зміни температури і вуглецевого потенціалу для режимів 3 і 4 іонної нітроцементації

Попередньо термоциклічну обробку, яка складалася з п'яти циклів, проводили за спеціально розробленою схемою, що передбачала нагрівання матеріалу до температури 850 °С — значення, яке відповідає умовам нітроцементації. Потім здійснювали охолодження до 550 °С шляхом виключення розряду, при цьому не передбачалася витримка матеріалу в кінцевих стадіях охолодження. Одночасно з насиченням матеріалу виконувалася термоциклічна обробка аналогічним методом і в тих же температурних діапазонах. Після кожного етапу процесу дифузійного

вирівнювання концентрації вуглецю проводилося плавне зниження температури. Результати дослідження демонструють, що використання неізотермічних режимів нітроцементації дозволяє значно скоротити загальну тривалість обробки. Зокрема, час, необхідний для виконання такого процесу, у середньому скорочується в два-три рази порівняно з тривалістю традиційних ізотермічних режимів. Завдяки характерним особливостям процесів у плазмі тліючого розряду, які вирізняються високою точністю регулювання температурного режиму та ефективною здатністю атмосфери до насичення, відкривається широкий спектр технологічних можливостей для впровадження неізотермічних варіантів дифузійного насичення матеріалів.

3.МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Загальна методика досліджень процесу карбазотування

Параметри технологічного усталення процесу карбазотування у тліючому розряді суттєво впливають на фізико-механічні властивості, будову, складову фаз та стійкість до зношування карностірдного покриття, тому з'ясування цього впливу є завданням першорядної ваги.

Практичні випробування здійснювалися на зразках сталі марки 12ХН3А. Основною метою цих випробувань було встановлення кореляції між властивостями карбазотованого шару (його глибиною, твердістю, структурною організацією, фазовим та хімічним складом) та ключовими аспектами технологічного циклу (тиском, складом насичувальної суміші, температурним режимом та тривалістю операції). Як робочі гази використовувалися суміші азоту та аргону (у співвідношенні 65 % N₂ + 25 % Ar), а також пропан С3Н7. Температурний діапазон насичення варіювався від 470 до 500 °С, тиск газової суміші під час дифузійного насичення коливався від 70 Па до 400 Па, а тривалість процесу становила від 20 до 240 хвилин.

У процесі вивчення застосовувалися такі методики, як металографія, рентгеноструктурний та хімічний аналізи. Завдяки цим методам вдалося визначити такі властивості карбазотованого покриття: структуру і товщину – за допомогою мікроскопів ММР–2Р та «Neophot–21»; мікротвердість –

використовуючи мікротвердомір ПМТ–3; а також фазовий склад – за допомогою рентгенівського апарату ДРОН– 3М.

Для оптимізації проведення наукових дослідів та забезпечення надійності отриманих даних, були залучені математичні інструменти планування експериментальних робіт (зокрема, плани першого та другого порядку), а також статистичні методи для аналізу експериментальних результатів.

3.2. Методика планування експериментальних досліджень карбоазотування в тліючому розряді

Використання математичного апарату першого порядку для опису наявних процесів [105, 105], є реальним лише у невеликому інтервалі варіації змінних чинників, коли цю функцію на визначеній ділянці можна із достатньою точністю замінити прямою лінією. З огляду на це, для вирішення поставленого завдання прогнозування залежностей та обґрунтованого проведення наукових робіт, було обрано методику планування дослідів другого порядку Хартлі [70]. Плани Хартлі виділяються серед інших планів другого порядку меншою кількістю потрібних випробувань. Так, для чотирифакторного дослідження за ортогональним центрально-композиційним планом необхідно виконати 25 випробувань, за рівномірним рототабельним центрально-композиційним планом – 31 випробування, а за композиційним планом Хартлі – 16 випробувань.

Математичне моделювання досліджуваного явища проводилося за допомогою регресійної моделі у формі квадратного полінома [80]:

$$\varphi(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (2.1)$$

де $\varphi(x)$ – функція відгуку (вихідна змінна);

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ – коефіцієнти рівняння регресії;

x_i, x_j – незалежні фактори.

Коефіцієнти регресії, представлені у вигляді векторного стовпця β , розраховується із матричного рівняння [80]:

$$(F^T F) \beta = (F^T Y), \quad (2.2)$$

де F – матриця планування експеримента;

F^T – трансформована матриця;

$(F^T F) = \Phi$ – інформаційна матриця Фішера;

Y – вектор – стовпець результатів експериментів.

Оцінка придатності отриманої регресійної моделі проводилася за допомогою критерію Фішера.

Введені такі позначення чотирьох змінних чинників технологічного процесу азотування у плазмі тліючого розряду:

z_1 – температура карбоазотування, T (°C);

z_2 – тиск у вакуумній камері, p (Па);

z_3 – тривалість процесу карбоазотування, τ (хв);

z_4 – вміст пропану в насичуючому середовищі C_3H_7 , %.

Довірливі рівні зміни факторів такі:

z_1 – від 470 °C до 500 °C;

z_2 – від 70 Па до 400 Па;

z_3 – від 20 хв до 240 хв;

z_4 – від 0 % до 12 %.

Матриця спектра плану Хартлі в зоні гіперкулі для чотирьохфакторного експерименту наведена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Матриця спектра плану Хартлі при $n = 4$ (зона гіперкуля)

Складові плану	Номер експери- менту	Фактори			
		x_1	x_2	x_3	x_4
Ядро плану	1	+ 0,5	+ 0,5	+ 0,5	+ 0,5
	2	- 0,5	+ 0,5	+ 0,5	+ 0,5
	3	+ 0,5	- 0,5	+ 0,5	- 0,5
	4	- 0,5	- 0,5	+ 0,5	- 0,5
	5	+ 0,5	+ 0,5	- 0,5	- 0,5
	5	- 0,5	+ 0,5	- 0,5	- 0,5
	6	+ 0,5	- 0,5	- 0,5	+ 0,5

	7	- 0,5	- 0,5	- 0,5	+ 0,5
«Зіркові» точки	8	- 1	0	0	0
	10	+ 1	0	0	0
	11	0	- 1	0	0
	12	0	+ 1	0	0
	13	0	0	- 1	0
	14	0	0	+ 1	0
	15	0	0	0	- 1
	15	0	0	0	+ 1
Центральна точка	16	0	0	0	0

Знаходимо фактичні величини параметрів процесу азотування за формулою:

$$z_j = x_j \Delta z_j + z_j^0 \quad (2.3)$$

Отримані напідставі(2.3)відомості наведено у таблиці2.2. Зметоюпідвищення достовірностідосліджень, центральні точки повторюються чотири рази (режими 16, 17, 18, 20 табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Параметри карбоазотування в тліючому розряді по плану Хартлі

Номер режиму	Параметри режиму карбоазотування			
	Температура T, °C	Тиск P, Па	Тривалість τ, хв	Вміст пропану C ₂ H ₇ , %
1	2	3	4	5
1	560	320	175	8
2	510	320	175	8
3	560	150	175	3
4	510	150	175	3
5	560	320	65	3
5	510	320	65	3
6	560	150	65	8
7	510	150	65	8
8	470	240	130	5
10	500	240	130	5
11	540	70	130	5
12	540	400	130	5
13	540	240	20	5
14	540	240	240	5
15	540	240	130	0
15	540	240	130	12
16	540	240	130	5
17	540	240	130	5
18	540	240	130	5
20	540	240	130	5

2.3 Технологія процесу карбоазотування в тліючому розряді

Вивчення процесу карбоазотування у тліючому розряді проводилися на експериментальній установці УТ-1, яка розташована на базі Подільського наукового фізико-технологічного центру (ПНФТЦ). Зовнішній вигляд установки показаний на рис. 2.1.

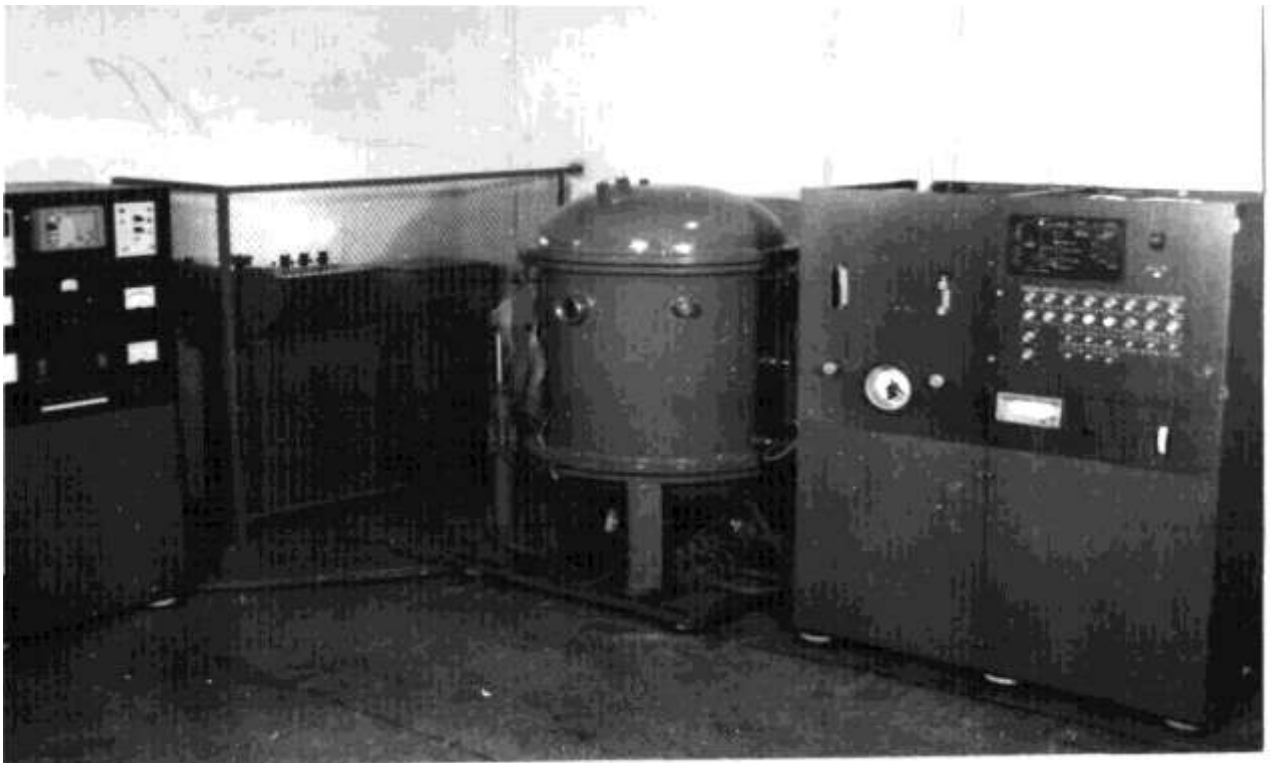


Рисунок 2.1 – Установка для карбоазотування в тліючому розряді

Охолоджуванa водяним контуром розрядна камера зроблена з сталі, щонайкраще, імає подвійну обшивку. Щоб мати можливість спостерігати за зміцненням, у камері розміщено два оглядові отвори (через один із них вводиться пірометр АПРЗ для контролю температури).

Система створення вакууму охоплює вакуумні помпи НВПР – 15 – 055 та 2НВР – 5ДМ, а також відповідні трубопроводи та запірну арматуру (див. рисунок 2.2).

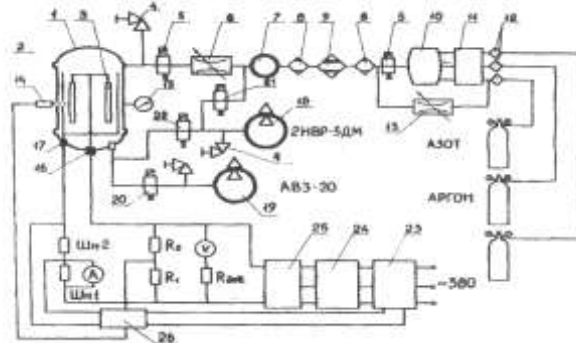


Рисунок 2.2 – Схема установки для карбоазотування в тліючому розряді

Газова система постачання містить газові балони, фільтраційні елементи (12), резервуар-змішувач (10), цеолітовий пастковий пристрій (7), кисневий очисник (8), газовий дросель (5) та електромагнітні клапани (5) (Див. Рис. 2.2).

Електрична система складається з тиристорного регулятора напруги (23), підвищувального трансформатора (24), випрямного пристрою (25) та блоку стабілізації розряду (25), що реагує на варіації струму напруги у ланцюгу живлення. Регулятор напруги здійснює контроль за параметрами напруги та струму, що надходять до електродів розрядної камери.

3.4. Методика дослідження зносостійкості

Машинатертя містить усоби такі елементи: приводну систему 1, вузол шпинделя 2 та фрикційний блок 3 (Рис. 2.4). Привід складається з асинхронного електродвигуна марки АОЛ-211-ЧСО із номінально

ю потужністю $N_e = 0,5 \text{ кВт}$, робочою частотою $n = 1350 \text{ об/хв}$, та клинопасової трансмісії з чотирма сходами.

Шпиндельний агрегат розташований у корпусі, при цьому сам шпиндель розміщений у гільзі на опорних кочках (кулькопідшипниках). Шпиндель з'єднаний із веденим шківом пасової передачі через шліци. Подача шпинделя регулюється обертанням вала-шестерні спільно з гільзою, що має на собі рейкове зачеплення. Сила притискання до тестового зразка генерується шляхом підвішування визначеної ваги на маховик 4.

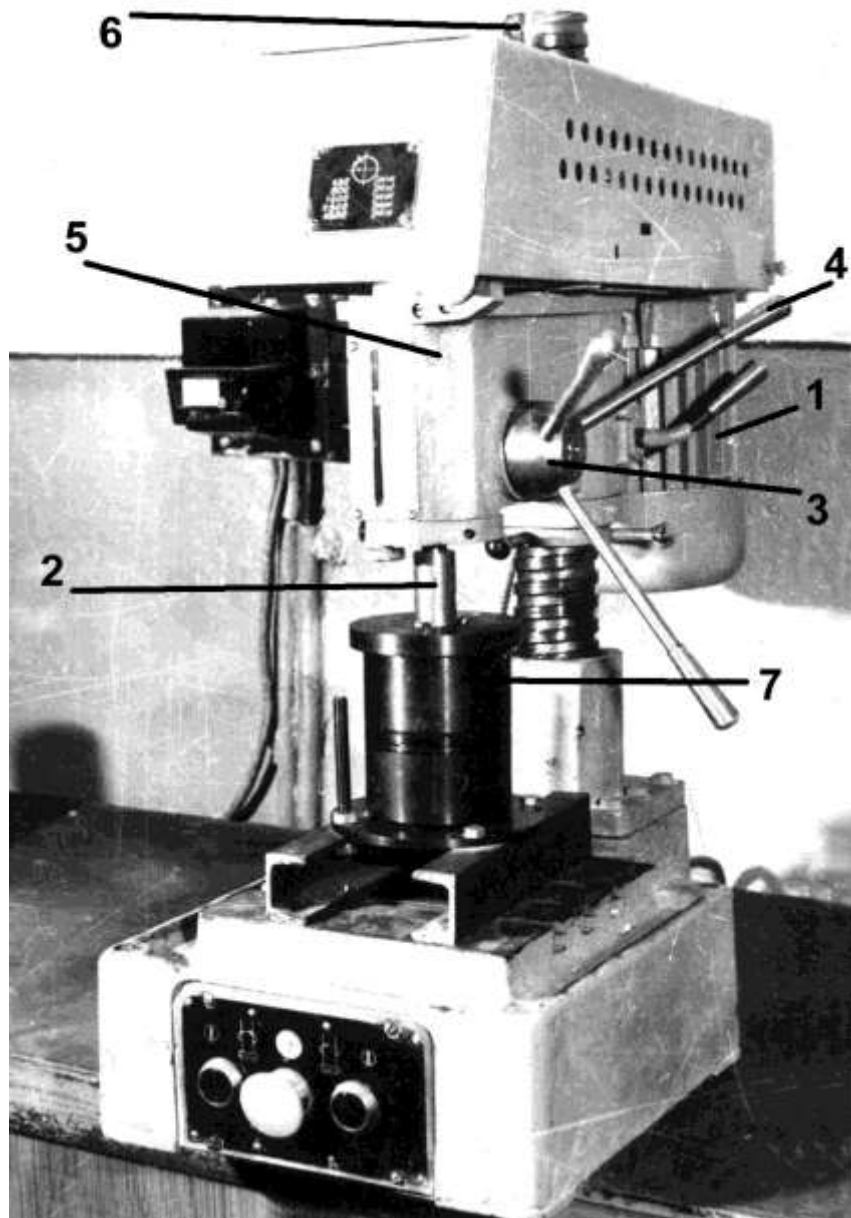


Рисунок 2.3 – Установка для проведення досліджень на тертя

Контртіло фіксується до чашки (склянки) 4 за допомогою двох стрижнів, яка, своєю чергою, розташована на опорному підшипнику 5. Забезпечення фіксації чашки по куту реалізується через трос, що з'єднує її із стрижнем 5. На цьому стрижні 5 закріплені тензодатчики, котрі дають змогу визначити величину моменту тертя, на основі якого потім обчислюється коефіцієнт тертя. У простір, утворений між зразком та контртілом, подається мастильний матеріал.

Ключовими та найбільш відповідальними компонентами у складових частинах вимірювальних систем виступають саме вимірювальні елементи, адже саме вони значною мірою впливають на загальну точність функціонування усього контрольного обладнання.

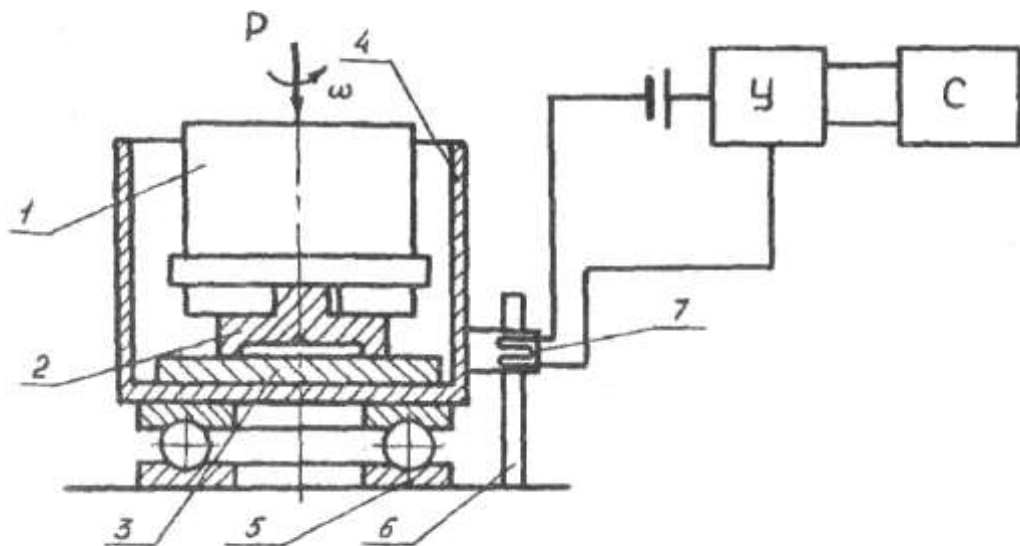


Рисунок 2.4 – Схема установки для проведення досліджень на тертя

В якості вимірювального елемента розробленого спеціального пристрою застосована важільно-зубчата головка МКМ. Похибка вимірювання – 1 мкм.

Конструкція вимірювального пристрою показана на рис. 2.5.

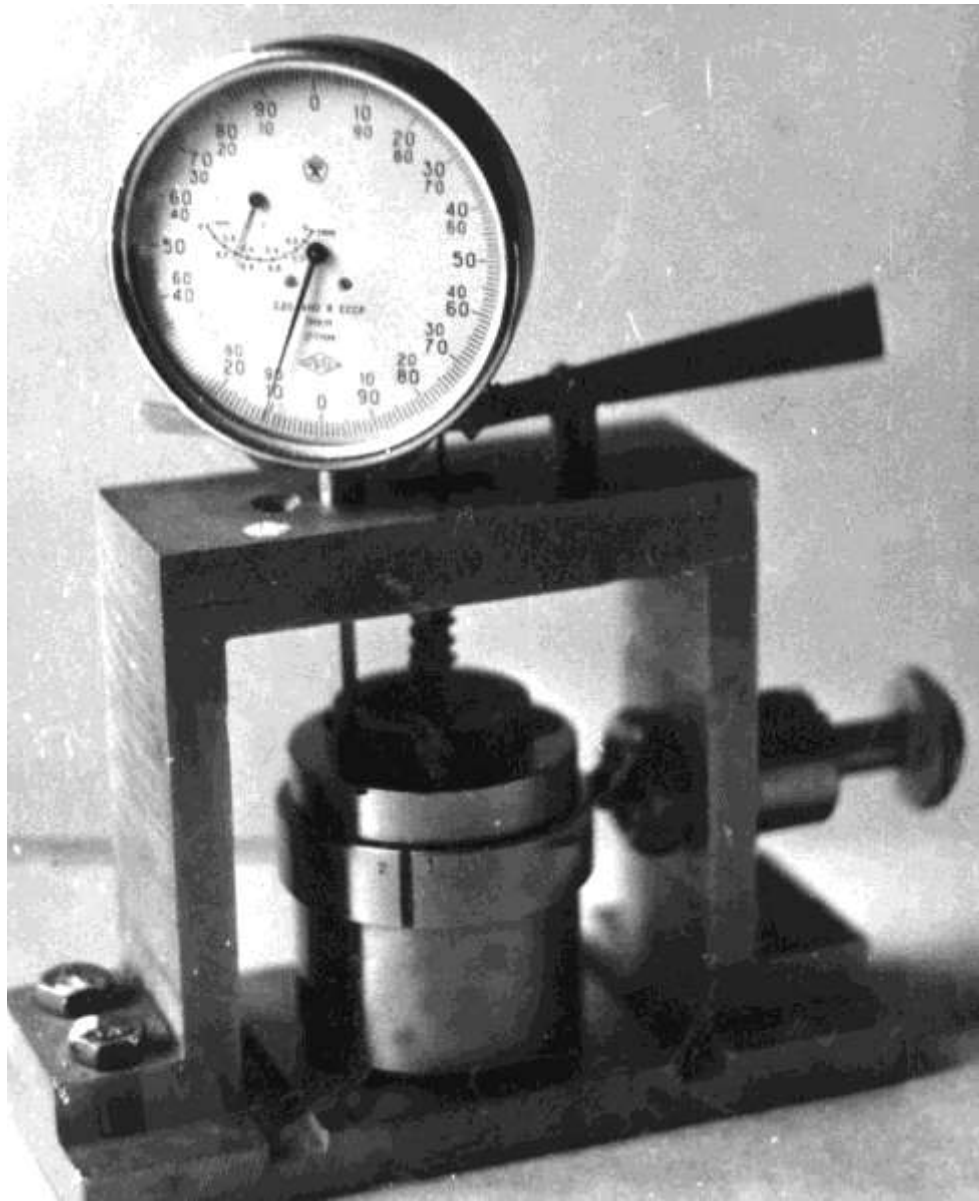


Рисунок 2.5 – Контрольний пристрій для вимірювання величини зносу

Аби позбутися похибки, що виникає через розташування зразка щодо оправки, вимірювання здійснювалися від усталеної базової площини, якою виступила торцева грань самої оправки. При цьому, зразок, закріплений на старті дослідження, залишався у оправці аж доки не стиратиметься визначений шар металу. З метою мінімізації похибки вимірювальних операцій, пристрій обладнано механізмами осьового та кутового затискання оправки.

Дослідження зразка виконувалося у п'ятнадцяти різних точках, після чого розраховувалось середнє значення його висоти. Лінійна величина зносу становила різницю між висотою зразка до початку випробувань та після їх завершення.

Схематичне зображення зразка та відповідного контр тіла подано на ілюстрації

2.5.

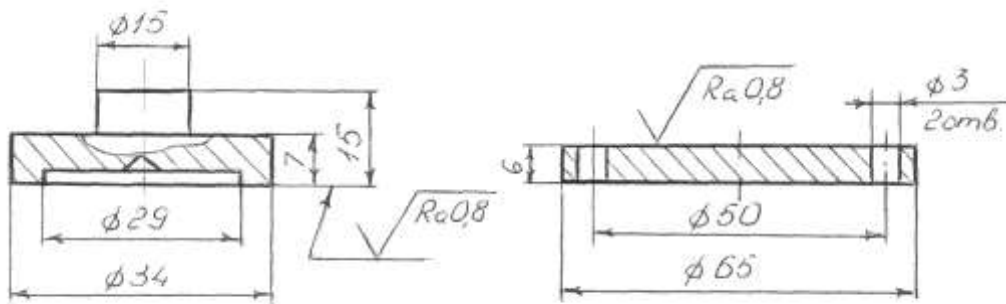


Рисунок 2.5 – Ескізи зразка і контртіла

Щоб вивчити, як технологічні чинники процесу карбоазотування впливають на стійкість до зносу, було задіяно план Хартлі другого рангу (див. табл. 2.2). Випробування здійснили на зразках зі сталі 12ХН3А, які попередньо зміцнили за допомогою карбоазотування у тліючому розряді. Умови, за яких оцінювалася зносостійкість, були наступні: робоче середовище — мастило Індустріальне 20, швидкість руху (ковзання) становила $V = 1,24$ м/с, а питомий тиск — $p = 4$ МПа.

4. ЗНОСОСТІЙКІСТЬ СТАЛІ 12ХН3А, ЗМІЦНЕНОЇ МЕТОДОМ КАРБООЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ

Дані щодо експлуатаційної стійкості зразків зі сталі марки 12ХН3А, зміцнених за допомогою карбоазотування в тліючому розряді, отримані за різними технологічними опрацюваннями згідно з планом другого порядку Хартлі, представлено у Таблиці 3.1. Розраховані коефіцієнти регресії також містяться у цій же Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Величина зносу зразків із різних сталей при терті ковзання, зміцнених карбоазотуванням в тліючому розряді по плану Хартлі

Номер режиму	Величина зносу U, мкм
	Сталь 12ХН3А
1	15
2	13
3	10
4	12,5
5	27
5	43
6	16
7	13
8	15
10	20
11	21
12	17
13	17,5
14	22
15	24
15	16
16	21,5
17	21
18	22
20	21

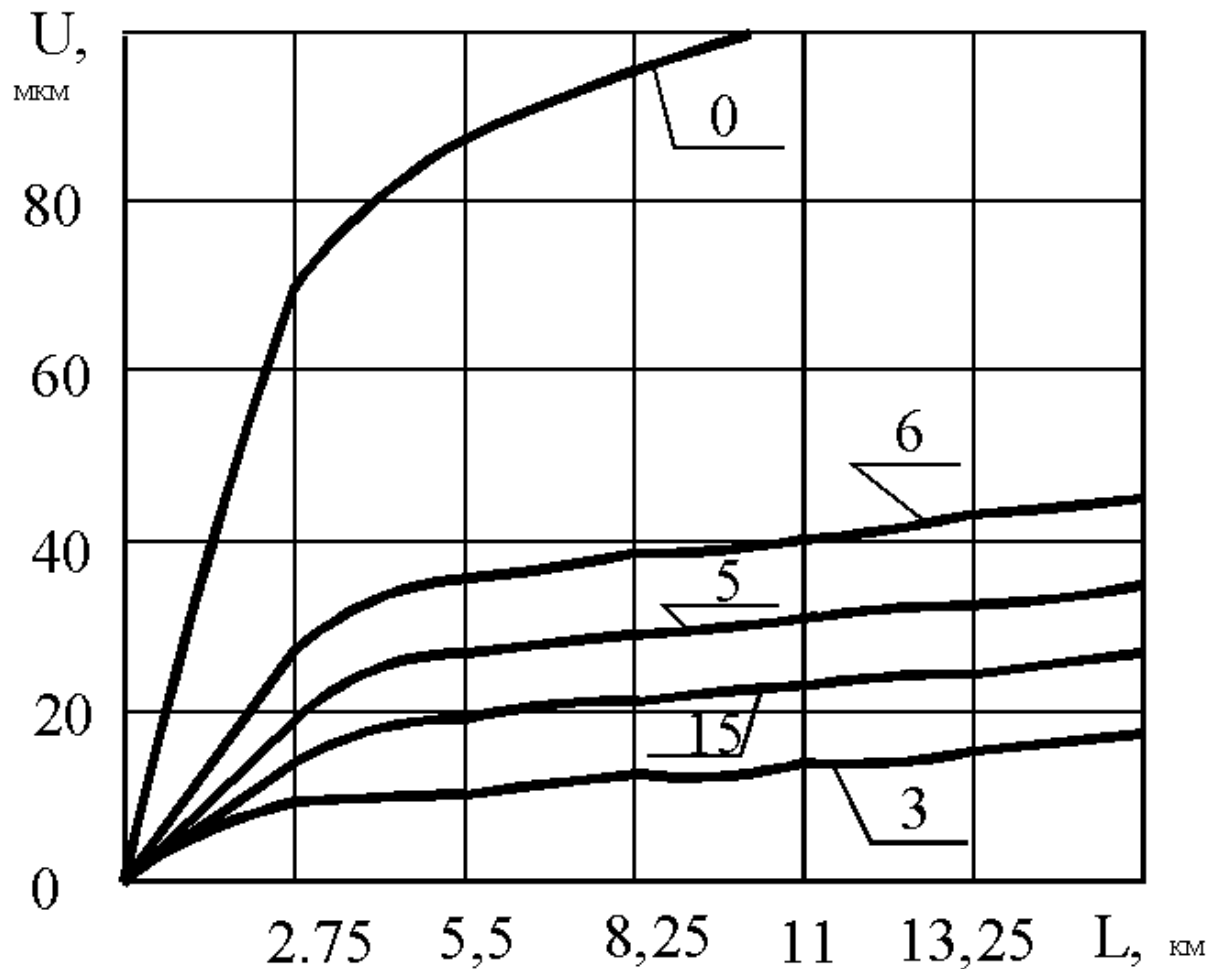


Рисунок 3.1 – Кінетика зношування зразків із сталі 12ХН3А, зміцнених методом карбоазотування

Узори кривих стирання свідчать, що в усіх дослідженнях присутній етап виходу на робочий режим (мал. 3.1), котрий ознаменується вищою інтенсивністю зносу, та період стабільної роботи з меншою інтенсивністю стирання. Зі співставлення величин зносу в час виходу на режим і у час стабільної роботи видно, що перший суттєво відбивається на процесі зношення пари тертя, а отже, і на тривалості служби компонентів. На рівень зносу в цю фазу помітний вплив мають такі чинники як будова поверхневого шару, його хімічний склад, шорсткість поверхні та робочі параметри (питомий тиск, швидкість, оточення). Коригуючи усі ці змінні, цілком реально досягти суттєвого зниження інтенсивності зносу в час виходу на режим.

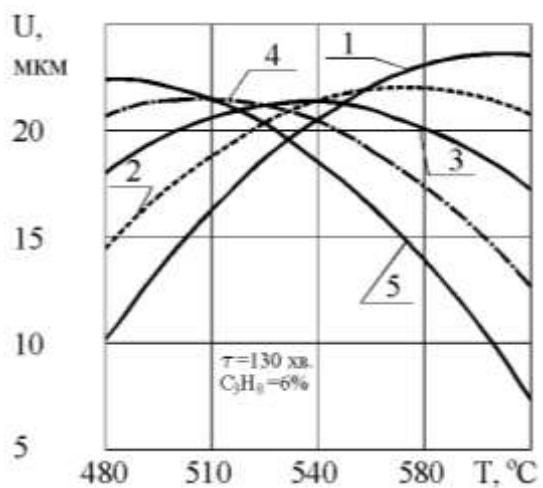
Таблиця 3.2 – Коефіцієнти рівнянь регресії, які описують залежність величини зносу від технологічних параметрів карбоазотування в тліючому розряді різних сталей

Коефіцієнт регресії	Значення коефіцієнта регресії
	Сталь 12ХН3А
β_0	21,365
β_1	-0,437
β_2	-1
β_3	1,65
β_4	-3,5
β_{11}	-3,65
β_{22}	-1,65
β_{33}	-1,5
β_{44}	-1,25
β_{12}	6,25
β_{13}	5,25
β_{14}	11,65
β_{23}	-10,65
β_{24}	-27,65
β_{34}	25,25

На рис. 3.2 показані залежності зносу зразків із сталі 12ХН3А, від параметрів технологічного процесу карбоазотування в тліючому розряді. Із графіків видно, що режим зміцнення неоднозначно впливає на процес зносу як по величині так і по характеру. Такі залежності показують не тільки ступінь впливу того чи іншого технологічного параметру на трибологічну характеристику поверхні зміцненого металу, але і дозволяють оптимізувати технологічний процес карбоазотування по даній характеристиці з врахуванням

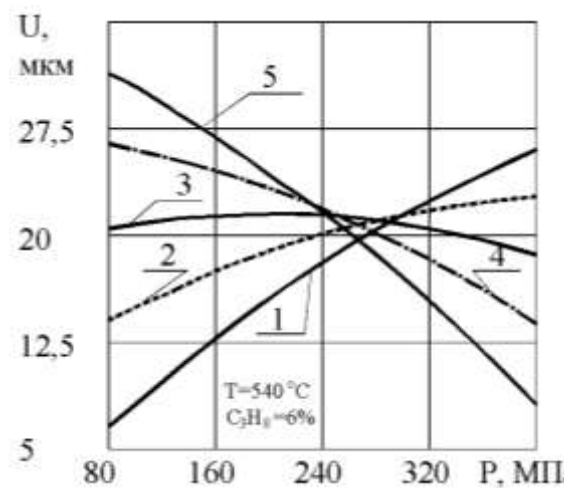
реальних умов експлуатації матеріалу. Так для сталі 12ХН3А найвища зносостійкість в умовах проведених досліджень зафіксовано при карбоазотуванні в тліючому розряді по режиму: $T = 560\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 150\text{ Па}$, $\tau = 175\text{ хв}$, кількість пропану в насичуючому середовищі – $8\% \text{ C}_3\text{H}_8$.

На мал. 3.2 зображено залежності стирання зразків зі сталі 12ХН3А, від чинників технологічного процесу карбоазотування у низькотемпературному розряді. З графіків помітно, що режим зміцнення нечітко впливає на процес зносу як за величиною, так і за суттю. Такі залежності демонструють не лише ступінь впливу того чи іншого технологічного чинника на трибологічну властивість зміцненого металу, але й дають змогу вдосконалити технологічний процес карбоазотування за цією властивістю з огляду на дійсні умови використання матеріалу. Так для сталі 12ХН3А найвищий опір зносу в умовах здійснених вишукувань зафіксовано при карбоазотуванні у низькотемпературному розряді за режимом: $T = 560\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 150\text{ Па}$, $\tau = 175\text{ хв}$, обсяг пропану у насичуючому середовищі – $8\% \text{ C}_3\text{H}_8$.



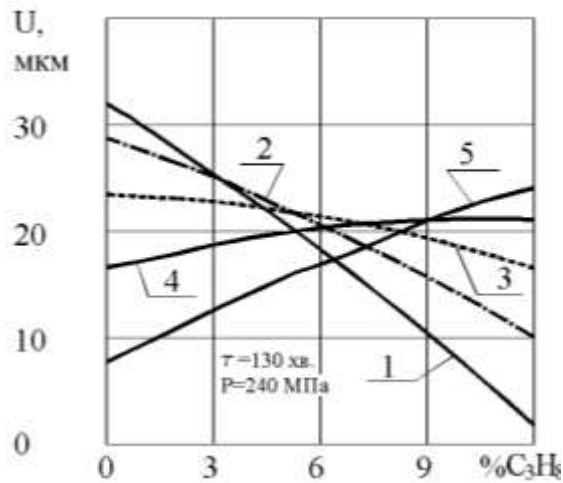
p : 1 - 70 МПа; 2 - 150 МПа;
3 - 240 МПа; 4 - 320 МПа; 5 - 400
МПа

а)



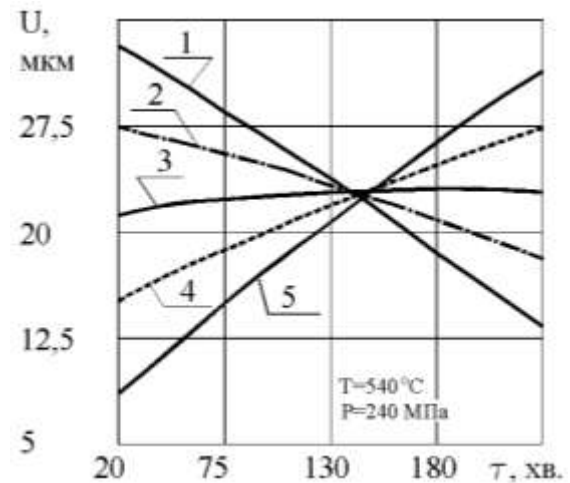
τ : 1 – 20 хв; 2 – 65 хв; 3 – 130 хв;
4 – 175 хв; 5 – 240 хв

б)



T: 1 - 470 °C; 2 - 510 °C; 3 - 540 °C;
4 - 560 °C; 5 - 500 °C

в)



% C_3N_7 : 1 - 0%; 2 - 3%; 3 - 5%;
4 - 8%; 5 - 12%

г)

Рисунок 3.2 – Вплив параметрів технологічного процесу карбоазотування на зносостійкість сталі 12ХН3А

Виявлено, що карбоазотовані зразки демонструють значно вищий опір зносу у певних умовах порівняно з тими, що були азотовані. Режим карбоазотування у тліючому розряді суттєво впливає на зносостійкість, особливо протягом початкового етапу притирання. Наприклад, для зміцненої сталі 12ХН3А, згідно з режимом 5, знос на стадії припрацювання виявився у чотири рази більшим, ніж при застосуванні режиму 3. Зі збільшенням пройденого шляху тертя величина зносу поступово знижувалася, досягаючи стабільного рівня до завершення періоду притирання. Водночас, розбіжність у темпах зношування зміцнених за різними технологіями зразків зменшувалася, стаючи практично однаковою на етапі нормального зносу. Схожа динаміка зношування спостерігалася і для інших типів сталей, оброблених карбоазотуванням.

Це явище можна пояснити тим, що внаслідок зміцнення методом карбоазотування у тліючому розряді, яке здійснюється за різних технологічних параметрів, на поверхні зразків формуються шари з варіативним фазовим складом, твердістю, пластичністю та іншими фізико-механічними характеристиками. Досягнення ідеального балансу цих властивостей для конкретних умов тертя забезпечує мінімальну інтенсивність зносу як на етапі притирання, так і під час звичайного експлуатаційного зношування. З утворенням вторинних структур (ВС), які слугують захисним покриттям для поверхні тертя, інтенсивність зносу знижується і після повного формування цих структур досягає мінімуму, характерного для стадії нормальної роботи.

На ілюстрації 3.2 представлені результати всебічного аналізу впливу ключових технологічних чинників на зносостійкість сталі 12ХН3А, отримані завдяки методології планування експериментів (схема Хартлі, див. табл. 2.2). Ці дані дозволяють визначити оптимальні умови карбоазотування у середовищі тліючого розряду для досягнення найвищого опору зносу досліджуваних сплавів. Для сталі 12ХН3А такими визнано наступні режими: температура карбоазотування — 540 °С, тиск — 400 Па, час насичення — 240 хвилин, концентрація пропану — 12 %.

Аналіз отриманих взаємозв'язків свідчить, що зростання твердості матеріалу не завжди позитивно корелює з його стійкістю до зношування. Оптимальні параметри процесу зміцнення, які дають змогу досягти максимальної мікротвердості поверхні та найбільшої глибини зміцненого шару, не завжди збігаються з тими, що забезпечують максимальну зносостійкість за цим критерієм. Кількісні показники зносу поверхонь тертя залежать не лише від технологічних аспектів обробки, але й від умов експлуатації (величини контактного тиску, швидкості ковзання та середовища). Отже, для поліпшення зносостійкості пар тертя, що працюють при різних матеріалах та режимах карбоазотування у тліючому розряді,

необхідно виявляти не лише оптимальні технологічні параметри, але й найбільш сприятливі експлуатаційні умови тертя.

5. ВИСНОВКИ

Вирішено нагальне науково-технічне завдання: посилення стійкості та тривалості служби машинобудівних компонентів через аплікацію дифузійних шарів із найбільш вигідними характеристиками. Теоретично обґрунтовано та емпірично підтверджено ідею покращення міцності та експлуатаційного ресурсу виробів, що зазнають навантажень, шляхом нанесення покриттів. Сутність цієї ідеї полягає у досягненні якнайкращого результату від покриття через калібрування його параметрів.

Фундаментальні засади дають змогу створити розрахункову модель усього процесу, що є критичним для забезпечення контрольованості технології залежно від умов застосування, а також для оптимізації робочих параметрів, які гарантують найефективніше досягнення поставлених цілей зміцнення. Водночас, теорія відкриває шляхи для підбору складових газової суміші та їхньої пропорції як ключового чинника, що модулює фазові зміни в приповерхневих зонах оброблюваних об'єктів.

Наукове підтвердження фізичних засад запропонованої низькотемпературної вакуумно-дифузійної газорозрядної методики карбоазотування у тліючому розряді є необхідною умовою для її впровадження як екологічно доброзичливої процедури, що сприяє економії матеріальних, людських та енергетичних резервів.

Розроблена методика карбоазотування у плазмі тліючого розряду з використанням безводних середовищ має ту перевагу, що дозволяє варіювати технологічними змінними процесу з метою досягнення ідеальних фізико-механічних властивостей зміцнених сплавів, а отже, їхньої покращеної роботоздатності.

Виконана робота, спрямована на вивчення впливу робочих параметрів процесу карбоазотування на характеристики конструкційних матеріалів, дає

змогу виробити найкращий алгоритм та режими для зміцнення. Завдяки застосуванню середовища без вологи помітно зменшується схильність поверхні до крихкості, зростає її опірність навантаженням та стійкість до утворення тріщин.

Експериментально встановлено кореляцію між твердістю, товщиною шару, мікроструктурою та фазовим складом карбоазотованого азотованого покриття, і основними робочими параметрами технології. На базі цих співвідношень визначено оптимальні режими зміцнення для певних типів конструкційних сталей, керуючись критерієм максимальної міцності.

Було проведено дослідження опору стиранню зразків зі сталі 12ХН3А, зміцненої методом карбоазотування у тліючому розряді, із залученням математичних методів планування випробувань. Робочі параметри зміцнювального процесу (температура, тиск, склад насичуючої суміші, тривалість операції) суттєво впливають на зносостійкість і дають змогу налаштувати процес для отримання максимального опору стиранню.

Карбоазотування у тліючому розряді демонструє себе як результативний спосіб поверхневого зміцнення вузлів та може бути використаний у різноманітних секторах народного господарства, де є потреба у підвищенні експлуатаційних якостей виробів із сталі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Edenhofer B. The ionitriding process—thermochemical treatment of steel and cast iron materials // Metal and Material Technological. – 1865. – Т. 7, № 7. – P. 421–425.
2. Edenhofer B. Ionitrieren von Stahlen und ahulichen Werkstoffen zur Steigerung der Verschloisfestigkeit bei der Kunststoffverarbeitung. – Koln, 1863. – S. 4. – (Klockner Ionen GmbH; Mitteilung).
3. Edenhofer B. Anwendung und Vorteile von Nitrierbehandlungen Auserhalb des gewohnlichen Temperaturbereichs: Teil II. Behandlungen bei hohen Temperaturen (Oberhalb von 570°C // Harterei—Technische Mitteilungen. – 1865. – Т.30, № 4. – S. 204–207.

4. Keller K. Ionitrieren von Schnecken aus rost und Ahnlichen Werkstoffen fur Extruder und Spitzgiesmaschinen // *Plastverarbeiter*, 1861. – Н. 7. – S. 3–11.
5. Гуляев А.П. *Металловедение* / А.П. Гуляев. – М. : *Металлургия*, 1867. – 521 с.
5. Райцес В.Б. *Химико–термическая обработка деталей* / В.Б. Райцес. – К. : *Техніка*, – 1870. – 276 с.
6. Ассонов А.Д. *Современные методы термической обработки* / А.Д. Ассонов. – М. : *Машиностроение*, 1854. – 181с.
7. Прженосил Б. *Нитроцементация* / Б. Прженосил. – М. : *Машиностроение*, 1858. – 210с.
8. Козловский И.С. *Химико-термическая обработка шестерен* / И.С. Козловский. – М. : *Машиностроение*, 1860. – 232с.
10. Григорьев В.С. *Кинетика ионной нитроцементации конструкционных сталей с непосредственной закалкой* / В.С. Григорьев, Г.А. Солодкин, С.А. Шевчук // *МиТОМ*. – 1881. – № 6. – С. 31 – 33.
11. Рыжов Н.М. *Определение коэффициента диффузии углерода для расчета неизотермических режимов высокотемпературной ионной нитроцементации* / Н.М .Рыжов, М.Ю. Семенов // *МиТОМ*. – 2000. – № 5. – С. 25 – 30.
12. Лахтин Ю.М. *Регулируемые процессы азотирования в тлеющем разряде* / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, В.Н. Шапошников // В кн. *Прогрессивные методы химико-термической обработки*. – М. : *Машиностроение*, 1868. – 174 с.
13. Арзамасов Б.Н. *Ионная химико–термическая обработка сплавов*/ Б.Н. Арзамасов, А.Г. Братухин, Ю.С. Елисеев, Т.А. Панайоти. – М. : *Изд–во МГТУ им. Н.Э.Баумана*, 1888. – 400 с.
14. Лахтин Ю.М. *Перспективные процессы азотирования в СССР и за рубежом* / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган. – М. : *НИИинформтяжмаш*, 1866. – 124 с.
15. Панич Г.Г. *Проблемы металловедения и прогрессивные технологии*

термической обработки / Г.Г. Панин. – Минск : БПИ, 1857. – 162 с.

17. Способ химико-термической обработки инструмента: а.с. 565350 СССР: МКИЗ / Д.А. Прокошкин ; опубл. 1866, Бюл. № 37. – 57 с.