

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

КОСТИК КАТЕРИНА ОЛЕКСАНДРІВНА



УДК 621.785.527/.532/.533/.539/.545

НАУКОВІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЙ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОРОШКОВИМИ СУМІШАМИ
КЕРОВАНОГО СКЛАДУ

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі ливарного виробництва Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор **Акімов Олег Вікторович**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри ливарного виробництва.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Тарельник В'ячеслав Борисович**, Сумський національний аграрний університет, завідувач кафедри технічного сервісу;

доктор технічних наук, доцент **Роп'як Любомир Ярославович**, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, професор кафедри комп'ютеризованого машинобудування;

доктор технічних наук, доцент **Лебідь Володимир Тимофійович**, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів.

Захист відбудеться «09» квітня 2020 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «05» березня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Н.В. Зубкова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема підвищення надійності машин набуває все більшого значення у зв'язку з ускладненням експлуатації виробів, що працюють в умовах тертя, великих теплових та механічних навантажень, в агресивному середовищі. Для підвищення надійності та довговічності штампового і різального інструменту, збільшення границі витривалості виробів з легованих конструкційних сталей, підвищення зносостійкості деталей машин, забезпечення високої твердості та корозійної стійкості поверхневих шарів виробів в промисловості широко використовують поверхневе зміцнення.

Необхідність у поверхневому зміцненні мають такі деталі, як втулки, труби, шайби, гвинти, прокладки, осі, вали, вал-шестірні, плунжери, штоки, колінчасті та кулачкові вали, кільця, шпинделі, шнеки, оправки, рейки, зубчасті вінці, півосі, зубчасті колеса, гідроциліндри, деталі верстатів та турбін, а також інструменти (свердла, мітчики, накатники, фрези, протяжки), штамповий інструмент, пуансони, прес-форми лиття під тиском тощо.

На теперішній час існує велика кількість методів поверхневого зміцнення, заснованих на нанесенні покриттів або зміні стану поверхні. Серед них широке використання знаходить хіміко-термічна обробка (ХТО), що застосовується для сплавів як чорних, так і кольорових металів. Поверхневі дифузійні шари, отримані внаслідок такої обробки, мають низку переваг перед покриттями, нанесеними різними методами (наплавленням, газотермічним напиленням тощо). Міцність їх зчеплення з основним металом значно більша, ніж у покриттів, а поступова зміна хімічного складу за глибиною дифузійного шару створює плавний перехід властивостей від поверхні до серцевини деталі. Також, інтерес до поверхневого зміцнення деталей машин технологіями з застосуванням процесів дифузійного насичення залишається значним, оскільки це методи впливу на поверхню виробів, які дозволяють отримувати унікальне поєднання механічних та спеціальних експлуатаційних властивостей поверхневого шару.

Існуючі способи поверхневого зміцнення деталей машин методами ХТО, як правило, забезпечують працездатність деталей в умовах тертя і зношування, але вони є досить тривалими і потребують спеціального складного та дорогого обладнання. Тому актуальним є вдосконалення технологічних процесів виготовлення деталей машин за рахунок розробки нових методів поверхневого зміцнення, які значно підвищують довговічність робочого шару і поверхні деталей при значному прискоренні та спрощенні технологій поверхневого зміцнення.

Дисертаційну роботу спрямовано на вирішення актуальної науково-технічної проблеми в області технології машинобудування: розробка інноваційних та короткотривалих технологій поверхневого зміцнення деталей машин порошковими сумішами керованого складу для забезпечення експлуатаційних властивостей виробів на високому рівні при значному зниженні затрат на їх виготовлення. Вирішення цієї проблеми дозволить забезпечити підвищення надійності машин за рахунок збільшення терміну служби деталей машин та інструменту, при зниженні енерговитрат, що дуже важливо для сучасної України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі ливарного виробництва згідно з пріоритетним напрямом розвитку науки і техніки України «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості і сільському господарстві», за тематичними напрямками НТУ «ХП» згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 7 вересня 2011 р. № 942: «Цільові дослідження щодо отримання нових матеріалів, їх з'єднання і оброблення», «Створення та застосування технологій отримання, зварювання, з'єднання та оброблення конструкційних, функціональних і композиційних матеріалів» та «Створення та застосування нанотехнологій і технологій наноматеріалів» відповідно до тематики кафедри. Дослідження виконувалися відповідно до завдань держбюджетних НДР МОН України: «Розробка інноваційних технологій функціональних наноматеріалів для підвищення ресурсу, корозійного і механічного опору та відновлення металевих виробів» (ДР № 0115U000532), в якій здобувач була виконавцем окремих етапів, та «Розробка наукових та технологічних засад щодо створення литих конструкцій з залізвуглецевих і кольорових сплавів, оптимальних процесів їх одержання і автоматизованих методів проектування» (ДР № 0115U000693), в якій здобувач була співвиконавцем. Господоговірних робіт: № 19480 з ТОВ «Вентиляторний завод Укрвентсистеми» (м. Харків): «Розробка методології та прикладного математичного апарату для обробки експериментальних даних по визначенню вихідних характеристик при випробуванні систем вентиляції для промислових об'єктів з метою оптимізації конструктивно-технологічних рішень при їх проектуванні»; № 19522 з ВАТ «Харківський тракторний завод ім. С. Орджонікідзе» (м. Харків): «Інженерне моделювання литих корпусних деталей безступінчастої гідрооб'ємно-механічної коробки передач трактора в діапазоні потужності двигуна 240-300 к.с.»; № 19606 «Підвищення якості складних корпусних виливків в умовах НВЦ «Європейські технології машинобудування»» (м. Харків), в яких здобувач була виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення наукових основ інноваційних та короткотривалих технологій поверхневого зміцнення деталей порошковими сумішами керованого складу за рахунок інтенсифікації процесів насичення поверхневих шарів сплавів азотом, вуглецем та бором задля підвищення терміну служби деталей машин та інструменту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- створити математичні моделі та номограми існуючих технологічних процесів дифузійного поверхневого зміцнення деталей машин, які дозволять визначити конкретні умови проведення обробок для вирішення технологічних проблем у виробництві;

- дослідити процеси насичення поверхневих шарів деталей машинобудування зі сталей азотом, вуглецем та бором при використанні нано- та макродисперсних насичувальних сумішей та розробити технології комплексної обробки для створення композиційної структури дифузійного шару та

встановити закономірності розподілу температури під час поверхневого зміцнення;

- розробити наукові основи технології борування титанових сплавів та запропонувати математичну модель для знаходження розподілу концентрації бору по товщині зміцненого шару виробів машинобудування;

- створити технології інтенсифікації процесів ХТО деталей машин за рахунок використання струмів високої частоти та лазерної обробки та;

- провести експериментальні та промислові випробовування деталей машинобудування, зміцнених за розробленими технологіями поверхневого зміцнення, та впровадити результати досліджень у виробництво і в навчальний процес.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси виготовлення деталей із зміцненням робочих поверхонь порошковими сумішами керованого складу.

Предмет дослідження – закономірності утворення дифузійних шарів, впливу технологічних параметрів комплексних зміцнюючих обробок на підвищення властивостей виробів машинобудування.

Методи дослідження. Вирішення поставленої проблеми забезпечується використанням системного підходу та раціонального поєднання теоретичних і експериментальних досліджень, узагальнення та аналізу відомих наукових результатів. В роботі використано оптичну та електронну мікроскопію для вивчення структури зразків; рентгеноструктурний аналіз для визначення фазового складу зміцнених шарів; вимірювання мікротвердості від зміцненої поверхні зразка до його серцевини; вимірювання зносостійкості зміцнених зразків за різними технологіями у порівнянні зі зразками сталі без поверхневого зміцнення, визначення мікрокрихкості борованих шарів. Результати експериментів оброблено статистичними методами. При створенні математичної моделі використано методи апроксимації статистичних даних і теорії помилок, повний центральний ортогональний композиційний план другого порядку, отримано номограми, використано математичний апарат розв'язання крайових задач дифузії методом граничних елементів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробці наукових основ інноваційних та короткотривалих технологій поверхневого зміцнення деталей машин порошковими сумішами керованого складу, що дозволило вирішити актуальну науково-практичну проблему підвищення терміну служби виробів машинобудування:

- *вперше* розраховано локальні максимуми поверхневої твердості та глибини дифузійних шарів сплавів і встановлено теоретичні оптимальні умови процесів дифузійного зміцнення, що дозволяє отримати конкретні технологічні параметри проведення ХТО та забезпечити оптимальні характеристики дифузійних шарів поверхні виробів машинобудування;

- *вперше* створено математичні моделі та номограми існуючих технологій поверхневого зміцнення сталей, що дозволило визначити конкретні умови ХТО (температуру і тривалість), виходячи із заданої глибини дифузійного шару або

поверхневої твердості сталей, що суттєво впливає на ефективність реалізації процесів зміцнення поверхні виробів машинобудування;

– *вперше* на основі використання інноваційних технологій і системного аналізу при мінімальних витратах, розроблено загальний методологічний підхід керування технологічними процесами поверхневого зміцнення деталей машин порошковими сумішами керованого складу при насиченні поверхневих шарів азотом, вуглецем і бором, це дозволило підвищити експлуатаційні властивості виробів машинобудування при значному скороченні тривалості ХТО;

– *набули подальшого розвитку* розроблені комплексні ХТО, які значно знижують крихкість борованих шарів за рахунок більш плавного зниження твердості від поверхні до серцевини виробів зі сталей, що дозволило підвищити експлуатаційні властивості виробів та термін служби деталей машин та інструменту на відміну від відомих методів ХТО, які підвищують лише поверхневу твердість;

– *вперше* розроблено математичну модель розподілу температури за глибиною дифузійного шару, що дозволило визначити характер залежностей та отримати дані про розподіл температури за глибиною виробу при різних технологічних режимах обробки поверхні деталей;

– *удосконалено* технологію борування виробів машинобудування з паст титанових сплавів за рахунок використання нанодисперсного насичувального середовища, що дозволило скоротити процес борування у 2-3 рази та скоротити технологічний процес виготовлення деталей за рахунок поєднання двох операцій: борування і гартування титанового сплаву;

– запропоновано розв'язання крайових задач дифузії методом граничних елементів, що дозволило *вперше* створити математичну модель розподілу концентрації бору за товщиною зміцненого шару титанового сплаву;

– *удосконалено* технологію інтенсифікації процесів ХТО методами нагрівання струмами високої частоти та за рахунок попередньої лазерної обробки деталей, що дозволило отримати високі експлуатаційні властивості поверхневих шарів виробів машинобудування при значному скороченні тривалості обробок.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці технологій комбінованого зміцнення поверхневих шарів деталей машин та інструменту.

На основі комплексу проведених теоретичних та експериментальних досліджень, сформульованих принципів, закономірностей і положень отримано наступні практичні результати:

1. Спосіб комбінованої обробки сталевих виробів (патент України №111066); спосіб дифузійного борування сталевих виробів (патент України №116177); спосіб поверхневого зміцнення сталевих виробів (патент України №116178); спосіб отримання твердого покриття на поверхні сталевих виробів (патент України №116116); сплав на основі заліза з ефектом пам'яті форми (патент України №116117); склад для борування сталевих виробів (патент України №117775); спосіб поверхневого зміцнення титанових сплавів (патент

України №117770); дисперсійно-твердіючий сплав на основі заліза з ефектом пам'яті форми (патент України №117757).

2. Розроблені технологічні процеси ХТО впроваджено для підвищення поверхневої твердості сталевих виробів на ТОВ «АСТИЛ М» (м. Харків), що дозволило підвищити зносостійкість втулки у 1,5 рази після нітроцементації, у 4,3 рази після послідовної нітроцементації та борування, у 5 разів після цементації, нітроцементації та борування та у 2 рази після борування з нагріванням СВЧ у порівнянні зі втулкою без поверхневого зміцнення (Акт впровадження від 05.10.2017 р.).

3. Розроблені технологічні процеси комбінованого зміцнення впроваджено для підвищення поверхневої твердості сталевих виробів на ПАТ «Харківський машинобудівний завод «Світло шахтаря» (м. Харків). Виробничими випробуваннями встановлено, що запропоновані ефективні технологічні процеси комбінованого зміцнення поверхневого шару сталевих виробів дозволили значно прискорити технологічні процеси хіміко-термічної обробки у 2–10 разів, що привело до зменшення витрат на їх проведення за рахунок економії електричної енергії (Акт впровадження від 17.10.2017 р.).

4. Розроблені технологічні процеси впроваджено на ТОВ «НВЦ ЄТМ» (м. Харків), що дозволило підвищити зносостійкість втулки у 1,5 рази після нітроцементації, у 4,3 рази після послідовної нітроцементації та борування (Акт впровадження від 31.10.2017 р.).

5. Прийнято для впровадження в виробництві розроблені номограми, які дозволяють визначити конкретні умови газового азотування (температуру і тривалість) виходячи із заданої глибини азотованого шару або поверхневої твердості виробів зі сталі 38Х2МЮА на ПАТ «Харківський машинобудівний завод «Світло шахтаря» (м. Харків). Встановлено, що запропоновані номограми дозволили значно спростити роботу інженера-технолога, а також вирішити зворотну задачу, а саме, оцінити можливу товщину зміцненого шару і поверхневу твердість при одночасному впливі температури і тривалості газового азотування (Акт впровадження від 15.11.2017 р.).

6. Розроблено ефективний технологічний процес нітроцементації у порошковій макродисперсній суміші для підвищення експлуатаційної стійкості зубчастого колеса зі сталі 38Х2МЮА на АТ «Харківський тракторний завод» (м. Харків). Встановлено, що використання макродисперсної суміші прискорило процес хіміко-термічної обробки у 1,5-2 рази при отриманні властивостей поверхневого шару виробу таких, як і після традиційного процесу нітроцементації, що дозволило зменшити витрати на проведення хіміко-термічної обробки у 2 рази (Акт впровадження від 24.01.2018 р.).

7. Розробки, які виконані в дисертації, впроваджено у навчальний процес для студентів механіко-технологічного факультету НТУ «ХПІ» спеціальностей 131 «Прикладна механіка» спеціалізації 131-09 «Обладнання та технології ливарного виробництва» та 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані

технології» спеціалізації 151-07 «Комп'ютеризовані системи управління технологічними процесами» (Акт впровадження від 20.12.2017 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення і результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримано особисто здобувачем. Роботи [1–3, 5, 11–13, 15, 19, 26, 42] виконано без співавторів. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: нова технологія низькотемпературної нітроцементації сталей; обґрунтування вибору оптимальних технологічних параметрів розробленого процесу; розрахунки коефіцієнтів дифузії азоту, вуглецю та бору для сталі та титанового сплаву; математичні моделі товщини дифузійного шару для різних режимів зміцнення; вивчення структури і властивостей плунжерів з легованої сталі 30X3BA після газового та іонно-плазмового азотування, порівняльний аналіз двох видів азотування; запропоновано та досліджено процеси впливу режимів борування на структуру і властивості титанового сплаву BT3-1; досліджено процес впливу різних видів попередньої термічної обробки на структуроутворення зміцненої зони сталі після лазерного гартування; вивчено процеси отримання нових сплавів на основі заліза; запропоновано та досліджено процеси комбінованого зміцнення сталевих виробів; розроблено процес азотування у нанодисперсному середовищі.

Апробація результатів дисертації. Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи оприлюднено та позитивно оцінено на Міжнародних науково-технічних конференціях: «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2010–2017); «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве» (Краматорськ, 2011); «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах» (Запоріжжя, 2015); «Литво» (Запоріжжя, 2015–2017); «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (Київ, 2016, 2017); «Синергетика, мехатроніка, телематика дорожніх машин і систем у навчальному процесі та науці» (Харків, 2017).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано у 50 наукових роботах, зокрема 25 статей у наукових фахових виданнях України (з яких 19 статей у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз даних, 5 з яких SCOPUS); одна – у закордонному виданні; отримано 8 патентів України на корисну модель; 16 тез у збірниках доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 403 сторінки, з яких анотація на 24 сторінках, зміст на 5 сторінках, основний текст на 296 сторінках, список використаних джерел із 263 найменувань на 30 сторінках, додатки на 14 сторінках. Робота містить 147 рисунків, з яких 66 на 56 окремих сторінках, та 25 таблиць, з яких 1 таблиця на 1 окремій сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дано загальну характеристику роботи; обґрунтовано актуальність теми; сформульовано мету, завдання, об'єкт та предмет дослідження; описано застосовані методи дослідження та зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів; надано інформацію про апробацію та публікацію результатів дисертаційних досліджень.

У першому розділі проведено аналіз літературних джерел, що стосуються досліджуваної в дисертаційній роботі проблеми. Розглянуто методи підвищення експлуатаційних властивостей сплавів фізико-технічною обробкою. Виконано огляд існуючих досліджень загальних закономірностей хіміко-термічної обробки, процесів насичення поверхневих шарів виробів машинобудування атомарним азотом, бором, вуглецем та методи комбінованої обробки.

Відмічено, що існуючі методи підвищення експлуатаційних властивостей сталей та титанових сплавів, як правило, забезпечують працездатність деталей машин в умовах тертя і зношування, але вони є тривалими. Тому актуальним є пошук таких методів, які значно підвищують довговічність виробів машинобудування методами ХТО у порошкових сумішах з керованим складом і з застосуванням фізико-технічної обробки для інтенсифікації процесів зміцнення поверхневих шарів. За результатами першого розділу сформульовано завдання дослідження.

У другому розділі представлено математичне моделювання існуючих процесів хіміко-термічної обробки сталевих деталей.

Математичне моделювання розглянуто на прикладі сталі 30ХГСА після борування в обмазках та сталі 38Х2МЮА після газового та іонно-плазмового азотування. Незважаючи на значний розвиток у галузі машинобудування інноваційних технологій хіміко-термічних обробок, найбільш поширеним методом зміцнення поверхонь виробів на підприємствах залишається азотування, а саме газове та іонно-плазмове. Тому актуальним є отримання номограм та математичних моделей для найбільш поширених технологій ХТО.

Технологічний режим борування сталі 30ХГСА здійснювали у пасті. На підготовлені зразки наносили шар пасту з суміші, яка містить 80–86 % нанодисперсного полібориду магнію, 7–10 % фтористого літію і 7–10 % фтористого натрію, товщиною до 3 мм. Для побудови рівняння регресії було реалізовано повний центральний ортогональний композиційний план другого порядку.

Процес борування проводили за наступною технологічною схемою, яка полягала у декількох етапів:

1. Перед боруванням поверхню зразків очищали від слідів окалини, іржі, змащення та інших забруднень для усунення небажаного впливу інших домішок на процес дифузійного насичення. Незначні забруднення видаляли 96 %-им спиртом.

2. Приготування порошкоподібної суміші для борування сплавів проводили в наступній пропорції: 80–86 % боровмісткої речовини на основі полібориду магнію (Mg_2B , Mg , Mg_3B_4 , Mg_3B_2), або аморфного бору, з додаванням активаторів хімічних реакцій у кількості 7–10 % LiF та 7–10 % NaF . Ці речовини перемішували в сухому стані, потім додавали сполучні (96 %-ий спирт і клей БФ-2 в ацетоні). Усе перемішували до одержання однорідної маси цієї пасти з необхідною густиною для наступного її нанесення на поверхню зразків.

3. Нанесення шару пасти на поверхню виробу проводили товщиною 2–3 мм (два-три рази повторювали дану процедуру для отримання суцільного шару) із просушуванням у шафі за температурою 120–140 °С протягом 30 – 40 хвилин до повного висихання, що приводить до міцного тримання обмазки на поверхні зразків. Потім вироби розташовували в тигель і пересипали порошкоподібною сумішшю таким чином, щоб навколо кожного виробу була боровмісна речовина, а знизу і зверху товщина суміші складала до 3–5 мм, що дозволяє отримати додаткові атоми бору під час проведення зміцнюючої обробки. Тигель ставили в камерну піч.

4. Борування здійснювали за температурою 800–1000 °С тривалістю 15, 30, 45, 60, 90 та 120 хвилин.

5. Після борування зберігалось у деяких ділянках зчеплення між обмазкою та поверхнею зразка, яку необхідно було видалити. Очистка поверхні виробів від залишків пасти після борування проводилась кип'ятінням у воді протягом 30 хвилин.

В якості вхідних змінних вибиралися температура борування (x_1^*), яка змінювалась від 800 °С до 900 °С та тривалість хіміко-термічної обробки (x_2^*) в діапазоні 15–90 хвилин. Тривалість обробки більша за 90 хв призводить до формування більшого шару боридів з високою крихкістю, який швидко сколюється під час роботи виробу, особливо при динамічних навантаженнях. Тому для подальшого математичного моделювання процесу дану тривалість не враховували. При температурі борування 1000 °С за даним технологічним процесом борований шар має яскраво відображену голкоподібну структуру, які є концентраторами напружень та центрами появи тріщини. Саме з цієї причини також немає доцільним враховувати цей режим для подальшого моделювання. В якості вихідних змінних – глибина борованого шару (y). Для побудови математичної моделі, що може мати вигляд рівняння регресії, було проведено 10 паралельних експериментів з достатньою кількістю зразків сталі в точках поза планом, на підставі яких були отримані середні значення y .

Враховуючи, що з даних експериментального матеріалу можна «зняти» з достатнім ступенем точності значення вхідних і вихідних змінних, для побудови рівняння регресії було реалізовано повний центральний ортогональний композиційний план другого порядку. Для подальшої можливості порівняння значень тривалості та температури хіміко-термічної обробки необхідно було здійснити нормування значень вхідних змінних, яке було здійснено за наступними формулами:

$$x_1 = \frac{x_1^* - \bar{x}_1}{J_1}; \quad (1)$$

$$x_2 = \frac{x_2^* - \bar{x}_2}{J_2}, \quad (2)$$

де x_1, x_2 – нормовані значення вхідних змінних; x_1^*, x_2^* – натуральні значення вхідних змінних; \bar{x}_1, \bar{x}_2 – середнє значення вхідних змінних ($\bar{x}_1 = 850, \bar{x}_2 = 52,5$); J_1, J_2 – інтервали варіювання вхідних змінних ($J_1 = 50, J_2 = 37,5$).

Математична модель представлена поліномом наступного виду

$$y_i = b_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 (x_1^2 - \beta) + a_4 (x_2^2 - \beta) + a_5 x_1 x_2, \quad (3)$$

де a_i – оцінювані коефіцієнти; β – параметр, що розраховується залежно від числа точок ядра композиційного плану 2^{n-p} , плеча «зоряних» точок α і числа точок плану за формулою

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^N (x_i^j)^2}{N} = \frac{2^{n-p+\alpha}}{N}. \quad (4)$$

Загальний вигляд вхідних змінних для розрахунку коефіцієнтів a_i моделі (3) наведений в табл. 1.

Коефіцієнти a_i були визначені за формулами:

$$a_i = c_1 \sum_{j=1}^N x^i y^j, i = 1, \dots, n; \quad (5)$$

$$a_i = c_2 \sum_{j=1}^N [(x_{i-1}^j)^2 - \beta] y^j, i = n + 1, \dots, 2n; \quad (6)$$

$$a_i = c_3 \sum_{j=1}^N x_\mu^j x_\lambda^j y^j, \lambda = 1, \dots, n, \mu \neq \lambda, i = 2n + 1, \dots, k; \quad (7)$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y^j - \beta \sum_{i=1}^N a_{n+i}. \quad (8)$$

У формулах (5)–(8) c_1, c_2, c_3 – коефіцієнти для лінійних, квадратичних і парних взаємодій незалежних змінних відповідно, n – число лінійних членів моделі, N – кількість експериментів.

Для полінома другого ступеня виду (3) значення вказаних параметрів наведені в табл. 2.

Для оцінки точності отриманої моделі обчислювалися суми квадратів відхилень експериментальних значень вихідних змінних від розрахункових, які отримані за моделлю (S_R), і оцінки дисперсії (S_R^2):

$$S_R = \left(y_{експ} - y_{розн} \right)^2; \quad (9)$$

$$S^2 = \frac{S_R^2}{\varphi}. \quad (10)$$

де $\varphi = N - (k + 1)$ – число ступенів свободи, N – число експериментів ($N=9$), k – число оцінюваних параметрів ($k=5$).

Для перевірки гіпотези про адекватність використали критерій:

$$F \leq F_{кр}; \quad (11)$$

$$F = \frac{S_R^2/\varphi_1}{S_0^2/\varphi_2}, \quad (12)$$

де $F_{кр}$ – табличне значення критерію Фішера для довірчої ймовірності 95 % і відповідних чисел ступенів свободи $\varphi_1 = 3$ та $\varphi_2 = 9$.

Якщо виконується умова (11), модель вважається адекватною, якщо $F > F_{кр}$, гіпотеза про адекватність моделі відхиляється.

Таблиця 1 – Данні для побудови ортогонального центрального композиційного плану

Номер експеримента	x_1	x_2	$x_1^2 - \beta$	$x_2^2 - \beta$	y_{ij}
1	x_1^{max}	x_2^{max}	$(x_1^{max})^2 - 0,6667$	$(x_2^{max})^2 - 0,6667$	y_{i1}
2	x_1^{min}	x_2^{max}	$(x_1^{max})^2 - 0,6667$	$(x_2^{max})^2 - 0,6667$	y_{i2}
3	x_1^{max}	x_2^{min}	$(x_1^{max})^2 - 0,6667$	$(x_2^{min})^2 - 0,6667$	y_{i3}
4	x_1^{min}	x_2^{min}	$(x_1^{min})^2 - 0,6667$	$(x_2^{min})^2 - 0,6667$	y_{i4}
5	x_1^{max}	$x_2^{середнє}$	$(x_1^{max})^2 - 0,6667$	$(x_2^{середнє})^2 - 0,6667$	y_{i5}
6	x_1^{min}	$x_2^{середнє}$	$(x_1^{min})^2 - 0,6667$	$(x_2^{середнє})^2 - 0,6667$	y_{i6}
7	$x_1^{середнє}$	x_2^{max}	$(x_1^{середнє})^2 - 0,6667$	$(x_2^{середнє})^2 - 0,6667$	y_{i7}
8	$x_1^{середнє}$	x_2^{min}	$(x_1^{середнє})^2 - 0,6667$	$(x_2^{min})^2 - 0,6667$	y_{i8}
9	$x_1^{середнє}$	$x_2^{середнє}$	$(x_1^{середнє})^2 - 0,6667$	$(x_2^{середнє})^2 - 0,6667$	y_{i9}

Таблиця 2 – Значення параметрів ортогональних центральних композиційних планів для розрахунку коефіцієнтів моделі

N	β	c_1	c_2	c_3
9	0,6667	0,1667	0,5	0,25

Оцінка значимості коефіцієнтів моделі проводилася на основі критерія

$$|\hat{a}_i| \geq t_{кр} s_i, \quad (13)$$

де $t_{кр}$ – критичне значення розподілу Стьюдента для довірчої ймовірності 95 % і числа ступенів свободи $\varphi_2 = 9$, s_i – середнє квадратичне відхилення, яке визначається з формули (10).

Отримано модель товщини шару боридів (y) залежно від нормованих значень температури (x_1) та часу зміцнювальної обробки (x_2) має вигляд

$$y = 50,88889 + 9,1685 \cdot x_1 + 23,0046 \cdot x_2 + 3,8257 \cdot x_1^2 - 8,6743 \cdot x_2^2 - 4,5 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (14)$$

Критерій для перевірки гіпотези про адекватність моделі дорівнює 1,96256, що менше табличного значення критерія Фішера для довірчої ймовірності 95 % і відповідних чисел ступенів свободи $\varphi_1 = 3$ та $\varphi_2 = 9$. Таким чином, модель вважаємо адекватною.

Оцінка значимості коефіцієнтів моделі за критерієм Стьюдента показала, що усі коефіцієнти моделі (14) значимі.

Виходячи з порівняння значень коефіцієнтів отриманої моделі (14), зроблений висновок, що саме тривалість борування має найбільший вплив на зростання шару боридів (у 2,5 рази більше ніж температура). Таке відхилення від класичного значного впливу температури, а не часу, пов'язане з чітким обмеженням температурних та часових характеристик розробленого процесу борування. Прискорення борування пов'язано з високим вмістом аморфного бору (~ 85 %) і великою поверхнею нанодисперсних частинок суміші, що інтенсифікує протікання хімічних реакцій та дифузійних процесів.

Математична модель (14) дійсна для борування сталі 30ХГСА за розробленою технологією в діапазоні температур 800–900 °С, тривалістю 15–90 хв. Поверхня відклику у факторному просторі, яка описує значення вихідних змінних при різних значеннях вхідних змінних у заданій області планування наведена на рис. 1. Візуальний аналіз поверхні відклику дозволяє зробити висновок, що зі зростанням температури та тривалості, як ми і очікували, товщина боридів збільшується, причому її максимальне значення досягається при максимальній тривалості та температурі, що і підтверджує металографія. Математичний оптимум знаходиться у діапазоні 70–80 мкм. Графічне зображення залежності товщини боридів одночасно від температури та тривалості обробки показано на рис. 2.

Отримана номограма (рис. 2) дозволяє визначити конкретні умови борування (температуру та тривалість), виходячи з заданої товщини шару боридів. Запропонована математична модель та номограма має велике практичне значення. А саме, виходячи з експлуатаційних потреб, визначається необхідна товщина шару боридів, за допомогою отриманої математичної моделі та номограми можна чітко визначити конкретні температуру та тривалість борування. До того ж це дозволяє варіювати умови обробки залежно від експлуатаційних та технологічних потреб.

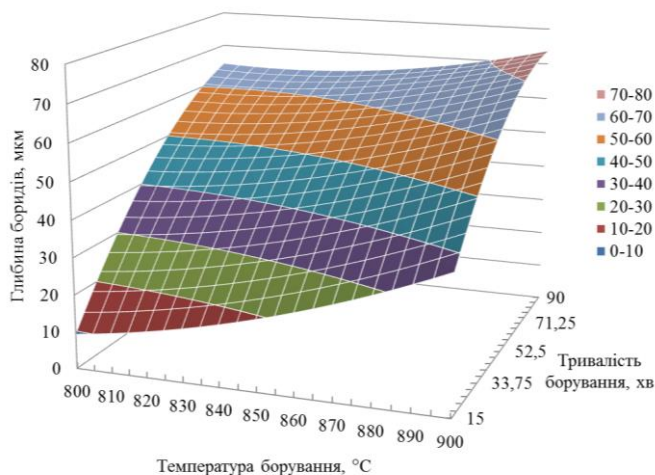


Рисунок 1 – Поверхня відклику у факторному просторі зміни товщини шару боридів залежно від температури та часу зміцнювальної обробки

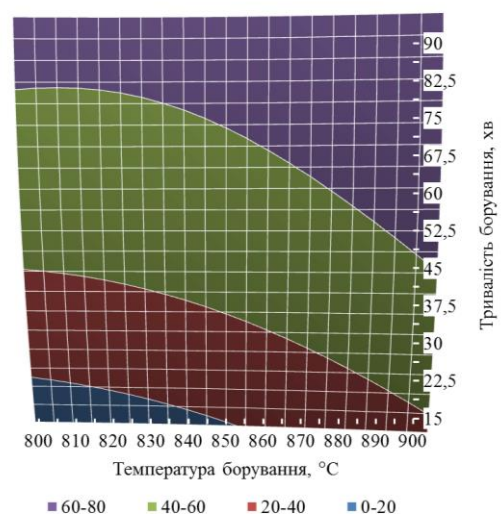


Рисунок 2 – Номограма товщини боридів одночасно від температури та тривалості обробки

Технологія газового азотування зразків-свідків з легованої сталі була здійснена при температурах 500–560 °С тривалістю від 20 до 80 год. Для здійснення процесу газового азотування було використано наступне обладнання: електропіч СШАМ-12.12/7 із щитами керування; стелаж з аміачними балонами; адсорбер (силікагелевий осушувач); дисоціомерт, U-подібні манометри, масляний затвор, крани. Електропіч опору типу СШАМ-12.12/7 призначена для газового азотування. Для азотування застосовували рідкий аміак першого сорту з вологістю до 0,2 %, який знаходився в балонах під тиском до 30 атм. Аміак подавався в піч з балонів, які встановлювали на спеціальному стелажі. Всі балони були з'єднані гнучкими шлангами з устаткуванням. Рідкий аміак із балонів спрямовувався в адсорбер. Контроль тиску аміаку здійснювали манометром, який встановлювався на колекторі. Тиск на I-му ступені редуктора був в межах 2 атм. Газоподібний аміак крізь колектор надходив в аміачний двухступеневий редуктор ДР-ІА, який застосовувався для редуціювання та підтримки тиску у системі трубопроводів.

Адсорбер використовували для осушування аміаку, який надходив у піч. Адсорбер являє собою пустий циліндр, оснащений з двох боків фланцями, які кріпляться до нього за допомогою болтів. Всередину адсорбера поміщували сітчастий кошик із вологовідокремлювачем – силікагелем. Аміак надходив в адсорбер через нижній штуцер, проходив крізь силікагель та осушений крізь нижній штуцер, далі надходив в систему. Дисоціометр був застосований для визначення ступеню дисоціації аміаку і є ємністю, градуйованою на 100 ділень. Принцип дії приладу оснований на властивості аміаку розчинятися у воді. Зверху та знизу ємність закривалася кранами. Одна гілка нижнього двоходового крану з'єднана з лінією викиду рідини в каналізацію, а друга – з лінією викиду газів у повітря (крізь масляний затвор).

Для визначення ступеню дисоціації аміаку відкривали обидва крани таким чином, щоб газ, що відходить з печі, проходили крізь дисоціометр. Через 40–60 с закривали нижній кран, а інший повертали таким чином, щоб дисоціометр наповнювався водою. Аміак розчинявся у воді, а азот та водень не розчинялися. За об'ємом, наповненим газами, визначали ступінь дисоціації аміаку. При газовому азотуванні сталених зразків-свідків при температурах азотування ступінь дисоціації аміаку знаходилася в межах 30–50 %.

Зразки-свідки розміщували в пристрої так, щоб вони не доторкувалися один до одного для запобігання появи ділянок на поверхнях зразків або виробів без дифузійного зміцнення, а також для вільного попадання на поверхню металу, що підлягала азотуванню, продуктів розпаду аміаку, які грають важливу роль у процесах дифузійного насичення. Після цього зразки-свідки з деталями загрузали в піч та герметично зачиняли, продували муфель печі до повного вилучення з нього повітря, що устанавлюється по дисоціометру (повне заповнення дисоціометру водою вказує на відсутність повітря в печі), потім вмикали піч. Термін продувки складав 30–60 хвилин.

Газове азотування проводили за наступною технологічною схемою: попередній відпал, покращення (гартування при 930–950 °С в масло і високий відпуск при 640–680 °С з подальшим охолодженням на спокійному повітрі),

знежирювання, безпосередньо газове азотування протягом 20–80 годин, повільне охолодження виробів разом з піччю до температури 200 °С з наступним охолодженням на спокійному повітрі.

Вибір температури азотування для деталей визначався відповідно до значень глибини та твердості шару. При високій твердості і невеликому шарі застосовували низьку температуру (500 °С), а при великій глибині та меншій твердості пристосовували більш високу температуру (560 °С).

Отримана модель глибини азотованого шару залежно від нормованих значень температури і тривалості хіміко-термічної обробки має вигляд

$$y = 402,2222 + 61,679 \cdot x_1 + 246,716 \cdot x_2 - 11,727 \cdot x_1^2 - 116,727 \cdot x_2^2 - 17,5 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (15)$$

Критерій для перевірки гіпотези про адекватність моделі показав, що модель можна вважати адекватною. Оцінка значимості коефіцієнтів моделі показала, що всі коефіцієнти значимі.

Математична модель, що описує вплив температури і тривалості азотування на значення поверхневої твердості азотованого шару, має вигляд

$$y = 8,41 - 0,75015 \cdot x_1 + 0,5334 \cdot x_2 - 0,98459 \cdot x_1^2 - 1,13459 \cdot x_2^2 - 0,125 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (16)$$

Умова адекватності моделі (16) виконується, перевірка значимості коефіцієнтів показала, що коефіцієнт a_5 не значимий, відповідно модель буде мати вигляд

$$y = 8,41 - 0,75015 \cdot x_1 + 0,5334 \cdot x_2 - 0,98459 \cdot x_1^2 - 1,13459 \cdot x_2^2. \quad (17)$$

Поверхні відгуку у факторному просторі, що описують значення вихідних змінних при різних значеннях вхідних змінних в обраній галузі планування, наведено на рис. 3, 4. Графічне зображення залежності глибини азотованого шару одночасно від двох факторів, від температури і тривалості хіміко-термічної обробки показано рис. 3. Графічне зображення впливу температури і тривалості азотування на зміну значень поверхневої твердості показано рис. 4.

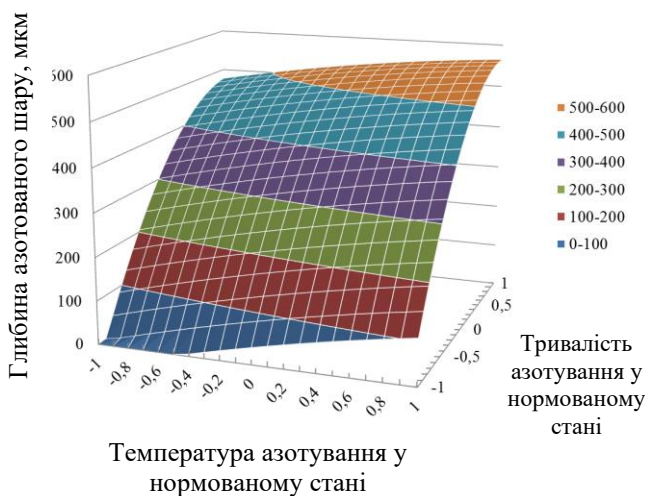


Рисунок 3 – Поверхня відгуку в факторному просторі зміни глибини азотованого шару залежно від температури і тривалості обробки

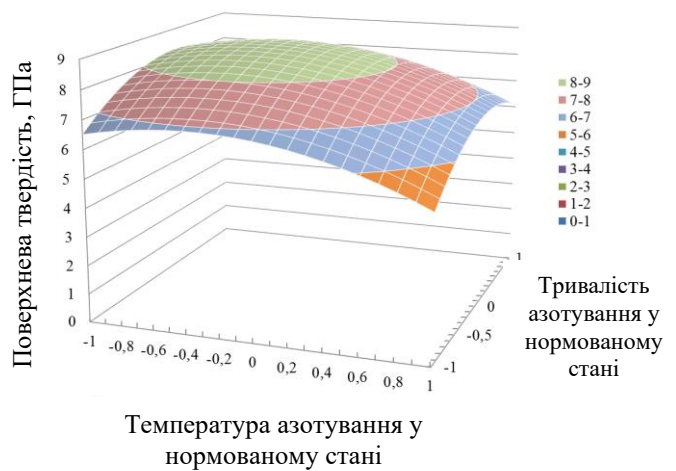


Рисунок 4 – Поверхня відгуку в факторному просторі зміни поверхневої твердості після азотування залежно від температури і тривалості обробки з урахуванням значимості коефіцієнтів

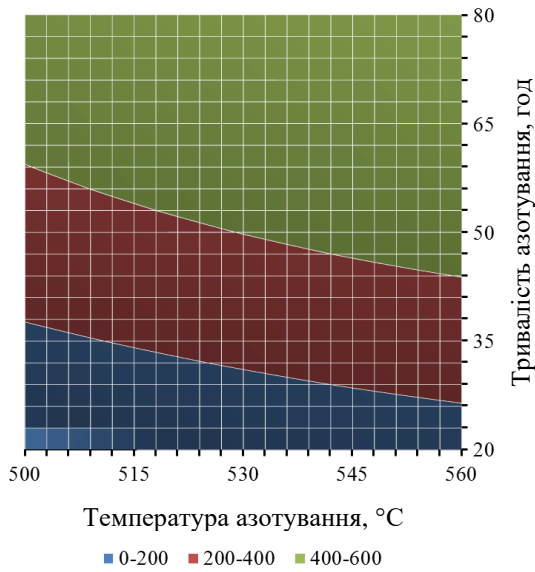


Рисунок 5 – Номограма глибини дифузійного шару одночасно від температури і тривалості азотування

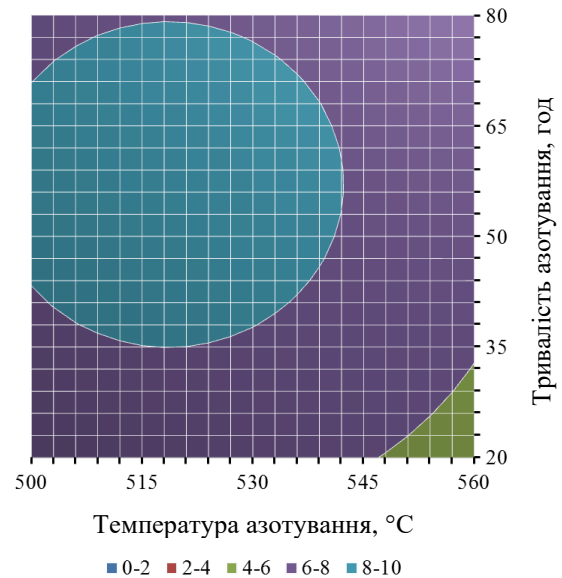


Рисунок 6 – Номограма поверхневої твердості сталі 38Х2МЮА одночасно від температури і тривалості азотування з урахуванням значимості коефіцієнтів

Отримані номограми (рис. 5, 6) дозволяють визначити конкретні умови азотування (температуру і тривалість), виходячи із заданої глибини азотованого шару або поверхневої твердості сталі 38Х2МЮА відповідно, що має велике практичне значення.

Також отримана номограма, яка зв'язує глибину азотованого шару і поверхневу твердість від двох технологічних параметрів (температури і часу).

Розраховано теоретичні оптимальні умови газового азотування: 518,0 °C і 57,7 год для отримання максимальних значень поверхневої твердості і 588,5 °C і 77,3 год – максимальної глибини дифузійного шару. Експериментально доведено, що вихід за межі максимальних значень області планування (температура 560 °C і тривалості обробки 80 год) призводить до формування у дифузійному шарі нітридної сітки по межах зерен, що неприпустимо. Вихід за межі мінімальних значень (температура 500 °C і тривалості обробки 20 год) призводить до формування недостатнього і неоднорідного зміцненого шару, а також до появи ділянок з відсутністю азотованих шарів.

Технологічний процес іонно-плазмового азотування зразків сталі проводили при температурах 500–560 °C тривалістю від 1 до 12 год. Даний діапазон температур був обраний для можливості подальшого порівняння з газовим режимом азотування. Для здійснення процесу іонно-плазмового азотування застосовували піч НПІ 6,6/6. Перед іонно-плазмовим азотуванням з поверхні зразків видаляли забруднення, промивали їх бензином, ацетоном і просушували, потім поміщали в установку. Набирали деталі на пристрій і закривали установку. Потім в камері печі створювався вакуум з тиском не менше 5 Па. Продували 2–3 рази камеру дисоційованим аміаком протягом 5–6 хв до тиску 200–600 Па, наступним етапом відкачували з камери газ до тиску 5 Па. Деталі очищали мікродугами, заповнювали камеру аміаком до тиску 50 Па і включали нагрівання

до температури 390 ± 10 °С. Потім підвищували тиск газу до 1000 Па і проводили азотування при температурах 530 ± 30 °С протягом 1–12 годин. Зразки сталі охолоджували в дві стадії: 1) охолодження до температури 300–250 °С в тліючому розряді (тиск до 0,5–1,0 мм. рт.ст); 2) охолодження до температури 150–100 °С при відключенні тліючого розряду.

Деталі охолоджували на спокійному повітрі.

Отримана модель глибини зміцненого шару залежно від нормованих значень температури і тривалості хіміко-термічної обробки має вигляд

$$y = 295,55556 + 42,5085 \cdot x_1 + 280,056 \cdot x_2 - 9,211 \cdot x_1^2 + 33,289 \cdot x_2^2 + 13,75 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (18)$$

З урахуванням значимості коефіцієнтів, модель глибини насиченого шару залежно від нормованих значень температури і тривалості хіміко-термічної обробки буде мати наступний вигляд

$$y = 295,55556 + 42,5085 \cdot x_1 + 280,056 \cdot x_2. \quad (19)$$

Математична модель, що описує вплив температури і тривалості азотування на значення поверхневої твердості азотованого шару, має вигляд

$$y = 9,8 - 0,8335 \cdot x_1 + 1,30026 \cdot x_2 + 0,09853 \cdot x_1^2 - 0,80147 \cdot x_2^2 - 0,75 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (20)$$

Умова адекватності моделі виконується, перевірка значимості коефіцієнтів показала, що коефіцієнт a_3 не значимий, відповідно модель буде мати вигляд

$$y = 9,8 - 0,8335 \cdot x_1 + 1,30026 \cdot x_2 - 0,80147 \cdot x_2^2 - 0,75 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (21)$$

Поверхні відгуку в факторному просторі для опису значень вихідних змінних з урахуванням варіювання значень вхідних змінних у заданій області планування, показано на рис. 7, 8. Найбільші значення глибини азотованого шару відповідають області максимальних температури та тривалості процесу у заданому діапазоні (рис. 7). Для поверхневої твердості спостерігається інша залежність – область максимальних значень відповідає максимальній тривалості при мінімальних значеннях температури обробки в заданому діапазоні значень (рис. 8).

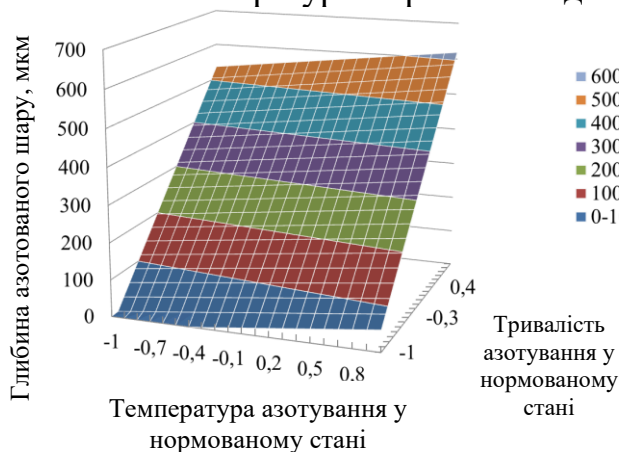


Рисунок 7 – Поверхня відгуку в факторному просторі глибини дифузійного шару при зміні температури і тривалості обробки з урахуванням значимості коефіцієнтів

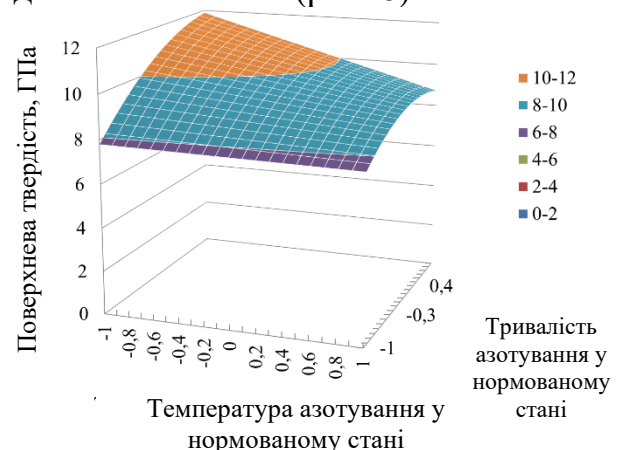


Рисунок 8 – Поверхня відгуку в факторному просторі зміни поверхневої твердості після азотування залежно від температури і тривалості обробки з урахуванням значимості коефіцієнтів

Побудовані номограми – графічні залежності вихідних даних (глибина азотованого шару або поверхнева твердість) від одночасного впливу двох факторів (температура азотування і тривалість обробки). Графічне зображення залежності глибини азотованого шару та поверхневої твердості одночасно від двох факторів показано рис. 7, 8. Номограми представлені на рис. 9, 10.

Розроблений метод отримання математичних моделей та номограм може бути використаний для будь-яких технологій та обладнання ХТО сплавів. Результати досліджень можуть бути використані на виробництві і в науково-дослідних роботах.

При моделюванні дифузійних процесів поверхневого зміцнення деталей у загальному вигляді вирішувалась задача забезпечення деякого заданого розподілу концентрації азоту $C(x, \tau)$ по глибині дифузійного шару x від поверхні виробу.

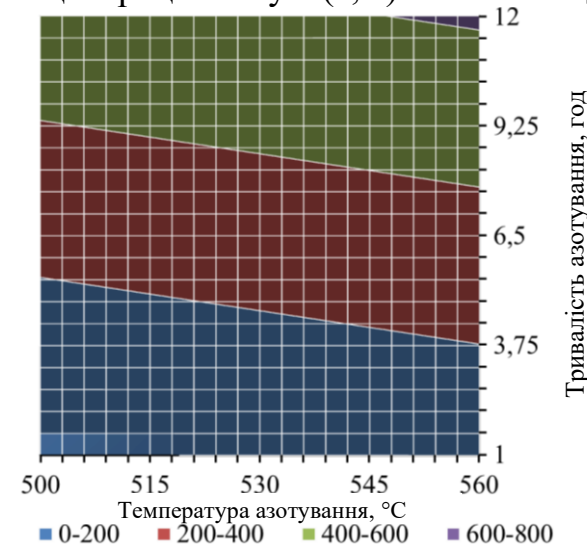


Рисунок 9 – Номограма глибини дифузійного шару одночасно від температури і тривалості азотування з урахуванням значимості коефіцієнтів

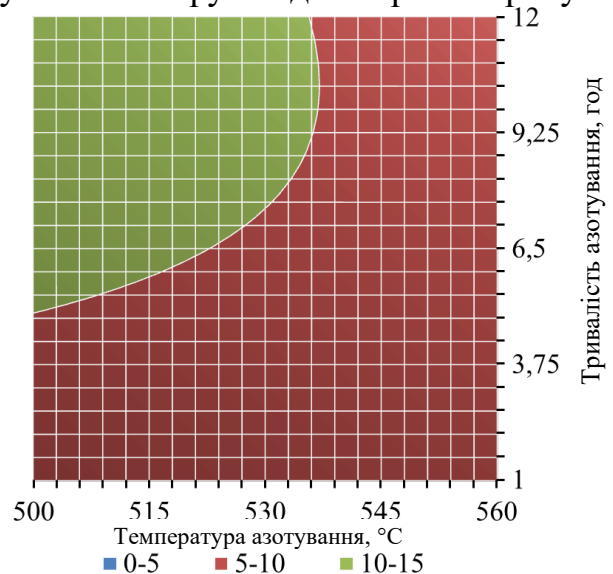


Рисунок 10 – Номограма поверхневої твердості сталі 38Х2МЮА одночасно від температури і тривалості азотування з урахуванням значимості коефіцієнтів

Прийнято наступні припущення:

1. Коефіцієнт дифузії насичувального елемента залежить від зміни температури.
2. Поверхня металу миттєво насичується до концентрацій рівноважних з насичувальною атмосферою.
3. Поверхневий шар і весь виріб нагріваються нерівномірно, тобто температура виробу – є функція часу і координат $t(x, \tau)$.

Математична модель представлена наступними диференціальними рівняннями в частинних похідних:

– рівняння дифузії, що описує процес дифузійного насичення

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D[t(x, \tau)] \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \right\}; \quad (22)$$

– рівняння нестационарної теплопровідності, що описує процес розподілу температури у виробі

$$C_V(x) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x) \frac{\partial t}{\partial x} \right], \quad (23)$$

де $D[t(x, \tau)]$ – коефіцієнт дифузії; $C_V(x)$ – теплоємність одиниці об'єму; $\lambda(x)$ – коефіцієнт теплопровідності, який є фізичним параметром речовини і характеризує здатність матеріалу проводити тепло, а також це коефіцієнт пропорційності в рівнянні закону Фур'є.

При чому, рівняння (22) та (23) використовуються при місцевій або локальній обробці (використання струмів високої частоти або лазерна обробка) і мають місце у початковий момент поверхневого зміцнення при об'ємному нагріванні. При тривалій витримці деталей в печі при температурах обробки нестационарна теплопровідність (23) не враховується, тому що температура деталей, які піддають поверхневому зміцненню, та навколишнього середовища мають однакові значення.

Граничні умови за концентрацією

$$C(0, \tau) = C_0(\tau), \quad \frac{\partial C(L, \tau)}{\partial x} = 0. \quad (24)$$

Початкові умови

$$C(x, 0) = 0. \quad (25)$$

Для вирішення задачі визначали розподіл температури $t(x, \tau)$ по глибині дифузійного шару. Для цього було розглянуто задачу нестационарної теплопровідності в неоднорідному тілі. Для спрощення задачі припускали, що температура є функцією координати x та часу τ

$$t = f(x, \tau) \text{ при } \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} = 0. \quad (26)$$

Температура в тілі змінювалася тільки в напрямку, перпендикулярному до поверхні. При цьому найбільший перепад температури на одиницю довжини відбувався в напрямку нормалі n до поверхні. При цьому температурний градієнт є вектором, спрямованим за нормаллю до поверхні виробу, значення якого має протилежний знак, що вказує на падіння температури і є межею відносини зміни температури Δt до відстані між ізотермами по нормалі Δn .

Приймаємо, що теплофізичні характеристики дифузійного шару – функції координат, а основний матеріал виробу має постійні характеристики. Внутрішні джерела в тілі відсутні ($q_v = 0$).

Тоді дана задача описується рівнянням (23) при наступних початкових умовах

$$t(x, 0) = t_0 \quad (27)$$

та змішаних граничних умовах (другого та третього роду):

$$-\lambda(0) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_0; \quad (28)$$

$$-\lambda(L) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha(t|_{x=L} - t_0). \quad (29)$$

Для вирішення задачі (23), (27)–(29) застосуємо диференціально-різницький метод. Введемо рівномірну сітку за змінною τ .

Теплофізичні характеристики неоднорідного тіла (дифузійний шар і основний матеріал) мають вид.

$$P(x) = P_0 + \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N (P(x_n) - P(x_{n-1})) \delta(x - x_n) h_n, \quad (30)$$

де $P(x) = \begin{cases} \lambda(x) \\ C_V(x) \end{cases}$; $P_0 = \min p(x_n)$; h_n – характерний лінійний розмір включення з характеристикою $p(x_n)$, $\delta(x - x_n)$ – функція Дірака, яка дозволяє записати точковий вплив та інтенсивність тепла.

Кількість точок N вибирається залежно від особливостей матеріалу виробу (геометрії неоднорідного шару, включень, кількості точок, в яких відомі величини теплофізичних характеристик).

Задовольнивши крайові умови, отримали рівняння розподілу температури по глибині дифузійного шару

$$t_i = \frac{2q_0}{\lambda_1 \gamma z} (\alpha - \lambda_{DL} \gamma) e^{-\gamma L} \operatorname{ch} \gamma x - \frac{2\alpha T_0}{z} \operatorname{ch} \gamma x + \frac{1}{2\lambda_0 h_\tau} \times \\ \times \sum_{n=1}^N h_n \left\{ (\lambda_n - \lambda_{n-1}) \frac{dt_{in}}{dx} \left[e^{-\gamma(x-x_n)} + \frac{4(\lambda_{DL} - \gamma)}{z} e^{-\gamma L} \operatorname{ch} \gamma x_n \operatorname{ch} \gamma x \right] + \right. \\ \left. + [(C_{Vn} - C_{V(n-1)}) t_{in} - C_{Vn} t_{(i-1)n}] \times \right. \\ \left. \times \left[(1 - \operatorname{sng}(-x_n)) \frac{4(\lambda_{DL} - \gamma)}{z \gamma} e^{-\gamma L} \operatorname{ch} \gamma x_n \operatorname{ch} \gamma x + \frac{\operatorname{sng}(-x_n)}{\gamma} \right] \right\}. \quad (31)$$

Продиференціював рівняння (18) по x і прийнявши $x = x_n$ ($n = 1, 2, \dots, N$) отримаємо спільно з (18) систему алгебраїчних рівнянь для визначення температури t_{in} і $\frac{dt_i}{dx}$, яку вирішуємо ітераційним методом.

У третьому розділі сформульовано теоретичні основи технологічних процесів насичення сталі 38X2МЮА атомарним бором, вуглецем та азотом.

Склад суміші для *технологічного режиму борування* сталі 38X2МЮА включав аморфний бор 65–85 мас. %, тетрафтороборат калію 5–10 мас. %, нітрид бору 5–20 мас. %, доломіт 5–15 мас. %. Нагрівання здійснювали в камерній печі тривалістю від 15 до 120 хв при зміні температури від 800 до 1000 °С. Після борування проводили гартування від температури ХТО з охолодженням у маслі з наступним низьким відпуском (при температурі 200 °С з охолодженням на спокійному повітрі) для часткового зняття внутрішніх напружень.

Технологічний процес борування сталі забезпечує формування двофазного шару, який складається з двох зон: зони бориду і перехідної зони. Мікроскопія борованого шару показана на рис. 11, 12 з яскраво вираженою голчастою структурою у вигляді клинів, спрямованих в сталь. При підвищенні температури ХТО від 800 до 1000 °С в сталі борований шар значно збільшується.

Як і очікували, твердість поверхневого шару не залежить від температури борування та ступеня легування сталі. Мікротвердість підтверджує наявність двох боридів, FeB з твердістю 22 ГПа і Fe₂B – 18 ГПа.

Таким чином, для спрощення технологічного процесу пропонується поєднати борування з гартуванням для сталі 38X2МЮА. Тобто раціональним режимом борування для сталі 38X2МЮА є температура 950 °С та тривалість 120 хв. При такій температурі формується достатній шар боридів (90 мкм) та у перехідній зоні немає окремих боридів по границях зерен, як при температурі

1000 °С, які можуть зіграти негативну роль при експлуатації виробу та призвести до крихкого руйнування по границях зерен.

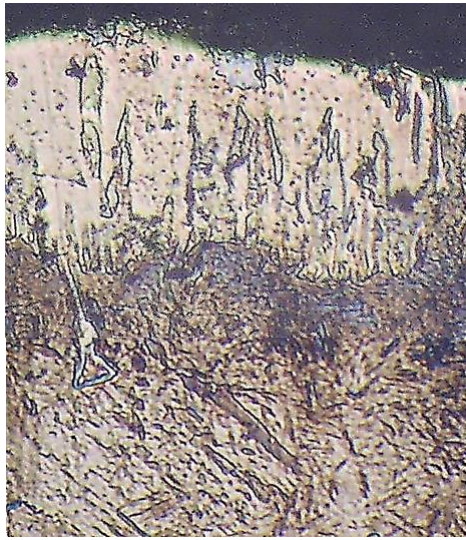


Рисунок 11 – Мікроструктура сталі 38X2МЮА після борування при температурі 950 °С протягом 120 хв; ×200

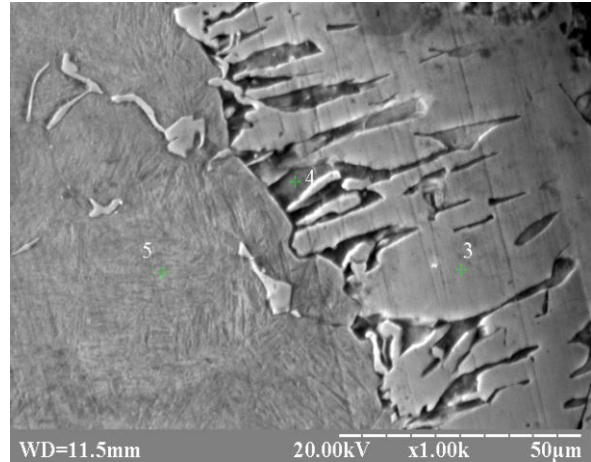


Рисунок 12 – Електронна мікроскопія сталі 38X2МЮА після борування при температурі 950 °С протягом 120 хв

Виникнення фазового перетворення під дією зміни температури і концентрації бору в сталі пояснює голкоподібне зростання боридних дифузійних шарів на поверхні сталі. Формування дифузійного шару можливе і у разі відсутності розчинності в результаті хімічної взаємодії атомів насичувального елемента (В) і основи (Fe). Тут дифузія пов'язана з утворенням нових фаз (хімічних з'єднань), що виникають в результаті реакцій, що відбуваються в твердій фазі. Коефіцієнт дифузії бору в загальному вигляді можна записати

$$D_B = D_o \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (32)$$

де R – газова постійна, Дж/моль·К; D_o – коефіцієнт дифузії при нескінченно великій температурі, см²/с; Q – енергія, яку необхідно затрачувати в процесі дифузії з одного положення рівноваги в кристалічній решітці в інше, кал/г·атом.

Згідно відомих даних температурна залежність коефіцієнта дифузії бору в α - і γ -залізі описується наступними виразами:

$$D_B^\alpha = (7,9 \pm 2,3) \cdot 10^{-5} \exp\left(-\frac{67 \pm 5}{RT}\right), \text{ см}^2/\text{с}; \quad (33)$$

$$D_B^\gamma = (5,7 \pm 1,8) \cdot 10^{-3} \exp\left(-\frac{23 \pm 4}{RT}\right), \text{ см}^2/\text{с}. \quad (34)$$

Товщина борованого шару визначається за формулою

$$h = \sqrt{2 \cdot D_B \cdot \tau}, \text{ мкм}. \quad (35)$$

З формули (35), знаючи експериментальні дані товщини шару і варіюючи час нагріву при пічному нагріванні, можна знайти коефіцієнт дифузії бору для борування сталі 38X2МЮА

$$D_B = \frac{h^2}{2 \cdot \tau} \quad (36)$$

Результати розрахунків зміни коефіцієнта дифузії бору в зміцненому шарі сталі представлено на рис. 13, з якого видно, що зі збільшенням температури борування від 800 до 1000 °С коефіцієнт дифузії бору збільшується, що приводить до більш інтенсивного зростання борованого шару сталі 38Х2МЮА.

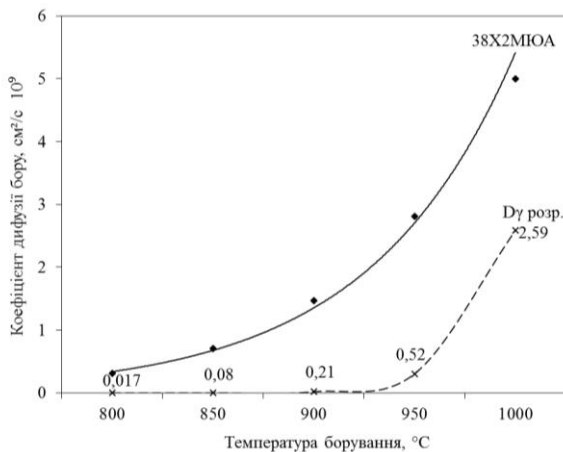


Рисунок 13 – Зміна коефіцієнта дифузії бору

При технології цементації зразки зі сталей поміщали у контейнер, заповнений карбюратором: деревне вугілля (дубове або березове) в зернах поперечником 3,5–10 мм або кам'яно-вугільний напівкокс і торф'яний кокс, з активаторами: вуглекислий барій (BaCO_3) і кальциновану соду (Na_2CO_3) в кількості 10–40 % від маси вугілля. Нагрівання проводили до температур 800–950 °С і витримували протягом 2 год.

На рис. 14 та 15 приведено залежності товщин дифузійних шарів сталей 20 та 20Х від температури цементації протягом 120 хв. З підвищенням температури товщина загального шару та кожної зони збільшується згідно рівнянь, наведених на рис. 14, 15. При температурах до 850 °С дифузійний шар, як і його складові, збільшуються незначно, при подальшому підвищенні температури – темп формування шарів значно прискорюється. Як і очікували, найменша товщина шару відповідає першій зоні – заевтектоїдній, найбільша зона – доевтектоїдній.

Для сталі 20 глибини шарів відповідають більшим значенням, ніж для сталі 20Х. Це пов'язано з наявністю легувального елемента у матриці сплаву – хрому, а як відомо, з підвищенням кількості легувальних елементів, глибина дифузійного шару зменшується. Тому, проведення експериментів відповідає теоретичному обґрунтуванню. Також, було відмічено, що збільшення температури саме від 900 до 950 °С приводить до значного зростання цементованих шарів для обох сталей у 1,6-1,7 разів. Тому, доцільно проводити цементацію при температурі 920-950 °С, що дозволяє отримати максимальні глибини дифузійних шарів.

Виходячи з аналізу даних металографії, загальних глибин дифузійних шарів, отримано залежності коефіцієнтів дифузії вуглецю для сталей 20 та 20Х для процесів атомарного насичення. Підвищення коефіцієнтів дифузії вуглецю для сталі 20 пояснює збільшення цементованих шарів у порівнянні зі сталлю 20Х (рис. 15). Наявність хрому у сталі 20Х уповільнює процеси насичення у 1,2–2 рази залежно від температури цементації. З підвищенням температури коефіцієнти

дифузії вуглецю значно збільшуються для двох сталей і характер кривих однаковий.

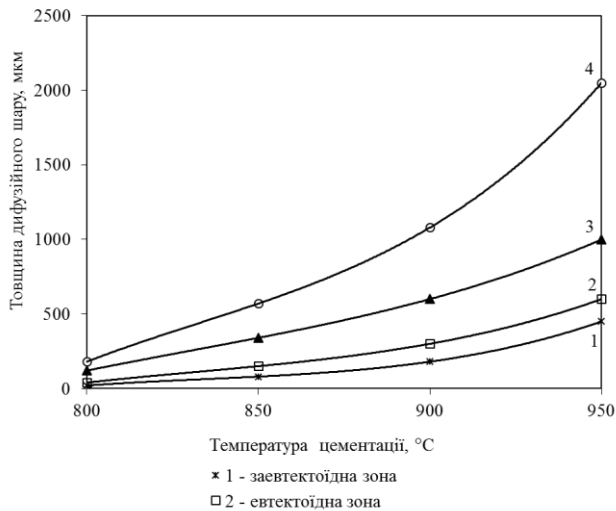


Рисунок 14 – Залежність товщини дифузійного шару сталі 20X від температури цементації з пічним нагріванням протягом 120 хв

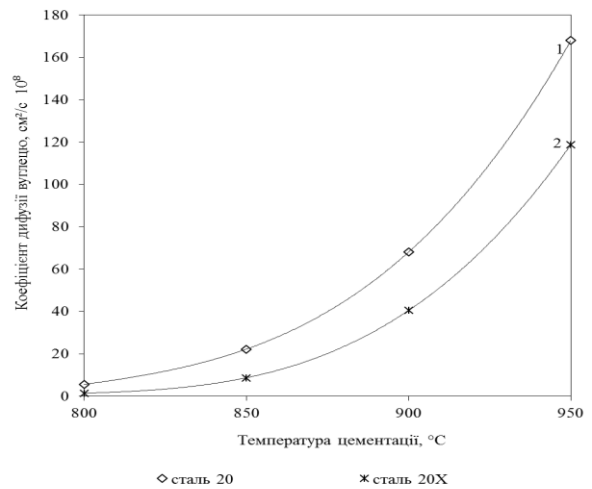


Рисунок 15 – Зміна коефіцієнтів дифузії вуглецю при пічному нагріванні сталей 20 та 20X

Технологія нітроцементації. Склад суміші: карбамід $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (95 %) та активатор NaF (5 %). Нітроцементацію зразків здійснювали в камерній печі при температурах 500–650 °C протягом 5 год.

Для сталі 40X зі збільшенням температури від 500 до 650 °C глибина дифузійного шару збільшується від 92 мкм до 290 мкм, а глибина нітридного шару – від 20 мкм до 65 мкм.

При низькотемпературній нітроцементації зі збільшенням часу від 1 год до 5 год в середовищі з карбамідом глибина дифузійного шару збільшується від 137 мкм до 198 мкм, а глибина нітридного шару – від 12 мкм до 48 мкм, а в середовищі з меламіном глибина дифузійного шару збільшується від 165 мкм до 250 мкм.

В табл. 3 приведено залежність товщини дифузійного та нітридного шарів сталі 40X після низькотемпературної нітроцементації.

Як видно, зі збільшенням часу глибина шару зростає, причому при ХТО у меламіні значення вищі, що пов'язано з більшою кількістю азоту, ніж вуглецю. Так як процес відбувається за низькою температурою (550 °C), азот є більш активним, що і є причиною більшої глибини шару.

Тривалість процесу нітроцементації і, як наслідок, глибина шару істотно впливають на твердість сталі.

При низькотемпературній нітроцементації сталі 40X на реакційній поверхні формується дифузійний шар, що складається з послідовно розташованих нітридокарбідних фаз.

Якісний фазовий рентгеноструктурний аналіз підтвердив наявність в поверхневому шарі карбідів, нітридів, карбонітридів, оксидів, інтерметалідів

легувальних елементів в сталі 40X після нітроцементації в різних азотовмісних середовищах.

Таблиця 3 – Товщини дифузійного та нітридного шарів сталі 40X після низькотемпературної нітроцементації при температурі 550 °С в різних середовищах

Тривалість нітроцементації, год	Насичувальне середовище для нітроцементації		
	Карбамід		Меламін
	Товщина нітридного шару, мкм	Товщина дифузійного шару, мкм	Товщина дифузійного шару, мкм
2	12	137	165
3	20	150	180
4	35	170	220
5	48	198	250

Технологічний процес цементації з подальшою нітроцементацією. Склад середовища для цементації: деревне вугілля з активаторами (вуглекислий барій і кальцинована сода в кількості 10–40 % від маси вугілля). Нагрівання проводили до температур: 800, 850, 900, 950 °С і витримували протягом 2 год.

Склад середовища для нітроцементації: карбамід $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (95 %) та активатор NaF (5 %). Нітроцементацію зразків здійснювали при температурі 550 °С протягом 5 год.

Дифузійний шар має 4 зони: ϵ -зона (нітридний шар); заевтектоїдну, що складається з карбонітридів, перліту і вторинного цементиту, що утворює сітку по зернах; евтектоїдну, що складається з одного пластинчастого перліту; доевтектоїдну – з перліту і фериту.

Встановлено вплив хрому на формування дифузійних шарів, який гальмує зростання шарів, починаючи від нітридної зони та закінчуючи загальним дифузійним шаром. Майже 1 % вмісту хрому зменшує глибину нітриднокарбідного дифузійного шару та його складових в 1,1–1,4 рази, а нітридну зону – 1,4–2,14 рази. Таким чином, порівняння товщин дифузійних шарів сталі 20 та 20X показує, що 1 % вмісту хрому зменшує загальний дифузійний шар на 11,33–15,86 %, а нітридний шар на 30,0–53,33 % залежно від температури попередньої цементації.

Мікротвердість зміцненого шару становить 11 ГПа, що відповідає ϵ -фазі, отриманої на поверхні усіх зразків після нітроцементації.

Результати розрахунків зміни коефіцієнта дифузії азоту для різних зон та загального дифузійного шару представлено на рис. 16, 17. Найменші значення відповідають першій зоні – нітридному шару. Це пов'язано з тим, що ця зона є найбільш насиченою азотом (це підтверджує вимір мікротвердості). Коефіцієнт дифузії заевтектоїдної зони має також низькі значення, але більші ніж у нітридному шарі.

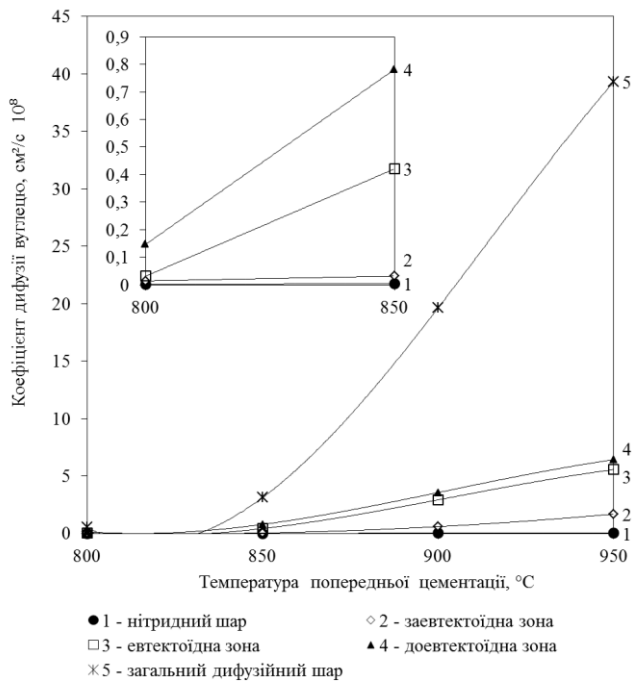


Рисунок 16 – Зміна коефіцієнта дифузії азоту при нітроцементатії сталі 20X з попередньою цементатією

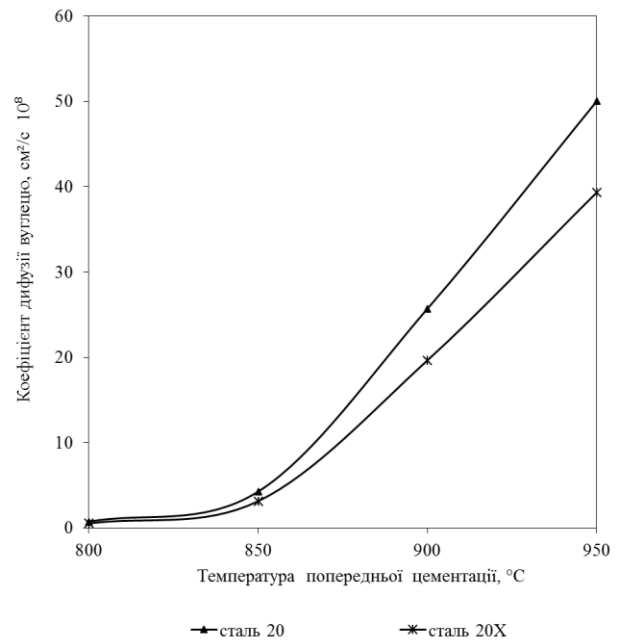


Рисунок 17 – Зміна коефіцієнтів дифузії азоту при нітроцементатії сталей 20 та 20X з попередньою цементатією

Поступово концентрація азоту зменшується від поверхні вглиб зразка, та дифузія прискорюється – доевтектоїдна зона. Значне збільшення коефіцієнтів дифузії відбувається з підвищенням температури попередньої цементатії. Загальний дифузійний шар має найбільше значення при температурі цементатії 950 °C. Зміна коефіцієнта дифузії загального шару відбувається згідно рівнянь, зображених на рис. 18. Аналіз впливу хрому на зміну коефіцієнта дифузії азоту показав, що хром зменшує коефіцієнт дифузії на 21,38–29,21 %.

У четвертому розділі досліджено технологічні процеси комплексного насичення сталі атомарними елементами для створення композиційності структури дифузійного шару як основу зниження крихкості борованого шару.

Технологічний процес послідовної цементатії та борування. Зразки зі сталі 38X2МЮА зміцнювали комплексною хіміко-термічною обробкою за режимами, які представлені в табл. 4. Склад середовища для цементатії: деревне вугілля з активаторами (вуглекислий барій і кальцинована сода в кількості 10–40 % від маси вугілля). Склад суміші для борування: аморфний бор 65–85 мас. %, тетрафтороборат калію 5–10 мас. %, нітрид бору 5–20 мас. %, доломіт 5–15 мас. %. Після борування проводили гартування від температури ХТО з наступним низьким відпуском для часткового зняття внутрішніх напружень.

Електронна мікроскопія сталі 38X2МЮА після комплексної ХТО за режимом 2 показана на рис. 18. За рахунок попередньої цементатії відбувається формування боридних голок з заокругленими краями та подальшим їх подрібненням вглиб дифузійного шару. Енергодисперсійною реєстрацією інтенсивності ліній характеристичного рентгенівського випромінювання зразка,

що виникає в результаті опромінення мікрооб'ємів зразка електронним зондом, встановлено, що шар боридів витісняє вуглець вглиб сталі.

Таблиця 4 – Режими комплексної обробки

№ п/п	Цементация	Борування
1	800 °С, 2 год	800 °С, 2 год
2	850 °С, 2 год	850 °С, 2 год
3	900 °С, 2 год	900 °С, 2 год
4	950 °С, 2 год	950 °С, 2 год

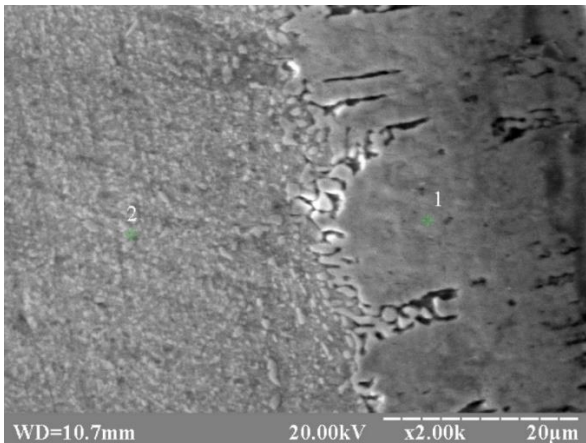


Рисунок 18 – Електронна мікроскопія сталі 38X2МЮА після комплексної ХТО за режимом 2

Залежність товщин дифузійних шарів сталі 38X2МЮА від температури після комплексної ХТО приведена в табл. 5. Характерною властивістю боридних шарів є висока твердість. Борид FeV має мікротвердість 22 ГПа, а борид Fe_2V – 18 ГПа. Збільшення вмісту вуглецю в сталі призводить до зниження твердості борида FeV і практично не впливає на твердість Fe_2V . При підвищенні температури борування сталей твердість FeV дещо знижується, а Fe_2V – незначно збільшується. Тривалість насичення на твердість боридних фаз практично не впливає.

Таблиця 5 – Залежність товщин дифузійних шарів сталі 38X2МЮА після кожної ХТО та загальної від температури

Температура обробки, °С	Товщина боридного шару, мкм	Товщина вуглецевого шару, мкм	Загальна товщина, мкм
800	25–30	40–50	65–70
850	35–40	140	180
900	55	660	715
950	60	1300	1360

При підвищенні температури ХТО характер кривих стає більш пологим в порівнянні з попередніми кривими. Товщина борованого шару досягає 1360 мкм. Раціональним режимом борування являється температура 950 °С при якій забезпечуються висока поверхнева твердість при достатньому зміцненому шарі.

За експериментальними даними отримано залежність товщини боридів від температури борування після нітроцементації для сталі 38X2МЮА (рис. 19). Мікротвердість підтверджує наявність двох боридів, а саме FeV з твердістю 22 ГПа і Fe_2V – 18 ГПа. Характер кривих (рис. 20) при температурах борування 800–900 °С вказує на різке зниження мікротвердості та невелике підвищення

товщини загального дифузійного шару (від 40 до 95 мкм). При підвищенні температури (950 та 1000 °С) боридний шар збільшується до 57 та 80 мкм відповідно. Також, при цьому зростає карбонітридна перехідна зона до 83 та 115 мкм відповідно, що забезпечує плавний перехід від твердого боридного шару (22–20 ГПа) до серцевини з твердістю 5,7–5,8 ГПа.

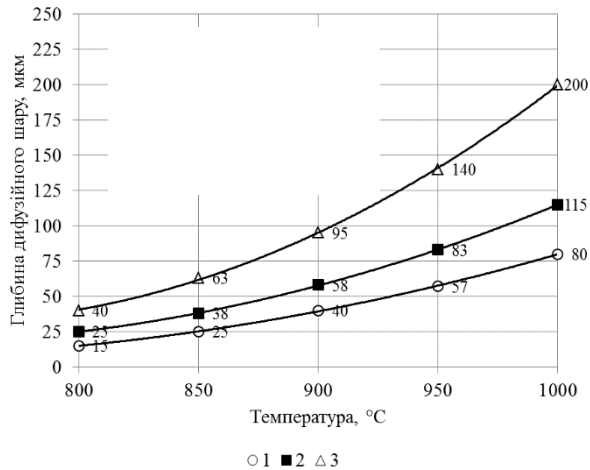


Рисунок 19 – Залежність товщини дифузійного шару від температури:

- 1 – дифузійний шар боридів;
- 2 – дифузійний шар карбонітридів;
- 3 – загальний дифузійний шар

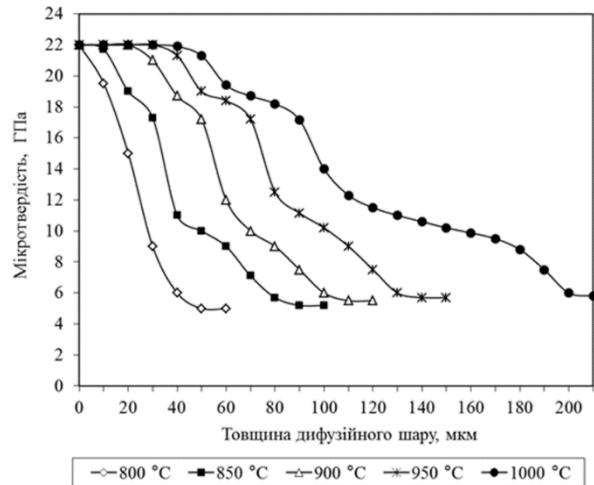


Рисунок 20 – Розподіл мікротвердості в дифузійних шарах сталі 38Х2МЮА після ХТО

Таким чином, раціональним режимом борування для сталі 38Х2МЮА є температура 950 °С та тривалість 2 год. При такій температурі формується достатній шар боридів (до 80 мкм) з загальним дифузійним шаром до 200 мкм. Також для спрощення технологічного процесу пропонується поєднати борування з гартуванням для сталі 38Х2МЮА.

Технологічний процес послідовної цементації, нітроцементації та борування. Зразки зі сталі 38Х2МЮА зміцнювали комплексною хіміко-термічною обробкою за режимами, представленими в табл. 6. Склад середовища для цементації: деревне вугілля з активаторами (вуглекислий барій і кальцинована сода в кількості 10–40 % від маси вугілля). Склад середовища для нітроцементації: карбамід $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (95 %) та активатор NaF (5 %). Склад суміші для борування: аморфний бор 65–85 мас. %, тетрафтороборат калію 5–10 мас. %, нітрид бору 5–20 мас. %, доломіт 5–15 мас. %. Після борування проводили гартування від температури ХТО з наступним низьким відпуском для часткового зняття внутрішніх напружень.

Залежність товщин дифузійних шарів сталі 38Х2МЮА від температури після комплексної ХТО приведена в табл. 7.

Товщина боридного шару зростає з підвищенням температури. Товщина боридного шару за температурою 800 °С складає 7 мкм, за 850 °С – 15 мкм, за 900 та 950 °С складає 55 та 65 мкм відповідно.

Таблиця 6 – Режими комплексної хіміко-термічної обробки

№ п/п	Цементація	Нітроцементація	Борування
1	800 °С, 2 год	550 °С, 5 год	800 °С, 2 год
2	850 °С, 2 год		850 °С, 2 год
3	900 °С, 2 год		900 °С, 2 год
4	950 °С, 2 год		950 °С, 2 год

Таблиця 7 – Залежність товщин дифузійних шарів сталі 38Х2МЮА після кожної ХТО та загальної товщини від температури

Температура обробки, °С	Товщина боридного шару, мкм	Товщина нітридного шару, мкм	Товщина карбідного шару, мкм	Загальна товщина, мкм
800	5–8	80–90	250	350
850	10–15	140–160	350	530
900	55–60	220	1200	1500
950	65	280–300	1700	2100

Аналогічна зміна товщин шарів відбувається з карбонітним та карбідними шарами. При 800 °С глибина карбонітридного шару складає 85 мкм, при 850 °С – 140 мкм, при 900 та 950 °С глибина карбонітридного шару складає 220 та 300 мкм відповідно. Товщина карбідного шару при 800 °С дорівнює 250 мкм, при 850 °С – 350 мкм, при 900 та 950 °С глибина карбідного шару складає 1200 та 1700 мкм.

Мікротвердість на усіх поверхнях однаково висока, проте глибина перехідного шару суттєво відрізняється, що сильно впливає на властивості сталі.

При комплексній ХТО за режимом 1 та за режимом 2 (табл. 6) перехідна зона невелика, що може призвести до сколювання дифузійного шару. При комплексній ХТО за режимом 3 та режимом 4 перехідна зона значно більша, що покращує механічні властивості сталі такі, як міцність, твердість, межа витривалості, межа текучості, ударна в'язкість тощо, підвищує протикорозійну стійкість та задиристійкість.

Для розв'язання задачі розподілу температури в багатошарової зміцненій зоні, яка утворилася на поверхні легованої сталі при комплексній хіміко-термічній обробки, розглянемо одномірне нестационарне температурне поле n -шарової стінки, яка обмінюється теплом з навколишнім середовищем. Між шарами існує ідеальний контакт. Аналітично задача зводиться до рішення диференційного рівняння одномірної теплопровідності

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} = \frac{1}{a_i} \cdot \frac{\partial T_i}{\partial \tau} \text{ при } i=1, 2, \dots, n; \tau > 0; 0 < x < \delta, \quad (37)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності; τ – час.

Для аналітичного рішення рівняння (37) задаємося наступними крайовими умовами: початковий розподіл температури в твердому тілі та дія на поверхню навколишнього середовища. Тоді температура на початку процесу комплексної

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \{ \theta'_1 [(1+k_2)\varphi_2(\mu_n \eta_1) - (1-k_2)\varphi_2(\mu_n \eta_2)] \\
& + \theta'_2 [(1+k_1)\varphi_1(\mu_n \eta_3) - (1-k_1)\varphi_1(\mu_n \eta_4)] \} \exp(-\mu_n^2 \tau) \\
\text{при } 1 \leq \eta \leq \frac{H_2}{\delta_1}; \\
T_3 = T_0 + A_0 & \left\{ k_2 \theta'_1 (1 + \beta_2 \gamma_2 z) + \theta'_2 \left[k_1 - \beta_1 \gamma_1 \sum_{j=1}^4 (-1)^j c_j \zeta_j \right] \right\} - \\
& - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left[k_2 \theta'_1 \varphi_2(\mu_n z) - \theta'_2 \sum_{j=1}^4 (-1)^j c_j \varphi_1(\mu_n \zeta_j) \right] \exp(-\mu_n^2 \tau) \\
\text{при } \frac{H_2}{\delta_1} \leq \eta \leq \frac{H_3}{\delta_1}.
\end{aligned}$$

Таким чином, отримано математичні моделі, які дозволяють отримати чітке уявлення про розподіл температури у зміцнених дифузійних шарах за розробленими комплексними технологіями хіміко-термічних обробок, завдяки яким можливо стало отримати комплексні структури дифузійних шарів.

Розглянуто задачі розподілу тепла в багатошаровому плоскому тілі та циліндричній деталі при комплексній хіміко-термічній обробки за різними режимами зміцнення.

Через громіздкість математичних операцій припускали, що після закінчення деякого часу (теоретично нескінченно великого) температура поверхні тіла вирівнювалась і становилася рівною температурі навколишнього середовища $T_0 = t_{c1}$. Також для спрощення задачі приймали наступні припущення: дифузійні шари уявляли собою послідовно-складові структури; кожен n -шар приймали, як однорідний і ізотропний; припускали, що фізичні параметри постійні для кожного n -шару; деформація розглянутого об'єму, пов'язана зі зміною температури, є дуже малою величиною і в порівнянні з самим об'ємом; внутрішні джерела теплоти в тілі відсутні. Також передбачалося, що між шарами здійснювався ідеальний контакт, тобто температури дотичних шарів однакові.

Для різних дифузійних шарів коефіцієнт теплопровідності різний і для кожного з них залежить від структури, об'ємної ваги, вологості, тиску і температури. Внаслідок залежності від температури коефіцієнт теплопровідності λ є змінною величиною $\lambda = \lambda(t)$ і для отриманих дифузійних шарів приймаємо, як функцію від температури. Після комплексної хіміко-термічної обробки, а саме нітроцементації або цементації з наступним боруванням, на поверхні сталі формується дифузійний шар, який складається з боридного шару з переходом в карбонітридний шар або карбідний шар, тобто складається з трьох шарів. Тому приймали його як багатошарову стінку.

При комплексній хіміко-термічній обробці, а саме цементації, нітроцементації з наступним боруванням мали формування дифузійного шару з боридів, карбонітридів, карбідів і шар сталі (α -Fe), тобто складався з чотирьох шарів. Таким чином, задачу можна було розглядати як розподіл температури в чотирьохшаровій стінці.

Порівняльний аналіз теоретичних та експериментально отриманих даних показав, що похибка не перевищує 5 %. Встановлено закономірність, згідно якої у дифузійних шарах, близьких до поверхні, експериментальні дані мають більші значення, ніж теоретичні, а у шарах, які розташовані глибше – саме теоретичні данні мають більші значення, що пояснюється особливостями будови комплексних шарів, отриманих за різними технологіями поверхневого дифузійного зміцнення сталей.

У п'ятому розділі досліджено технологічний процес борування титанових сплавів.

Рекомендується замінити сталеві деталі, що найчастіше виходять з ладу в результаті втомних руйнувань, на титанові сплави. Наприклад, болт, гайку шатуна зі сталей 45ГА, 50ХФА, поршневий палець зі сталі 12ХНЗА доцільно виготовляти з титанових сплавів ВТЗ-1, ВТ8 для підвищення надійності і довговічності в роботі при високій швидкості; балансири зі сталі 18ХНВА замінюють на титанові сплави з метою підвищення довговічності і зменшення загальної маси машини; деталі в механізмах газорозподілення, клапани, штовхачі, гайки розпилувача, осі та інші вироби з легованих сталей доцільно замінювати на титанові сплави з метою скорочення витрат, значного збільшення терміну дії за рахунок кращої корозійної стійкості, для підвищення надійності при підвищених навантаженнях поряд з високою питомою міцністю, а також для зменшення питомої ваги виробів.

Розроблено спосіб поверхневого зміцнення титанових сплавів, який полягає у насиченні поверхневих шарів компонентами боровмісного середовища, до складу якого входить боровмісна речовина та активатор, і нагрівання при температурі 800–1100 °С впродовж 0,25–2 год. Склад суміші для борування (мас.%): аморфний бор 75–95, фторид літію 5–25.

На попередньо очищену, знежирену та поліровану поверхню зразків титанових сплавів наносили шар пасти, до складу якої входить (мас. %): фторид літію 5–25 % і аморфний бор 75–95 % товщиною близькою до 2–3 мм з наступним підсушуванням при температурах 90–140 °С тривалістю 30–40 хвилин до повного висихання пасти. Наведені складові перемішували в сухому стані, потім поєднували з зв'язувальними компонентами: розчин клею БФ-2 в ацетоні і 96-% спирт для досягнення необхідної консистенції пасти. Зразки титанових сплавів пересипали сумішшю таким чином, щоб вся їх поверхня була покрита та розміщували в тигель з наступним нагріванням в камерній печі до температур зміцнюючої обробки 800–1100 °С з подальшою витримкою при цих температурах впродовж 0,25–2 годин.

Досліджено процес борування на структуру (рис. 21), товщину, фазовий склад, мікротвердість поверхневих шарів зразків на титанових сплавах ВТ1-0 (технічно чистий титан) та ВТЗ-1 ($\alpha+\beta$ -сплав).

Аналіз отриманих результатів показав, що після борування титанових сплавів отримали боридні шари з поверхневою мікротвердістю 29–33 ГПа більшої товщини (до 110 мкм і перехідної зони до 190 мкм) і більшої мікротвердості перехідної зони (до 27 ГПа) у порівнянні з існуючими способами. Рентгеноструктурний фазовий аналіз досліджуваних сплавів виявив наявність боридів титану Ti_2B , TiB , TiB_2 та окислу Ti_2O_3 , а в перехідній зоні – твердого розчину бору в $\alpha-Ti$ та залишків TiB , TiB_2 і TiO_2 .

Позитивний ефект насичення поверхневих шарів пояснюється наступним призначенням компонентів, що додаються до пасти. Заміна бури на більш термодинамічно активний аморфний бор приводить до інтенсифікації процесу

борування. Саме цей компонент боровмісного середовища має мінімальний розмір частинок, який становить до 10 нм, і є основою порошку. Це дозволяє значно інтенсифікувати хімічні та дифузійні процеси за рахунок значної активної площі зіткнення частинок між поверхнею виробу, яку необхідно зміцнити, і компонентами порошку. В порівнянні з іншими боровмісними речовинами аморфний бор є найбільш дешевою сировиною при високому вмісті бору.

Додавання фтористого літію при нагріванні до температур дифузійної обробки приводить до його хімічної взаємодії з бором і киснем, що у свою чергу утворює захисну оболонку типу $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, яка не дозволяє розтікатися насичувальній суміші та забезпечує захист від кисню. Літій є лужним металом, який виступає в якості енергійного відновника, що легко згорає (Li_2O) при нагріванні до температур дифузійної обробки за наступною формулою



Фтористий літій є активатором дифузійного процесу борування. Крім того, фтористий літій є постачальником додаткового фтору F_2 , який взаємодіє з аморфним бором при утворенні сполуки BF_3 . Хімічна сполука BF_3 , яка утворилася, частково дисоціює зі звільненням атомарного бору, а також частково взаємодіє з нагрітою поверхнею титанового сплаву при появі вільного атомарного бору. Ці реакції мають замкнений цикл і діють весь період насичення безперервно, що забезпечує у свою чергу доставку на поверхню виробу все нових і нових порцій атомарного бору. Таким чином, транспортером атомів бору від боровмісних сполук до насичувальної поверхні є вільний фтор в хімічній сполуці BF_3 .

Менше 15 хв борування при температурі нижче 900°C товщина зміцненого шару недостатня на всіх зразках. Тривалість борування при нагріванні вище 1100°C більше 2 год призводить до значного росту зерен титанової матриці, що викликає різке зниження її механічних характеристик.

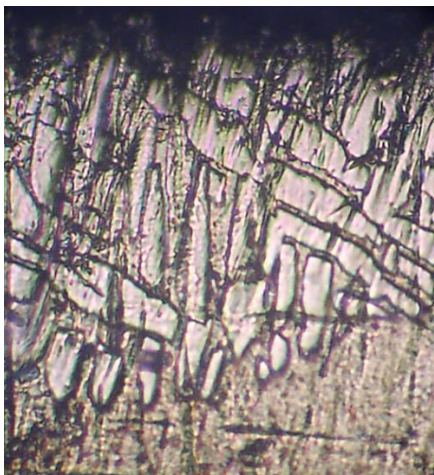


Рисунок 21 – Мікроструктура сплаву VT3-1 після борування при 900°C протягом 2 год; $\times 350$

З приведених результатів витікає, що запропонований спосіб поверхневого зміцнення титанових сплавів забезпечує у порівнянні з відомими такі переваги: збільшує швидкість отримання зміцнених шарів в 2–3 рази, що дозволить зекономити час та електроенергію; збільшує товщину боридного шару в 2–6 рази і перехідної зони до 15,8 разів; забезпечує високу поверхневу мікротвердість (до 30 ГПа) виробів з титанових сплавів, а мікротвердість перехідної зони підвищує в 1,2–1,5 рази; підвищує експлуатаційні властивості (твердість, міцність, зносостійкість, корозійну стійкість та ін.) виробів; можливість проведення процесу борування в звичайній окислювальній атмосфері без спеціального устаткування; підвищує технологічність і поліпшення умов праці.

Застосування способу поверхневого зміцнення титанових сплавів, що пропонується, дозволить поєднувати хіміко-термічну обробку (борування) з операцією термообробки (гартування), що підвищить термін служби деталей оснащення,

експлуатаційних властивостей дифузійних шарів виробів, що працюють в умовах дії контактних навантажень, підлягають дії корозійно-механічних навантажень.

Процес дифузії бору описується диференціальним рівнянням дифузії – другим законом Фіка. В даній роботі розглянуто одновимірний дифузійний процес в області $x \in [0, h]$, де h – товщина плоского зразка, границя $x = 0$ відповідає поверхні, яка контактує безпосередньо з бором. Нелінійність процесу дифузії визначається залежністю коефіцієнта дифузії від концентрації. З урахуванням усіх умов, k -я ітерація рішення крайової задачі в момент часу $\tau = \tau_n$ має вигляд

$$c^{(k)}(\xi, \tau_n) = D \left[\sum_{i=1}^n \left(q_0^{(i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} u^*(\xi, 0, \tau_n, \tau) d\tau - c_h^{(i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} q^*(\xi, h, \tau_n, \tau) d\tau \right) - c^* \int_0^{\tau_n} q^*(\xi, 0, \tau_n, \tau) d\tau \right] + K \frac{DV_B}{RT} \int_0^{\tau_n} \int_0^h \frac{\partial c^{(k-1)}(x, \tau)}{\partial x} u^*(\xi, x, \tau_n, \tau) dx d\tau, \quad (40)$$

де c – розподіл концентрації бору в зразку; τ – час борування; R – універсальна газова постійна; T – абсолютна температура; V_B – парціальний молярний об'єм бору в сталі; K – коефіцієнт пропорційності.

Запропоновану математичну модель (40) застосовано для знаходження розподілу концентрації бору по товщині зміцненого шару розробленим методом дифузійного зміцнення (рис. 22). Порівняльний аналіз експериментальних (на рис. 22 позначено точками) та теоретичних (криві на рис. 22) даних показав, що похибка не перевищує 5 %.

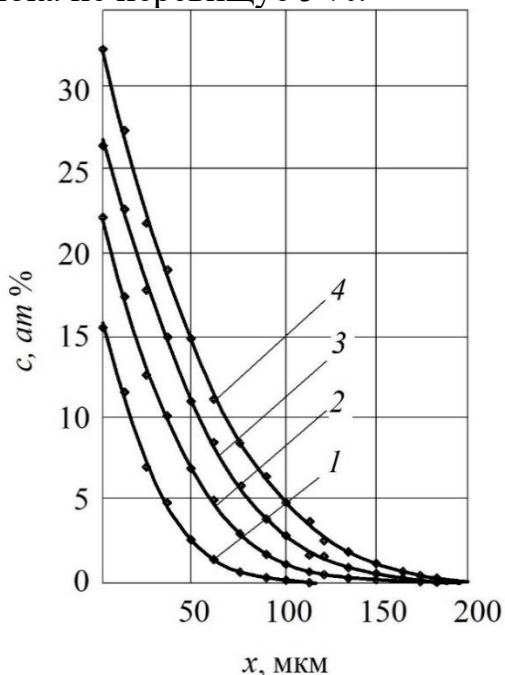


Рисунок 22 – Розподіл концентрації бору по товщині зміцненого шару залежно від тривалості нового процесу борування:

1 – 30 хвилин, 2 – 60 хвилин,
3 – 90 хвилин, 4 – 120 хвилин

Таким чином, запропонований математичний апарат розв'язання крайових задач дифузії методом граничних елементів може бути використаний для задач визначення концентрації та дифузії бору.

У шостому розділі досліджено інтенсифікацію процесів ХТО методами струмами високої частоти та лазерною обробкою, вплив зміцнюючих обробок на зміну глибини шару, поверхневої твердості та зносостійкості поверхневого шару сталей. Інтенсифікацію процесів ХТО відповідно проводили при нагріванні струмами високої частоти на ламповому генераторі ВЧГ 60-3/0,44 та на технологічному комплексі на базі потужного CO₂ лазера «Латус 31» при потужності лазерного випромінювання – 1,0±0,1 кВт та швидкості пересування лазерного променя від 0,5 до 1,5 м/хв.

Були визначені основні характеристики індуктора для розробленого технологічного процесу борування при температурі поверхні $T_0=950$ °С струмами високої частоти для зразків зі сталі 38Х2МЮА. Проведено тепловий, електричний та геометричний розрахунки індуктора. Також проведено розрахунок охолодження індуктора водою та знайдено основні характеристики індуктора.

Розроблено спосіб поверхневого зміцнення сталевих виробів, що включає нанесення на поверхню деталі обмазки, до складу якої входить боровмісна речовина і активатор, сушіння і нагрівання струмами високої частоти.

Як боровмісну речовину використовували аморфний бор і активатор фторид літію при такому співвідношенні (мас. %): аморфний бор 90–75, фторид літію 10–25. Витримку проводили при температурі 800–1100 °С впродовж 1–5 хв.

Було досліджено процес борування з нагрівом струмами високої частоти на структуру, товщину, фазовий склад, мікротвердість поверхневих шарів зразків вуглецевих та легованих сталей. Після борування сталевих виробів при нагріванні струмами високої частоти отримали боридні шари більшої товщини (до 0,24 мм) і більшої мікротвердості (до 22,5 ГПа) у порівнянні з відомими способами. Рентгеноструктурний фазовий аналіз досліджуваних сталей підтвердив наявність боридів, карбоборидів та α -Fe. При витримці менше 1 хв товщина зміцненого шару недостатня на всіх зразках сталей. Тривалість борування при індукційному нагріві більше 5 хв призводить до формування евтектичних структур боридного шару та оплавлення поверхні, що неприпустимо для деталей та інструментів.

Запропонований спосіб забезпечує у порівнянні з відомими такі переваги: збільшує швидкість отримання борованих шарів в 1,7–2,5 рази; підвищує поверхневу мікротвердість в 2–2,25 рази; підвищує експлуатаційні властивості; суттєво знижує трудомісткість процесу при значній економії електроенергії за рахунок зменшення числа компонентів в обмазці та зниження температури обробки на 100 °С в порівнянні з існуючими методами.

Застосування цього способу дозволяє поєднувати хіміко-термічну обробку (борування) з операцією термообробки (гартування), що підвищить термін служби деталей та їх експлуатаційні властивості.

Розроблено спосіб борування сталевих виробів, що включає попереднє нанесення на поверхню обмазки, в склад якої входить боровмісна речовина, активатор фторид натрію і зв'язуюча речовина розчину клею БФ в ацетоні, і нагрівання струмами високої частоти. Як боровмісну речовину використовували поліборид магнію або аморфний бор і додатково введено активатор фторид літію, при такому співвідношенні (мас. %): поліборид магнію або аморфний бор 76–90, фторид літію 5–12, фторид натрію 5–12. Витримку при температурі 750–1200 °С проводили циклічно впродовж 1–5 хв з числом циклів обробки від 6 до 30.

Аналіз отриманих результатів показав, що утворюються боридні шари товщини до 250 мкм з мікротвердістю до 23 ГПа. Значна швидкість росту

боридного шару пояснюється створенням дефектів кристалічної будови за рахунок багаторазового фазового перетворення, що підвищує дифузійні процеси насичення атомарним бором.

Розглянуто спосіб комбінованої обробки виробів, що включає попередню лазерну обробку поверхні матеріалу з потужністю лазерного випромінювання – $1,0 \pm 0,1$ кВт, швидкістю пересування лазерного променя – $0,5\text{--}1,5$ м/хв з наступним азотуванням в середовищі меламіну з 3–5 % фтористого натрію при температурі $530\text{--}560$ °С протягом 2–3 год. Аналіз отриманих результатів показав, що після лазерної обробки і наступного азотування сталі 38Х2МЮА отримуємо азотований шар більшої товщини (до 0,65 мм) і більшої мікротвердості (до 12,5 ГПа) у порівнянні з чисто азотованими ділянками (без попередньої лазерної обробки), на яких товщина дифузійного шару не перевищувала 0,2 мм, а мікротвердість – 10,8 ГПа. Це пояснюється полегшенням дифузії атомів азоту і підвищенням його розчинності внаслідок утворення більш дефектної структури металу після лазерного опромінювання.

Досліджено спосіб отримання твердого покриття на поверхні сталевих виробів, що включає попередню лазерну обробку поверхні матеріалу та борування в середовищі полібориду магнію 80–86 %, активаторами фтористий натрій (NaF) 7–10 %, фтористий літій (LiF) 7–10 % при витримці при температурах $850\text{--}950$ °С протягом 30–90 хв. Аналіз отриманих результатів показав, що отримуємо боридний шар більшої товщини (до 0,140 мм) і вищої мікротвердості (до 22,5 ГПа) у порівнянні з чисто борованими ділянками (без попередньої лазерної обробки), на яких товщина дифузійного шару не перевищувала 0,070–0,073 мм, а мікротвердість – 18–20 ГПа.

Один з методів підвищення працездатності виробів – є створення нових сталей з підвищеними механічними властивостями. Досліджено процеси створення нових сталей аустенітного класу з обґрунтованою термічною обробкою, яка дозволяє збільшити міцність до 1380 МПа при забезпеченні експлуатаційних властивостей на високому рівні.

Встановлено, що розроблений технологічний режим комплексної обробки, який полягав у процесі послідовного насичення сталей атомарними вуглецем, азотом та бором, дозволяє значно збільшити перехідну зону від твердого шару боридів до матриці виробу, що у свою чергу приводить до значного підвищення зносостійкості поверхневого шару сталі. Це відбувається за рахунок значного зниження крихкості отриманого борованого шару на поверхні сталі. А саме, карбонітридний шар виступає в якості амортизаційного прошарку між твердою поверхнею (шар боридів) та м'якою серцевиною (матриця сталі, яка після комплексної зміцнюючої обробки має структуру сорбіт відпуску), про що свідчить плавний розподіл мікротвердості від зміцненої поверхні вглиб виробу.

Порівняльний аналіз існуючих обробок і розроблених зміцнюючих технологій показав, що наявність боридів у поверхневому шарі для будь-яких режимів приводить до твердості поверхневих шарів на рівні 22 ГПа, крім обробки з використанням методу нагрівання струмами високої частоти, що пов'язано з

особливостями формування шару боридів за короткий проміжок часу при інтенсивному способу нагріванні. Встановлено, що від способу насичення поверхні сталі атомарним азотом, поверхнева твердість майже не змінюється та становить 10–12,5 ГПа.

Аналіз зміни зносостійкості показав, що процес насичення поверхні азотом за будь-якою технологією приводить до незначного підвищення зносостійкості у порівнянні із застосуванням технологій насичення поверхневих шарів атомарним бором. Можна зробити висновок, що показник зносостійкості залежить від поверхневої твердості зміцненого шару і саме бориди здатні забезпечити значне її підвищення.

Встановлено, що заводський режим газового азотування тривалістю 80 год при температурі 560 °С здатний підвищити зносостійкість поверхневого шару у 1,38–1,46 рази у порівнянні із зразком сталі без зміцнюючої обробки залежно від шляху тертя, а заводський режим іонно-плазмового азотування тривалістю 12 годин при температурі 560 °С здатний підвищити зносостійкість у 1,40–1,49 рази. Азотування у середовищі меламіну, тривалістю 5 год при температурі 550 °С підвищує зносостійкість поверхні у 1,38–1,52 рази. Запропонована технологія нітроцементациї тривалістю 5 годин при температурі 550 °С, забезпечила зносостійкість вищу на 1,36–1,50 рази. Режим зміцнюючої комплексної обробки, який полягав у попередній лазерній обробці та наступному азотуванні при швидкості переміщення лазерного променя 0,5 м/хв та тривалістю азотування у середовищі меламіну 2 години при температурі 550 °С забезпечив зносостійкість поверхні вищу в 1,43–1,57 раз. Розроблений метод борування тривалістю 2 години при температурі обробки 950 °С забезпечив зносостійкість поверхні більшу в 2,74 рази зі значним її пониженням при шляху тертя більше 120 м, що пов'язано із відколюванням часток боридного шару через його велику крихкість.

Технологія комплексного зміцнення за рахунок послідовного азотування у середовищі меламіну та наступному боруванні при тривалості азотування 5 годин при температурі 550 °С та тривалістю борування 2 години при температурі обробки 950 °С дозволила отримати збільшення зносостійкості у 4,21–4,30 рази у порівнянні із зразком сталі без поверхневого зміцнення. Запропонований технологічний режим комплексного насичення для зміцнення поверхні сталей, який полягав у послідовній цементациї та боруванні при тривалості цементациї та борування по 2 години при температурах обох обробок 950 °С, підвищив зносостійкість у 3,97–4,21 рази. Запропонований режим комплексного насичення атомарними елементами, який полягав у послідовній нітроцементациї протягом 5 год при температурі 550 °С та наступному боруванні тривалістю 2 години при температурі 950 °С, забезпечив збільшення зносостійкості у 4,09–4,25 разів. Запропонований процес насичення сталі атомарними елементами при комплексній хіміко-термічній обробці, який полягав у послідовних процесах цементациї тривалістю 2 години при температурі 950 °С, нітроцементациї протягом 5 годин при температурі 550 °С та боруванні тривалістю 2 години при температурі 950 °С, забезпечив найбільший показник зносостійкості, а саме

підвищив зносостійкість у 5 разів. Запропонований режим інтенсифікації процесів хіміко-термічної обробки методом нагрівання оброблюваних поверхонь струмами високої частоти, а саме борування з нагріванням зразків струмами високої частоти з витримкою 5 хв при температурі 950 °С, дозволив підвищити зносостійкість у 2,78–2,97 рази. Запропонований режим інтенсифікації процесів хіміко-термічної обробки методом нагрівання струмами високої частоти, а саме циклічне борування з нагріванням зразків струмами високої частоти сумарною тривалістю циклів 5 хвилин при температурі 950 °С, забезпечив зростання зносостійкості у 2,78–3,03 рази. Запропонований режим зміцнюючої комплексної обробки, який полягав у попередній лазерній обробці та наступному боруванні при швидкості переміщення лазерного променя 0,5 м/хв, та тривалістю насичення атомарним бором 1 години при температурі 950 °С, дозволив підвищити зносостійкість поверхні виробу у 4,67–4,52 рази. Таким чином, саме розроблені комплексні зміцнюючі обробки на основі процесу дифузійного насичення атомарним бором здатні забезпечити зносостійкість поверхневих шарів на високому рівні при абразивному зношуванні.

Для можливості зіставлення техніко-економічної оцінки ефективності запропонованих нових технологій поверхневого зміцнення у порівнянні з існуючими технологіями є доцільним порівнювати їх за показниками витрат на електроенергію, що є найбільш вагомою величиною. Зміна інших показників не є дуже значимою, тому для спрощення розрахунків не будемо їх враховувати. За даними акціонерного товариства «Харківобленерго» тарифи на електроенергію станом на 4 квартал 2018 року для всіх груп споживачів, крім населення, по класах напруги (без ПДВ) становлять 178,079–212,776 коп/кВт·годин залежно від класу напруги. Для спрощення порівняльного аналізу приймаємо вартість електроенергії 2 грн/кВт·годин. Таким чином, виходячи із тривалості обробок (для спрощення розрахунків брали лише тривалість зміцнюючих обробок при заданих температурах витримки, не враховували роботу устаткування для виходу на заданий режим обробки) та промислової потужності устаткування 380 кВт/годин отримали наступні значення. Для заводського режиму газового азотування тривалість обробки становила 80 годин при температурі 560 °С, при цьому вартість одного циклу обробки за електроенергією становить 38000 грн. Заводський режим іонно-плазмового азотування тривалістю 12 годин при температурі 560 °С буде коштувати 4940 грн. Вартість азотування у середовищі меламіну, як і запропонованої технології нітроцементатації, тривалістю 5 годин при температурі 550 °С становить 3800 грн, але вартість запропонованого середовища для процесу низькотемпературної нітроцементатації (підрозділ 3.3) у 10 разів дешевша, ніж вартість меламіну. Запропонований режим зміцнюючої комплексної обробки, який полягав у попередній лазерній обробці та наступному азотуванні з тривалістю азотування у середовищі меламіну 2 години при температурі 550 °С, за витратами на електроенергію буде коштувати 1520 грн. Метод борування за технологією, запропонованою у підрозділі 3.1 тривалістю 2 години при температурі 950 °С, також буде коштувати 1520 грн у порівнянні із

традиційним методом борування тривалістю 6 годин для досягнення експлуатаційних характеристик борованого шару на тому ж рівні, який за витратами на електроенергію становить 4560 грн. Технологія комплексного зміцнення за рахунок послідовного азотування у середовищі меламіну та наступному боруванні, тривалістю азотування 5 годин при температурі 550 °С та тривалістю борування 2 години при температурі обробки 950 °С, буде коштувати 5320 грн. Запропонований технологічний режим комплексного насичення для зміцнення поверхні сталей, який полягав у послідовній цементації та боруванні при тривалості цементації та борування по 2 години при температурах обох обробок 950 °С, коштує 3040 грн замість 6080 грн. Вартість запропонованого режиму комплексного насичення атомарними елементами, який полягав у послідовній нітроцементації протягом 5 год при температурі 550 °С та наступному боруванні тривалістю 2 години при температурі 950 °С, становитиме 5320 грн замість 9120 грн. Запропонований процес насичення сталі атомарними елементами при комплексній хіміко-термічній обробці, який полягав у послідовних процесах цементації тривалістю 2 годин при температурі 950 °С, нітроцементації протягом 5 годин при температурі 550 °С та боруванні тривалістю 2 години при температурі 950 °С, дозволяє знизити витрати на електроенергію з 13680 грн до 6840 грн. Запропонований режим інтенсифікації процесів хіміко-термічної обробки методом нагрівання оброблюваних поверхонь струмами високої частоти, а саме борування з нагріванням зразків струмами високої частоти з витримкою 5 хвилин при температурі 950 °С, як і режим інтенсифікації процесів хіміко-термічної обробки методом нагрівання струмами високої частоти, а саме циклічне борування з нагріванням зразків струмами високої частоти сумарною тривалістю циклів 5 хвилин при температурі 950 °С, буде коштувати 63,08 грн. Вартість запропонованого режиму зміцнюючої комплексної обробки, який полягав у попередній лазерній обробці та наступному боруванні тривалістю насичення атомарним бором 1 години при температурі 950 °С, становитиме 760 грн.

Виробничими випробуваннями встановлено, що:

- використання запропонованих ефективних технологічних процесів поверхневого зміцнення дозволило підвищити зносостійкість втулки зі сталі 38Х2МЮА з зовнішнім діаметром 30 мм, внутрішнім діаметром 17 мм, довжиною 6 мм, масою 12 г після нітроцементації у макродисперсній суміші у 1,5 рази після нітроцементації, у 4,3 рази після послідовній нітроцементації та боруванні, у 5 разів після цементації, нітроцементації та боруванні та у 2 рази після боруванні з нагріванням струмами високої частоти у порівнянні зі втулкою без поверхневого зміцнення.

- запропоновані ефективні технологічні процеси комбінованого зміцнення поверхневого шару сталевих виробів дозволили значно прискорити технологічні процеси хіміко-термічної обробки у 2-10 разів, що привело до зменшення витрат на їх проведення за рахунок економії електричної енергії.

– використання запропонованих ефективних технологічних процесів поверхневого зміцнення дозволило підвищити зносостійкість втулки зі сталі 38Х2МЮА з зовнішнім діаметром 30 мм, внутрішнім діаметром 17 мм, довжиною 6 мм у 1,5 рази після нітроцементації, у 4,3 рази після послідовній нітроцементації та боруванні.

– запропоновані номограми дозволили значно спростити роботу інженера-технолога, а також вирішувати зворотню задачу, а саме, оцінити можливу товщину зміцненого шару і поверхневу твердість при одночасному впливі температури і тривалості газового азотування.

– експлуатаційна стійкість зубчастого колеса з зовнішнім діаметром 94 мм, внутрішнім діаметром 21 мм, довжиною 17 мм після нітроцементації підвищується у 1,5-2 рази у порівнянні з експлуатаційними властивостями виробу без нітроцементації. Використання макродисперсної суміші прискорило процес хіміко-термічної обробки у 1,5-2 рази при отриманні властивостей поверхневого шару виробу таких, як і після традиційного процесу нітроцементації, що дозволило зменшити витрати на проведення хіміко-термічної обробки у 2 рази.

Таким чином, показано значне зниження витрат на електроенергію та економічно доведено доцільність використання на підприємствах нових запропонованих технологій поверхневого зміцнення виробів.

У додатках наведено акти впровадження у виробництво та навчальний процес, список публікацій.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проведено комплекс досліджень, спрямованих на вирішення важливої науково-технічної проблеми в області технології машинобудування: розробка інноваційних та короткотривалих технологій поверхневого зміцнення деталей машин порошковими сумішами керованого складу для забезпечення експлуатаційних властивостей виробів машинобудування на високому рівні при значному зниженні затрат на їх виготовлення. При виконанні роботи отримано такі результати:

1. Створено математичні моделі і номограми, які дозволяють визначити конкретні технологічні параметри ХТО (температуру і тривалість газового, іонно-плазмового азотування та борування в обмазках) поверхні виробів машинобудування, виходячи із заданої глибини дифузійного шару або потрібної поверхневої твердості деталей, що має велике практичне значення. Розроблений математичний алгоритм побудови номограм може бути використаний для будь-яких технологій ХТО сплавів. Результати досліджень можуть бути використані на виробництві і в науково-дослідних роботах.

Вперше встановлено теоретичні оптимальні умови газового азотування сталі 38Х2МЮА, а саме 518,0 °С і 57,7 год для отримання максимальних значень поверхневої твердості і 588,5 °С і 77,3 год – максимальної глибини дифузійного шару.

В результаті математичного моделювання дифузійних процесів та експериментальних досліджень отримано дані про розподіл температури по

глибині виробу при різних значеннях температури впливу. Аналітичні методи дозволили отримати функціональні залежності для розрахунку розподілу температури по глибині шару та дослідити вплив різних чинників на температурний стан тіла. Похибка отриманих теоретично та експериментальних даних не перевищує 3–5 %.

2. Розроблено наукові основи технологічного процесу борування виробів машинобудування зі сталі 38Х2МЮА, який дозволяє отримати шар з двох боридів. Нова технологія дозволяє скоротити тривалість насичення поверхневих шарів деталей атомарними елементами в 2–3 рази, що значно зменшує енерговитрати, отримати необхідні експлуатаційні властивості та поєднати насичення поверхневого шару атомарним бором із гартуванням.

Досліджено процеси насичення виробів зі сталей 20 та 20Х вуглецем. На основі експериментальних даних створені математичні моделі для визначення товщин загального дифузійного шару та кожної зони від температури цементації в діапазоні 800–950 °С. Встановлено, що наявність хрому в сталі 20Х уповільнює процеси насичення поверхневих шарів деталей у 1,2–2 рази залежно від температури цементації.

Розроблено наукові основи технологічного процесу одночасного насичення поверхневих шарів сталі атомарним азотом та вуглецем. Цей процес дозволяє отримати карбонітридні фази подібні класичним фазам, що утворюються при азотуванні, за рахунок більшої активності атомарного азоту ніж атомарного вуглецю при температурах 500–650 °С. Встановлено, що прискорення дифузії зростає майже в 5–10 разів залежно від температури ХТО при використанні запропонованого способу нітроцементації за рахунок використання макродисперсної насичувальної суміші.

Розроблено наукові основи комплексної технології ХТО деталей машин, які дозволяють сформувати боридний шар з перехідною зоною, що підвищує експлуатаційні властивості виробів машинобудування за рахунок зменшення мікротвердості дифузійних шарів. Розраховано розподіл температури по глибині дифузійних шарів при комплексних хіміко-термічних обробках. Надано математичні моделі, які дозволяють отримати чітке уявлення про розподіл температури під час зміцнення дифузійних шарів комплексними технологіями. Експериментальні данні підтвердили достовірність теоретично отриманих моделей. Встановлено закономірність, згідно якої у дифузійних шарах, близьких до поверхні, експериментальні дані мають більші значення, ніж теоретичні, а у шарах, які розташовані глибше – саме теоретичні данні мають більші значення, що пояснюється особливостями будови комплексних шарів, отриманих за різними технологіями поверхневого дифузійного зміцнення сталей.

3. Розроблено наукові основи технології борування деталей машинобудування з паст титанового сплаву, що забезпечує отримання твердості поверхні в межах 30–29 ГПа зі зниженням її до 27–26 ГПа по шару до перехідної зони (з загальною товщиною до 110 мкм), що пов'язане зі зміною фазового складу самого шару, в якому формуються бориди титану Ti_2B , TiB , TiB_2 . Завдяки використанню нанодисперсного боровмісного порошку тривалість насичення бором скорочується в 2–3 рази. Доцільним є поєднання насичення поверхневого

шару атомарним бором титанового сплаву ВТЗ-1 з гартуванням. Запропоновано математична модель для знаходження розподілу концентрації бору по товщині зміцненого шару. Порівняльний аналіз експериментальних та теоретичних даних довів, що похибка не перевищує 5 %. Таким чином, запропонований математичний апарат розв'язання крайових задач дифузії методом граничних елементів може бути використаний для задач визначення розподілу концентрації та дифузії бору.

4. Розроблено способи інтенсифікації процесів хіміко-термічної обробки деталей методами нагрівання струмами високої частоти для отримання високих експлуатаційних властивостей поверхневих шарів виробів при значному скороченні тривалості обробок. Визначено основні характеристики індуктора для розробленого процесу борування струмами високої частоти.

Запропоновано способи комбінованої зміцнюючої обробки сталевих виробів, які включали попередню лазерну обробку поверхневих шарів сталі з наступним процесом азотування або борування. Встановлено, що попередня лазерна обробка сприяла пришвидшенню подальших зміцнюючих обробок за рахунок більшої дефектності попередньо оброблених ділянок лазерним променем.

Розроблено технологічний режим отримання нових аустенітних сталей з підвищеними експлуатаційними властивостями, що обумовлено дисперсійним твердінням, що приводить до об'ємного зміцнення виробу в цілому.

5. Зроблено порівняльний аналіз впливу існуючих та розроблених зміцнюючих обробок на зміну глибини шару, поверхневої твердості та зносостійкості поверхневого шару сталі 38Х2МЮА. Встановлено, що розроблені комплексні зміцнюючі обробки на основі процесу дифузійного насичення бором здатні забезпечити зносостійкість поверхневих шарів на високому рівні при абразивному зношуванні.

Розробка нових комплексних технологій поверхневого зміцнення деталей машин та інструменту дозволила підвищити поверхневу твердість та зносостійкість виробів машинобудування при значному скороченні тривалості та енерговитрат технологічних режимів, а саме:

- підвищити експлуатаційну стійкість зубчастих коліс при зменшенні витрат на проведення хіміко-термічної обробки у 2 рази;
- підвищити зносостійкість деталей типу втулка та циліндр у 1,5 рази після нітроцементації, у 4,3 рази після послідовної нітроцементації та борування, у 5 разів після цементації, нітроцементації та борування та у 2 рази після борування з нагріванням СВЧ у порівнянні зі втулкою без поверхневого зміцнення;
- нові технологічні процеси комбінованого зміцнення поверхневого шару сталевих виробів машинобудування дозволили значно прискорити технологію хіміко-термічної обробки у 2–10 разів, що привело до зменшення витрат на їх проведення за рахунок економії електричної енергії.

Зроблене економічне обґрунтування доцільності застосування розроблених зміцнюючих обробок на підприємствах. Впроваджено результати досліджень у виробництво та навчальний процес.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Костик К. О. Підвищення зносостійкості деталей прес-форм лиття під тиском методом борування з нанопаст / К. О. Костик // Вісник НТУ «ХП». – 2013. – №70 (1043). – С. 8-12.

2. Костик К. О. Зміцнення прес-форм лиття під тиском по нанотехнології / К. О. Костик // Проблеми машинобудування. – 2013. – № 5. – С. 113-118.

3. Костик, К. О. Підвищення довговічності деталей енергетичного машинобудування методом нітроцементації в макродисперсній суміші / К. О. Костик // Машинобудування. – 2013. – № 12. – С. 50-55.

4. Костик К. О. Поверхнєве зміцнення деталей автомашин та тракторів методом низькотемпературної нітроцементації в порошковому середовищі / В. О. Костик, К. О. Костик, А. С. Долженко // Автомобільний транспорт. – 2013. – Вып. 33. – С. 115-119.

Здобувачем розроблено нову технологію низькотемпературної нітроцементації сталей, обґрунтовано вибір оптимальних технологічних параметрів розробленого процесу, розраховано коефіцієнт дифузії азоту для сталі 40X за запропонованою технологією.

5. Костик К. О. Інноваційний метод підвищення довговічності деталей машин хіміко-термічною обробкою / К. О. Костик // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2014. – № 1/3 (15). – С. 20-21.

6. Костик К. О. Вивчення зміни коефіцієнту дифузії вуглецю залежно від температури хіміко-термічної обробки сталі 20X / В. О. Костик, К. О. Костик // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – №38 (1011). – С. 21-29.

Здобувачем проведено та проаналізовано процес цементації сталі 20X, детально вивчено зміни коефіцієнта дифузії вуглецю залежно від температури хіміко-термічної обробки; математичні моделі товщини загального дифузійного шару та кожної її зони від температури цементації в діапазоні 800–950 °С.

7. Костик К. О. Моделювання глибини боридного шару сталі 4X5МФС при зміні тривалості борування по нанотехнології / К. О. Костик, В. О. Костик // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – №40 (1083). – С. 145-149.

Здобувачем отримано експериментальні данні та на їх основі розраховані математичні моделі товщини боридного шару методом найменших квадратів з використанням матричного підходу до регресивного аналізу.

8. Костик К. О. Порівняльний аналіз впливу газового та іонно-плазмового азотування на зміну структури і властивостей легованої сталі 30X3BA / К. О. Костик, В. О. Костик // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – №48 (1090). – С. 21-41.

Здобувачем вивчено структури і властивості плунжерів з легованої сталі 30X3BA після газового та іонно-плазмового азотування, порівняльний аналіз двох видів азотування.

9. Костик Е. А. Изготовление отливок с дифференцированными свойствами поверхности / О. И. Пономаренко, Е. А. Костик, Г. Е. Федоров // Компресорне і енергетичне машинобудування. – 2015. – № 4 (42). – С. 40-44.

Здобувачем досліджено процес поверхневого легування, товщини легованого шару, дослідження мікроструктури зразків.

10. Костик К. О. Швидкісний метод нітроцементзації легованої сталі / К. О. Костик, В. О. Костик, А. С. Долженко, С. В. Нікіфорова // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – № 14 (1123). – С. 35-41.

Здобувачем досліджено процес впливу технологічних параметрів низькотемпературної нітроцементзації на структуру та властивості сталі 30Г; встановлення оптимального режиму зміцнення поверхневого шару нітроцементациєю.

11. Костик К. О. Зміцнення поверхні інструменту зі сталі 38Х2МЮА комплексною хіміко-термічною обробкою сталі / К. О. Костик // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – № 39 (1148). – С. 26-33.

Здобувачем запропоновано та досліджено процеси впливу режимів борування на структуру і властивості титанового сплаву ВТЗ-1; досліджено структуру, товщину, твердість та склад поверхневого шару титанового сплаву після борування; досліджено вплив тривалості хіміко-термічної обробки на процес формування борованого шару.

12. Kostyk K. O. Research of influence of gas nitriding duration on formation of diffusion layer of steel 20Kh2N4A / К. О. Kostyk // Праці Одеського політехнічного університету. – 2015. – Вип. 2(46). – С. 14-18. DOI 10.15276/opus.2.46.2015.04

13. Костик К. О. Розробка швидкісної технології борування легованої сталі / К. О. Костик // Східно-Європейському журналі передових технологій. – 2015. – № 6/11 (78). – С. 8-15. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.55015 (**Scopus**).

14. Kostyk K. O. Nanodispersed boriding of titanium alloy / К. О. Kostyk, V. O. Kostyk // Праці Одеського політехнічного університету. – 2015. – Вип. 3(47). – С. 17-23. DOI 10.15276/opus.3.47.2015.04

15. Костик К. О. Розробка технології місцевого поверхневого зміцнення зубчатого циліндричного колеса відцентрованого змішувача / К. О. Костик // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. – №2. – С. 39-43.

16. Kostyk K. Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding / М. Mohanad, V. Kostyk, D. Demin, K. Kostyk // Східно-Європейському журналі передових технологій. – 2016. – № 2/5 (80). – С. 45-49. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.65454 (**Scopus**).

Здобувачем досліджено процес впливу технологічних параметрів іонного азотування на зміну властивостей зміцненого шару сталі 38Х2МЮА; математичні моделі, номограми глибини шару і поверхневої твердості залежно від змін температури і тривалості іонного азотування.

17. Kostyk K. The choice of the optimal temperature and time parameters of gas nitriding of steel / W. Dhafer, V. Kostyk, K. Kostyk, A. Glotka, M. Chechel // Східно-Європейському журналі передових технологій. – 2016. – № 3/5(81). – С. 44-50. DOI 10.15587/1729-4061.2016.69809 (**Scopus**).

Здобувачем досліджено процес впливу технологічних параметрів газового азотування на зміни властивостей зміцненого шару сталі 38Х2МЮА; математичні моделі глибини шару і поверхневої твердості залежно від змін температури і тривалості газового азотування.

18. Костик Е. А. Влияние предварительной термической обработки и режимов лазерной закалки на структуроформирование стали / А. Идан, О. В. Акимов, Е. А. Костик, А. А. Гончарук // Вісник НТУ «ХП». – 2016. – № 18 (1190). – С. 66-73. DOI:10.20998/2413-4295.2016.18.10.

Здобувачем досліджено процес впливу різних видів попередньої термічної обробки на структуроутворення зміцненої зони сталі 40 після лазерного гартування.

19. Костик К. О. Поверхневе двошарове зміцнення сталі при послідовному насиченні вуглецем та бором в порошкових макро- та нанодисперсних середовищах / К. О. Костик // Вісник НТУ «ХПІ». – 2016. – №. 42 (1214). – С. 54-63. DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2413-4295.2016.42.09>

20. Костик Е. А. Улучшение эксплуатационных свойств сплава на основе железа с эффектом памяти формы методом вакуумной переплавки / С. М. Нури, О. В. Акимов, Е. А. Костик, А. А. Глотка, Н. В. Чечель // Процеси лиття. – 2016. – № 5 (119). – С. 68-72.

Здобувачем вивчено процеси отримання сплаву на основі заліза методом вакуумної переплавки.

21. Костик Е. А. Особенности эксплуатационных свойств сплава на основе железа с эффектом памяти формы / С. М. Нури, О. В. Акимов, Е. А. Костик // Металл и литье Украины. – 2017. – № 2–3 (285–286). – С. 27–29.

Здобувачем вивчено процеси отримання нового сплаву на основі заліза.

22. Kostyk K. Development of an iron-based alloy with a high degree of shape recovery / A. Mohammed, O. Akimov, K. Kostyk // Східно-Європейському журналі передових технологій. – 2017. – № 3/12 (87). – С. 30-37. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.103523 (**Scopus**).

Здобувачем вивчено процес отримання сплаву на основі заліза, досліджено сплив легувальних елементів.

23. Kostyk K. Surface hardening of steel parts / A. Idan, O. V. Akimov, K. O. Kostyk // Праці Одеського політехнічного університету. – 2017. – № 1 (51). – С. 17–23. DOI 10.15276/opu.1.51.2017.

Здобувачем запропоновано та досліджено процеси комбінованого зміцнення сталевих виробів для забезпечення високих експлуатаційних властивостей поверхневого шару сталі.

24. Kostyk K. Development of a combined technology for hardening the surface layer of steel 38Cr2MoAl / A. Idan, O. Akimov, K. Kostyk // Східно-Європейському журналі передових технологій. – 2017. – № 2/11 (86). – Р. 56-62. DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2017.100014> (**Scopus**).

Здобувачем досліджено процеси зміни властивостей поверхневого шару конструкційної сталі після комбінованого зміцнення.

25. Костик Е. А. Упрочнение стали 40Х комбинированной обработкой с применением лазера / А. Идан, О. В. Акимов, Е. А. Костик, А. А. Гончарук // Металл и литье Украины– 2016. – № 7 (278). – С. 33–35.

Здобувачем досліджено процеси зміцнення сталі за рахунок застосування комбінованих обробок.

26. Kostyk K. Development of innovative method of steel surface hardening by a combined chemical-thermal treatment / K. Kostyk // EUREKA: Physics and Engineering. – 2016. – №. 6. – С. 46-52. DOI: <http://dx.doi.org/10.21303/2461-4262.2016.00220>

27. Пат. 111066 Україна, МПК8 С23С 8/02-26 UA. Спосіб комбінованої обробки сталевих виробів / Костик К. О., Ідан А., Акімов О. В., Костик В. О. (Україна) ; заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т «ХПІ»; заявл. 19.05.16 ; опубл. 25.10.16, Бюл. № 20. – 5 с.

Здобувачем розроблено процес азотування у нанодисперсному середовищі; досліджено процес комбінованої обробки сталевих виробів.

28. Пат. 116116 Україна, МПК8 С23С 8/02-26 UA. Спосіб отримання твердого покриття на поверхні сталевих виробів / Костик К. О., Ідан А., Акімов О. В., Костик В. О. (Україна); заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т «ХПІ»; заявл. 11.11.16; опубл. 10.05.17, Бюл. № 9. – 6 с.

Здобувачем розроблено процес борування сплавів; досліджено процес комбінованої обробки сталевих виробів.

29. Пат. 116117 Україна, МПК8 С22С 38/00, С21D 7/13 UA. Сплав на основі заліза з ефектом пам'яті форми / Костик К. О., Ахмед С. М., Акімов О. В. (Україна); заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т «ХПІ»; заявл. 11.11.16; опубл. 10.05.17, Бюл. № 9. – 5 с.

Здобувачем досліджено процес отримання сплаву на основі заліза.

30. Пат. 117757 Україна, МПК8 С22С 38/04 UA. Дисперсійно-твердіючий сплав на основі заліза з ефектом пам'яті форми / Костик К. О., Ахмед С. М., Акімов О. В. (Україна); заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т «ХПІ»; заявл. 19.01.17; опубл. 10.07.17, Бюл. № 13. – 6 с.

Здобувачем досліджено процес отримання дисперсійно-твердіючого сплаву на основі заліза.

31. Пат. 116177 Україна, МПК8 С23С 8/02-26 UA. Спосіб дифузійного борування сталевих виробів / Костик К. О., Акімов О. В., Костик В. О. (Україна); заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т «ХПІ»; заявл. 25.11.16; опубл. 10.05.17, Бюл. № 9. – 6 с.

Здобувачем розроблено процес борування сталей, склад боровмісної суміші.

32. Пат. 116178 Україна, МПК8 С23С 8/00, С25D 5/50 UA. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих виробів / Костик К. О., Акімов О. В., Костик В. О. (Україна); заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т «ХПІ»; заявл. 25.11.16; опубл. 10.05.17, Бюл. № 9. – 6 с.

Здобувачем розроблено процес поверхневого зміцнення сталевих виробів, запропоновано склад боровмісної суміші.

33. Пат. 117775 Україна, МПК8 С23С 8/68–70 UA. Склад для борування сталевих виробів / Костик К. О., Акімов О. В., Костик В. О. (Україна); заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т «ХПІ»; заявл. 03.01.17; опубл. 10.07.17, Бюл. № 13. – 6 с.

Здобувачем запропоновано склад боровмісної суміші.

34. Пат. 117770 Україна, МПК8 С23С 8/02-26 UA. Спосіб поверхневого зміцнення титанових сплавів / Костик К. О., Акімов О. В., Костик В. О. (Україна); заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т «ХПІ»; заявл. 03.01.17; опубл. 10.07.17, Бюл. № 13. – 6 с.

Здобувачем розроблено процес поверхневого зміцнення титанових сплавів, склад боровмісної суміші.

35. Літус* К. О. Покращення властивостей титанових сплавів за допомогою нанодисперсних порошкових паст / В. О. Костик, К. О. Літус, О. В. Шульга // Матеріали XVIII наук.-практич. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». Секція 6. Нові матеріали та технології в процесах гарячої обробки металів. (Харків, 2010 р.). – X., 2010. – С. 25.

Здобувачем досліджено процеси зміни властивостей титанових сплавів після хіміко-термічної обробки.

36. Літус К. О. Борування сталей У8 та У12 в нанодисперсних порошках для підвищення стійкості пресформ лиття під тиском / К. О. Літус*, В. О. Костик // Матеріали ХІХ наук.-практич. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». Секція 6. Нові матеріали та технології в процесах гарячої обробки металів. (Харків, 2011 р.). – Х., 2011. – С. 29.

Здобувачем досліджено процеси формування дифузійних шарів на сталях У8 та У12 після ХТО.

37. Литус Е. А. Влияние упрочнения азотированием стали 3Х3М3Ф на изменение износостойкости пресс-форм литья под давлением медных сплавов / Е. А. Литус*, В. О. Костик // Материалы III Международной науч.-технич. конф. «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве» (Краматорск, ДГМА, 2011 г.). – К., 2011. – С. 122-124.

Здобувачем досліджено процеси зміцнення сталі 3Х3М3Ф методом азотування.

38. Літус К. О. Вплив нітроцементації на корозійну стійкість сталей / К. О. Літус*, В. О. Костик, Ю. О. Хмелівська // Матеріали ХХ наук.-практич. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». Секція 6. Нові матеріали та технології в процесах гарячої обробки металів. (Харків, 2012 р.). – Х., 2012. – С. 31.

Здобувачем досліджено процеси нітроцементації сталей.

39. Костик К. О. Аналіз дифузійних процесів насичення сталевих виробів при боруванні з нанодисперсної пасті / В. О. Костик, К. О. Костик // Матеріали ХХІ наук.-практич. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». Секція 6. Нові матеріали, комп'ютерна графіка та сучасні технології обробки металів. (Харків, 2013 р.). – Х., 2013. – С. 29.

Здобувачем досліджено дифузійні процеси насичення сталевих виробів.

40. Костик К. О. Моделювання глибини боридного шару при насиченні з нанопасті / К. О. Костик, В. О. Костик // Матеріали ХХІІ наук.-практич. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». Секція 6. Нові матеріали, комп'ютерна графіка та сучасні технології обробки металів. (Харків, 2014 р.). – Х., – 2014. – С. 23.

Здобувачем зроблено моделювання глибини боридного шару.

41. Костик К. О. Зміцнення поверхневих шарів сталей методами ХТО в порошкових макро- та нанодисперсних середовищах / К. О. Костик, В. О. Костик, С. В. Нікіфорова // Матеріали ХХІІІ наук.-практич. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». Секція 6. Нові матеріали, комп'ютерна графіка та сучасні технології обробки металів. (Харків, 2015 р.). – Х., 2015. – С. 327.

Здобувачем досліджено процес зміцнення поверхневих шарів сталей методами ХТО.

42. Костик К. О. Інноваційна нітроцементація легованої сталі / К. О. Костик // Матеріали ХІV Міжнар. наук.-техн. конф. «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах». (Запоріжжя, 2015 р.). – З., 2015. – С. 50.

43. Костик К. О. Перспективні методи поверхневого зміцнення / К. О. Костик, В. О. Костик // Матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф. «Литво». (Запоріжжя, 2015 р.). – З., 2015. – С. 143-144.

Здобувачем запропоновано методи поверхневого зміцнення.

44. Костик Е. А. Математическая модель поверхностной твердости стали в зависимости от изменений технологических параметров ионного азотирования / М. Кхалаф, В. О. Костик, Е. А. Костик // Матеріали XXIV наук.-практич. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». Секція 6. Нові матеріали, комп'ютерна графіка та сучасні технології обробки металів. (Харків, 2016 р.). – Х., 2016. – С. 356.

Здобувачем отримано математичну модель поверхневої твердості сталі при іонному азотуванні.

45. Костик Е. А. Моделирование процесса газового азотирования / Е. А. Костик, В. О. Костик, Аль-Рекаби Дафер // Матеріали VIII Міжнар. наук.-техн. конф. «Нові матеріали і технології в машинобудуванні». (Київ, 2016 р.). – К., 2016. – С. 80.

Здобувачем отримано математичну модель процесу азотування.

46. Костик К. О. Азотування легованої сталі у плазмі тліючого розряду / К. О. Костик, В. О. Костик // Матеріали XII Міжнар. наук.-техн. конф. «Литво-2016». (Запоріжжя, 2016 р.). – З., 2016. – С. 131-132.

Здобувачем досліджено процес азотування легованої сталі.

47. Костик Е. А. Особенности формирования упрочненного слоя при комбинированном азотировании стали / Алаа Фадил И Идан, О.В. Акимов, Е.А. Костик // Збірник наукових праць за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції «Синергетика, мехатроніка, телематика дорожніх машин і систем у навчальному процесі та науці» (16 березня 2017 р.). – Харків: ХНАДУ, 2017. – С. 113-114.

Здобувачем досліджено процес формування зміцненого шару.

48. Костик Е. А. Особенности комбинированного упрочнения поверхностного слоя стальных деталей / Алаа Фадил И Идан, О.В. Акимов, Е.А. Костик // Тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (17-19 травня 2017 р.) матеріали конференції у 4-х ч. – Ч.ІІ. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – С. 4

Здобувачем досліджено процес комбінованого зміцнення.

49. Костик Е. А. Комбинированная технология упрочнения поверхности легированной стали / Алаа Фадил И Идан, О.В. Акимов, Е.А. Костик // Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2017» (30-31 травня 2017 р.). – Київ: НТУУ «КПІ». – 2017. – С. 77.

Здобувачем досліджено процес комбінованого зміцнення.

50. Костик Е. А. Получение твердого покрытия на поверхности стальных изделий / Алаа Фадил И Идан, О. В. Акимов, Е.А. Костик // Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Литво – 2017» (23-25 травня 2017 р.). – Запоріжжя: Редакційний відділ ЗТПП. – 2017. – С 109.

Здобувачем досліджено процеси отримання твердого покриття.

* К. О. Костик – дівоче прізвище К. О. Літус

АНОТАЦІЇ

Костик К.О. Наукові основи технологій поверхневого зміцнення деталей машин порошковими сумішами керованого складу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування (13 – механічна інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2020.

У дисертаційній роботі проведено комплекс досліджень, спрямованих на вирішення важливої науково-технічної проблеми в області технології машинобудування: розробка інноваційних та короткотривалих технологій поверхневого зміцнення деталей машин порошковими сумішами керованого складу для забезпечення експлуатаційних властивостей виробів на високому рівні при значному зниженні затрат на їх виготовлення.

Розроблено загальний методологічний підхід керування технологічними процесами поверхневого зміцнення деталей порошковими сумішами керованого складу при насиченні поверхневих шарів азотом, вуглецем і бором на основі використання інноваційних технологій і системного аналізу при мінімальних витратах, що дозволило підвищити експлуатаційні властивості виробів машинобудування при значному скороченні тривалості ХТО.

Розроблено комплексні ХТО, які значно знижують крихкість борованих шарів за рахунок більш плавного зниження твердості від поверхні до серцевини виробів зі сталей для підвищення експлуатаційних властивостей виробів та терміну служби деталей машин та інструменту.

Удосконалено технологію борування деталей машинобудування з паст титанових сплавів за рахунок використання нанодисперсного насичувального середовища, що дозволило скоротити процес борування у 2-3 рази та скоротити технологічний процес виготовлення деталей за рахунок поєднання двох операцій: борування і гартування титанового сплаву.

Інтенсифіковано процеси ХТО виробів машинобудування методами нагрівання струмами високої частоти та за рахунок попередньої лазерної обробки деталей, що дозволило отримати високі експлуатаційні властивості поверхневих шарів при значному скороченні тривалості обробок.

Ключові слова: технологічний процес, формування якості поверхонь деталей машин, інтегрована та інноваційна технологія, поверхневе зміцнення, експлуатаційні властивості, поверхнева твердість, дифузійний шар, зносостійкість, нанодисперсна порошкова суміш, математичне моделювання.

Костик Е.А. Научные основы технологий поверхностного упрочнения деталей машин порошковыми смесями управляемого состава. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения (13 – механическая

инженерия). – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2020.

В диссертационной работе проведен комплекс исследований, направленных на решение важной научно-технической проблемы в области технологии машиностроения: разработка инновационных и кратковременных технологий поверхностного упрочнения деталей машин порошковыми смесями управляемого состава для обеспечения эксплуатационных свойств изделий на высоком уровне при значительном снижении затрат на их изготовление.

Разработан общий методологический подход управления технологическими процессами поверхностного упрочнения деталей машиностроения порошковыми смесями управляемого состава при насыщении поверхностных слоев азотом, углеродом и бором на основе использования инновационных технологий и системного анализа при минимальных затратах, что позволило повысить эксплуатационные свойства изделий при значительном сокращении продолжительности ХТО.

Разработаны комплексные ХТО, которые значительно снижают хрупкость борированных слоев за счет более плавного снижения твердости от поверхности к сердцевине изделий из сталей для повышения эксплуатационных свойств изделий и срока службы деталей машин и инструмента.

Усовершенствована технология борирования деталей машиностроения с паст титановых сплавов за счет использования нанодисперсной насыщающей среды, что позволило сократить процесс борирования в 2-3 раза и сократить технологический процесс изготовления деталей за счет совмещения двух операций: борирования и закалки титанового сплава.

Интенсифицированы процессы ХТО изделий машиностроения методами нагрева токами высокой частоты и за счет предварительной лазерной обработки деталей, что позволило получить высокие эксплуатационные свойства поверхностных слоев при значительном сокращении длительности обработок.

Ключевые слова: технологический процесс, формирование качества поверхностей деталей машин, интегрированная и инновационная технология, поверхностное упрочнение, эксплуатационные свойства, поверхностная твердость, диффузионный слой, износостойкость, нанодисперсная порошковая смесь, математическое моделирование.

Kostyk K. O. Scientific basis of surface hardening technologies of machine parts by controlled composition powder mixtures. – Manuscript.

The thesis for the scientific degree of doctor of technical sciences, specialty 05.02.08 – technology of mechanical engineering (13 – mechanical engineering). – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2020.

In the thesis a set of studies was aimed at solving an important scientific and technical problem in the field of engineering technology: the development of innovative and short-term technologies of machine parts surface hardening with controlled

composition powder mixtures to ensure the performance properties of products at a high level with a significant reduction in the cost of their production.

Mathematical models and nomograms of existing technologies of steels surface hardening were created to determine the specific conditions of ChTT (temperature and duration) based on a given depth of the diffusion layer or the surface hardness of steels, which significantly affects the efficiency of the strengthening processes.

The general methodological approach of management of technological processes of details surface hardening by powder mixes of the controlled structure at saturation of surface layers with nitrogen, carbon and boron on the basis of use of innovative technologies and the system analysis at the minimum expenses was developed that allowed to increase operational properties of products at considerable reduction of ChTT duration.

ChTT was designed the complex, which significantly reduces the fragility of boriding layers due to a more gradual decrease in hardness from surface to core products from steels to improve the operational properties of the goods and service life of machine parts and tools. It was created a mathematical model of the temperature distribution in the depth of the diffusion layer to determine the nature of the dependencies and obtain data on the temperature distribution in the depth of the product under different processing conditions.

It was improved boriding pastes technology of titanium alloys through the use of nanodispersed environment, thereby reducing the boriding process 2-3 times and to shorten the manufacturing process of components by combining two operations: boriding and titanium alloy hardening. The solutions of boundary value diffusion problems by the boundary element method were proposed, which allowed to create a mathematical model of the distribution of boron concentration over the thickness of the hardened titanium alloy.

The processes of heating by high-frequency currents and due to the preliminary laser treatment of parts were intensified, which allowed to obtain high performance properties of the surface layers with a significant reduction in the duration of treatments.

A comparative analysis of the influence of existing and developed hardening treatments on the change in the depth of the layer, the surface hardness and wear resistance of the surface layer of steel 38Ch2MoAl was done. It was established that the developed complex hardening treatment based on the process of diffusion saturation with boron can provide wear resistance of the surface layers at a high level with abrasive wear.

Keywords: technological process, formation of surface quality of machine parts, integrated and innovative technology, surface strengthening, performance properties, surface hardness, diffusion layer, wear resistance, nanodisperse powder mixture, mathematical modeling.

