

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

**Князев Сергій Анатолійович**



УДК 621.78

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН  
БОРУВАННЯМ ІЗ ШВИДКІСНИМ НАГРІВОМ СВЧ**

Спеціальність – 05.02.01 – Матеріалознавство

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

кандидат технічних наук, професор  
**Погрібний Микола Андрійович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри «Матеріалознавство»

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, доцент  
**Сайчук Олександр Васильович**,  
директор навчально-наукового інституту  
технічного сервісу Харківського  
національного технічного університету  
сільського господарства імені Петра  
Василенка

кандидат технічних наук  
**Олійник Олександр Купріянович**,  
провідний інженер-технолог центральної  
заводської лабораторії Державного  
підприємства «Завод імені В. О. Малишева»

Захист відбудеться «28» квітня 2021 р. о «14:00» годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.832.04 у Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44

Автореферат розісланий «    » березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Є.І. Калінін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одним із напрямків збільшення опору зношуванню деталей машин є створення методом хіміко-термічної обробки (ХТО) на поверхнях шарів з високими експлуатаційними властивостями. Незважаючи на те, що в результаті ХТО значно підвищується зносостійкість виробів, традиційні методи такої обробки мають ряд недоліків, головними із яких є значна тривалість процесу та неможливість в разі потреби локалізувати нагрівання. Ініціювання активності тих процесів ХТО, які направлені на адсорбцію, дифузію активних атомів насичуючої речовини та інших факторів може значно скоротити тривалість ХТО та покращити властивості зміцнюваної поверхні.

Таким активізатором може бути висока швидкість нагрівання, для досягнення якої можливе використання індукційного нагріву струмом високої частоти (СВЧ), замість традиційного, тривалого пічного нагріву. При цьому, використання нагріву СВЧ представляє значну цікавість і новизну з точки зору виявлення та детального дослідження особливостей формування структури та властивостей матеріалу при поверхневому дифузійному насиченню елементами, що зміцнюють, в умовах високих швидкостей нагріву. Специфічною перевагою СВЧ-обробки, в порівнянні з традиційними методами нагріву, є також можливість проведення локального (місцевого) нагрівання, необхідність в якому досить гостро диктується особливостями конструкції виробу, що зміцнюється.

Прикладом виробу, який невідкладно потребує підвищення зносостійкості за рахунок локального зміцнення є робочі лопатки парових турбін, ресурс експлуатації яких, внаслідок ерозійного зношування вхідних кромки залишається на недостатньому рівні. Розроблена на кафедрі матеріалознавства НТУ «ХП» технологія із застосуванням поверхневого індукційного гартування дозволила значно подовжити термін експлуатації таких лопаток. Однак зростання потужності та більш жорсткі умови роботи обладнання вимагають подальшого підвищення його експлуатаційної надійності. Перспективним для вирішення даної проблеми є застосування комплексного підходу, а саме, використання ХТО, наприклад борування, разом з швидкісним нагрівом СВЧ.

Окрім зміцнення лопаток парових турбін, процес ХТО з СВЧ нагрівом (а саме борування) може бути використовуваним для зміцнення інших деталей, наприклад валів, зубчатих коліс, деталей насосів у нафтовидобувній галузі, ріжучого та штампувального інструменту, які в процесі експлуатації також піддаються інтенсивному зношуванню.

Таким чином, тема, запропонована для дисертаційної роботи, є актуальною, представляє практичний інтерес, і, крім того, має значну теоретичну цінність, оскільки механізми впливу прискорюючих факторів на дифузійні процеси ХТО, морфологія боруваних шарів, отриманих шляхом швидкісного нагріву, мало вивчені.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі «Матеріалознавство» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Дослідження за темою дисертаційної роботи виконані відповідно до господарської угоди між АТ «Турбоатом» та кафедри «Матеріалознавства» НТУ «ХП» № 20016 «Вдосконалення технології зміцнення вхідних кромки лопаток парових турбін шляхом нагріву СВЧ» (2010-2012 рр.), одним

з пунктів якої є розробка технології підвищення ерозійної стійкості лопаток парових турбін методом СВЧ борування; відповідно до господарської угоди № 20604 «Дослідження структури і властивостей після термічної та хіміко-термічної обробок конструкційних сталей на модельних зразках виробів для спеціального машинобудування» за 2016 р. між ТОВ ХАДО – Холдінг та кафедрою «Матеріалознавство» НТУ «ХП», і була частиною науково-дослідницької роботи за господарським договором № 20679 (2017 – 2018 рр. ) між ДП ХМЗ «ФЕД» і кафедрою «Матеріалознавство», та науково-дослідницької роботи ДР 0117U0049970.

**Мета дослідження.** Метою роботи є підвищення працездатності деталей машин, які експлуатуються в умовах інтенсивного поверхневого зносу, та розробка ефективної для промислового використання технології зміцнення, основаної на поєднанні локальної хіміко-термічної обробки і швидкісного нагріву струмами високої частоти.

**Завдання дослідження.**

Для вирішення поставленої мети були вирішені такі задачі:

1. Встановити особливості формування структури і властивостей борованого шару при боруванні зі швидкісним нагрівом СВЧ в порівнянні з традиційним пічним боруванням.

2. Вивчити вплив швидкості нагріву на інтенсивність дифузійних процесів під час борування, на кінетику формування структури і властивостей борованих шарів, розробити модель отримання ефективного дифузійного борованого шару для умов швидкісного нагріву.

3. Дослідити характер структури, фазовий склад, твердість, ударну в'язкість та зносостійкість борованих шарів в залежності від режимів борування з використанням швидкісного нагріву СВЧ.

4. Розробити ефективну за складом та технологічними властивостями насичуючу пасту для локального нанесення на поверхню з наступним індукційним нагрівом СВЧ.

5. На основі проведених досліджень запропонувати технологію локального борування з використанням швидкісного нагріву струмом високої частоти для забезпечення високих експлуатаційних властивостей виробів, які працюють в умовах інтенсивного поверхневого зносу.

**Об'єкт дослідження:** технологічний хіміко-термічний процес інтенсифікованого борування вуглецевих та легованих конструкційних сталей з використанням паст для одержання зносостійких поверхневих шарів.

**Предмет дослідження:** підвищення експлуатаційної стійкості деталей машин боруванням із швидкісним нагрівом СВЧ.

**Методи дослідження.** Поставлені в роботі задачі вирішувалися з застосуванням реєстрації термічних кривих процесу швидкісного нагріву з метою встановлення параметрів нагріву: температури, тривалості, швидкості нагріву; комп'ютерного моделювання термічних та дифузійних процесів для підтвердження правильності розрахунків коефіцієнту зернограничної дифузії; металографічного аналізу структури зразків для безпосереднього контролю товщини та морфології структури борованого шару; виміру мікротвердості; рентгенофлуоресцентного аналізу (РФА) для здійснення пошарового аналізу розподілу елементів; рентгеноструктурного

фазового аналізу для встановлення особливостей фазового складу і його порівняння для пічної та СВЧ технології борування; растрової електронної мікроскопії (РЕМ) для визначення морфології і мікроелементного аналізу структурних складових; механічних випробувань на ударний згин з метою підтвердження збереження високих показників в'язкості матеріалу після СВЧ-борування; випробування на зносостійкість; застосування методу математичного планування експерименту для оптимізації технологічних параметрів борування з нагрівом СВЧ. Обробка отриманих даних відбувалась з застосуванням сучасних комп'ютерних пакетів та мікропрограм на їх основі.

**Наукова новизна** полягає в узагальненні та розвитку теорій і практики зміцнення матеріалів з урахуванням та можливістю керування структуроутворенням та дифузійними процесами шляхом оптимізації технологічних параметрів при насиченні бором в умовах швидкісного нагрівання, що дозволяє вирішити актуальну проблему підвищення зносостійкості деталей машин і інструментів.

*Вперше:*

– на основі теоретичних і експериментальних досліджень виявлено особливості дифузійних процесів в поверхневих шарах сталі при боруванні в умовах високих швидкостей нагріву.

– встановлено природу впливу швидкісного нагріву на розвиток дифузії при боруванні, яка полягає в інтенсифікації процесів насичення за рахунок збільшення кількості границь розділу при фазовій перекристалізації, що разом з горофільною природою бору визначає зернограничний механізм дифузії в якості домінуючого і більш динамічного.

– на основі досліджень зв'язків між швидкістю нагріву і особливостями структуро- та фазоутворення запропонована фізико-математична модель отримання ефективного дифузійного борованого шару при збільшенні швидкості нагріву до 1000 °C/с і більше.

*Отримало подальший розвиток:*

– технологія вимірювання і швидкісного збору даних у швидкоплинних процесах нагріву струмами високої частоти, які створюють електромагнітні перешкоди.

*Удосконалено:*

– процес пічного борування шляхом дослідження режимів і складу паст з метою скорочення його тривалості і усунення негативного впливу на матричну структуру матеріалу, поверхня якого обробляється.

– процес формування однофазного борованого шару з метою зменшення крихкості і тріщиноутворення.

– технологію борування з метою зменшення кількості карбідної фази у матричній структурі сталі мартенситного класу з підвищеним вмістом вуглецю.

**Практичне значення.**

1. Розроблену технологію апробовано на АТ “Турбоатом” та рекомендовано в якості нової технології зміцнення кромки лопаток парових турбін на базі існуючого обладнання.

2. Технологію короткочасного пічного борування запропоновано для зміцнення внутрішніх поверхонь деталей спеціального машинобудування на промисловому майданчику ТОВ «ХАДО – Холдінг».

3. Технологію борування з швидкісним нагрівом СВЧ апробовано для зміцнення дробеметних лопаток. Порівняно строк експлуатації лопаток, борованих за новою технологією і лопаток, зміцнених за звичайною технологією термічної обробки. За результатами порівняння технології борування з швидкісним нагрівом СВЧ рекомендовано до впровадження на підприємстві ТОВ «Науково-технічна і фінансово-промислова компанія «ВГІК»».

4. Прикладний характер результатів дисертації також полягає в їх використанні у навчальному процесі НТУ «ХПІ» на кафедрі «Матеріалознавство» при викладенні дисциплін «Автоматизація виробничих процесів», «Хіміко-термічна обробка матеріалів», «Структури та функціональні властивості матеріалів», а також у навчальному процесі на кафедрі матеріалознавства і технології конструкційних матеріалів Сумського державного університету при викладанні дисциплін «Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство», «Металознавство та основи термічної обробки», «Технологія виробництва та обробки матеріалів».

**Особистий внесок здобувача.** Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно та викладено у роботах [1 – 25]. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: визначення напрямків досліджень, проведення підготовки зразків, металографічний аналіз, вимір твердості, аналіз результатів та формування висновків [2, 3, 22]; у роботі [4] проведено підготовку і отримання частини зразків боруванням, металографічний аналіз, обговорення результатів та формування висновків.

**Апробація результатів дисертації.** Результати експериментів, виконаних в рамках дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на серії конференцій MicroCAD (м. Харків, 2010 – 2020 р.р.) у секції «Нові матеріали, комп'ютерна графіка та сучасні технології обробки металів», на Міжнародній заочній науковій конференції «Технические науки: традиции и инновации» (секція «Машинобудування») у м. Челябінськ (2012 р.), на II республіканській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития» секція «Матеріалознавство» у м. Гродно (Білорусь, 2012 р.), на II Міжнародній заочній конференції «Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве» (секція «Нові матеріали, покриття і технології їх нанесення») у м. Орск (2013 р.), на міжнародній конференції «Наука и общество» м. Донецьк (15 лютого 2014 р.), на XI Міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії» м. Харків (20-22 листопада 2019 р.), на 3-ій Міжнародній конференції DSMIE-2020 м. Харків (9-12 червня 2020 р.), на Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні напрями матеріалознавства: збільшення ресурсу конструкцій на основі конвергенції сучасних технологій обробки матеріалів» м. Харків (24-25 вересня 2020 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 25 наукових працях, у тому числі: 7 статей у спеціалізованих наукових виданнях України (з них 3 у виданнях, що включено до міжнародних наукометричних баз – [2, 3, 6]); 1

публікація у закордонному виданні; та 17 матеріалів і тез у збірниках доповідей наукових конференцій.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 226 сторінок у тому числі 2 додатки на 11 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 214 сторінок, містить 109 рисунків, 27 таблиць. Список використаних джерел нараховує 128 найменувань на 11 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність і важливість теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і завдання дослідження, визначені об'єкт і предмет дослідження, викладені основні положення наукової новизни і практичного значення отриманих результатів, надана інформація щодо апробації роботи.

**Перший розділ** присвячений аналізу сучасного стану досліджень щодо підвищення зносостійкості деталей машин шляхом ХТО. Приведений огляд джерел літератури свідчить про те, що насичення поверхневих шарів бором є одним з найефективніших методів поверхневого зміцнення конструкційних сталей. Бориди заліза забезпечують значний рівень твердості, а за товщиною борований шар поступається тільки цементованим шарам. В той же час традиційні методи пічного борування мають ряд недоліків, головними з яких є значна тривалість процесу та неможливість в разі потреби локалізувати нагрівання.

В джерелах літератури зустрічаються дані про намагання вирішення цієї проблеми шляхом використання в процесі борування більш прогресивних методів нагрівання, наприклад, лазерного або індукційного нагрівання. В той же час більшість питань щодо такого поєднання залишаються відкритими або взагалі такими, що не досліджувались. Повністю відсутні уявлення і залежності стосовно впливу головного фактору індукційної обробки СВЧ – швидкості нагріву – на розвиток дифузійних процесів при боруванні, на особливості фазо- та структуроутворення в умовах швидкісного борування, відсутні дані щодо аналізу специфічного впливу швидкості нагріву на експлуатаційні властивості борованих виробів. На цій підставі обґрунтована мета і сформульовані завдання дослідження.

У другому розділі обґрунтований вибір матеріалів та описані методики, які застосовувались в процесі виконання роботи.

Для проведення експериментів були обрані сталі, які широко використовуються в машинобудуванні та турбінобудуванні. Матеріалами для дослідження обрані сталі різних класів та призначень, що дозволило детально вивчити будову дифузійних шарів та вплив вуглецю і легувальних елементів на формування поверхневого шару при боруванні за розробленими технологіями.

Дослідженню підлягали сталі 40, 40X, 15X11МФ, X46Cr13 та 12X18H10T. Борування проводилось з використанням паст, які наносились на поверхню зразків та натурних виробів шари товщиною  $\sim 1$  мм. В процесі експериментів використовувались пасті різних складів, основними компонентами яких були карбід бору, аморфний бор та фтористий натрій. Борування за традиційною технологією проводилося шляхом нагрівання в печі в інтервалі температур 950...1200 °С з витримкою від 15 хв. до 3 годин. Для швидкісного борування використовувався

генератор струмів високої частоти ВЧГ 60-3/0,44, температура нагрівання при цьому варіювалась від 1050 до 1300 °С, а швидкість – від 1000 до 1200 °С/с. Швидкісне борування проводилось без витримки при температурі нагрівання з наступним охолодженням на повітрі або в воді.

Мікроструктуру та товщину дифузійних шарів досліджували методом оптичної мікроскопії на мікроскопі ZEISS AXIO Vert. A1 за стандартною методикою світлого поля з максимальним збільшенням  $\times 1000$ . Твердість зразків визначали на приладі типу ТК (Роквелл) за шкалою А згідно з ГОСТ 9013–95, мікротвердість – на приладі ПМТ-3 при навантаженні 200 г і витримці 10 с за стандартною методикою (ДСТУ ISO 6507-1:2007). Показник мікротвердості дифузійних шарів оцінювали при різних навантаженнях від 20 до 200 г відповідно до шкали ВІАМ за допомогою приладу ПМТ-3, випробування на ударний згин на маятниковому копрі 2130КМ-03. Зношування визначалось виміром втрати ваги при дії твердих прискорених стислим повітрям часток з кутом атаки 45° та 90°. Елементний аналіз проводився на приладах СЕФ-01-М та СЕФ-01-М-1 серії "СПРУТ". Для фазового аналізу застосовували рентгенівський дифрактометр ДРОН-3, для детального структурного аналізу та мікророзподілу елементів растровий електронний мікроскоп Philips XL 30 ESEM з максимальним збільшенням  $\times 8000$ .

Для оптимізації режимів швидкісного борування та побудови моделі інтенсивного насичення поверхні бором при високих швидкостях нагрівання проводили математичне планування експерименту. Для цього обрана математична модель у вигляді неповного поліному другого ступеню

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2, \quad (1)$$

де  $b_0, b_1, b_2$  – коефіцієнти регресії;  $x_1, x_2$  – кодове значення факторів (температури та тривалості борування);  $y$  – критерії оптимізації (твердість та розміри борованих шарів).

**У третьому розділі** приведені результати дослідження впливу традиційного пічного борування на структуру та властивості борованих шарів в залежності від режимів борування та вмісту вуглецю в сталі. Технологію пічного борування досліджено з метою вибору основних реагентів для здійснення ефективного насичення та отримання базових зразків, що використовувались при порівнянні структур та властивостей зразків після технології борування зі швидкісним нагрівом СВЧ.

За даними мікротвердості, металографічного та рентгеноструктурного аналізів можна зробити висновок, що боровані шари на сталі 40Х складаються, головним чином, з бориду  $\text{Fe}_2\text{B}$ . При появі в структурі твердого розчину бору в  $\alpha$ -залізі на відстані 110 – 150 мкм від краю зразків спостерігається падіння мікротвердості до 10000 МПа

На сталі 15Х11МФ у поверхні виявлено зону бориду  $\text{Fe}_2\text{B}$ , що щільно зчеплена з основним металом і простягається на глибину приблизно 80 мкм. Мікротвердість цієї ділянки вища, ніж на сталях 40 та 40Х, і складає  $H_{200} \approx 22500$  МПа. З результатів дослідження можна зробити висновок, що карбід бору є ефективнішим джерелом атомів бору у складі паст, що діє в умовах окисного середовища і по насичуючій здатності переважає аморфний бор.



Борування високолегованої сталі X46Cr13 з підвищеним складом вуглецю (до 0,5 %), на відміну від 40 та 40X, призводить до формування двофазного стану (рис. 1) з утворенням боридів FeV та Fe<sub>2</sub>V. Шар FeV схильний до сколювання і є небажаним (рис. 2), однак його присутність показує високий потенціал насичення при дисоціації борскладової речовини.



Рисунок 1 – Мікроструктура двофазного борованого шару на сталі X46Cr13, борованої з пасти

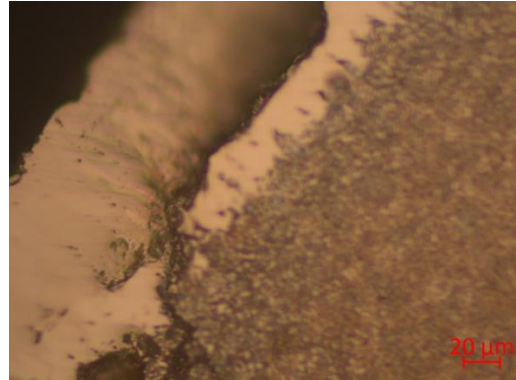
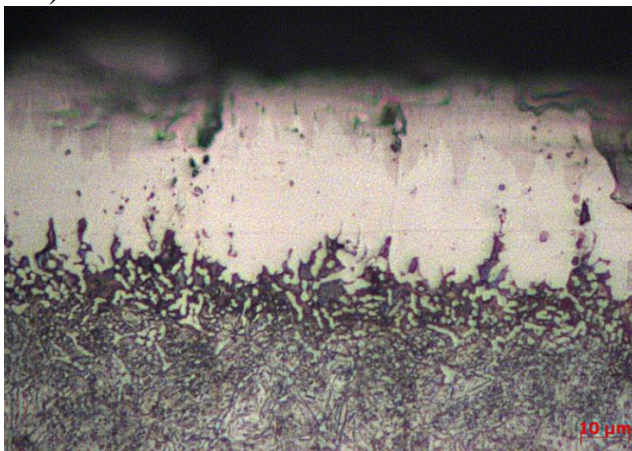


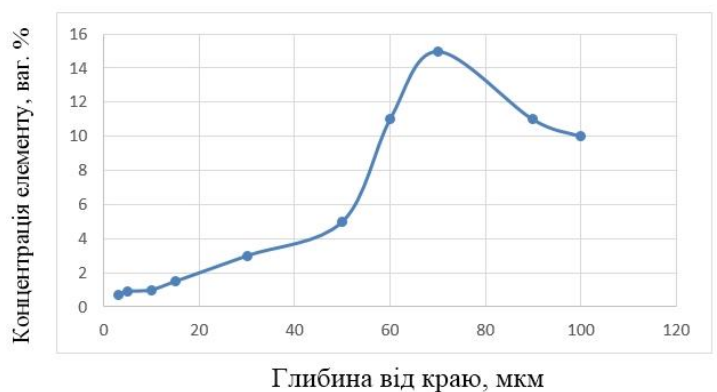
Рисунок 2 – Мікроструктура в місці сколювання бориду FeV

Борування зі ступеневим нагрівом, при якому спочатку відбувається нагрів до 1000 °С з подальшим зниженням температури обробки до 830 °С, дозволяє отримати більші за розмірами боровані шари з мінімальним укрупненням зерна основного матеріалу, яке відбувається внаслідок збиральної рекристалізації. Таким чином, у першому наближенні, така схема обробки показує існування потенційних шляхів вдосконалення процесу борування. Збільшення витримки при 1000 °С з 15 хв. до 30 хв. призводить до укрупнення зернової структури внаслідок збиральної рекристалізації, що є одним з головних недоліків пічного борування, яке погіршує характеристики міцності матеріалу.

Борування високолегованої сталі 15X11МФ з малим вмістом вуглецю (0,15%) з використанням пасти, призводить до формування меншої кількості бориду FeV (рис. 3 а).



а



б

Рисунок 3 – Мікроструктура борованого шару на сталі 15X11МФ (а) та розподіл хрому (б) у борованому шарі

Дослідження розподілу легуючих елементів в борованому шарі, здійснене з пошаровим поліруванням (рис. 3 б) показало, що хром присутній у приповерхневих шарах концентрується у перехідному підшарку під зоною боридів. Такий перерозподіл свідчить про наявність зустрічної дифузії з формуванням більш твердого підшарку, ніж у сталях без хрому. Молібден та ванадій розчиняється тільки у фазі типу  $Me_2B$ , підвищуючи її мікротвердість.

Як виявили досліди з короткочасним високотемпературним боруванням, найефективнішою є паста з підвищеним вмістом активатору на основі 60% карбиду бору та 40% NaF. В цілому, дослідження по пічному боруванню показали потенційну можливість скорочення процесу борування.

Крім того, як показали дослідження, суцільна морфологія боридів, особливо при формуванні бориду  $FeB$ , неприйнятна для умов контактного навантаження та кавітаційної дії технологічного середовища на поверхні деталей внаслідок значної крихкості.

У четвертому розділі приведені результати дослідження особливостей фазового складу, структури та властивостей борованих шарів, отриманих в умовах швидкісного нагрівання СВЧ.

Борований шар, отриманий на сталі мартенситного класу (рис. 4а) з пасти, має високі значення товщини дифузійного шару (235 мкм), і переважає по товщині борований шар отриманий за традиційною пічною технологією нагріву (40 мкм) (рис. 4 б). Під дифузійною зоною розташована зона гартування, яка являє собою твердий підшарок. Як видно з графіку (рис. 4 в), борований шар, отриманий при швидкісному нагріві СВЧ, хоча і поступається за мікротвердістю борованому шару, отриманому при пічному нагріві, однак має більш плавний характер зміни мікротвердості по глибині, що призводить до зменшення крихкості поверхневих зміцнених шарів.

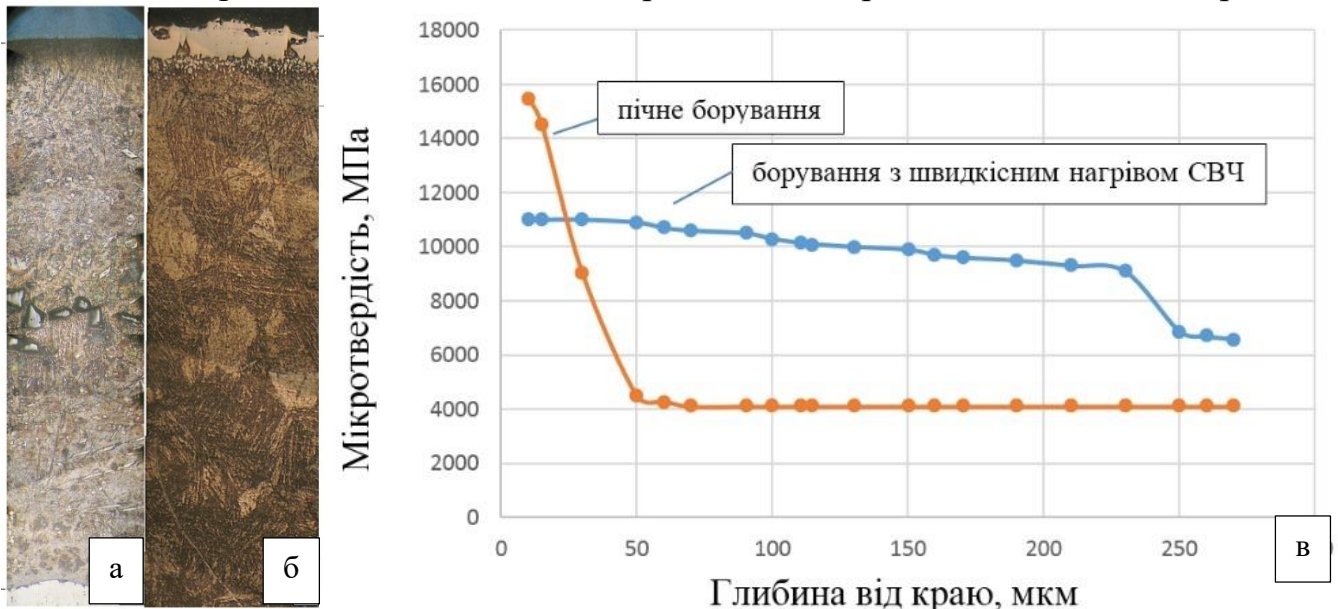


Рисунок 4 – Панорами мікроструктур по глибині шару отримано з застосуванням швидкісного нагріву СВЧ (а), та пічного нагріву (б), зміна мікротвердості по глибині борованих шарів, отриманих за різною технологією нагріву (в)

Зміна морфології борованого шару в залежності від швидкості нагріву представлена на рис. 5 - 6.

На вуглецевих конструкційних сталях, при високій температурі (1300 °C і вище), часто формується структура евтектики і боридів з заокругленими гранями, які при порівняно низьких швидкостях нагрівання (100 – 350 °C/c) утворюють дендритний скелет (рис. 5). При більш нерівноважних умовах (500 – 1000 °C/c) формування борованого шару, на високолегованих сталях мартенситного класу, утворюється структура ізольованих боридів з правильними прямокутними гранями типу  $\text{Fe}_2\text{B}$ , високодисперсними карбоборидами та твердим розчином бору у залізі в якості матриці (рис. 6).

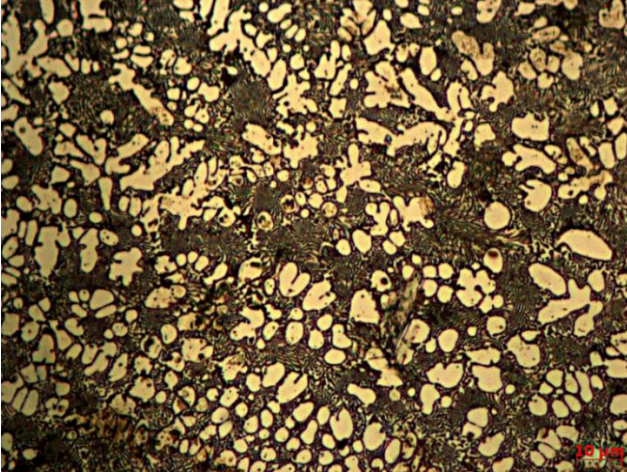


Рисунок 5 – Мікроструктура евтектики і боридів на сталі 40X при менш рівноважних умовах ( $V_H = 100 - 350 \text{ }^\circ\text{C/c}$ )



Рисунок 6 – Мікроструктура бориду, карбоборидів та твердого розчину на сталі 15X11MF при більш нерівноважних умовах ( $V_H = 500 - 1000 \text{ }^\circ\text{C/c}$ )

При зменшенні концентрації бору, кількість карбоборидів може помітно зменшуватись, що закономірно призводить до збільшення пластичності шару. При режимах термоциклювання «нагрівання-охолодження» спостерігається збільшення кількості та укрупнення карбоборидної фази. Самі карбобориди формують ланцюги від великих боридів.

Шляхом рентгеноструктурного аналізу борованих шарів (рис. 7), отриманих при швидкісному нагріві СВЧ, виявлено твердий розчин на основі заліза, невелику кількість бориду типу  $\text{FeB}$  (сліди), борид типу  $\text{Fe}_2\text{B}$ , карбоборид  $\text{Fe}_{23}(\text{C,B})_6$ .

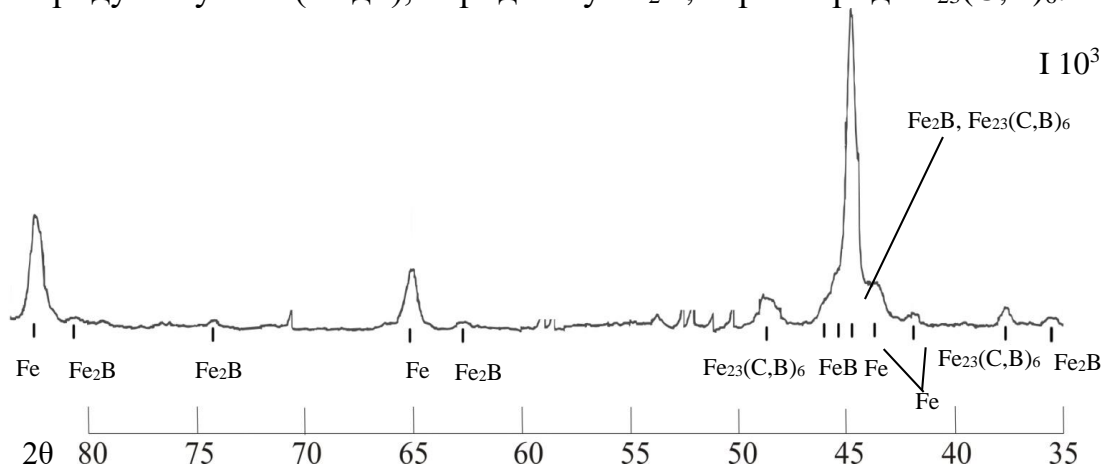
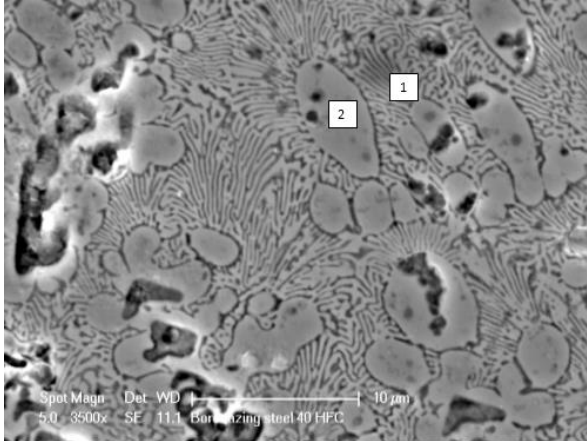


Рисунок 7 – Дифрактограма борованого зразка, отриманого з нагріванням СВЧ

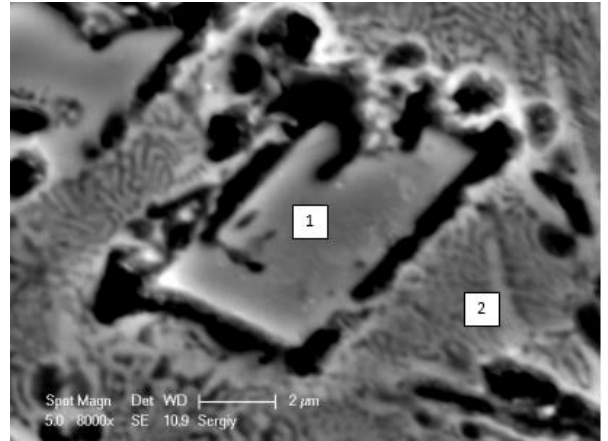
Отримані боровані шари мають гетерогенну структуру, матриця якої - твердий розчин бору в залізі, з середньою мікротвердістю 4000 МПа, та включенням боридів  $Fe_2B$  та карбоборидів типу  $Fe_{23}(C,B)_6$ . Мікротвердість скупчень  $Fe_{23}(C,B)_6$  досягає 7000 МПа, а  $Fe_2B$  – 14000 МПа.

Розподіл елементів по структурі засвідчив підвищену концентрацію хрому у борованих шарах, особливо у сталі 40Х (рис. 8 - 10).



Точки	Елементний склад, ваг. %				
	Fe	Cr	Mn	B	C
1	94,35	0,5	0,6	3,8	0,24
2	89,1	1,95	0,04	8,1	-

Рисунок 8 – Структура і елементний склад борованого шару на сталі 40Х, отриманого при швидкості нагрівання 150 °С/с (x 3500)



Точки	Елементний склад, ваг. %				
	Fe	Cr	Mn	B	C
1	91,3	0,1	0,07	8,9	-
2	94,6	1,5	0,6	3,1	0,35

Рисунок 9 – Структура і елементний склад борованого шару на сталі 40Х, отриманого при швидкості нагрівання 1000 °С/с (x 8000)

Збільшення швидкості нагріву з 150 °С/с до 1000 °С/с призводить до зміни морфології структури, яка полягає в усуненні структури регулярної евтектики, що як правило, має понижену мікротвердість (8000 – 9500 МПа).

При боруванні з швидкістю нагріву 1000 °С/с на сталі 15Х11МФ, утворюється морфологія структури, подібна до морфології, що представлена на рис. 9, а розподіл елементів структурних складових підтверджує їх приналежність до твердого розчину бору у залізі та легуючих елементів, карбоборидів та бориду типу  $Fe_2B$  з достатньо точною стехіометрією (таблиця 1).

Таблиця 1 – Елементний склад структурних складових на сталі 15Х11МФ при швидкості нагрівання 1000 °С/с і температурі 1200 °С

Структури	Елементний склад, ваг. %						
	Fe	Cr	Mo	V	Si	B	C
Твердий розчин	86,16	10,67	1,49	0,57	0,17	сліди	0,03
Карбоборид	80,07	11,99	0,6	0,41	-	6	0,91
Борид	78,35	12,02	-	0,62	-	8,3	-

Встановлено, що при великих швидкостях нагрівання ( $1000\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ), зустрічної дифузії хрому не відбувається внаслідок короткочасності процесу і його концентрація локально не збільшується, як це спостерігалось у випадках з пічним нагрівом.

Для виявлення механізму дифузії бору, при різних швидкостях нагріву, було проведено експерименти по боруванню аустенітної сталі 12X18H10T. Як видно з рис. 10 а, дифузійне проникнення бору відбувається по границям зерен. Верхня частина структури борованого зразка після пічного борування, в більшості випадків, сколюється, внаслідок того, що поверхневий шар дуже крихкий і пористий. Він складається з боридів і великої кількості пор, які утворилися у зв'язку з надмірною активністю пасти. Глибше шар складається з зерен легованого аустеніту і боридної фази  $\text{Fe}_2\text{B}$  по границям зерен (рис. 10 б).

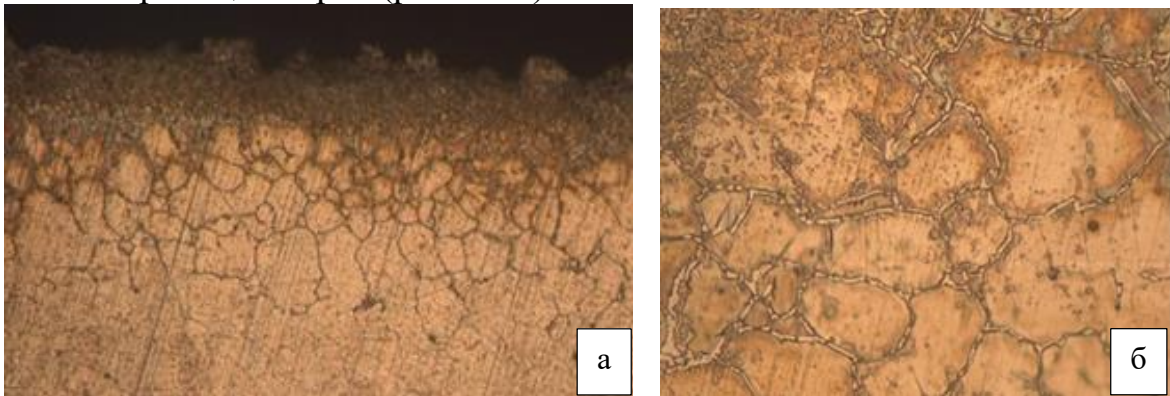


Рисунок 10 – Мікроструктури сталі 12X18H10T після борування з нагрівом СВЧ (а) та пічного борування (б)

Боровані шари, отримані на аустенітній сталі, є добрим демонстратором прояву механізму дифузії бору. Бор є горючим елементом і намагається виділитись та дифундувати по границям зерен. При швидкісному нагріві СВЧ, коли реалізується подрібнення зерен та збільшення границь поділу, складаються сприятливі умови до зернограничної дифузії бору у сталі, що і проявляється у значній дифузії бору.

Окремий інтерес представляє використання дифузійного борованого шару у якості проміжного між нітридом хрому, нанесеного вакуумно-дуговим осадженням, та м'якою аустенітною сталлю. В процесі дослідження перед нанесенням покриття CrN сталь піддавали боруванню з нагрівом СВЧ. В результаті такої обробки на поверхні формується шар CrN товщиною  $\approx 5\text{ мкм}$  та борований прошарок товщиною до  $20\text{ мкм}$ , який є перехідною структурою між дуже твердим нітридом хрому і м'якою підкладкою, що зменшує продавлювання при великих контактних навантаженнях та ризик сколювання поверхневого напиленого шару з нітриду хрому. Досягнуте в результаті такої обробки дифузійне проникнення бору по границям зерен, у вигляді «проростів» боридної фази, збільшує зчеплювання поверхневих шарів з матричним металом і, таким чином, призводить до збільшення адгезійної міцності покриття.

Для оцінки впливу швидкості нагріву на ударну в'язкість проведено випробування на ударний згин після різних варіантів борування. Порівняння даних по ударній в'язкості сталі 15X11МФ після пічного та швидкісного борування (рис. 11) засвідчили, що після швидкісного борування СВЧ ударна в'язкість збільшується на 16 - 30 %, ніж при пічному боруванні.

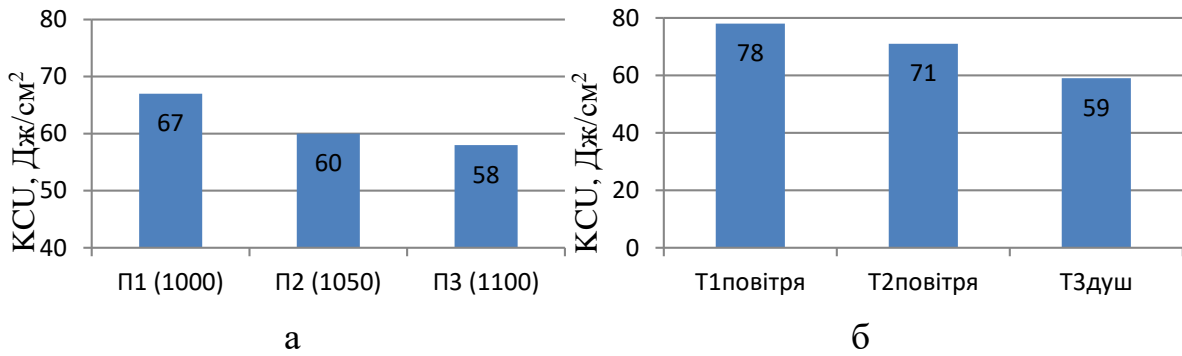


Рисунок 11 – Значення ударної в'язкості зразків із сталі 15X11МФ після борування у печі (а) та швидкісного нагріву СВЧ (б)

Встановлено і експериментально підтверджено параметри зернограничної дифузії для різних варіантів нагріву:  $D^{B^1}_O = 0,18346 \text{ см}^2/\text{с}$  - для швидкісного нагрівання СВЧ;  $D^{B^2}_O = 0,02036 \text{ см}^2/\text{с}$  - для пічного нагрівання. Отримані коефіцієнти є ключовими для моделювання концентраційного розподілу бору в умовах нерівноважного формування дифузійного шару і, відповідно, для прогнозування фазового складу, структури та властивостей борованих поверхонь при високих швидкостях їх нагрівання. Співвідношення результатів моделювання розподілу бору по глибині співпадає з експериментальними даними (рис. 12). Шляхом проведення експериментів з математичним плануванням створена математична модель з геометричною оптимізацією (рис. 13).

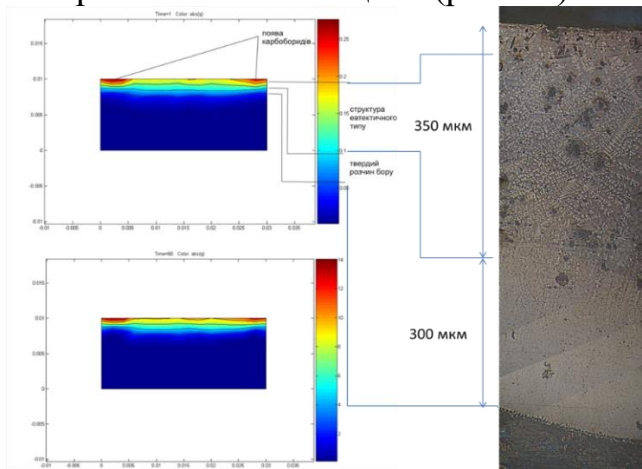


Рисунок 12 – Результати моделювання швидкісного дифузійного проникнення бору за механізмом зернограничної дифузії та порівняння експериментальних даних

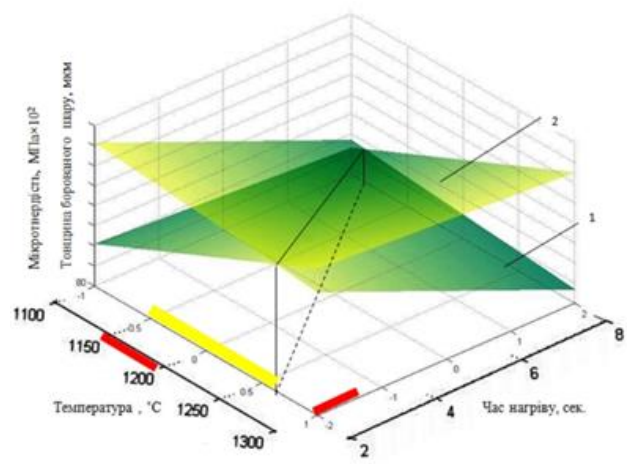


Рисунок 13 – Геометрична оптимізація результатів експерименту з виділеними зонами умовно оптимальних режимів нагрівання, де 1 - зміна мікротвердості, 2 - зміна товщини

Математичне планування експерименту з побудовою математичної моделі дозволило оцінити вплив параметрів процесу швидкісного борування на рівень мікротвердості та глибину зміцненого шару. Отримані рівняння характеризують залежність показників зміцнення від параметрів швидкісного борування:

$$Y_h = -182,3 + 0,26t - 1,3\tau \quad (2)$$

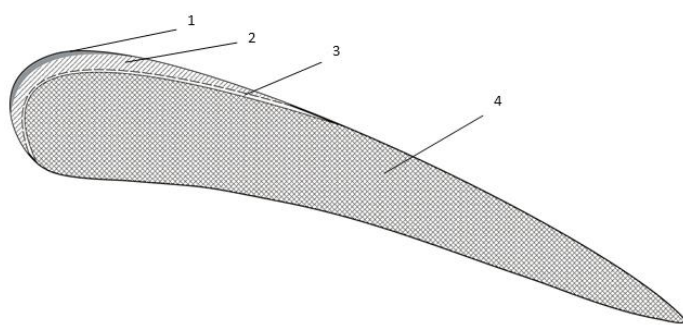
$$Y_{HV} = 22480 - 5,03t - 909\tau \quad (3)$$

де  $Y_b$ ,  $Y_{HV}$  – показники глибини та твердості, що прогноуються;  $t$  – температура нагріву;  $\tau$  – час нагріву. З отриманих рівнянь можна зробити висновки, що головним фактором отримання більш твердих та значних за розмірами борованих шарів є зменшення часу нагріву, тобто збільшення швидкості нагріву. Коефіцієнти рівнянь показують, що збільшення швидкості нагріву саме через зменшення часу, а не внаслідок підвищення температури є більш ефективнішою дією. Застосувавши вирази (2) і (3), отримані шляхом математичного планування експериментів, і побудувавши площини перетину (рис. 13) були встановлені оптимальні параметри обробки. Для сталі 15X11МФ температура формування шарів повинна знаходитись у межах 1150 – 1250 °С зі швидкістю нагріву у межах 1000 – 1100 °С/с.

**П'ятий розділ** присвячений практичному використанню борування зі швидкісним нагрівом СВЧ для поверхневого зміцнення виробів, які експлуатуються в умовах інтенсивного зношування. Для дослідження були обрані деталі, в яких традиційними методами зміцнення важко забезпечити досягнення необхідної зносостійкості, а саме, робочі лопатки парових турбін та дробеметні лопатки.

Інтенсивне зносостійке зношування вхідних кромок лопаток парових турбін призводить до суттєвого зменшення ресурсу експлуатації таких виробів. Проведені дослідження показали, що вирішення даної проблеми можна досягти застосовуючи комплексний підхід, а саме, використовуючи борування разом зі швидкісним нагріванням СВЧ. Крім того, використання для борування насичуючих паст, які можна наносити локально на вхідну кромку лопатки, дозволяє поєднати борування і швидкісний нагрів СВЧ в межах однієї технології протиерозійного зміцнення лопаток, яка в даний час застосовується на АТ «Турбоатом».

В результаті металографічних та дюрOMETричних досліджень натурних лопаток зі сталі 15X11МФ встановлено, що борування в умовах швидкісного нагрівання дозволяє отримати на вхідній кромці лопатки багатошарову композицію (рис. 14) з власне борованого шару та перехідного прошарку високої твердості (рис. 15).



1 - борований шар; 2 - загартований шар; 3 - перехідна зона; 4 - основний матеріал лопатки

Рисунок 14 – Схема формування захисного ерозійностійкого шару на вхідній кромці лопатки турбіни в процесі борування з використанням швидкісного нагріву СВЧ

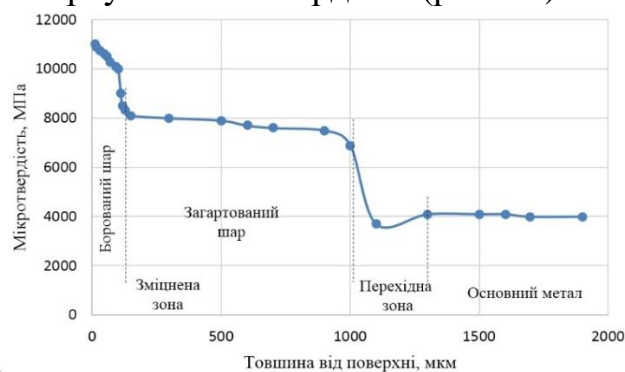


Рисунок 15 – Розподіл мікротвердості по перетину вхідної кромки лопатки турбіни після швидкісного борування з нагрівом СВЧ

Така структура та властивості зміцненого шару будуть сприяти ефективному підвищенню ерозійної стійкості лопаток, оскільки відносно пластична матриця твердого розчину бору в залізі здатна до дисипації енергії кавітаційних мікроударів, в той час, як тверді дисперсні частки боридів та карбоборидів зміцнюють матричну фазу та надійно екранують поширення руйнівної дії кавітації вглиб матеріалу. Цьому сприяє і наявність додаткового загартованого шару з мартенситною структурою, який забезпечує підвищену твердість на глибині до 1000 мкм. Експериментальні випробування показали, що зносостійкість матеріалу лопаток зі сталі 15X11МФ, після поверхневого зміцнення та застосування розробленої технології, зростає у 1,5 рази. При заміні існуючої технології обробки кромки лопаток парової турбіни з гартування на борування з нагрівом СВЧ, економічний ефект досягає 25 тис. грн. на одній лопатці внаслідок подовження строку експлуатації.

Проведено апробацію технології борування з нагрівом СВЧ на дробеметних лопатках. Показано, що заміна вже існуючих технологій зміцнення на борування з швидкісним нагрівом СВЧ, дозволяє отримати значний економічний ефект внаслідок підвищення експлуатаційних властивостей. Суттєве подовження строку активної експлуатації призводить до економічного ефекту у 500 тис. грн. при виготовленні 120 лопаток.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлені науково обґрунтовані результати досліджень, які забезпечують вирішення актуальної науково-технічної задачі – підвищення зносостійкості деталей машин шляхом дифузійного насичення бором в умовах швидкісного нагрівання, за рахунок комплексного використання локальної хіміко-термічної обробки і нагріву струмами високої частоти. Отримані результати дозволили сформулювати основні теоретичні та науково-практичні висновки:

1. На основі аналізу джерел інформації отримано уявлення про ступінь вивчення процесів борування, які традиційно використовуються для зміцнення деталей машин, і встановлена недостатність існуючих технологій борування, котрі б давали можливість активізувати процеси формування більш ефективних дифузійних шарів з високою зносостійкістю. Виявлена відсутність теоретичних моделей процесів насичення бором в умовах високих швидкостей нагріву, відомі методи борування з індукційним нагрівом малоефективні і не мають теоретичного обґрунтування. Проведений аналіз надав початкову інформацію щодо базових режимів борування та показав актуальність подальших теоретичних досліджень і експериментальних розробок в даній галузі;

2. Експериментально встановлено, що насичуючий елемент – бор, в умовах швидкісного нагріву, може дифундувати на значну глибину - до 350 – 600 мкм від поверхні у вуглецевій та високолегованій сталі, що суттєво перевищує можливості традиційних методів борування. На основі результатів аналізу особливостей структуро- та фазоутворення встановлено, що природа такого впливу швидкості нагріву на дифузійні процеси при боруванні полягає у створенні сприятливих структурних факторів збільшення кількості границь розділу при фазовій перекристалізації, що разом з горофільною природою бору визначає зернограничний механізм дифузії в якості домінантного, зі збільшеною інтенсивністю насичення, в порівнянні з традиційним процесом борування;



3. Теоретично обґрунтована та запропонована модель отримання дифузійного борованого шару при підвищенні швидкості нагрівання до 1000 і більше градусів Цельсія за секунду. Встановлено взаємозв'язок між швидкістю нагріву, структурними параметрами сталі, глибиною проникнення бору, параметрами дифузії та концентраційним розподілом дифундуючого елемента, що дозволяє прогнозувати структурний стан борованого шару і, відповідно, основні показники його якості (товщину, мікротвердість, напруження сколювання, зносостійкість);

4. На підставі результатів металографічного, рентгеноструктурного аналізів, дослідження РЕМ, виявлені особливості структури і фазового складу борованих шарів, отриманих зі швидкісним нагрівом СВЧ. Встановлено, що склад борованого шару, в цьому випадку, суттєво відрізняється від традиційного наявністю твердого розчину бору в залізі у вигляді фонові фази, або у вигляді окремих зон з витягнутою по дифузійному потоку зеренною структурою, карбоборидів підвищеної дисперсності та додаткових фаз: карбід бору, імпортованого з насичуючої пасти чи сформованого в глибині шару, борцементиту, ізольованих один від одного боридів типу  $Me_2B$ , евтектичних композицій твердого розчину та бориду;

5. Встановлено, що боридні шари, отримані шляхом швидкісного нагріву СВЧ, на відміну від традиційного нагрівання, не мають негативного впливу на ударну в'язкість сталей, що досліджувались. В окремих випадках, наприклад, при боруванні з нагрівом СВЧ аустенітної сталі, ударна в'язкість навіть збільшується, за рахунок стримання, в умовах високих швидкостей нагріву, процесів збиральної рекристалізації та зміцнення границь зерен бором;

6. Встановлено, що напруга сколювання борованого шару, отриманого за допомогою швидкісного нагріву СВЧ, в декілька разів більша, ніж борованого шару, отриманого традиційними методами борування у печі чи електролітично, що свідчить про його більшу пластичність і здатність протистояти мікроударному та абразивному зношуванню;

7. Розроблено та оптимізовано технологію отримання суцільного борованого шару на виробках із вуглецевої і високолегованої сталі із застосуванням швидкісного нагріву СВЧ та безперервно-послідовним переміщенням деталі по відношенню до індуктора. Встановлено, що для реалізації ефективного процесу борування необхідно підтримувати температуру процесу в межах від 1100 °C до 1350 °C з питомою потужністю індукційного генератора СВЧ від 0,45 до 0,6 кВт/мм<sup>2</sup>, що забезпечить середню швидкість нагріву в поверхневих шарах виробу не менше 1000 °C/с; швидкість переміщення деталі повз індуктор не повинна перевищувати 11 мм/с, з дотриманням зазору між індуктором і поверхнею приблизно 1 мм; необхідно використовувати обладнання для індукційного нагріву з частотою не меншою за 440000 Гц, що забезпечує виділення необхідної енергії у поверхневому шарі (скін-шарі), який по товщині буде співпадати з теоретичною глибиною проникнення бору при швидкісному нагріві;

8. Запропонований, досліджений та рекомендований для борування, з метою підвищення зносостійкості, новий склад насичуючої пасти, який відрізняється від традиційних тим, що для активації процесу дисоціації борвмісної речовини у складі значно збільшено кількість активатору NaF до 40 %. З метою додаткового захисту від окислення в якості борскладової речовини обрано карбід бору. В якості зв'язуючої

добре зарекомендували себе водні розчини клею КМЦ або рідкого скла з загальною часткою не більше 10 % від загального складу пасти;

9. Встановлено і експериментально підтверджено параметри зернограничної дифузії для різних варіантів нагріву:  $D^{B^1O} = 0,18346 \text{ см}^2/\text{с}$  - для швидкісного нагрівання СВЧ;  $D^{B^2O} = 0,02036 \text{ см}^2/\text{с}$  - для пічного нагрівання. Отримані коефіцієнти є ключовими для моделювання концентраційного розподілу бору в умовах нерівноважного формування дифузійного шару і, відповідно, для прогнозування фазового складу, структури та властивостей борованих поверхонь при високих швидкостях їх нагрівання.

10. Досліджена можливість використання комплексного борування насичуючою пастою в поєднанні зі швидкісним локальним нагрівом СВЧ для реальних деталей (лопаток турбін, дробеметних лопаток, косметичного інструменту тощо). Для вказаних виробів досягнуто підвищення зносостійкості у 1,5 – 4 рази. Очікувальний економічний ефект при зміцненні однієї лопатки парових турбін складає 25 тис. грн. При зміцненні 120 дробеметних лопаток економічний ефект складає 500 тис. грн.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Погрібний М.А., Князев С.А. Борування конструкційних сталей з використанням насичуючих паст. *Металознавство та обробка металів*. 2011. № 1. С. 33–38.

2. Sobol O., Andreev A., Stolbovoy V., Knyazev S., Barmin A., Krivobok N. Study of the effect of ion nitriding regimes on the structure and hardness of steel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 2, Is. 5. P. 63–68.

3. Postelnyk H., Knyazev S., Meylekhov A., Stolbovoy V., Kovteba D. A study of an effect of the parameters of niobium-based ion cleaning of a surface on its structure and properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 1/5 (85). P. 34–39.

4. Mikhailov I.F. Baturin A.A. Mikhailov A.I. Knyazev S.A. Light element depth distribution by the intensity ratio of incoherent and coherent scattering. *X-Ray Spectrometry*. 2019. P. 1–7.

5. Knyazev S.A. Features of structure formation of surface layers with high content of boron on steel 15X11MФ in the conditions of furnace and induction heating. *Ceramics: Science and Life*. 2020. № 2 (47). P. 26–30.

6. Knyazev S., Rebrova O., Riumin V., Nikichanov V., Rebrova A. Establishment of structure and operational properties of boried layers on 40X steel obtained from paste by induction heating. *Functional Materials*. 2021. Vol. 28, Is. 1. P. 76 – 83.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Князев С.А., Погрібний М.А. Дослідження технологічних умов та кінетики отримання суцільного шару при боруванні малолегованої конструкційної сталі з використанням швидкісного нагріву струмом високої частоти (СВЧ). *XVIII Міжнародна науково-практична конференція Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*. Ч. II. Харків. НТУ «ХПІ». 2010. С. 26

8. Князев С.А., Погрібний М.А. Уточнення фізико-математичної моделі дифузії бору у дрібнозернисту структуру сталі при швидкісному нагріві. *XIX Міжнародна*

науково-практична конференція *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*. Ч. II. Харків. НТУ «ХПІ». 2011. С. 21

9. Князев С.А., Погрібний М.А. Вплив зернистості насичуючого порошку при боруванні високолегованої сталі методом швидкісного нагріву. *XX Міжнародна науково-практична конференція Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*. Ч. II Харків. 2012. НТУ «ХПІ». С. 21

10. Князев С.А., Погребной Н.А. Разработка технологии упрочнения паротурбинного оборудования путем борирования с высокоскоростным нагревом ТВЧ. *Международная заочная научная конференция «Технические науки: традиции и инновации»*. Челябинск, 2012. С. 125 – 127

11. Князев С. А. Борирование со скоростным нагревом ТВЧ – как способ повышения эрозионной стойкости кромок лопаток паровых турбин. *II республиканская научно-техническая конференция с международным участием «Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития»* (Гродно, Біларусь, 2012 р.) С. 25 - 27

12. Князев С.А., Погрібний М.А. Порівняння структур та фазового складу борованих шарів отриманих в рівноважних та не рівноважних умовах термічної обробки. *XXI Міжнародна науково-практична конференція Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*. Ч. II. Харків. НТУ «ХПІ». 2013. С. 25

13. Князев С.А. Борирование стали 40Х с импульсным нагревом ТВЧ. *Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве: материалы II Международной заочной конференции*. Орск 2013 р. С. 46

14. Князев С.А. Особенности структур борированного слоя, полученного с использованием скоростного нагрева токами высокой частоты. *Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием «Инновации в материаловедении»* Москва, 2013 г. С. 147

15. Князев С.А., Вуець О.Є. Комплексна хіміко-термічна та термічна обробка для підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин *XXII Міжнародна науково-практична конференція Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*. Ч. II. Харків. НТУ «ХПІ». 2014. С. 26

16. Волков О.А., Князев С.А., Журбий А.А. Упрочнение ювелирного инструмента с помощью борирования из паст. *Наука и общество: Международная конференция*. Ч.1. г. Донецк, 15 февраля 2014. С. 33 - 36

17. Князев С.А., Вуець А.Е. Проблемы поверхностного упрочнения в контексте практического применения. *Міжнародна конференція Наука та сучасність: виклики XXI століття*. Ч. II Київ. 2014. С. 74 - 77

18. Князев С.А. Зміцнення ножів-молотків з інструментальної сталі 65Г шляхом борування з паст. *XXIII Міжнародна науково-практична конференція Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*. Ч. 1. Харків. НТУ «ХПІ». 2015 С. 329

19. Кавун Д.В., Князев С.А. Вибір матеріалу і розробка технології зміцнення для лопаток дробометних установок. *XXIV Міжнародна науково-практична конференція Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*. Ч. I. Харків. НТУ «ХПІ». 2016. С. 337

20. Князев С.А., Реброва О.М. Практика борування сталі Х46Сr13 з одночасним поліпшенням механічних характеристик, шляхом максимального розчинення карбідної фази *XXVII Міжнародна науково-практична конференція Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*. Харків. НТУ «ХПІ». 2019. С. 298

21. Князев С.А., Реброва О.М., Єфименко Н.В. Встановлення механічних характеристик після борування ауθενітної сталі 1.4301. *XXIX Міжнародна науково-практична конференція Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*. Харків. НТУ «ХПІ». 2020. С. 280

22. Postelnyk H., Sobol' O., Chocholaty O., Knyazev S. Structure and corrosion resistance of vacuum-arc multi-period CrN/Cu coatings. *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange: Book of Abstracts of the 3rd International Conference*, Kharkiv, Ukraine, June 9-12, 2020. P. 109.

23. Князев С.А. Зміцнення ножів зі сталі 20Х13 шляхом борування з паст. *Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні напрями матеріалознавства: збільшення ресурсу конструкцій на основі конвергенції сучасних технологій обробки матеріалів»*. Харків, 24-25 вересня 2020. С. 90 – 93.

Праці, які додатково відображують наукові результати дисертації:

24. Князев С.А. Визначення складу пасти для формування зміцнених шарів на сталі мартенситного класу шляхом комбінованої обробки. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2020, № 21. С. 229-234.

25. Князев С.А. Встановлення показників ударної в'язкості на сталі мартенситного класу після пічного борування з паст. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2021, № 23. С. 188-193.

## АНОТАЦІЯ

**Князев С. А.** Підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин боруванням із швидкісним нагрівом СВЧ.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство. – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Міністерство освіти і науки України, Харків – 2021.

У дисертаційній роботі виконана науково обґрунтована розробка технологічного комплексу зміцнення вуглецевої та легованих конструкційних сталей з поєднанням методу хіміко-термічної обробки та індукційного нагріву, що дозволило забезпечити суттєве підвищення їх поверхневої твердості, зносостійкості, не знижуючи при цьому показники ударної в'язкості.

Основним завданням роботи було визначення взаємозв'язку між технологічними параметрами швидкісного нагріву СВЧ та дифузійного насичення, формуванням структури та властивостями сталей, зміцнених боруванням. При дослідженні вирішена задача впливу режимів нагріву і складу пасти, що насичує поверхню сталі бором. Представлені фотографії мікроструктур, які показують зміни морфології структури в основному у поперечному перерізі зразків. Дифузійний шар суттєво відрізняється від матричної структури в основному за рахунок формування

боридів і карбоборидів, що підтверджено вимірюванням мікротвердості. Додатково, на складних за морфологією структурах борованих шарів при швидкісному нагріві, проводились дослідження фазового складу і розподіл елементів у мікрооб'ємі. Встановлено, що при умовах нестационарного нагріву формуються структури, які суттєво відрізняються від структур традиційних борованих шарів. Вони можуть мати дендритну будову, складатись з ізольованих боридів і карбоборидів у твердому розчині бору в залізі тощо. Встановлено, що відсутність суцільного шару боридів хоча і зменшує мікротвердість шару, але сприяє підвищеній зносостійкості в умовах відсутності сколювання.

**Ключові слова:** хіміко-термічна обробка (ХТО), струми високої частоти (СВЧ), борування, мікротвердість, паста, боровані шари, швидкісний нагрів, дифузія, зносостійкість, ударна в'язкість.

## АННОТАЦИЯ

**Князев С. А.** Повышение эксплуатационных свойств деталей машин борированием со скоростным нагревом ТВЧ.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. – Национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенка, Министерство образования и науки Украины, Харьков – 2021.

В диссертационной работе выполнена научно обоснованная разработка комплекса упрочнения углеродистой и легированных конструкционных сталей, с сочетанием метода химико-термической обработки и индукционного нагрева, что позволило обеспечить существенное повышение их поверхностной твердости, износостойкости, не снизив при этом показатели ударной вязкости.

Основной задачей работы было определение взаимосвязи между технологическими параметрами скоростного нагрева ТВЧ и диффузионного насыщения, формированием структуры и свойствами сталей, упрочненных борированием. При исследовании решена задача влияния режимов нагрева и состав пасты, насыщающей поверхность стали бором. Представлены фотографии микроструктур, которые показывают изменения морфологии структуры, в основном в поперечном сечении образцов. Диффузионный слой существенно отличается от матричной структуры, в основном за счет формирования боридов и карбоборидов, что подтверждено измерением микротвердости. Дополнительно, на сложных по морфологии структурах борированных слоев, при скоростном нагреве, проводились исследования фазового состава, распределение элементов в микрообъемах. Установлено, что при условиях нестационарного нагрева, формируются структуры существенно отличающиеся от структур традиционных борированных слоев. Они могут иметь дендритное строение, состоять из изолированных боридов и карбоборидов в твердом растворе бора в железе и прочее. Установлено, что отсутствие сплошного слоя боридов, хотя и уменьшает микротвердость слоя, но способствует повышенной износостойкости в условиях отсутствия скалывания.

**Ключевые слова:** химико-термическая обработка (ХТО), токи высокой частоты (ТВЧ), борирование, микротвердость, паста, борированные слои, скоростной нагрев, диффузия, износостойкость, ударная вязкость.

## ABSTRACT

**Knyazev S. A.** Improving the operational properties of machine parts by borating with high-speed heating of HFC. – Manuscript.

Dissertation of the degree of Doctor of Technical sciences by specialty 05.02.01 - Materials science. – Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv – 2021.

The aim of the study is to implement a technology that combines diffusion saturation with high-speed surface treatment to intensify the process of obtaining hardened borated layers.

In the dissertation work, a scientifically substantiated development of a hardening complex for carbon and alloy structural steels with a combination of the method of chemical-heat treatment and induction heating was carried out, which made it possible to ensure a significant increase in their surface hardness, wear resistance without reducing the impact strength.

Experimental studies were carried out on the basis of a detailed study of the effect of high-speed heating modes on the structure and phase composition of steels after boriding. To ensure effective hardening, the selection of borating modes and the composition of saturating pastes were carried out. The materials selected for experiments are available and reflect a wide range of basic grades of ferrite-pearlitic, martensitic, austenitic steels. In the course of the experiments, the conditions were selected for the implementation of accelerated boriding under the conditions of furnace heating without using special equipment. The total boriding time has been reduced from 8 to 3 hours. The possibility of the formation of a less brittle single-phase boride layer is shown. On austenitic steel, the possibility of the formation of a "boride-free" boron layer with continuous and intergranular diffusion is shown. The main task of the work was to determine the relationship between the technological parameters of high-speed heating of high-frequency current and diffusion saturation, the formation of the structure and properties of steels strengthened by borating. The study solved the problem of the influence of heating modes and the composition of the paste saturating the steel surface with boron. The photographs of microstructures are presented, which show changes in the morphology of the structure mainly in the cross section of the samples. The diffuse layer differs significantly from the matrix structure mainly due to the formation of borides and carboborides, which is confirmed by measuring the microhardness. Additionally, studies of the phase composition and the distribution of elements in microvolumes were carried out on structures of borated layers with complex morphology under high-speed heating. It was found that under conditions of non-stationary heating, the structures formed differ significantly from the structures of traditional armored layers. They can have a dendritic structure, consist of isolated borides and carboborides in a solid solution of boron in iron, and the like. It has been established that the absence of a continuous boride layer, although it reduces the microhardness of the layer, contributes to increased wear resistance in the absence of chipping.

**Keywords:** chemical-heat treatment (CHT), high-frequency currents (HFC), borating, microhardness, paste, bored layers, high-speed heating, diffusion, wear resistance, impact strength.

Підписано до друку 2021.  
Формат 60 x 90/16. Друк ризографічний.  
Гарнітура Times New Roman  
Зам. /2021. Ум. Вид. арк. 0.9.  
Тираж 100 прим. Ціна договірна.

Надруковано ФОП Видавець А.Б.  
м. Харків, вул. Видавнича, 3001, офіс 1001.  
Свідоцтво про державну реєстрацію ВОО № від 2021.