

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“ ” 2023 р.
Зав. кафедри К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь, вчене звання)
А.В. Войтік
(підпис) (ініціали, прізвище)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до дипломної роботи
магістр
(освітній рівень)

тема роботи: **«Підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин
боруванням із швидкісним нагрівом струмами високої частоти»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 22м-ім
освітньої програми магістр
спеціальності 208
«Агроінженерія»
Гринюк Ігор Олександрович
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор Дідур В.В.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

м. Умань – 2023 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Освітня програма магістр
Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
А.В. Войтік
“ ” 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ**

студенту Гринюку Ігорю Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин боруванням із швидкісним нагрівом струмами високої частоти»

керівник роботи д.т.н., професор Дідур В.В.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від
“14” листопада 2023 р. № 01-06/261

2. Строк подання студентом роботи 25.11.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Загальні положення ХТО; літературні джерела; розрахунки дифузії в умовах дії високих швидкостей нагрівання.

4. Перелік питань, які потрібно розробити:

- встановити особливості формування структури і властивостей боронованого шару при боронуванні зі швидкісним нагрівом СВЧ в порівнянні з традиційним пічним боронуванням;

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

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

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

- запропонувати технологію локального боронування з використанням швидкісного нагріву струмом високої частоти для забезпечення високих експлуатаційних властивостей виробів, які працюють в умовах інтенсивного поверхневого зносу.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 20 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломної роботи: мета і завдання дослідження; теоретичні розрахунки та обґрунтування моделі дифузії в умовах дії високих швидкостей нагрівання; показники економічної ефективності;

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		
Техніко-економічне обґрунтування	Дідур В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 23 квітня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	30.04.2023 р.	
2.	Розділ 1.	14.05.2023 р.	
3.	Розділ 2.	28.05.2023 р.	
4.	Розділ 3.	11.06.2023 р.	
5.	Розділ 4.	25.06.2023 р.	
6.	Розділ 5.	24.09.2023 р.	
7.	Виконання ілюстративної частини роботи	23.10.2023 р.	
8.	Представлення роботи керівнику на перевірку	25.11.2023 р.	

Студент

(підпис)

Гринюк І. О
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Дідур В.В.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Гринюк І.О. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин боруванням із швидкісним нагрівом струмами високої частоти (Дипломна робота, Уманський національний університет садівництва, 2023: пояснювальна записка на 67 сторінках, у т.ч. 5 розділів, 24 рисунки, 3 таблиці, 28 джерел літератури).

Робота присвячена 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.

Запропоновано боронування, як ефективний спосіб поверхневого зміцнення.

Для реалізації поставленої мети в першому розділі проведено дослідження застосування дифузійних шарів у якості підкладки при реалізації методів фізичного осадження.

В другому розділі проведено теоретичні розрахунки та обґрунтування моделі дифузії в умовах дії високих швидкостей нагрівання.

В третьому розділі проведено аналіз використання борованого шару в якості дифузійної підкладки для напилення

Розроблено інженерні рішення для забезпечення безпеки праці.

Виконано економічне обґрунтування запропонованого удосконалення.

Ключові слова: ДЕТАЛІ МАШИН, БОРОНУВАННЯ, ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ, ДИФУЗИЯ, ФІЗИЧНЕ ОСАДЖЕННЯ, БОРУВАННЯ, СТРУМ, ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЇ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ, ШЛЯХИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ БОРУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ	9
1.1 Загальні положення ХТО.....	9
1.2 Вибір виду ХТО. Борокування, як ефективний спосіб поверхневого зміцнення.....	13
1.3 Борокування сталі з паст та порошків, особливості технології борокування.....	17
1.4 Використання нагріву СВЧ в процесах борокування.....	20
1.5 Ерозійне зношування	31
1.6 Застосування дифузійних шарів у якості підкладки при реалізації методів фізичного осадження.....	32
1.7 Висновки по розділу	33
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.	34
2.1 Теоретичні розрахунки та обґрунтування моделі дифузії в умовах дії високих швидкостей нагрівання.	34
2.2 Висновки по розділу	48
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОРОТКОЧАСНОГО БОРОВАВАННЯ З ШВИДКІСНИМ НАГРІВОМ СВЧ НА ДЕТАЛЯХ ЯКІ ПІДДАЮТЬСЯ ЗНОШУВАННЮ	49
3.1 Борокування дробеметних лопаток.....	49
3.2 Використання борованого шару в якості дифузійної підкладки для напилення.....	50
3.3 Висновки по розділу.....	52
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	54
4.1 Аналіз умов праці.....	54
4.2 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці.....	55
4.3 Вентиляція.....	59
РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ БОРОВАВАННЯ З ШВИДКІСНИМ НАГРІВОМ СВЧ.....	60
Висновки по розділу.....	62
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	65

ВСТУП

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 кромek 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 боронування, разом з швидкісним нагрівом СВЧ.

Окрім зміцнення лопаток парових турбін, процес ХТО з СВЧ нагрівом (а саме боронування) 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 борованих шарів, отриманих шляхом швидкісного нагріву, мало вивчені.

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**:

- Встановити особливості формування структури і властивостей боронованого шару при боронуванні зі швидкісним нагрівом СВЧ в порівнянні з традиційним пічним боронуванням.

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

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

- Розробити ефективну за складом та технологічними властивостями насичуючу пасту для локального нанесення на поверхню з наступним

індукційним нагрівом СВЧ.

- На основі проведених досліджень запропонувати технологію локального боронування 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 боронування вуглецевих та легованих конструкційних сталей з використанням паст для одержання зносостійких поверхневих шарів.

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

.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЇ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ, ШЛЯХИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ БОРУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

Сучасні реалії науково-технічного розвитку диктують умови щодо економічності та спрощення технологій зміцнення матеріалів, котрі перенасичені досить складними операціями. Це в повній мірі стосується хіміко-термічної обробки (ХТО). Підвищення працездатності деталей машин є постійною проблемою матеріалознавців. Відомі ефективні способи хіміко-термічної обробки (ХТО), у тому числі борування, на даний час вже не відповідають вимогам ресурсо- та енергоекономії. Тому представляє інтерес кардинальне вдосконалення існуючих технологій. Одним з таких напрямків може бути інтенсифікація дифузійних процесів шляхом застосування швидкісного нагріву струмами високої частоти (СВЧ).

1.1 Загальні положення ХТО

Хіміко-термічною обробкою (ХТО) називають термічну обробку (ТО), яка містить в собі сполучення термічного та хімічного впливу з метою зміни складу, структури та властивостей поверхневого шару [1]. Відомо безліч варіантів ХТО, при яких відбувається поверхневе насичення сталей та інших сплавів відповідними елементами (C, N, B, Al, Cr, Si, P, Zn та ін.) чи їх комбінаціями шляхом дифузії у атомарному стані зі спеціально створеного навколишнього середовища під впливом температурного або додаткових, інших факторів. Більшість видів ХТО є дуже ефективними щодо збільшення функціональних властивостей поверхні внаслідок утворення порівняно товстих зміцнених шарів (2 - 0,01 мм) [2].

Процес хіміко-термічної обробки є гетерогенним, тобто таким, що відбувається у різних контактуючих фазах, відокремлених між собою поверхнею розділу [1, 3]. Тому будь-який процес ХТО можна розглянути як багатостадійний:

1. Утворення активних речовин. 2. Доставка активних речовин до поверхні виробу. 3. Адсорбція активних атомів або молекул на поверхню: 3.1 Фізична адсорбція; 3.2 Хемосорбція. 4. Реакції на поверхні (за рахунок хімічних або дифузійних утворень). 5. Десорбція продуктів реакції. 6. Відвід продуктів реакції.

Кожна з наведених стадій може бути лімітуючою, що вносить вирішальне значення на швидкість всього процесу в цілому [1, 3].

Утворення активних атомів у середовищі, що насичує, відбувається поблизу поверхні або безпосередньо на поверхні металу. Адсорбція є складним процесом, що протікає на поверхні насичення нестационарним чином. Розрізняють фізичну (оборотну) і хімічну адсорбцію (хемосорбцію). При хіміко-термічній обробці обидва типи адсорбції накладаються один на одного. Фізична адсорбція призводить тільки до зчеплення адсорбованих атомів елемента, що насичує (адсорбата) з оброблюваною поверхнею (адсорбентом) завдяки дії Ван-дер-Ваальсових сил притягання, і для неї характерна легка оборотність процесу адсорбції (десорбція). При хемосорбції відбувається взаємодія між атомами адсорбата й адсорбенту, що за своїм характером і силі близько до хімічного. Адсорбція починається насамперед на тих ділянках поверхні, енергія яких максимальна. Адсорбовані атоми втримуються на поверхні завдяки прагненню системи понизити запас вільної енергії. Адсорбція - завжди екзотермічний процес, що приводить до зменшення вільної енергії. Якщо хімічний потенціал елемента, що дифундує, в атмосфері, що насичує, вище, ніж в оброблюваному металі, адсорбовані атоми поглинаються оброблюваним металом, впроваджуючись у вакантні місця решітки, котрі у великій кількості наявні на поверхні металу. Адсорбуюча здатність оброблюваної поверхні залежить від температури, тиску, стану поверхні, природи металу й елемента, що дифундує, і інших факторів. Розвитку процесу адсорбції простимульоване здатністю елемента, що дифундує, утворювати з основним металом тверді розчини [1, 4].

Однією з найважливіших стадій в технології ХТО є четверта стадія. В процесі дифузії виникає дифузійний потік від поверхні у глиб металу. Цей процес можливий при здатності дифундуючих елементів розчинятися у матеріалі

оброблювальної деталі та при достатній температурі, завдяки якій атоми отримують необхідну енергію активації процесу дифузії [1].

Концентрація дифундуючого елемента на поверхні залежить від співвідношення швидкостей підводу на поверхню та відводу в глибину дифундуючого елемента, наявності якого на поверхні, в свою чергу обумовлюється кількістю адсорбованих атомів на поверхні. Інтенсивність хіміко-термічної обробки в більшій мірі залежить від дифузійної стадії. В процесах ХТО найбільш часто має місце гетеродифузія (проходить зі зміною концентраційних параметрів) [5, 6], а саме її різновид - реактивна дифузія (проходить з утворенням нових фаз) [1].

В основі процесу дифузії лежать скачки переміщення атомів від положення рівноваги, де атоми переміщуються тільки лише в рамках термічних флуктуацій, до іншого положення в кристалічній решітці. Для здійснення переміщення атому необхідно надати енергію активації, яка у будь-якому випадку більша за енергію теплових флуктуацій [1, 5, 6].

Для розуміння процесу дифузії у твердому кристалічному тілі запропоновано ряд можливих механізмів дифузії: міжвузельний, вакансійний, циклічний, обмінний, краудійний. При дифузії по міжвузельному механізму атом переміщується стрибком, шляхом відтиснення сусіднього атому з нормального положення до міжвузельного простору. За вакансійним механізмом зміщення атома відбувається у сусідню вакансію, на місці якого, відповідно, утворюється нова вакансія. Циклічний механізм дифузії полягає у взаємному переміщенні групи атомів і характерний лише для невеликої групи металів. Обмінний механізм представляє собою окремий випадок циклічного і полягає в взаємному обміні місцями декількох атомів. Краудійний механізм полягає в русі стиснутих в деякому напрямку атомів [1, 3].

Для процесу дифузії справедливий ряд важливих законів:

- рушійна сила дифузії визначається градієнтом хімічного потенціалу (концентрацією, вільною енергією) дифундуючого компонента, тому

дифузійний потік пропорційний (в залежності від температури, тиску та

складу) цьому градієнту;

- концентрація дифундуючої речовини непостійна, а змінюється з часом;
- коефіцієнт дифузії залежить від ряду параметрів (енергії активації процесу та температури). Чим нижча енергія активації і вище температура, тим більший коефіцієнт дифузії [6].

При нагромадженні атомів елемента, що дифундує, на поверхні насичення, виникає дифузійний потік від поверхні вглиб оброблюваного металу. Процес можливий тільки за умови розчинності елемента, що дифундує, в оброблюваному матеріалі й досить високій температурі, що забезпечує необхідну швидкість дифузії [7].

Швидкість дифузії атомів елемента, що насичує, у кристалічній решітці заліза неоднакова і залежить від складу та будови фаз, що утворюються: дифузія протікає швидше при утворенні твердих розчинів впровадження (при насиченні вуглецем або азотом, розміри атомів яких малі), ніж твердих розчинів заміщення. Тому, при дифузійній металізації (насиченні металами) процес ведуть при більш високих температурах, довгостроково, однак, одержують меншу товщину шару, ніж при насиченні азотом і вуглецем [8].

У результаті дифузії утвориться дифузійний шар, на поверхні якого концентрація елемента, що дифундує, найбільша. По мірі віддалення від поверхні концентрація елемента падає. Шар матеріалу деталі в поверхні насичення, що відрізняється від вихідного за хімічним складом, називається дифузійним шаром [9]. Матеріал деталі під дифузійним шаром, не порушений впливом навколишнього активного середовища, називають серцевиною. Під загальною товщиною дифузійного шару розуміють найкоротшу відстань від поверхні насичення до серцевини. Ефективною товщиною дифузійного шару називають частину загальної товщини дифузійного шару, що визначається найкоротшою відстанню від поверхні насичення до мірної ділянки, яка характеризується встановленим граничним номінальним значенням базового параметра. Прилягаюча до серцевини внутрішня частина дифузійного шару, довжина якої визначається різницею загальної й ефективної товщини, одержала назву

перехідної зони дифузійного шару. Якісною й кількісною характеристикою хіміко-термічної обробки є товщина дифузійного шару, розподіл концентрації елемента, що дифундує, по товщині шару, фазовий склад і властивості шару (твердість, пластичність, опір зношування, корозійна стійкість та ін.). Залежно від конкретних умов залучається лише необхідний набір контрольованих ознак [1].

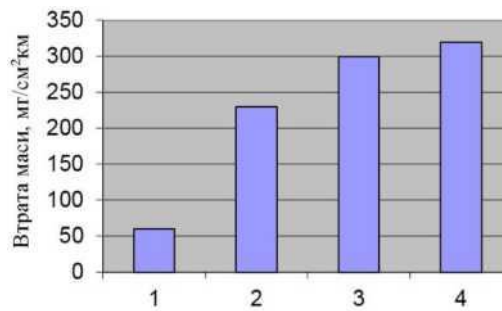
1.2 Вибір виду ХТО. Боронування, як ефективний спосіб поверхневого зміцнення

Потреба в локальній поверхневій обробці пояснюється тим, що більшість деталей машин і механізмів працюють в умовах зносу, кавітації, циклічних навантажень, корозії при кімнатній або високих температурах. При цьому максимальне навантаження виникає саме у поверхневих шарах. Хіміко-термічна обробка підвищує твердість поверхні, зносостійкість, кавітаційну та корозійну стійкість і створює на поверхні сприятливі залишкові напруження стиснення, збільшує надійність і довговічність деталей машин [10].

Вибір виду хіміко-термічної обробки дуже важливий та відповідальний етап розробки. Його здійснюють опираючись на кінцеві експлуатаційні властивості, які повинен мати виріб, технологічні особливості ХТО, а також економічну доцільність [11 - 14]. Коротко приведемо аналітичний огляд деяких видів ХТО.

На рис. 1.1 показано зношування зразків зі сталі 7X3 оброблених за різними схемами зміцнення. Параметри випробувань: швидкість ковзання 0,42 м/с, тиск 150 кгс/см², температура в зоні тертя ~ 550 °С [15].

Як видно з рис. 1.1 борований шар на сталі дає найменші показники втрати маси, в порівнянні з іншими видами ХТО металоїдами. При ХТО металами товщина зміцненого шару, як правило менша (табл. 1.1), що може призводити до продавлювання зміцненого шару при значних контактних навантаженнях.



1 - борування; 2 - цементация; 3 - азотування; 4 - ТО - покращення.

Рисунок 1.1 - Зношування сталі 7Х3

Таблиця 1.1 - Порівняльні дані по деяких видах ХТО [16]

Вид шару	Структура шару	Твердість HV	Товщина шару, мм
Цементований	Мартенсит (після ТО)	650-780	1
Азотований	Нітриди, карбонітриди	250-1100	0,2-0,6
Борований	FeB, Fe ₂ B	1100-1500	0,1-0,2
Хромований	Карбіди хрому, заліза	1800-2000	0,01-0,02
Титанований	TiC	3500-4000	0,01-0,15
Складний, карбідний	Карбіди титану, хрому	2000- 4000	0,015-0,02

Таким чином, за основу ХТО був взятий процес борування, при якому утворюється твердий, зносостійкий шар з окалиностійкістю до 800°C, теплостійкістю до 950 °C та підвищеною корозійною стійкістю. Крім того, при боронуванні утворюються дифузійні шари з суцільним хімічним з'єднанням, які за товщиною помітно поступаються лише цементованим шарам.

Боронування - насичення поверхневих шарів металу та сплавів бором - проводять головним чином з метою підвищення їх поверхневої твердості, зносостійкості особливо в умовах абразивного зношування, а також корозійної стійкості [3, 17]. Поряд із цим, боронування підвищує кислото-, жаро- і

теплостійкість. Висока твердість борованого шару зберігається при нагріванні до температури 950 °С. Основний недолік борованої поверхні - підвищена крихкість, що в багатьох випадках обмежує можливість більше широкого застосування цього виду обробки [18].

Боронуванню піддають поверхні виробів із заліза, сплавів на його основі, а також тугоплавких металів [3, 17].

Основні види боронування приведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 - Боронування металів та сплавів [19]

У порошках	У негерметичних контейнерах	У герметичних контейнерах	У вакуумі	У захисній атмосфері	У псевдорідкому середовищі
Із паст	-				
У рідкому середовищі	У розчинах солей	У розчинах окислів	У розчинах електролітів		
-	У нейтральних чи у боровмісних розчинах		-		
У газових середовищах	З галоїдними сполуками бору		З водневими сполуками бору		З алкілборидними сполуками

В основу класифікації боронування можна покласти агрегатний стан середовища при хіміко-термічній обробці. Відповідно до цієї класифікаційної ознаки можна виділити три основні методи боронування: у твердих, рідких та газоподібних середовищах.

Зазвичай боронування проводять при температурах 880 - 1050 °С протягом 2 - 8 годин [20].

При електролізному чи без електролізному боруванні у рідкому середовищі тривалість та температура процесу дещо знижується. Якість та товщина шару збільшується по відношенню до пічного нагріву. Необхідність використання ван та низька стійкість тиглів (особливо до $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) є головною перешкодою для цього різновиду боронування [3, 21].

Рідинної спосіб боронування може бути використаний практично на будь-якому підприємстві. Найбільш раціонально його застосування в дрібносерійному й серійному виробництві. Він відрізняється досить високою продуктивністю, стабільністю одержуваних результатів, високою щільністю й бездефектністю бороновних шарів. Основними недоліками рідинного боронування є: значне віднесення розплаву з оброблюваними виробами й труднощі відмивання від розплаву деталей складної конфігурації [19].

Газове боронування має ще меншу привабливість по причині складності та відповідальності обладнання, адже для реалізації насичення шару використовують токсичні, вибухонебезпечні гази. Крім цього, вони є дефіцитними, а отримані шари не завжди мають належну якість. Газові середовища мають підвищену активність, і тому насичення бором у них відбувається при більш низькій температурі, а сам процес за технологією й устаткуванням є більш складним. Однак серйозними недоліками газового боронування є отруйність і вибухонебезпечність застосовуваних газів [12, 22].

Боронування із паст (обмазок) доцільно застосовувати при зміцненні масивних великогабаритних виробів, а також при необхідності місцевого боронування. Розвиток цього напрямку в боронуванні стимулюється також можливістю сполучення боронування з існуючими на підприємствах режимами термічної обробки виробів, що зміцнюються. Технологія процесу боронування з паст передбачає виконання наступних операцій: готування обмазки, підготовку поверхні, що зміцнюється, до насичення, нанесення й сушіння обмазки, нагрів й витримка підготовлених до насичення деталей по заданому режиму, охолодження й очищення деталей від пасти.

У випадку пічного нагріву у звичайному окисному середовищі деталі із шаром обмазки вимагають спеціального захисту від окислювання. Більш прогресивною є технологія насичення з обмазок: на виробі методом занурення наносять шар активної пасти, просушують його, після чого наносять (також методом занурення) шар захисної обмазки. Підготовлені в такий спосіб деталі можна нагрівати будь-яким відомим у цей час способом. Після завершення

режиму насичення деталі охолоджують на повітрі або піддають безпосередньому загартуванню [17].

Вибір методу боронування диктується його технологічністю, умовами виробництва, конфігурацією, розмірами деталей, а також вартістю та наявністю хімічних речовин для здійснення процесу.

1.3 Боронування сталі з паст та порошків, особливості технології боронування

Аналіз традиційних способів боронування з порошкових, рідких та газоподібних середовищ викриває істотні недоліки. Основними з них є наступні: - більші труднощі, а іноді й неможливість обробки масивних і великогабаритних виробів; - складна технологія одержання локальних покриттів; - необхідність у спеціальному устаткуванні, технологічному оснащенні та допоміжних пристроях.

Зазначені недоліки можуть бути значною мірою усунуті при здійсненні процесів дифузійного боронування з паст. Застосування паст як насичуючого середовища пов'язане з використанням у процесах хіміко-термічної обробки металів і сплавів з використанням швидкісного електронагріву. У виробничих умовах існують різні методи дифузійного боронування з паст.

Процеси насичення здійснюються при цьому з використанням пічного та електричного нагріву, за рахунок тепла, що утворюється при згорянні енерговиділяючих паст, у розплавах металів і солей, з використанням металотермічних та струмопровідних сумішей. Велике розмаїття технологій боронування з паст, розроблених різними авторами, вимагає їхньої систематизації. Запропоновано класифікацію відомих у наш час методів боронування, при яких насичуючим середовищем використовуються пасти (рис. 1.2) [4, 34, 64, 65].

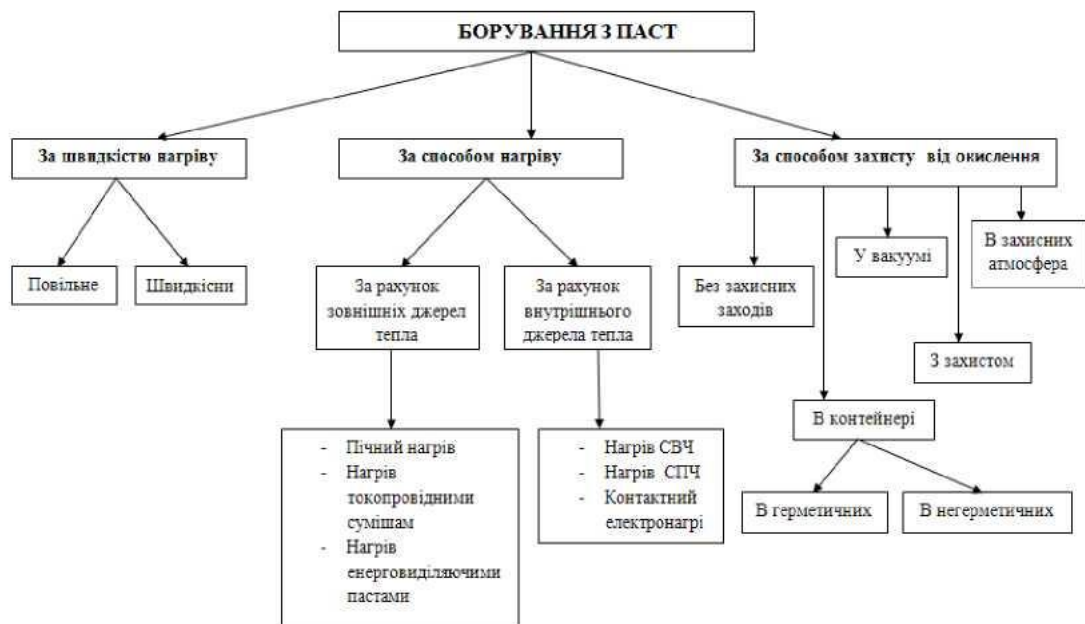


Рисунок 1.2 - Класифікація методів борування з паст [4, 34, 64, 65]

В основу класифікації покладені технологічні особливості реалізації процесів. Такими класифікаційними ознаками є: 1) спосіб нагріву; 2) спосіб захисту активної пасти та оброблюваного виробу від окислювання; 3) швидкість нагріву. За способом нагріву процеси боронування поділяються на дві групи: 1) нагрів за рахунок зовнішніх джерел тепла; 2) нагрів за рахунок внутрішніх джерел тепла.

До першої групи відносяться процеси боронування, які здійснюються в умовах первинного нагріву, нагрівання енерговиділяючими пастами й струмопровідними сумішами.

До другої групи - процеси, коли використовується електронагрів струмами високої й промислової частоти та контактний електронагрів.

За характером захисних заходів оброблюваних виробів та активної пасти від окислювання доцільно виділити наступні способи: - боронування без будь-якого захисту; - боронування в герметичних і негерметичних контейнерах; - у вакуумі; - у захисних та нейтральних атмосферах; - боронування з використанням захисних обмазок. Останні наносяться на необроблювані ділянки виробів та поверх шару активної пасти.

І нарешті, за швидкістю нагріву процеси боронування варто поділити на звичайні (пічні) та швидкісні. При цьому швидкість нагріву дуже мала й становить приблизно 10 град/хв. Швидкісний нагрів, як правило, забезпечується електронагрівом струмами високої й промислової частоти, контактним способом - шляхом безпосереднього пропущення струму через виріб [64].

Технологія процесу боронування з паст передбачає виконання наступних операцій: готування обмазки, підготовку зміцнюючої поверхні до насичення, нанесення й сушіння обмазки, нагріву та витримки підготовлених до насичення деталей по заданому режимі, охолодження й очищення деталі від пасти.

Основні компоненти пасти ретельно змішуються в спеціальних змішувачах і розбавляють зв'язуючою речовиною до необхідної консистенції. В якості зв'язуючих матеріалів використовують гідролізований етилсилікат, рідке скло, сульфітно-спиртову барду, розчин клею БФ-2 в ацетоні, цапон-лак, декстриновий клей. Консистенція пасти в основному визначається обраною технологією нанесення її на деталь: пульверизацією, зануренням, кистю. При боронуванні дрібних деталей пасту доцільно наносити зануренням, на великі й складні по конфігурації вироби - кистю або пульверизатором. Товщина пасти повинна становити 1,5 - 2,5 мм. Обмазки на основі ацетону, ацетоноксилену, бутилацетата, цапон-лака, нітроцелюлозних лаків, спиртів і інших органічних речовин з високою швидкістю випару просушують на повітрі при кімнатній температурі. Обмазки замішані на основі неорганічних або органічних мінеральних речовин, вимагають спеціального сушіння в сушильних шафах. Подальша підготовка деталей до насичення диктується обраним способом нагріву. У випадки використання для реалізації режиму насичення швидкісних методів нагріву (індукційний нагрів СВЧ, електроконтактний нагрів СПЧ), що не передбачають тривалих витримок при температурі насичення, додаткової підготовки деталей до боронування не потрібно. При боронуванні з обмазок можна використовувати й інші прискорені методи нагріву: у струмопровідних сумішах, у металевих і сольових розплавах тощо. По швидкості нагріву перераховані середовища поступаються нагріву СВЧ, але значно перевершують за здатністю, що нагріває,

електричні печі з повітряною атмосферою [65]. Більш детально боронування з СВЧ нагрівом розглянуто нижче.

Незважаючи на досить повний опис у літературі процесів боронування, залишаються деякі технологічні нюанси. Відмітимо деякі рекомендації, котрі зустрічаються у літературі.

При підготовці деталей рекомендовано поліпшувати чистоту поверхні та шорсткість. Крім того, насичуючу поверхню слід обезжирити. При нанесенні паст слід ретельно перемішувати зв'язуючи суміш та порошок насичення. Не слід допускати суцільного нанесення зв'язуючого (клею), так як він може стати значною перешкодою для адсорбції атомів бору на поверхню зразка. Очевидним є складність в змішуванні порошку зі зв'язуючою сумішшю, тому часто необхідно застосовувати проміжний розчинник або розчиняти порошок у воді. Крім цього, слід враховувати дисперсність насичуючого порошку: більші за розмірами фракції можуть зменшувати товщину шару, а дрібні - призводять до злипання частинок і, як наслідок, зменшення товщини шару та складність відокремлення відпрацьованої суміші після обробки [67].

Частіше деталі після боронування піддають загартуванню й відпуску особливо при роботі деталей в умови значних тисків. Наявність під тонким твердим шаром боридів м'якої серцевини може привести до продавлення й викрихкування борованого шару [21]. Більш прогресивним для борованих деталей є термічна обробка з застосуванням ступінчатого або ізотермічного загартування з нагріванням у соляних ванах або з нагріванням СВЧ [7, 68, 69]. Це забезпечує утворення більш твердої перехідної зони від борованого шару до серцевини деталі.

1.4 Використання нагріву СВЧ в процесах боронування

З усіх способів швидкісного нагріву нагрів струмами високої частоти є найбільш технологічно привабливим [70 - 72].

Нагрів струмом високої частоти (СВЧ) - це метод нагріву найчастіше

магнітних, проводячи струм, матеріалів (сталей, чавунів та інших металів), заснований на явищі електромагнітної індукції і здійснюється за рахунок протікання струму у деталі-провіднику, яка знаходиться у змінному магнітному полі [70].

При індукційному нагріві металеве тіло розміщується у зону концентрованого магнітного поля провідника або катушки зі змінним електричним струмом. При проходженні змінного струму по витках катушки (індуктора) у її середині створюється магнітне поле, що змінюється по величині й напрямку аналогічно струму. Змінне магнітне поле, перетинаючи при своїх змінах об'єм металу, що перебуває у зоні дії поля індуктора, відповідно до закону електромагнітної індукції збуджує в поверхневих шарах електрорушійну силу. Об'єкт нагріву є електропровідним, тому індуктована ЕРС викликає у ньому змінний струм тієї ж частоти, що й струм індуктора. Теплова дія індуктованого електричного струму викликає нагрів частини деталі, що перебуває в зоні дії змінного магнітного поля індуктора [70, 72].

Таким чином, основною відмінністю індукційного нагрівання від нагрівання у печах полягає у виділенні теплоти безпосередньо в зонах деталі, що піддаються впливу змінного магнітного поля та електричного струму. Це обумовлює високу швидкість нагрівання й можливість здійснювати місцевий зональний нагрів.

При нагріві у печах або ваннах теплота в оброблювану деталь передається за рахунок випромінювання й конвекції, тому швидкість нагріву сильно обмежується умовами теплопередачі із зовнішнього середовища у метал і теплопровідністю усередині останнього. Систему індуктор - деталь, можна розглядати як електричний трансформатор, первинною обмоткою якого є індуктор, а вторинною - контур струму у металевому об'єкті нагріву. У цій системі під час нагріву відбувається безконтактна передача електричної енергії з первинного ланцюга - індуктора у вторинний ланцюг - виріб, що нагрівається, де електрична енергія перетвориться в теплову. У теорії індукційного нагріву показано, що потужність, яка виділяється в деталі, що нагрівається, залежить від добутку коефіцієнту, що залежить від зазору між індуктором і деталлю, квадрату

сили струму індуктора та квадратного кореня добутку питомого опору, магнітної проникності матеріалу об'єкта нагріву, частоти струму [72, 73].

Таким чином, за інших рівних умов (однакові розміри деталей та індуктора, незмінний струм індуктора), потужність, що розвивається у виробі, пропорційна кореню квадратному із частоти струму. Підвищення частоти струму дозволяє концентрувати в невеликому об'ємі деталі значну потужність (до 3 - 5 кВт/см²), і тим самим виконувати індукційний нагрів з великою швидкістю – до 300-500 °C/с [73, 74].

Зокрема, при поверхневому загартуванні застосовують режими, що забезпечують нагрів до температури загартування за час від декількох секунд до десятих часток секунди.

Швидкість нагріву сталевого виробу при використанні індукційного методу не є постійною у всьому інтервалі температур. Вона змінюється внаслідок зміни його опору й магнітної проникності сталі. Питомий опір сталі при нагріванні зростає і при досягненні температури загартування збільшується в порівнянні з вихідним у 5 - 6 разів. Магнітна проникність при підвищенні температури падає. Вище точки Кюрі вона стає рівною одиниці. Вихідна магнітна проникність сталі залежить від напруженості магнітного поля і в умовах індукційного нагріву становить від 5 до 20. Одночасна зміна питомого опору й магнітної проникності, у міру підвищення температури, в більшості випадків приводить до зменшення переданої потужності при переході через т. Кюрі, якщо напруженість магнітного поля залишається постійною [64, 74].

Важливим явищем у індукційному нагріву є поверхневий ефект. Справа в тому, що при змінному струмі щільність струму в перетині провідника не однакова. Струм протікає переважно по поверхневим шарам провідника, і при досить високих частотах густина струму в його серцевині мізерно мала. Для спрощення кількісного обліку поверхневого ефекту вводять поняття про еквівалентну глибину проникнення струму. Вважають, що струм протікає по поверхні провідника тільки в шарі, рівному глибині проникнення, і має на цій глибині рівномірну щільність, а в більш глибоких шарах виробу струм відсутній.

Величину еквівалентної глибини проникнення струму визначають із умови, що виділення теплової енергії струму однаково як у випадку дійсного, так і умовного розподілу струму [72].

Отже, глибина проникнення струму залежить від питомого опору, магнітної проникності матеріалу об'єкта нагріву, частоти струму. У шарі металу, що нагрівається, рівному глибині проникнення струму, виділяється приблизно 87 % всієї теплової енергії, збудженої в об'єкті нагріву, а інші 13 % виділяються у більш глибоких шарах. У зв'язку із цим можна вважати, що шар сталі, рівний глибині проникнення, нагрівається безпосередньо струмом, що циркулює у ньому, а більш глибокі шари нагріваються в результаті передачі теплоти від зовнішнього активного струмонесучого шару.

З енергетичної точки зору індукційний нагрів досить повно характеризується двома параметрами: значенням питомої потужності та часу нагрівання. Питомою потужністю називається потужність, що переходить в теплоту в одному квадратному сантиметрі поверхні деталі. Величина питомої потужності обумовлює швидкість нагрівання деталі. Очевидно, що чим більше питома потужність, тим швидше здійснюється нагрів [73].

Індукційний нагрів під загартування (та інші операції), з технологічної точки зору, необхідно характеризувати термічними параметрами, тому що вони обумовлюють характер і інтенсивність фазових перетворень, що відбуваються при нагріві сталі. Такими параметрами є середня швидкість нагріву в області фазових перетворень і кінцева температура процесу [74].

Кінетика індукційного нагріву, тобто зміна його температури в часі, залежить від багатьох факторів: сили струму та його частот, магнітних, електричних і теплофізичних властивостей металу, що нагрівається. У всіх випадках має місце безупинне нагрівання, що підвищує температуру, а форма термічної кривої не є постійною й залежить як від частоти, питомої потужності, так і магнітних властивостей сталі, фазових перетворень [74].

Процес нагрівання розділяється на початковий етап, з відносно великою й майже постійною швидкістю наростання температури, та етап уповільненого

нагріву вище температури втрати магнітних властивостей сталі. Крім зміни фізичних властивостей на процес нагріву сталі впливають фазові перетворення, що супроводжуються поглинанням теплоти, і теплове випромінювання, що різко збільшується при високих температурах поверхні виробу. В області температур, близьких до рівноважного положення критичної точки A_{c1} , найбільший вплив на швидкість перлітно-аустенітного перетворення має різниця концентрацій вуглецю в межах аустенітного прошарку між ділянками цементиту та фериту. Чим вище температура, тим більше різниця концентрацій $c_p - c_f$, і тим швидше завершується процес. Іншим фактором, що сприяє прискоренню перетворення, є збільшення коефіцієнта дифузії при підвищенні температури. Однак вплив цього фактору виявляється істотним тільки при значному підвищенні температури. Перетворення перліту в аустеніт по своїй природі – це швидкісний процес. Швидкість перетворення крупнопластинчатого та зернистого перліту в аустеніті при рівних температурах значно менше, ніж швидкість перетворення дрібних структур. Однак це розходження майже не помітно при повільному нагріванні [74].

Основним фактором, що забезпечує істотне підвищення міцності й пластичності сталі, загартованої після швидкісного нагріву, є здрібнювання зерна аустеніту й відповідне зменшення розмірів кристалів мартенситу. Чим дрібніше зерно, тим вище опір сталі крихкому руйнуванню [74 - 76].

Високочастотне загартування застосовується в промисловості для одержання виробів із твердим зносостійким поверхневим шаром і порівняно м'якою й в'язкою серцевиною. Першою й основною перевагою такого загартування, у порівнянні з наскрізним загартуванням, є зменшення крихкості деталей. Другою перевагою є зменшення деформації під час нагрівання і охолодження, що досягається за рахунок холодної серцевини. Третє - практично повне усунення окислення й виходу вуглецю при високих температурах, що при зменшенні деформації дозволяє в деяких випадках робити загартування остаточно готових деталей без шліфування. При загартуванні СВЧ виробів, що мають просту конфігурацію, застосовують одночасне нагрівання, при якому індуктором

охоплюється вся ділянка виробу, що підлягає нагріванню, і температура одночасно однакова по всій ділянці. Зазор між індуктором повинен бути мінімально допустимим з технологічних міркуваннях, щоб індуктор не торкався деталі, що гартується. Практичний зазор вибирається в межах 2 - 5 мм. Якщо деталь має складну конфігурацію, то одержання рівномірного нагрівання викликає складнощі [77].

При поверхневому загартуванні, що використовує швидкий нагрів, аустенітне зерно завжди дрібніше того, котре звичайно виходить при повільному нагріванні до температури аустенізації. Така зміна структури аустеніту приводить до зменшення розмірів когерентних областей і збільшенню значень мікронапруг і деформацій у загартованій сталі. В умовах височастотного загартування це може стати причиною підвищення твердості загартованого шару. При зниженні швидкості нагріву або підвищенні температури створюються умови для росту аустенітного зерна, що зменшує якісну перевагу мартенситу, отриманого після загартування зі швидким нагріванням. У доевтектоїдній сталі, аустенізація якої проходить у широкому інтервалі температур, перетворення надлишкового фериту неминуче супроводжується ростом зерна аустеніту і вплив швидкого нагрівання на структуру й твердість помітно менше. Подрібнення структури мартенситу призводить до збільшення ударної в'язкості. Особливо помітно цей вплив після відпуску загартованої сталі. Зі зменшенням величини зерна аустеніту поліпшується сполучення характеристик твердості та пластичності [78].

Необхідність швидкого охолодження визначається, по-перше, деякими технологічними й тепловими факторами, по-друге, особливістю будови аустеніту, отриманого після швидкого височастотного нагріву. Швидке охолодження запобігає вирівнювання тепла по перетину деталі, дозволяє зберігати поверхневий характер нагріву. При недостатній швидкості охолодження структура після загартування може містити мартенсит і троостит, причому троостит буде розташовуватися сіткою навколо мартенситних об'ємів [78].

Таким чином, і умови нагрівання, і умови охолодження відіграють істотну роль у визначенні структури й властивостей загартованої сталі після індукційного

нагріву. Швидке нагрівання і швидке охолодження підвищують властивості сталі. Це необхідно враховувати і при ХТО з нагрівом СВЧ.

Введення у сталь легуючих елементів вносить істотні особливості в кінетику фазових перетворень при нагріванні. Легуючі елементи впливають на структуру сталі й фазові перетворення при швидкісному нагріві: змінюють вихідний структурний стан сталі; змінюють температуру початку фазових перетворень; збільшують або зменшують стійкість карбідної фази; змінюють швидкість дифузії вуглецю в залізі. Цей вплив по-різному позначається на сталях, що відносяться до різних класів. Карбідоутворюючі легуючі елементи: хром, вольфрам, ванадій - істотно сповільнюють процеси фазових перетворень. Це може бути пов'язано, головним чином, з великою стійкістю карбідів, а також з деяким зменшенням швидкості дифузії вуглецю в залізі [74].

При швидкому нагріванні сталі, легованої карбідоутворюючими елементами, перетворення перліту в аустеніт протікає в інтервалі температур. Температура, при якій процес перетворення легованого перліту в аустеніт протікає найбільш інтенсивно, зміщується в область більш високих температур і зазвичай збігається з температурою магнітного перетворення сталі. У деяких випадках при сильному легуванні фазові перетворення починаються вище точки Кюрі (наприклад у сталі X12) [75].

У зв'язку з тим, що перетворення в сталі, легованої карбідоутворюючими елементами, йдуть значно повільніше, ніж в вуглецевій сталі, зростає роль вихідної структури.

Вплив хрому на кінетику розчину карбідної фази свідчать про значний вплив швидкості нагріву та повноту фазових перетворень при загартуванні хромистої сталі. При температурі вище 1200 °C починається інтенсивне розчинення карбідів. Зменшення кількості карбідної фази при гартуванні від температур, що перевищують 1260-1270 °C, викликано початком плавлення сталі та появою у структурі сталі, загартованої від цих температур, ділянок ледебуритної евтектики [76].

Одним зі способів пришвидшення ХТО металів є використання струмів

високої частоти. Електромагнітне поле використовується як для зменшення часу нагріву виробу, так і для попередньої активізації газового середовища [79].

Крім цього, слід відмітити такі способи інтенсифікації боронування, котрі зазначені в літературі: вплив магнітного поля, обробка ультразвуком, обробка у псевдозрідженому середовищі, пропускання струмів через обмазку, використання енергії ендотермічної реакції. Спроба поєднання декількох методів (наприклад обробка СВЧ та ультразвуковими коливаннями) за даними [80, 81, 82, 83, 84, 85] є недоцільними.

У табл. 1.3 приведені данні по боронуванню з нагрівом СВЧ за даними [86, 88]. З табл. 1.3 видно, що більшість дослідників використовувало індукційний нагрів як альтернативне джерело пічному нагріву з достатньо великою тривалістю нагріву. Так випробувано процес газового боронування в середовищі водню й диборану з індукційним нагрівом [79]. Зразки діаметром 20 мм підвішували усередині скляної посудини з подвійними стінками (робочий обсяг 1000 см³), охолоджуваного водою. Нагрів СВЧ проводився за допомогою генератора ЛГ-60 (6 кВт, 150-200 кГц), електричний режим якого вирівнювався регулюванням зворотного зв'язку. Суміш B₂H₆ + H₂ подавали в посудину знизу. Відпрацьований газ ішов через пастки з водою. Результати газового боронування при температурі 950 °С, при нагріві СВЧ, протягом 2 годин формується шар товщиною 150 мкм. Боровані шари на сталі 45, отримані в газовому середовищі при нагріві СВЧ, мають мікротвердість 1700-2000 кгс/мм².

Таблиця 1.3 - Боронування з використанням СВЧ нагріву

Сталь	t, °C	τ	V _H , °C/c	h шару, мкм	HV, кгс/мм ²	Мікротвердість, кгс/мм ²	Спосіб	Зауваження
1	2	3	4	5	6	7	8	9
45	850	2-6 год	-	110 200	1700 2000	-	Газове, у середовищі B ₂ H ₆ +H ₂	-
	200	2-3 хв		100 125	1000 1100	1150-1200	Паста: 50% B ₄ C+50% N ₃ AlF ₆	-

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
У8	100	0 с	-	40	900 1000	1050-1150	Паста: 50% В4С+ 50% Na3AlF6	-
	200	0 - 120 с	50	160 360	900 1000	1050-1150	Паста: 50% В4С + 50% Na3AlF6	-
	300	0 с	-	250	900 1000	1050-1150	Паста: 50% В4С+50% Na3AlF6	Можливе плавлення
У10	200	-3хв	-	100 125	1000 1100	1150-1200	Паста: 50% В4С+50% Na3AlF6	-

Більш просто здійснюється боронування в спеціальних пастах. Боронування проводили в пасті, що складається з 50 % порошку карбіду бору (розмір часток 240-270 меш.) і 50% кріоліту Na_3AlF_6 . Зв'язуючим матеріалом служив гідролізований етилсилікат.

Після просушування пасти (протягом 1 року при 200°C) на зразках вуглецевих сталей при 1200°C за 2-3 хв. утворювалися боровані шари глибиною 100-125 мкм. Для одержання такої ж глибини шарів при традиційних методах боронування потрібно набагато більше часу. Так, для одержання шарів тієї ж глибини при боронуванні з розплаву, що містить 40% B_4C та 60% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ при 1100°C , потрібно в 30-40 разів, а при насиченні з порошкових середовищ в 50-60 разів більший час [89].

За даними [87] для боронування сталі 45 з нагрівом СВЧ запропонований склад суміші: до 30% аморфного бору, до 20% B_4C , до 3% KBF_4 , до 3% кріоліту. Процес тривав 2 хвилини при температурі 950 - 1000 $^\circ\text{C}$. Результатом боронування, були дифузійні шари глибиною не більше 165 мкм для сталі 20 та 60 мкм для сталі У8. Зносостійкість збільшилась у 5 разів.

У публікації [86] авторами було проведено боронування патрубків з використанням нагріву СВЧ. Боронуванню піддавалась сталь 38ХНМ з обмазкою

B_4C на полівиниловому спирті (товщина обмазки 0,2-0,3 мм). Процес протікав при температурах 1170-1180°C (температуру контролювали за допомогою фотооптичного пірометру). Так, за 10-20 с товщина боридного шару, за даними авторів, досягала 10-50 мкм, а при тривалості процесу 30 с – товщина досягала 200-220 мкм. Твердість отриманих шарів була дещо нижче звичайної і становила HV 920-980. Зносостійкість зразків внаслідок боронування зросла у 8 разів. За думкою авторів, процес боронування забезпечується виділенням з B_4C за участю кисню повітря вільних атомів бору, які взаємодіють з залізом сталі при температурі 1175 °C та утворюють боридні шари.

Таким чином вказані вище технології боронування з нагрівом СВЧ більше нагадують короткотривале пічне боронування, ніж принципово нову технологію.

В літературі зустрічається досить обмежена кількість даних щодо структури борованих шарів після нагріву СВЧ. Приводяться, наприклад, результати досліджень морфології борованого шару евтектичного типу, а також структури на границі розділу борований шар - перехідна зона [90].

Боровані шари евтектичної будови зазвичай одержують при насиченні з паст в умовах швидкісного електронагріву до температур, що перевищують температуру плавлення потрібної (Fe-B-C) або подвійної (Fe-B) евтектики [91]. Їх можна одержати також шляхом оплавлення одно- та двофазних боридних шарів лазерним променем або при нагріві струмами високої частоти (СВЧ) у вакуумі або захисних середовищах, боронуванням у порошкових сумішах [92, 93, 94].

При боронуванні сталей утворення евтектики починається на границі «боридний шар - перехідна зона», потім вона швидко поширюється як у сторону основного металу, так і до поверхні (рис. 1.4 і 1.5).

Структура шару, що формується, визначається способом боронування, температурою процесу, часом витримки, швидкістю охолодження і може бути як чисто евтектичною, так і до- або заевтектичною з різним ступенем дисперсності.



Рисунок 1.4 - Мікроструктура борованого шару евтектичного типу
(сталь 45)×800



Рисунок 1.5 - Утворення евтектики на границі розділу борований шар-
перехідна зона (сталь 40) ×200

Незважаючи на певні неясності в механізмі формування борованих шарів евтектичного типу й недоробки в технології їхнього одержання, дослідники відзначають їх високі експлуатаційні властивості. Дані шари мають меншу крихкість і схильністю до сколювання [92, 94].

Відомо, що службові властивості борованих виробів залежать, головним чином, від товщини, структури й властивостей боридної зони. Проте істотний

вплив на працездатність борованих деталей здійснює і перехідна зона. Зокрема її товщина, хімічний склад і структура визначають характер розподілу залишкових напруг, міцність зв'язку боридного шару з основним металом, схильність його до сколювання, умови утворення й розвитку втомних тріщин, можливість продавлювання шару. Тому, вплив структури перехідної зони на зазначені властивості варто враховувати при виборі сталей і призначення режиму насичення [90, 92, 93, 94].

Таким чином, детальні дослідження структур борованих шарів після індукційного нагріву відсутні, а уривчаста інформація не дає змогу систематизувати данні щодо впливу на них різних швидкостей нагріву. Питання щодо морфології, особливостей фазового складу та структури борованих з нагрівом СВЧ шарів потребують додаткового вивчення, аналізу і узагальнення.

1.5 Ерозійне зношування

Ерозійне зношування є однією з головних причин, яке стримує подовження безупинної роботи парових турбін та зменшення кількості і тривалості ремонтних простоїв. Для підвищення ерозійної стійкості лопаток парових і газових турбін застосовують методи осадження і дифузійного насичення металами, конденсаційні покриття (азотування, багатокомпонентні покриття), електроіскрове зміцнення робочої поверхні, загартування СВЧ кромок лопаток, припайку захисних пластин, наплавку твердосплавними стелітовими сплавами, термомеханічну обробку поверхні, розробляються нові, складнолеговані сталі ферито-мартенситного класу, жароміцні сплави, застосовується об'ємне та поверхневе модифікування тощо [38, 95 - 98]. Але повністю вирішити проблему ерозійного зносу найбільш відповідального обладнання парової турбіни це не дозволяє.

Початок дії ерозійного впливу починається зі збільшення в металі лопатки густини дислокацій (до 10^{12} - 10^{13} см⁻²) під дією джерел зношування та наступного деформування поверхні [99]. Це в подальшому призводить до локального

тріщиноутворення в поверхневому шарі ще на етапі “інкубаційного періоду” зношування, тобто тоді, коли видимого ерозійного руйнування не спостерігається. Зародкові мікротріщини при їх розкритті призводять до локального руйнування.

Опір поверхні лопатки турбіни краплеударному впливу вологого пару саме на початковому етапі є найважливішим. Тому зміцнена поверхня повинна мати не тільки високу твердість, але й хороші зв'язки з матеріалом серцевини. При цьому енергія краплеударного впливу повинна передаватися через тверду, зміцнену поверхню до в'язкої серцевини. Таким чином, при краплеударній дії матеріал повинен мати змогу до релаксації напруги і деформування.

1.6 Застосування дифузійних шарів у якості підкладки при реалізації методів фізичного осадження

Методи вакуумно-катодного і магнетронного розпилення дозволяють отримати тверді, одно- та багат шарові покриття з метою отримання надтвердого стану у тонких поверхнях [100]. На різноманітні підкладки наносять карбіди, нітриди, борида [101]. Найпопулярнішими є нітриди та їх композиції, в основному TiN, CrN, MoN, ZrN тощо [101, 102]. Практично завжди матеріал виробу має значну різницю по твердості з матеріалом покриття. Наприклад аустенітна сталь має твердість 1,5 ГПа, а твердість покриття TiN може досягати 30 ГПа. Така різниця не сприяє підвищенню адгезійної міцності, особливо в умовах продавлювання [101]. Тому дифузійні шари, отримані шляхом хіміко-термічної обробки можуть слугувати буферною підкладкою, зменшуючи продавлювання при великих контактних навантаженнях. Так відома комбінована обробка, яка полягає в азотуванні сталі з наступним нанесенням вакуумного покриття. При цьому можливі проблеми з адгезією внаслідок виділення крихких нітридів заліза чи м'якого твердого розчину азоту у залізі [100]. Для ефективного «зчеплення» шарів і підкладки ефективним способом є іонне травлення [100, 101].

Боридні шари переважають за твердістю азотовані та мають текстуру росту, тому є перспективними на роль проміжного «буферу» між осадженим покриттям і поверхнею основного матеріалу.

1.7 Висновки по розділу 1

В результаті аналізу джерел інформації можна зробити висновки:

1. Насичення поверхневих шарів бором є одним з найефективніших методів підвищення зносостійкості конструкційних сталей. Борида заліза забезпечують значний рівень мікротвердості, а за товщиною борований шар поступається тільки цементованим шарам. При цьому важливим аспектом є можливість отримання зміцненого шару на значну глибину, рівень якої зменшує ризик продавлювання.

2. Боронування з паст дозволяє проводити локальне зміцнення великих за розмірами деталей без застосування складного і дорогого вакуумного або пічного обладнання.

3. Боронування з індукційним нагрівом дозволяє здійснювати локальну обробку складних за конфігурацією деталей внепичним способом та скоротити тривалість насичення до декількох секунд або хвилин.

4. Аналіз літератури показав певні переваги боронування в порівнянні з іншими методами ХТО та можливість його використання разом з нагрівом СВЧ. В той же час багато питань щодо такого поєднання залишаються відкритими або такими, що на даний час взагалі не досліджувались. Відсутні уявлення і залежності щодо впливу головного фактору індукційної обробки - швидкості нагріву - на розвиток дифузійних процесів при боронуванні, на особливості фазо- та структуроутворення в умовах швидкісного боронування, відсутні дані стосовно аналізу специфічного впливу швидкості нагріву на експлуатаційні властивості борованих виробів.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Теоретичні розрахунки та обґрунтування моделі дифузії в умовах дії високих швидкостей нагрівання.

Проблема створення фізико-математичної моделі дифузії бору в поверхневі шари сталі у дрібнозернисту структуру, що формується в нерівноважних умовах швидкісного нагріву є актуальною задачею. При її вирішенні було використано відомі базові передумови та застосоване комп'ютерне моделювання.

Атом бору, як і інші атоми неметалів, має малий атомний радіус, утворює з залізом тверді розчини проникнення. В порівнянні з воднем, азотом, вуглецем бор має найменшу різницю у атомному діаметрі з залізом, яка складає всього 0,76 А. Тому бор має достатньо низьку розчинність у кристалічній решітці заліза, яка у рівноважних умовах становить лише 0,001 та 0,13% відповідно у α -Fe та γ -Fe. Основним механізмом дифузії бору у рівноважних умовах є міжвузельний механізм, при якому бор займає частину октаедричних міжвузлів. У випадку великих концентрацій вакансій (в загартованих чи опромінених матеріалах) розглядають можливість утворення пар атом-вакансія та участі цих точкових дефектів у процесах дифузії. Для атомів проникнення характерна закономірність: чим менший розмір атомів, тим менша деформація решітки заліза, яка необхідна для перескоку від одного міжвузла до іншого, а, значить, і нижча енергія активації. Тому енергія активації лінійно залежить від атомних радіусів. Окрім атомних радіусів важливим для процесів дифузії є термодинамічний параметр - температура, умови і механізми дифузії, спорідненість дифундуючих атомів з атомами легуючих елементів. Таким чином вихідними даними для побудови моделі дифузії елементу, що насичує повинні бути використані наступні параметри: 1. енергія активації процесу; 2. початковий коефіцієнт дифузії у монокристалі; 3. температура процесу.

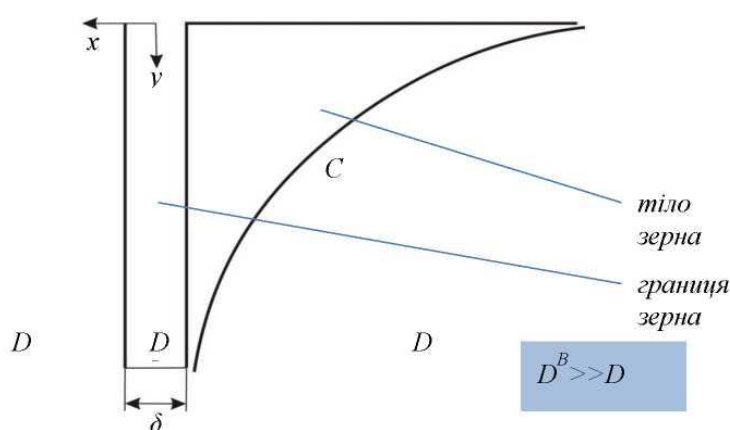
Виходячи з небагатьох літературних джерел по дифузії бору у сталь надійними можна вважати дані приведені у табл. 2.1 [5, 6, 33]. Відомі звичайні

моделі об'ємної дифузії справедливі тільки для стаціонарних умов нагрівання, де кількість дефектів порівняно невелика і, дифундуючи, атоми мають малу вірогідність знаходження поблизу дефектних ділянок структури, тому їх роль незначна. До дефектних ділянок, які грають помітну роль, можна віднести границі зерен і субструктуру дислокаційної природи. Тому коефіцієнт дифузії буде залежати від розмірів зерен, блоків, фрагментів. При збільшенні границь зерен і субструктури збільшується кількість і протяжність шляхів для дифузії. Збільшується вірогідність попадання дифундуючих атомів на границі. Енергетично процес переходу дифундуючих атомів на границі простимульовано підвищенням запасу вільної енергії, яку система звичайно намагається позбутися за рахунок міжзеренних сегрегацій та утворенням бормістких фаз.

Таблиця 2.1 - Вихідні данні щодо дифузії бору [5, 6, 33]

Матричний матеріал	Початковий коефіцієнт дифузії у монокристал відповідного матеріалу D_0 , $\text{см}^2/\text{с}$	Енергія активації процесу Q , Дж/гatom (кал/гatom)
$\alpha\text{-Fe}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	85000(20300)
$\gamma\text{-Fe}$	$2 \cdot 10^{-3}$	87800 (21000)

Експериментальне визначення коефіцієнту міжзеренної дифузії вперше був проведений Фішером. На рис. 2.1 представлено графічна модель Фішера.



D - коефіцієнт дифузії у зерні (монокристалі); D^B - коефіцієнт дифузії по границі зерна (чи субструктури); δ^B - геометричний параметр границі;

C - крива зміни концентрації дифундуючого елементу

Рисунок 2.1 - Графічна інтерпретація моделі Фішера

Вираз, отриманий Фішером, потребує точних концентраційних залежностей в кожній точці моделі. Крім того, співвідношення Фішера має низку припущень. Ле Клер спростив вираз Фішера і ввів величину кута ψ , під котрим крива постійного складу зустрічається з границею зерна в геометричній інтерпретації моделі Фішера. Наступними дослідниками відмічено, що незважаючи на спрощення виразу, Ле Клер зняв головне допущення попередньої моделі, про те, що значна частина дифундуючого елементу, який переміщується вздовж границі, неминуче буде відходити в зерно, внаслідок наявності суттєвого градієнта концентрації [5, 6].

Не заглиблюючись в математичні операції, відмітимо, що вираз Фішера трансформується у спрощений вид:

$$\frac{\delta^B D^B}{D_o} = \frac{2(\pi D_o t)^{1/2}}{C t q^2 \psi} \quad (2.1)$$

де t - температура процесу;

D_o - коефіцієнт дифузії у зерні (монокристалі);

D^B - коефіцієнт дифузії по границі зерна (чи субструктури);

δ^B - геометричний параметр границі;

ψ - кут нахилу дотичної кривої концентрації, який залежить від різниці перепаду концентрації елементу у тілі зерна та на його периферії (границі).

Для попередніх розрахунків маємо D_o бора у залізі, $\delta_B \sim 3d_{Fe}$; $d_{Fe} = 2,54 \text{ \AA}$ (виходячи з загально прийнятих моделей і уявлень про границю розділу). При розрахунках проблема може виникнути внаслідок відсутності значень кута ψ . Його можна визначити побудувавши геометричну інтерпретацію моделі Фішера. Для її побудови все ж таки бажано знати концентрації у двох точках: середня концентрація у твердому розчині бору в залізі $C_o = 0,004\%$ та $C_i = 0,15-0,02\%$ - концентрація, при якій утворюються бориди. Значення $0,15\%$ - для рівноважних умов формування фаз (пічний нагрів); значення $0,02\%$ - виділення ультрадисперсних боридів на границях зернової структури в певних умовах

(наприклад, швидкісний нестационарний нагрів) (рис. 2.2).

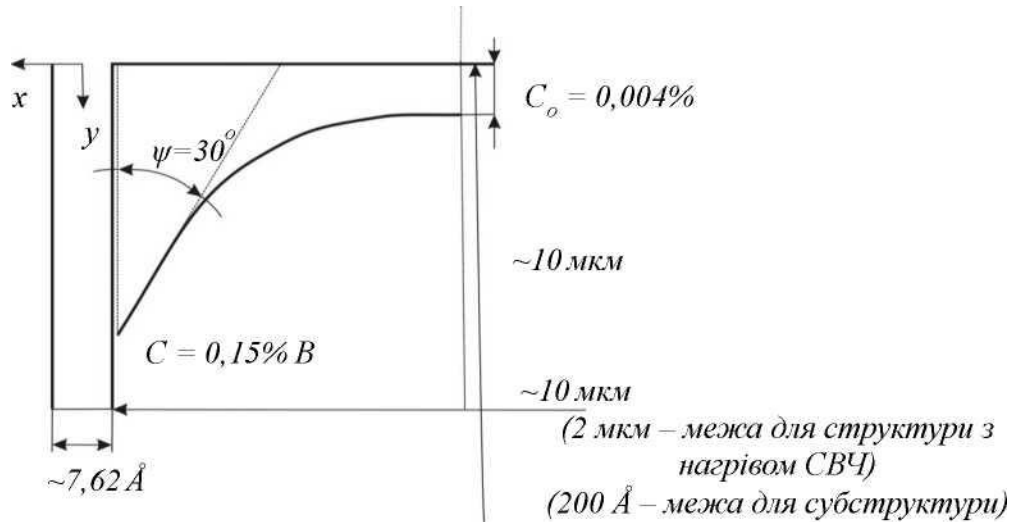


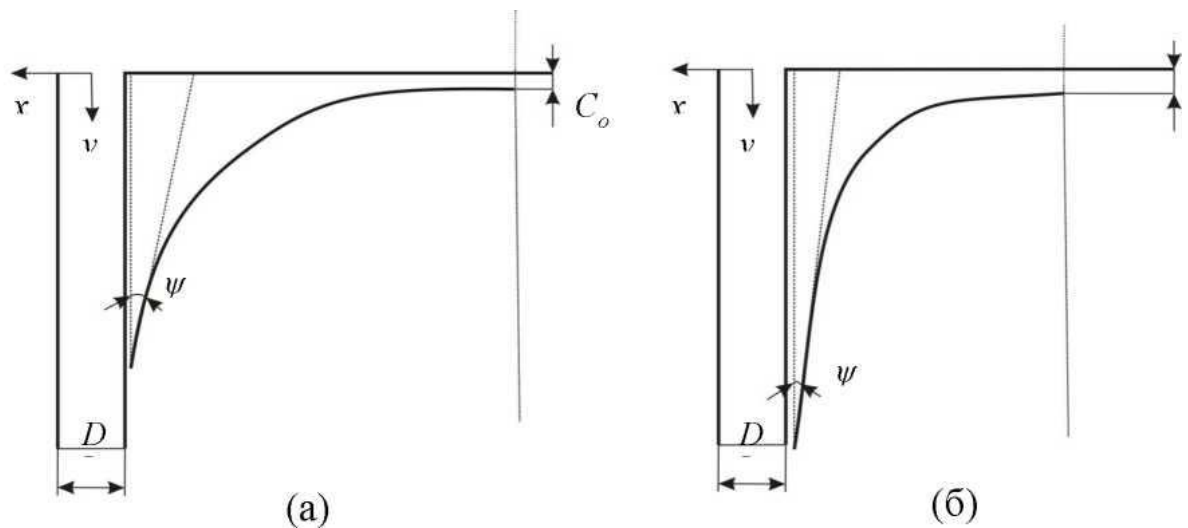
Рисунок 2.2 - Запропонована графічна Модель дифузійних процесів з параметрами структури з урахуванням ролі границь зерен при швидкісному нагріванні СВЧ

Основною метою попередніх розрахунків є визначення D_o^B . Визначення $\text{Stg}^2\psi$ полегшується тим, що суттєві зміни у розрахунках буде при зміні фіксованих кутів 30° , 45° , 60° . Тоді значення Stg^2 у відповідно буде дорівнювати 3, 1, 0,333. На рис. 2.3 представлена графічна модель дифузії бору в сталь 15X11МФ для рівноважних умов (пічний нагрів) і нерівноважних умов (швидкісний нагрів СВЧ).

З допомогою моделей на рис. 2.3 можна визначити, що при дрібнозернистій структурі, котра утворюється при швидкісному нагріванні, кут ψ буде дорівнювати 30° , при пічному нагріванні чи дифузії у монокристал він буде дорівнювати 60° . Тобто кут ψ виступає в якості зв'язуючої ланки між характеристиками дифузії і структурними параметрами.

Підставивши всі приведені данні у вираз (2.1) знаходимо значення зернограничного (ЗГ) коефіцієнту дифузії для двох випадків:

- $D^{B1}_0 = 0,18346 \text{ см}^2/\text{с}$ - для дрібнозернистої структури матриці (при швидкісному нагріванні, враховуючи розмір зерна не більше 10-20 мкм);
- $D^{B2}_0 = 0,02036 \text{ см}^2/\text{с}$ - для пічного нагрівання.



$$\psi_1 > \psi_2 ; \quad \text{Ctg}^2 \psi_1 < \text{Ctg}^2 \psi_2 ; \quad D^{B_1} < D^{B_2}$$

а) структура з “великим” зерном (пічний нагрів); б) структура з “дрібним” зерном (нагрів СВЧ);

боронування (а - в умовах повільного нагрівання; б - в умовах швидкісного нагрівання) з урахуванням ролі границь зерен

Рисунок 2.3 - Графічні моделі дифузійних процесів для різних способів

Традиційно, для розрахунків борованого шару приймають $D_o = 0,025078619 \text{ см}^2/\text{с}$. Ця величина підтверджує правильність наших розрахунків. Похибка для моделі становить приблизно 19%, що для нестационарних процесів з важко встановлювальними параметрами, є гарним результатом.

Вважаючи 3Г дифузію домінуючою в процесах формування дифузійного шару при швидкісних процесах нагрівання, отримані значення $D_o^{B_1}$ та $D_o^{B_2}$ можна використати для моделювання розвитку процесу дифузії за допомогою підрозділу інструментів PDEtools програми MATLAB 7.

Сутність комп'ютерного моделювання полягає у наступному: у робочому вікні будується геометрія зразка, подібна до зразків, які використані у досліді по боронуванню (рис. 2.4). Далі обираються граничні умови, рівняння дифузійного процесу, будується сітка кінцевих елементів потрібної точності (рис. 2.5) в результаті чого, будуються концентраційні поля розподілу бору (рис. 2.6).

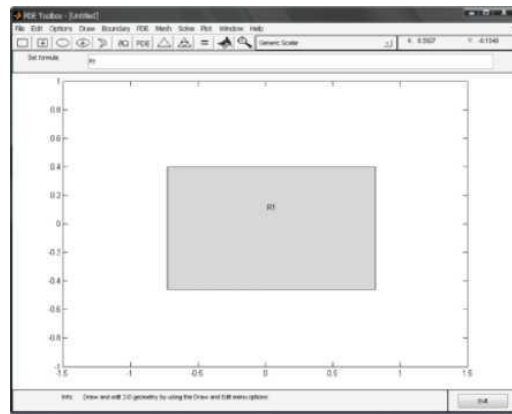


Рисунок 2.4 - Задання геометрії концентраційних полів в програмі
MATLAB 7

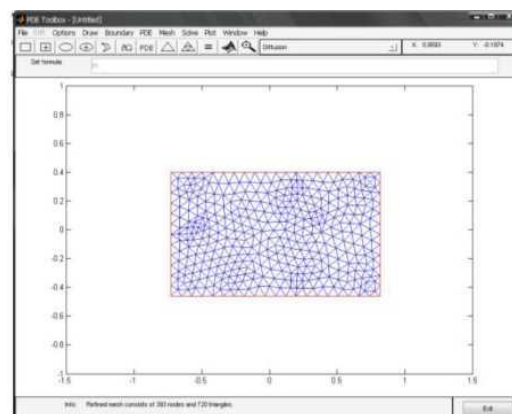


Рисунок 2.5 - Задання сітки кінцевих елементів при моделюванні
концентраційних полів в програмі MATLAB 7

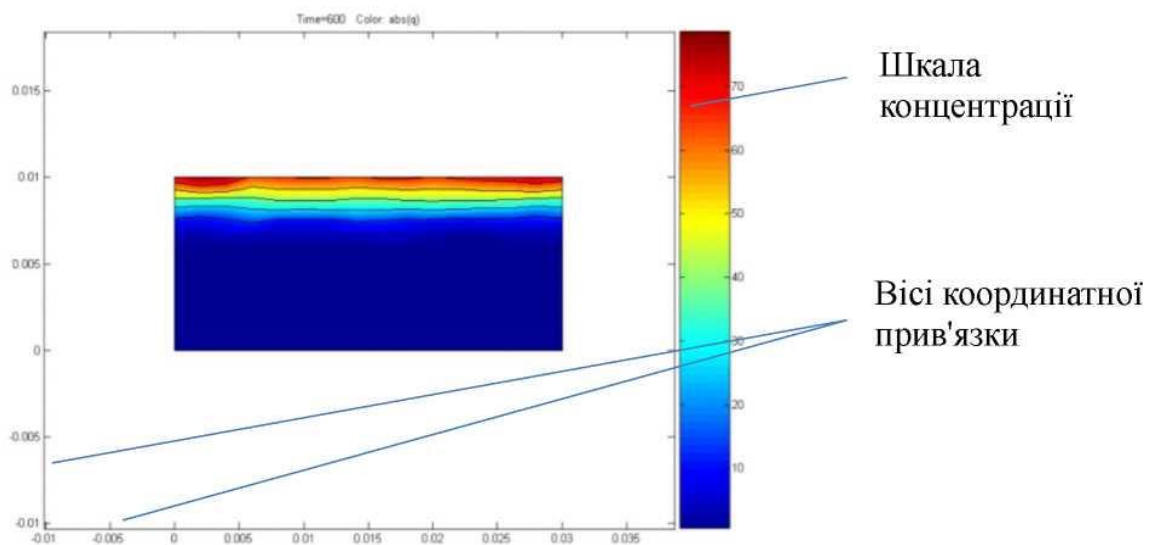


Рисунок 2.6 - Результат комп'ютерного моделювання концентраційних
полів бору в програмі MATLAB 7 для умов швидкісного нагріву СВЧ

При моделюванні процесів тривалого пічного боронування було отримано результати розподілу бору (рис. 2.7)

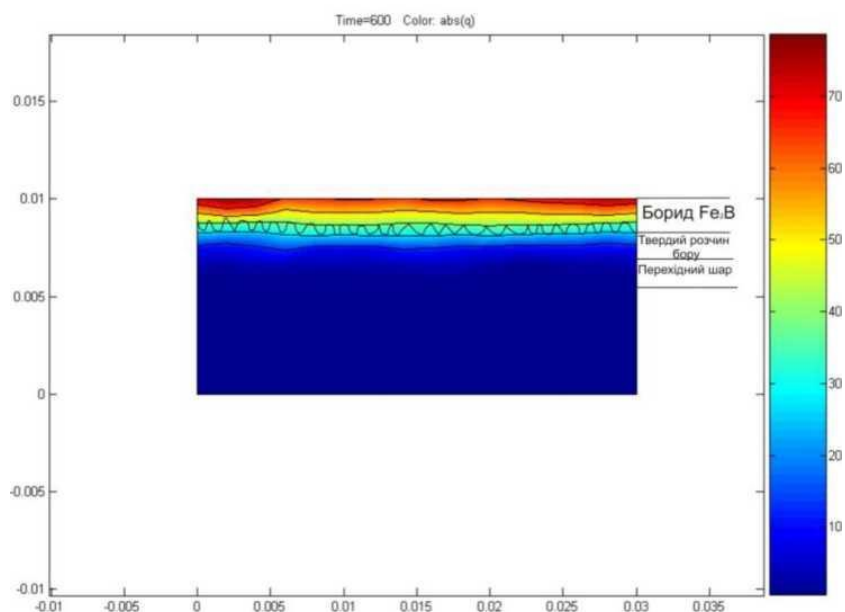


Рисунок 2.7 - Результат комп'ютерного моделювання концентраційних полів бору в програмі MATLAB 7 для тривалого часу боронування (пічне нагрівання)

Як видно з рис.2.7 концентраційний розподіл по товщині шару характерний для пічного боронування, у якому на поверхні формуються бориди з рівноважною концентрацією 35 - 50 % (ат.) (10 - 20% по масі), а глибше - твердий розчин бору в залізі.

Подробиці структури та фазовий склад отриманого боридного шару, використаного для порівняння з моделлю на рис. 2.8, розглянуто вище у підрозділі 2.1. Однак, вже за даними по концентраційному розподілу можна говорити про товщину зони з твердим розчином бору в залізі і зону з більшою концентрацією бору.

Використовуючи концентраційний розподіл і маючи відомості про концентрацію бору в окремих фазах можна спрогнозувати отримання борованого шару з урахуванням часу процесу (рис. 2.8).

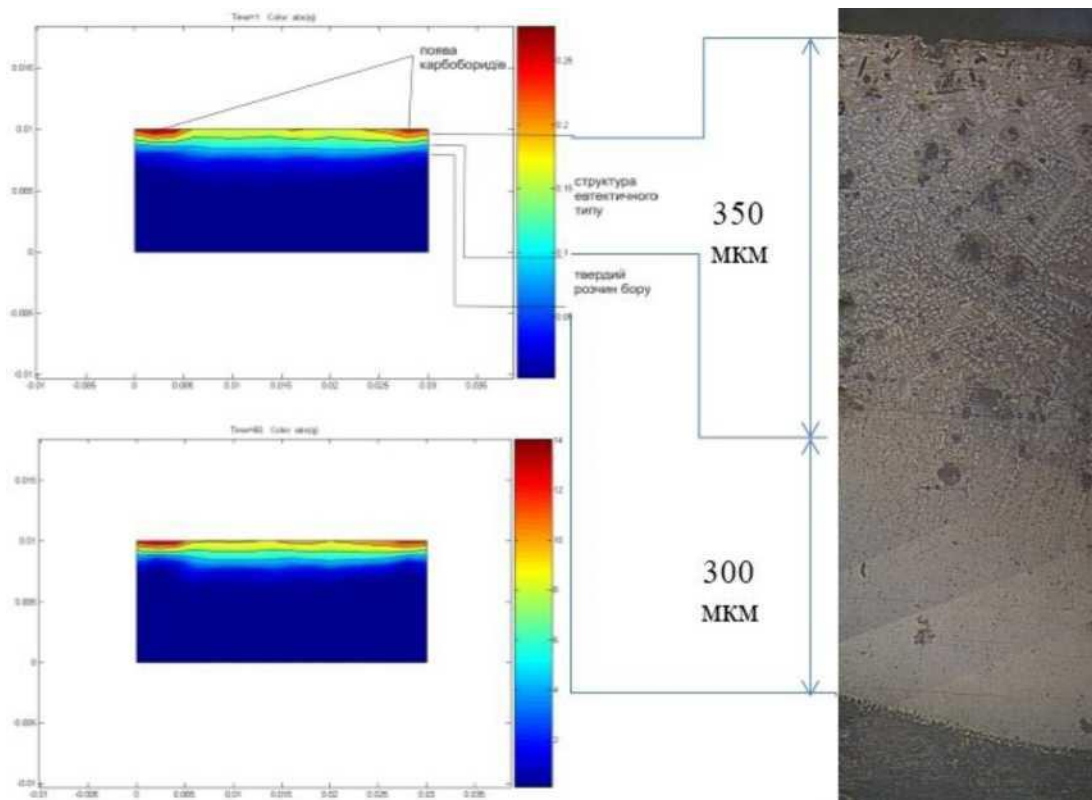


Рисунок 2.8 - Результат комп'ютерного моделювання концентраційних полів бору та його порівняння з експериментальним результатом для умов швидкісного нагріву СВЧ через 1 с та через 60 с

Як видно з розподілу концентраційних полів вже після першої секунди дії швидкісного нагріву концентрація бору підвищується до 0,01 - 0,25 % у товщині декілька сот мікрометрів. При таких концентраціях основою мікроструктури складатиме твердий розчин бору у залізі з осередками зародження боридної та карбоборидних фаз.

Цікавим є те, що моделювання вкрай нестаціонарних процесів протікання дифузії показує появу локальних максимумів концентрації бору, що в реальних умовах насичення якраз і призводить до формування конгломерацій карбоборидів і ізолюваних бориді.

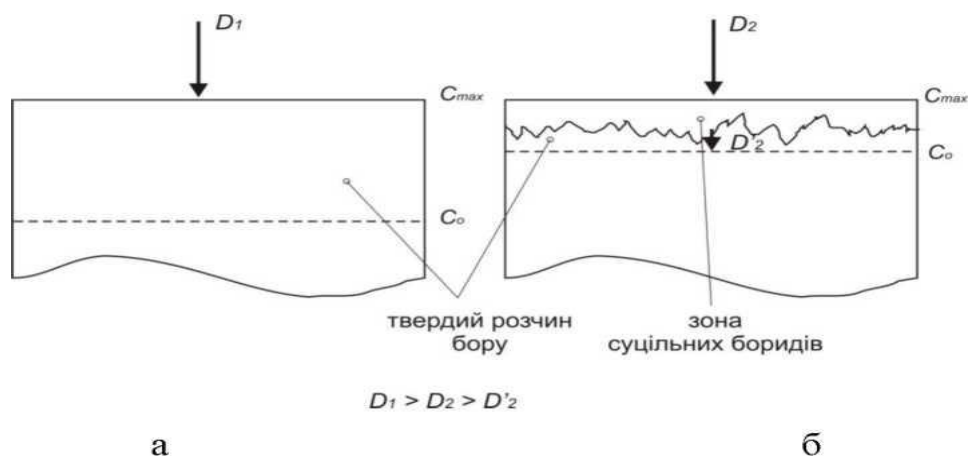
Такі фази повинні формуватись при концентраціях вищих ніж 0,1 % бору (глибина залягання 0,35 мм), що чітко корелює з даними металографічного аналізу (рис. 2.8). Через 60 с дифузійного процесу згідно з концентраційного

розподілу концентрація бору зростатиме до 14 %, однак на практиці реалізація такого нагріву в умовах високих швидкостей без застосування термоцеклювання є нереальною.

Порівнюючи результат моделювання з експериментальним боронуванням при швидкісному нагріванні СВЧ, отриманого при оптимальних параметрах, можна констатувати задовільну відповідність моделі (рис. 2.8).

Слід зазначити, що при моделюванні дифузійних процесів в умовах пічного боронування потрібно враховувати зміну коефіцієнта дифузії, так як при тривалому процесі формування фази бориду, різко знижується проникливість дифундуючих атомів через шар вже сформованих фаз, особливо боридів. Дифузійний ріст шару сповільнюється.

Ця особливість процесу дифузії схематично показано на рис. 2.9.



C_{max} , C_0 - початкова та кінцева концентрація насичуючого елементу;
 D_1 , D_2 , D'_2 - коефіцієнти дифузії до відповідних умов насичення а - швидкісний процес (нагрів СВЧ); б - тривалий процес (пічний нагрів)

Рисунок 2.9 - Схема формування борованого шару через дифузійні потоки при швидкісному та тривалому процесі

Роль границь зерен при пічному тривалому боронуванні втрачає свою значимість, як за рахунок відсутності розвинутої системи цих границь, коли домінує вакансійний механізм дифузії у твердому розчині, так і за рахунок формування суцільного щільного прошарку боридів на поверхні, що блокує

значний підвід нових атомів бору з поверхневого джерела (пасти). В моделях кількість дифундуючого елементу завжди приймається за однакову величину, адже в них не розглядається зміна потужності джерела атомів на поверхні. Однак розподіл по глибині фіксованої кількості атомів при розгляданні різних механізмів дифузії, чи зміні моделі буде неоднаковим, як і показано на рис. 4.53. Цим пояснюється деяка невідповідність моделі концентраційного розподілу з даними металографічного аналізу (в моделі шар більше, тому концентрація зміщена зверху і до низу). Тому для тривалих процесів нагрівання слід не враховувати 3Г дифузію.

З метою оптимізації процесу отримання якісних борованих шарів використано методику математичного планування експериментів, сутність якої полягає в переборі отриманих в процесі експериментів технологічних параметрів (факторів) і встановленні залежності від них показників зміцнення через коефіцієнти у математичних рівняннях.

В якості критеріїв оптимізації були вибрані глибина дифузійного борованого шару і його мікротвердість. Факторами, які впливають на дані критерії є температура та швидкість нагрівання (остання визначається температурою і часом нагріву).

Дані по кодуванню факторів, інтервали їх варіювання та план-матриця повнофакторного експерименту приведені в табл. 2.3 і 2.4.

Таблиця 2.3 - Кодування факторів експерименту

Інтервал змінення та рівень факторів	Температура $t, ^\circ\text{C}$	Час нагрівання t , сек.
Нульовий рівень $X_I = 0$	1200	5
Інтервал змінення	100	1,5
Нижній рівень $X_I = -1$	1100	3,5
Верхній рівень $X_I = +1$	1300	6,5
Нижній рівень $X_I = -2$	-	2
Верхній рівень $X_I = +2$	-	8
Кодове позначення	X_1	X_2

Таблиця 2.4 - План-матриця повнофакторного експерименту

Дослід	X ₁	X ₂	t, °C	τ, сек.	Швидкість нагріву, °C/c
1	-1	-1	1100	3,5	945
2	+1	-1	1300	3,5	1110
3	-1	+ 1	1100	6,5	510
4	+1	+ 1	1300	6,5	600
5	-1	-2	1100	2	1100
6	-1	+2	1100	8	415
7	+1	-2	1300	2	1200
8	+1	+2	1300	8	480

В таблиці 2.5 приведені результати повнофакторного експерименту по визначенню глибини h борованих шарів.

Таблиця 2.5 - Умови та реалізація досліду для глибини борованого шару

Дослід	X ₁	X ₂	Y _{h1} , мкм	Y _{h2} , мкм	Y _h - ^{h1} ₂ ^{h2} , мкм
1	-1	-1	125,75	130	127,9
2	+1	-1	114,76	149,35	132,1
3	-1	+ 1	67,85	79	73,4
4	+1	+ 1	215,5	190	202,8
5	-1	-2	114,2	78,07	96,1
6	-1	+2	82,31	103,94	93,1
7	+1	-2	129	160	144,5
8	+1	+2	134,35	100,4	117,4

Шляхом розрахунку отримано рівняння залежності глибини шару від температури та часу нагрівання:

$$Y_h = 123 + 26 \cdot X_1 - 2 \cdot X_2 - 0,005 \cdot X_{12} \quad (2.2)$$

Значення коефіцієнту X₁₂ не має значної ваги, тому для спрощення виразу його значенням можна знехтувати.

Виходячи з отриманої лінійної моделі рівняння маємо можливість Після переведення кодових значень факторів у натуральні отримана математична залежність глибини боронування від основних технологічних параметрів процесу боронування.

$$Y_h = -182,3 + 0,26t - 1,3\tau \quad (2.3)$$

Аналіз отриманих рівнянь свідчить про те, що збільшення температури і зменшення часу нагрівання буде призводити до збільшення глибини борованого шару. Одночасне збільшення температури і зменшення часу нагріву сприяє росту швидкості нагріву, що в свою чергу, визначає активізацію зернограничної дифузії, що і забезпечує більшу дифузійну проникненість бору.

Перевірка адекватності лінійної моделі показала відповідність нерівності критерію Фішера та значимості коефіцієнтів за критерієм Ст'юдента. Проведені досліді відповідають критерію Кохрена щодо відтворюваності результатів.

В табл. 2.6 представлені результати повнофакторного експерименту по визначенню мікротвердості борованого шару.

Таблиця 2.6- Умови та результати дослідів по визначенню мікротвердості борованого шару

Дослід	X ₁	X ₂	Y _{hV1} , МПа	Y _{hV2} , МПа	$Y_{HV} = \frac{Y_{h1} + Y_{h2}}{2}$, МПа
1	-1	-1	12293,1	14381,88	13337,5
2	+1	-1	14392,56	8164,43	11278,5
3	-1	+ 1	16919,22	14742,9	15831,1
4	+1	+ 1	8566,71	10609,8	9588,3
5	-1	-2	11547,97	13045,76	12296,9
6	-1	+2	8250,18	8049,62	8149,9
7	+1	-2	17263	15022,68	16142,8
8	+1	+2	8996,59	8164,43	8580,5

Розрахунковим шляхом отримано рівняння залежності твердості шару від

температури та часу нагрівання:

$$Y_{HV} = 11901 - 503 \cdot X_1 - 1363 \cdot X_2 - 0,035 \cdot X_{12} \quad (2.4)$$

Значення коефіцієнту X_{12} не має значної ваги, тому для спрощення виразу його значенням можна знехтувати.

Після переведення кодових значень факторів у натуральні отримана математична залежність мікротвердості борованих шарів від основних технологічних параметрів процесу боронування:

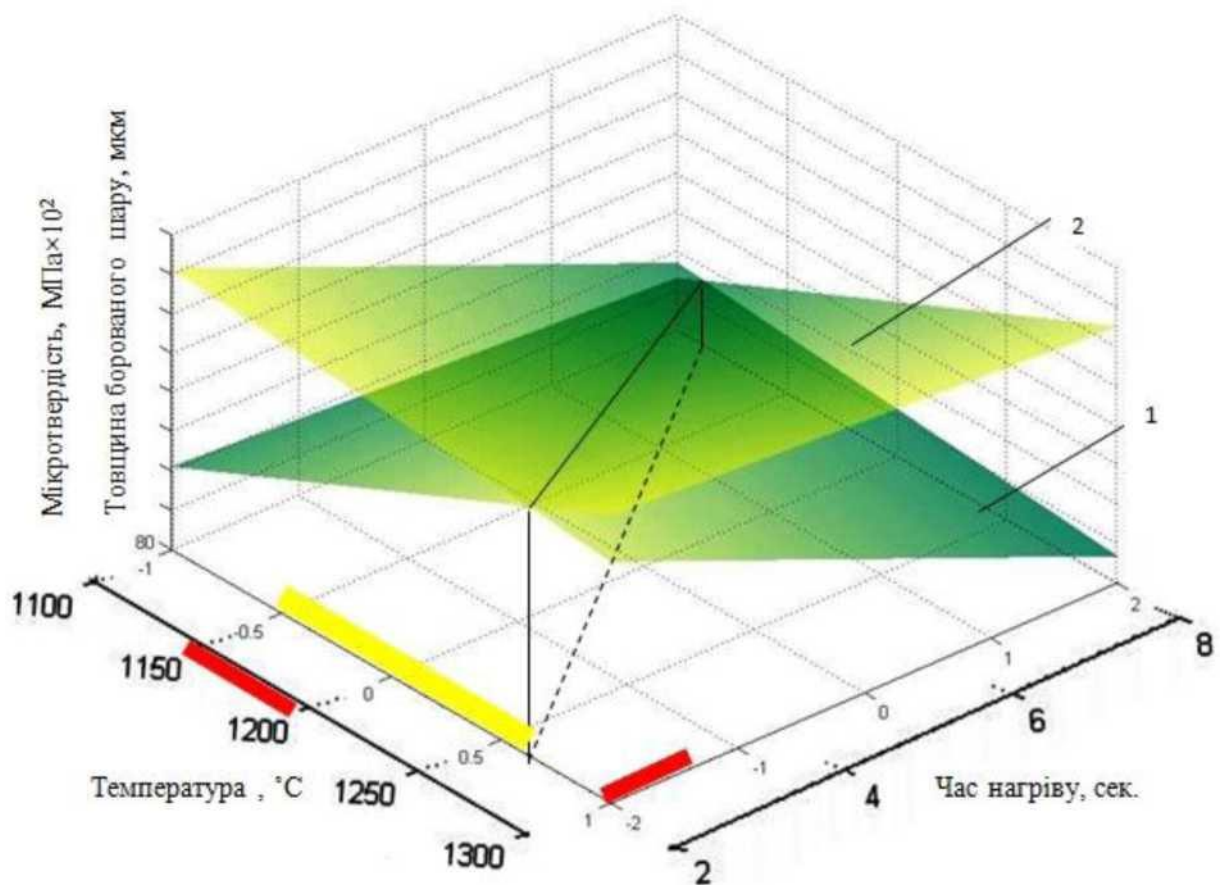
$$Y_{HV} = 22480 - 5,03t - 909\tau \quad (2.5)$$

Аналіз отриманих рівнянь свідчить про те, що зменшення температури та часу нагрівання буде сприяти збільшенню мікротвердості борованого шару, головним фактором при цьому завдяки більшому значенню коефіцієнта при X_2 (фактору часу) є зменшення часу нагріву, тобто, збільшення швидкості нагрівання.

Таким чином, з отриманих залежностей можна зробити висновки, що головним фактором отримання більш твердих та більших за глибиною борованих шарів є зменшення часу нагріву, тобто, збільшення швидкості нагрівання.

Величина коефіцієнтів рівнянь свідчить про те, що збільшення швидкості нагріву саме через зменшення часу, а не через підвищення температури дає значно більш ефективніший результат.

На базі отриманих результатів по математичному плануванні експерименту побудована геометрична модель у вигляді гіперплощини у тривимірному просторі (рис. 2.10) за допомогою якої були визначені оптимальні режими боронування для отримання найбільш ефективних шарів з використанням швидкісного нагріву СВЧ. Для сталі 15X11МФ найкраще поєднання твердості і глибини борованого шару може бути отримано при нагріванні до температури 1150 - 1250 °С зі швидкістю в межах 1000 - 1100 °С/с.



1 - зміна мікротвердості; 2 - зміна товщини.

Рисунок 2.10 - Геометрична оптимізація результатів експерименту з виділеними зонами оптимальних режимів нагрівання

З графіку залежності мікротвердості від часу нагрівання (дивись 2.10) видно, що при нагріванні до температури 1100 °C, більш помітна деяка тенденція на збільшення мікротвердості, однак при збільшенні часу нагрівання до 6 - 8 с спостерігається різке зниження мікротвердості. У випадку нагрівання до температури 1300 °C спостерігається постійне зниження мікротвердості зі збільшенням часу нагрівання.

Слід зазначити, що спостерігається тісний взаємозв'язок між мікротвердістю та глибиною борованого шару, що можна пов'язати з перерозподілом атомів бору. При незначних товщинах борованого шару атоми бору локалізовані у незначних об'ємах і утворюють більш тверді структури, і навпаки, при меншій локалізації атомів бору у дифузійному шарі спостерігається утворення менш твердих шарів.

2.2 Висновки по розділу

1. Встановлено, що змінюючи швидкість нагріву можна змінювати морфологію структури борованих шарів. У нерівноважних умовах швидкісного нагріву СВЧ можливе формування твердих розчинів бору, боридів сферичної та ромбічної морфології, евтектики, карбоборидів. Наявність даних структур підтверджено мікроскопічними, рентгеноструктурними дослідженнями та мікроаналізом елементного складу.

2. Дослідження, проведені з використанням математичного планування експерименту показали, що шляхом зміни параметрів нагріву можна регулювати параметри шару у широких межах. Зі збільшенням температури нагріву при боронуванні з застосуванням СВЧ збільшується товщина шару, але зменшується мікротвердість; зі збільшенням часу нагріву зменшується мікротвердість та збільшується товщина шару. Встановлені оптимальні параметри процесу боронування: температура нагріву 1150 - 1200 °C (для високолегованих сталей до 1250 °C), час нагріву 1 - 2 секунди, що відповідає швидкості нагріву 1000 - 1100 °C/с.

РОЗДІЛ 3

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОРОТКОЧАСНОГО БОРУВАННЯ З ШВИДКІСНИМ НАГРІВОМ СВЧ НА ДЕТАЛЯХ ЯКІ ПІДДАЮТЬСЯ ЗНОШУВАННЮ

3.1 Борування дробеметних лопаток

Технологія зміцнення натурних лопаток із сталі 40Х дробеметних пристроїв здійснювалось шляхом борування дробеметних лопаток з використанням пасти (60 % карбід бору та 40 % NaF, зв'язуюче - рідке скло) і поверхневого нагріву СВЧ. Пасту наносили полосою вздовж центральної осі лопатки де відбувається найбільш інтенсивна дія часток, що пошкоджують лопатку. Борування здійснювалось по обидві сторони лопатки. Для порівняння використовувались також лопатки, оброблені по традиційній технології (після гартування і низького відпуску). За результатами випробувань встановлено, що після борування з нагрівом СВЧ твердість на поверхні деталей зросла від 300 HV до 900 HV. Ресурс роботи до заміни лопатки збільшився від одного робочого тижня до одного робочого місяця, тобто, в 3 - 4 рази. З рис. 3.1-3.2 видно, що характер зношування поверхні лопаток в залежності від способу обробки різний.



а

б

а - зношена лопатка після боронування; б - зношена лопатка після гартування і відпуску

Рисунок 3.1 - Зміна геометрії зношених дробеметних лопаток після різних технологій обробки

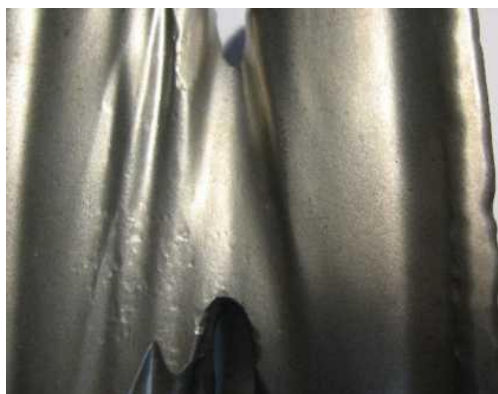


Рисунок 3.2 - Стан поверхні зношеної лопатка після боронування
з нагрівом СВЧ

У випадку зношування борованої лопатки відбувається часткове вимивання металу з поверхні зі збереженням високої чистоти поверхні навіть по глибині (за рахунок наявності прогартованого підшарку).

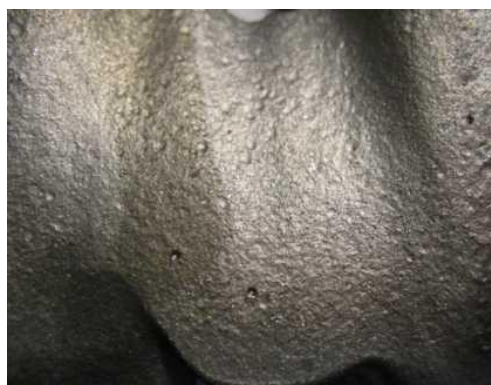


Рисунок 3.3 - Стан поверхні дробеметної зношеної лопатка після
загартування і відпуску

При зношуванні гартованої і відпущеної в печі відбувається швидке відколювання мікроб'ємів металу внаслідок його високої крихкості. При цьому формується розвинута поверхня з мікрократерами і кавернами, що сприяє погіршенню конструкційної міцності таких лопаток в цілому.

3.2 Використання борованого шару в якості дифузійної підкладки для напилення

Для підвищення зносостійкості деталей машин і оснастки застосовується вакуумно-дугового метод нанесення зносостійких покриттів на основі

тугоплавких металів, зокрема, титану, цирконію, хрому, молібдену тощо [128]. З метою збільшення ефективності захисного покриття перед його нанесенням бажано створити на поверхні виробу перехідний дифузний шар для поліпшення адгезії покриття до підкладки. Відомо, що бомбардування іонами матеріалом, який випаровується при негативному потенціалі на підкладці і наступне нанесення зносостійкого покриття забезпечує взаємне проникнення атомів металів покриття і підкладки, з формуванням необхідного дифузного шару [128].

Металографічна картина поверхні шару після комбінованої обробки (боронування з нагрівом СВЧ і вакуумно-дугового покриття) представлена на рис. 3.4.

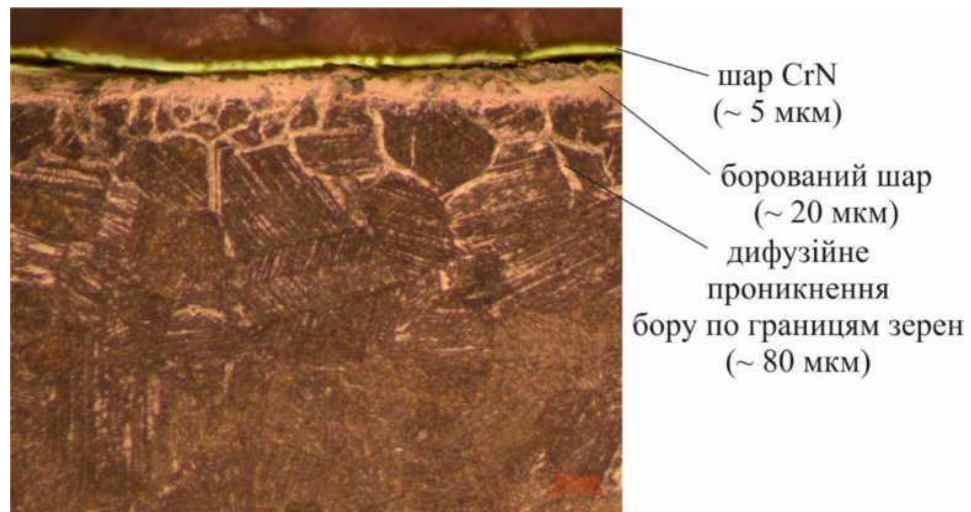


Рисунок 3.4 - Мікроструктура поверхневого зміцненого шару після комбінованої обробки

Експерименти проводилися з використанням вакуумно-дугової установки «Булат-6». Матеріали що розпилювались - хром марки ВХ-2К, і ніобій марки Нб. Підкладки 18×18 мм з товщиною 3 мм виготовлені з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т. Перед нанесенням покриття CrN, сталь піддавали боронуванню з нагрівом СВЧ. Після механічної очистки проводили іонне травлення поверхні іонами ніобію з метою поліпшення якості поверхні при високих потенціалах зсуву. Основне захисне покриття наносили у іонізованому середовищі азоту при менших потенціалах (від -70 до -200 В).

З рис. 3.4 видно, що в результаті обробки на поверхні сталі сформувався

шар нітриду хрому товщиною ~ 5 мкм. Борований прошарок товщиною є перехідною структурою між дуже твердим нітридом хрому і м'якою підкладкою, що зменшує продавлювання при великих контактних навантаженнях зменшує вірогідність сколювання поверхневого шару з нітриду хрому. Крім того дифузійне проникнення бору по границям зерен у вигляді «проростів» боридної фази збільшує зчеплювання поверхневих шарів з матричним металом.

3.3 Висновки до розділу

Таким чином, виходячи з результатів проведених досліджень можна зробити наступні основні висновки:

1. Показана можливість протиерозійного зміцнення вхідних кромок робочих лопаток парових турбін за рахунок поєднання процесів боронування і поверхневого загартування з нагрівом СВЧ. Використання для боронування насичуючих паст, яка може наноситись локально на вхідну кромку лопатки дозволяє поєднати боронування і поверхнєве загартування в одну технологічну операцію нагріву СВЧ на режимах, які застосовуються на АТ „Турбоатом” в даний час для поверхневого загартування лопаток.

2. Встановлено, що застосування при боронуванні швидкісного нагріву струмами високої частоти замість довготривалого пічного нагріву з оптимізованими параметрами потужності, температури нагріву, товщини пасти з певною пропорцією та мінімально можливим з технічної точки зору зазором між поверхнею та індуктором дозволяє отримати ефективно зміцнену поверхню.

4. Перевага боронування з нагрівом СВЧ в порівнянні з поверхневим загартуванням СВЧ полягає, вперш за все, в тому, що твердість і розміри зміцнених шарів при такій обробці значно перевершують відповідні характеристики загартованих шарів при несуттєвому зменшенні ударної в'язкості, що є вкрай позитивним для збільшення ресурсу ерозійної стійкості лопаток турбін.

5. Використання борованих шарів у якості дифузійного прошарку які

піддавались послідовному іонному травленню з наступним напиленням нітридних шарів з метою підвищення адгезійної міцності і зменшення ризику сколювання надтвердих шарів при високих контактних навантаженнях і продавлювання принципово можливе і призводить до збереження градієнтної структури навіть після виготовлення поперечного шліфа за стандартною технологією.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці

За походженнями та природою впливу на організм людини ШНВФ поділяють на: фізичні, хімічні, психофізіологічні, біологічні та соціальні.

Фізичні:

- Створюють небезпеку механічного травмування, опіків, обморожування;
- Віброакустичні: шум, вібрація, ультразвук та інфразвук;
- Електричні: статична, підвищений рівні напруги, КЗ через людину;
- Видиме, ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання;
- Світлові: недостатнє освітлення, підвищена яскравість тощо.

До хімічних, шкідливі хім. речовини у різних агрегатних станах, які здатні потрапляти в організм і розчинятись у біологічних рідинах.

До психофізіологічних входять: фізичні перевантаження і нервово- психічні.

Процес ЕДН характеризується наявністю ШНВФ:

- шкідливі речовини – вище гранично допустимого рівня ГДК;
- випромінювання в оптичному діапазоні;
- ультрафіолетове – вище ГДР;
- видиме – вище ГДР;
- інфрачервоне – помірний ДР;
- шум – вище ГДР;
- ультразвук – вище ГДР;
- електричний струм;
- іскри, бризки і викиди розплавленого металу;
- механізми і вироби що рухаються;
- системи, які знаходяться під тиском, що перевищує атмосферний.

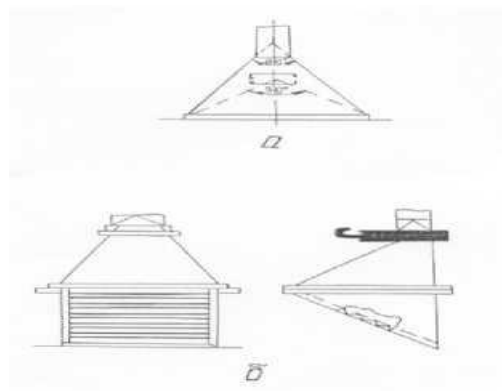
4.2 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

З аналізу впливає ШНВФ, зменшення можливе цих небезпечних факторів на організм людини реалізують: пристроями, установками, захисним одягом та електронними системами.

4.1.1 Захист від шкідливих речовин

Рівень шкідливого та небезпечного фактору напилювального процесу, в першу чергу, визначається способом напилювання, видом і складом матеріалу, що напилюється. Характер розвитку і тяжкість протікання, залежать від їх концентрації в зоні дихання.

Ми використовуємо для ЕДН дроти які не мають покриття, але процес розплавлення дротів у процесі напилення дуже схожий зі зварюванням. Частково виділяються з електродів у процесі плавлення ЗА такі як: Fe, Mn, Si, та гази – CO, NO_x, CO₂, H₂. Ефективним способом захисту є загальна вентиляція, якщо цього буде не достатньо або економічно не вигідно можна використовувати місцеву вентиляцію. Для місцевої вентиляції використовують пересувні фільтровентиляційні агрегати, або місцеву витяжну вентиляцію типу панелі рівномірного відсмоктування (рис. 4.1.б), яка встановлюється над робочим місцем працівника чи над місцем напилення виробу. При використанні ЕДН присутні горизонтальні потоки газів, це пояснюється тим, що стиснене повітря яке розпилює матеріал перпендикулярно до площі деталі, але паралельно до землі. У зв'язку з цим доцільно використовувати панель рівномірного відсмоктування.



а – зонт; б – панель рівномірного відсмоктування.

Рисунок 4.1. - Основні конструкції місцевої витяжної вентиляції

4.2.2 Захист від шкідливого випромінювання

Висока температура напильовального потоку та використання джерел нагрівання металу призвели до зміни інтенсивності і спектрального складу випромінювання, що має вплив на обслуговуючий персонал. Потужність потоків випромінювання таких теплових джерел в десятки разів перевищують інтенсивність природного випромінювання сонця. В їх спектрі випромінювання крім інфрачервоного (ІЧ) представлено видиме і ультрафіолетове (УФ) – усі частини спектру оптичного діапазону електромагнітних випромінювань. УФ випромінювання характеризується не тільки наявністю благотворних частин спектру, таких як довгохвильове (УФА) і середньохвильове (УФ-В), але й найбільш агресивною його частиною - короткохвильовим випромінюванням (УФ-С). Таким чином, спектр електродугових джерел значно відрізняється від природного. Допустима інтенсивність УФ опромінення встановлюється з урахуванням спектрального складу стосовно до одягненої людини при обов'язковому захисті очей та відкритої поверхні тіла не більш $0,3 \text{ м}^2$ і повинна складати не більше $11,0 \text{ Вт/м}^2$ для діапазону УФ-А, $0,02 \text{ Вт/м}^2$ - для УФ-В, $0,002 \text{ Вт/м}^2$ - для УФ-С. Засобами обов'язкового індивідуального захисту зварників від оптичного випромінювання під час дугового зварювання відкритою дугою є:

- Окуляри та респіратори для захисту обличчя;
- спеціальний одяг який не тільки буде захищати від бризок але й закривати тіло від дії ОВ;
- зниження інтенсивності випромінювання;
- лікувально-профілактичні заходи.

В залежності від виду зварювання та сили струму підбирають необхідний клас світлофільтра. У даному випадку так як відновлювальні роботи ЄДМ проводяться на режимах з силою струму у діапазоні 277-360 А, підбираємо за даними з таблиці світлофільтри С-6, або С-7.

4.2.3 Захист від надмірного шуму

Рівень звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку і еквівалентні

рівні звуку на робочих місцях виробничих приміщень і на території підприємств наведено в таблиці 4.1. Для встановлення вентиляції, кондиціонування повітря і повітряного опалення допустимі рівні повинні бути на 6 дБ менше рівнів, вказаних в таблиці 4.1 .

Допустимі рівні шуму повинні відповідати ДСН 3.3.6.037-99, а загальної і місцевої вібрації - ДСН 3.3.6.037-99. З метою запобігання передачі шуму від

шумних робочих місць до порівняно тихих, між ними встановлюють акустичні екрани висотою до 4-6 м, обладнанні з двох боків матеріалом, що поглинає звук: надтонким склом або базальтовим волокном, а з зовнішньої сторони ще закриті перфорованим металічним листом.

Таблиця 4.1. - Допустимі рівні шуму

Рівні звукового тиску, дБ в октавних смугах середньо геометричними частотами, Гц									Рівні звуку та еквівалентні рівні звуку дБЛ
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

Стіни установок для ЕДН покриті облицювальним матеріалом з звукопоглинанням з коефіцієнтом поглинання звуку не меншим 0,8. На обладнання, що гучно шумить, встановлюють, якщо це можливо за умовами його експлуатації, спеціальні звукоізолюючі кожухи.

4.2.4 Захист від ураження струмом

Виробничі приміщення з точки зору ураження електричним струмом належать до категорії особливо шкідливих. Експлуатація зовнішніх електроустановок прирівнюється до умов експлуатації в особливо небезпечних приміщеннях. Електротехнічні вироби з точки зору безпеки повинні відповідати вимогам ДНАОП 0.00-1.21-98 та ДНАОП 0.00-1.32-01.

Для запобігання ураження працівника електричним струмом забезпечено:

- усе обладнання яке працює під напругою заземлено;
- на усіх агрегатах є попереджуючі знаки відповідного кольору;
- обмежена напруга холостого ходу відповідно до умов праці і виду робіт пов'язаних з використанням електричних установок та агрегатів до 42В;
- вологість у приміщенні не більше 60%;
- спец одяг працівника та робоче місце (підлога, приміщення) сухі;
- працівник має інвентар захищаючий його від непередбачуваних ситуацій, а саме – чоботи з великою гумовою підошвою, резинові рукавиці (для виконання робіт пов'язаних з обладнанням).

4.2.5 Захист від продуктів напилення в процесі роботи

Використання спеціального одягу - найважливіша умов забезпечення безпеки праці, профілактики травматизму та професійного захворювання. Для захисту від випромінювання, бризок розплавленого металу, механічних пошкоджень, переохолодження при роботі на відкритому повітрі в холодний період року зварники використовують спеціальний одяг (костюми, халати, фартухи), рукавиці та інші засоби індивідуального захисту.

Спецодяг вибирається в залежності від способу зварювання і умов праці у відповідності з НПАОП 28.5-1.02-07.

Спецодяг повинен бути зроблений з вогнестійких матеріалів. Верхня частина одягу повинна перекривати штани, або застібатися з нижньою частиною одягу – це потрібно для запобігання потрапляння бризок під одяг. Рукавиці повинні перекривати рукава для запобігання потрапляння бризок під спецодяг. Для захисту рук у відповідності з НПАОП 28.5-1.02-07 слід застосовувати прості рукавиці, рукавиці з крагами.

4.2.6 Способи захисту від рухомих частин пристроїв

Для запобігання ураження працівника механічним фактором таким як затягування у рухомі частини пристроїв виконано такі заходи: забезпечено наявність відповідних знаків біля місць або станків рухомими частинами;

забезпечено огороження робочих місць або станків від потрапляння торонніх осіб; встановити світлові датчики, які будуть вимикати рухомі частини та станки при потраплянні сторонніх предметів та осіб у небезпечну зону.

4.3 Вентиляція

Для видалення аерозолів і газів, що утворюються при ЕДН в виробничих приміщеннях, застосовується місцева, загально обмінна і комбінована механічна вентиляція згідно з ДСТУ 2456-94. У даному випадку ми використовуємо місцеву вентиляцію типу панелі рівномірного відсмоктування, це пояснюється тим що при напиленні матеріалу на виріб ми маємо горизонтальні потоки повітря. Вентиляція буде встановлена над обтирачем в якому буде встановлена наша деталь (розподільний вал). Таким чином всі шкідливі речовини, які видуються потоком кисню разом з розплавленим електродним матеріалом і прямують в напрямок виробу, потраплять під дію вентиляції.

Основною необхідною умовою забезпечення ефективного уловлювання цих шкідливих частинок місцевим витяжним пристроєм з відстані 25...50 см є те, що витрата повітря, яке проходить через повітряно-приймальну лійку діаметром, як правило, 125 – 160 мм.

Розрахунок об'єму повітря, яке необхідно видалити місцевою вентиляцією L_m , визначаємо, виходячи з заданої швидкості всмоктування біля джерела виділення шкідливих речовин, характеристики спектру швидкостей всмоктування для певної конструкції всмоктувального отвору та наявності поверхонь, що огорожують зону всмоктування розраховуємо за формулою (4.1):

$$L_m = 3600 F_0 V_0, \quad (4.1)$$

де F_0 – площа відкритого перерізу витяжного отвору відсмоктувача, м²;

V_0 – швидкість всмоктування повітря у цьому прорізі, м/с.

Площу F_0 визначають конструктивними особливостями технологічного обладнання та вибраного витяжного пристрою. Значення V_0 знаходять, виходячи з умов забезпечення заданої швидкості повітря V_x в зоні зварювання або різання на відстані X (м) від центра отвору.

Швидкість руху повітря, що створюється місцевими відсмоктувачами біля джерел виділення шкідливих речовин, повинна бути при зварюванні у вуглекислому газі дротом суцільного перерізу і порошковим - не більше 0,5 м/с.

Для витяжних пристроїв з гострими краями найпростішої форми швидкість всмоктування повітря розраховується за формулою (4.2):

для округлих та квадратних отворів без екрана

$$V_0 = 16V_x (X / d)^2, \quad (4.2)$$

де d - діаметр отвору, який умовно може дорівнювати значенню квадрату швидкості, м;

Виходячи з умов та рекомендацій, а також конструкції нашої місцевої системи вентиляції маємо, що $X = 0,5$ м, $d = 1$ м, $V_x = 0,5$ м/с.

Розрахуємо об'єм повітря який потрібно видалити місцевою вентиляцією.

$$V_0 = 16 \cdot 0,5 \cdot (0,5/1)^2 = 2 \text{ м}^3/\text{с},$$

Прийmemo для розрахунку виходячи з габаритів виробу який відновлюється, що F_0 – площа відкритого перерізу витяжного отвору відсмоктувача дорівнює приблизно 1 м^2 (витяжне вікно вентиляції використовується з розмірами $1 \times 0,8$ м).

$$L_m = 3600 \cdot 1 \cdot 1 = 3600 \text{ м}^3/\text{год}$$

З рішення встановлюємо що необхідний об'єм повітря що відсмоктується повинен дорівнювати $3600 \text{ м}^3/\text{год}$.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

В роботі на заміну попередньому методу зміцнення розробляється новий спосіб – електроіскрове легування деталей «підшипник правий» насосу НШ10Г, виготовлених з алюмінієвого сплаву.

У проектному способі використовується та сама установка «Електрон-22» та обладнання для механічної обробки.

Схеми технологічних процесів зміцнення розглянутих дефектів базовим та проектним способом наведені в таблиці 5.1 [7].

Таблиця 5.1. Технологічні операції, основний час та норми часу при базовому та проектному способах зміцнення

Технологічний процес	Назва операцій	t_0 , год.	t_k , , год.
Базовий	1. Наплавочна	0,06	0,12
	2. Токарна	-	0,08
	3. Круглошліфувальна	-	0,02
Проектний	1. Наплавочна	-	0,02
	2. Зварювальна	0,02	0,08
	3. Круглошліфувальна	-	0,02

Припускається, що економічна ефективність буде досягнута за рахунок скорочення норм часу на виконання основних операцій, скорочення витрат зварювальних матеріалів та газу. Дані, які необхідні для розрахунку економічної ефективності від впровадження проектного способу наведені в таблицях 5.2 -5.3.

Таблиця 5.2. Режими зміцнення при базовому та проектному способах

Параметр	Базовий	Проектний
1. Діаметр зварювального дроту, мм	1,2	0,8
2. Зварювальний струм, А	100	120
3. Напруга, В	19	20
4. Витрата вуглецевого газу, м ³ /год	0,48	0,54

Таблиця 5.3. Ціни на обладнання і матеріали, вуглецевий газ

Назва	Оптові ціни, грн..
Установка 01.06-228 «Ремдеталь»	28600
Напівавтомат зварювальний ПДГ-312УЗ	
Зварювальний випрямляч ВДУ-504	
Верстат токарно-гвинторізний 1В62Г	34250
Верстат круглошліфувальний 3У-132М	36410
Зварювальний дріт 1,2Нп-30ХГСА, 1 кг	46,84
Зварювальний дріт 0,8Нп-30ХГСА, 1 кг	31,23
Вуглецевий газ, м ³ /год	29,9

5.1 Витрати на основні матеріали

При базовому методі зміцнення основні матеріали не використовуються. У запропонованому способі зміцнення використовуються втулки, виготовлені з листа сталі 45 товщиною 1 мм. Собівартість такої втулки складає 7,8 грн.

5.2 Витрати на зварювальний дріт при легуванні

$$C_{en} = Q_n \cdot \beta \cdot C_{en} \cdot K_{tr}, \quad (5.1)$$

де β – коефіцієнт витрати зварювального дроту на 1 кг наплавленого металу з врахуванням втрат на угар, розбризкування;

C_{en} – ціна 1 кг зварювального дроту, грн;

K_{tr} – коефіцієнт, який враховує транспортно-заготівельні витрати, $K_{tr}=1,04-1,06$.

Масу наплавленого металу визначасмо за формулою [7]:

$$Q_n = 0,001 \cdot F' \cdot l \cdot \gamma', \quad (5.2)$$

де F' – площа поперечного перерізу шву, см²;

l – довжина валика (шву), см;

γ' – щільність основного металу, г/см³.

$$Q_n^{\delta} = 0,001 \cdot 0,06 \cdot 242 \cdot 7,8 = 0,11 \text{ кг};$$

$$Q_n^{np} = 0,001 \cdot 0,04 \cdot 68,5 \cdot 7,8 = 0,02 \text{ кг};$$

$$C_{en}^{\delta} = 0,11 \cdot 1,15 \cdot 46,84 \cdot 1,05 = 6,22 \text{ грн};$$

$$C_{en}^{np} = 0,02 \cdot 1,15 \cdot 31,23 \cdot 1,05 = 0,75 \text{ грн}.$$

Витрати на газ (CO₂) [23]:

$$C_z = P_z \cdot t_0 \cdot C_z \cdot \kappa_{mp}, \quad (5.3)$$

де P_z – норма витрати газу, м³/год;

C_z – вартість 1 м³ газу, грн;

$$C_z^{\delta} = 0,48 \cdot 0,06 \cdot 29,9 \cdot 1,05 = 0,90 \text{ грн};$$

$$C_z^{np} = 0,54 \cdot 0,02 \cdot 29,9 \cdot 1,05 = 0,33 \text{ грн}.$$

5.3. Витрати електроенергії

$$C_e = \sum_{i=1}^m C_{ei} \quad (5.4)$$

де m – кількість операцій в технологічному процесі [8];

C_{ei} – витрати електроенергії при виконанні i -тої операції.

1) Витрати електроенергії на зварювання (наплавлення) [8]:

$$C_{e_{зв}} = Q_n \cdot \beta_e \cdot C_e, \quad (5.5)$$

де β_e – витрати електроенергії, кВт;

C_e – ціна 1 кВт електроенергії для підприємств-виробників, $C_e = 1,30$ грн.

$$\beta_e = \frac{U_{зв} \cdot I_{зв}}{\eta \cdot 1000}, \quad (5.6)$$

$$\beta_e^{\delta} = \frac{19 \cdot 100}{0,6 \cdot 1000} = 3,16 \text{ кВт}$$

$$\beta_e^{np} = \frac{20 \cdot 120}{0,6 \cdot 1000} = 4 \text{ кВт}$$

$$C_{e\text{ зб}}^{\bar{\delta}} = 0,11 \cdot 3,16 \cdot 1,30 = 0,45 \text{ грн.};$$

$$C_{e\text{ зб}}^{np} = 0,02 \cdot 4 \cdot 1,30 = 0,10 \text{ грн.}$$

2) Витрата електроенергії на механічну обробку та роботу наплавочної установки:

$$C_{e\text{ мех}} = \sum_{i=1}^n P \cdot t_k \cdot C_e \quad (5.7)$$

де P – потужність, яка споживається верстатом, кВт/год.

$$C_{e\text{ мех}}^{\bar{\delta}} = (16 \cdot 0,12 + 22 \cdot 0,08 + 25 \cdot 0,02) \cdot 1,30 = 5,40 \text{ грн.};$$

$$C_{e\text{ мех}}^{np} = (16 \cdot 0,08 + 2 \cdot 0,08 + 25 \cdot 0,02) \cdot 1,30 = 2,52 \text{ грн.}$$

3) Витрати на електроенергію при базовому та проектному способі зміцнення:

$$C_e^{\bar{\delta}} = 0,45 + 5,40 = 5,85 \text{ грн.};$$

$$C_e^{np} = 0,1 + 2,52 = 2,62 \text{ грн.}$$

5.4. Витрати на заробітну платню виробничих робітників з відрахуваннями

$$C_3 = \sum_{i=1}^m S'_{ri} \cdot t_{ki} \cdot K_m \cdot K'_o \cdot K_{\phi o} \quad (5.8)$$

де S_{ri} – годинна тарифна ставка відповідного розряду роботи i -тої операції, грн;

t_{ki} – норма часу на виконання i -тої операції;

K_m – коефіцієнт доплат до тарифного фонду за відроблений час;

$K_{\phi o}$ – податок на доходи фізичних осіб, $K_{\phi o} = 18\% = 0,18$.

$$\begin{aligned} C_3^{\bar{\delta}} &= 22,9 \cdot 0,12 \cdot 1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,18 + 27,8 \cdot 0,08 \cdot 1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,18 \\ &+ 27,8 \cdot 0,02 \cdot 1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,18 = 1,3 \text{ грн.}; \end{aligned}$$

$$C_3^{np} = 22,9 \cdot 0,02 \cdot 1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,18 + 27,8 \cdot 0,08 \cdot 1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,18 + \\ + 27,8 \cdot 0,02 \cdot 1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,18 = 0,75 \text{ грн.}$$

5.5 Амортизаційні відрахування по обладнанню кожного виду [8]

$$C_a = \frac{S_n \cdot H_a}{\Phi_\partial \cdot K_\epsilon \cdot 100} \cdot t_\kappa, \quad (5.9)$$

де S_n – першопочаткова (балансова) вартість обладнання, грн.;

Φ_∂ – дійсний фонд часу, год:

K_ϵ – коефіцієнт використання обладнання, $K_\epsilon = 0,7$;

H_a – норма амортизаційних відрахувань, $H_a = 0,15$.

$$\Phi_\partial = N_\partial \cdot t_{зм} \cdot n_{зм} \cdot K_p, \quad (5.10)$$

де N_∂ – кількість робочих днів у році, $N_\partial = 225$;

$t_{зм}$ – тривалість робочої зміни, $t_{зм} = 8$ годин;

$n_{зм}$ – кількість робочих змін, $n_{зм} = 1$;

K_p – коефіцієнт виконання робіт, $K_p = 0,95$.

$$\Phi_\partial = 255 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 0,95 = 1938 \text{ год.}$$

1) Установка 01.06-228 “Ремдеталь”, напівавтомат зварювальний ПДГ-312(УЗ), джерело живлення ВДУ-504:

$$S_n = 28600 \cdot 1,1 = 31460 \text{ грн.}$$

2) Верстат токарно-гвинторізний:

$$S_n = 34250 \cdot 1,1 = 37675 \text{ грн.}$$

3) Верстат круглошліфувальний:

$$S_n = 36410 \cdot 1,1 = 40051 \text{ грн.}$$

1) Зварювально-наплавочне обладнання:

$$C_a^{\delta} = \frac{31460 \cdot 0,15 \cdot 0,12}{1938 \cdot 0,7 \cdot 100} = 0,004 \text{ грн.}$$

$$C_a^{np} = \frac{31460 \cdot 0,15 \cdot 0,08}{1938 \cdot 0,7 \cdot 100} = 0,003 \text{ грн.}$$

2) Верстат токарно-гвинторізний:

$$C_a^{\delta} = \frac{37675 \cdot 0,15 \cdot 0,08}{1938 \cdot 0,7 \cdot 100} = 0,003 \text{ грн.}$$

3) Верстат круглошліфувальний:

$$C_a^{np} = \frac{40051 \cdot 0,15 \cdot 0,02}{1938 \cdot 0,7 \cdot 100} = 0,002 \text{ грн.}$$

Базовий метод:

$$C_{aзаг} = 0,004 + 0,003 + 0,002 = 0,009 \text{ грн.}$$

Проектний метод:

$$C_{aзаг} = 0,003 + 2 \cdot 0,0016 = 0,006 \text{ грн.}$$

5.6. Витрати на поточний ремонт обладнання та ТО

$$C_p = \frac{S_n \cdot K_{рем}}{\Phi_{\delta} \cdot K_u \cdot 100} \cdot t_k \quad (5.11)$$

де $K_{рем}$ – коефіцієнт витрат на ремонт обладнання по відношенню до його початкової вартості, $K_{рем} = 0,15$ [8].

1) Зварювально-наплавочне обладнання [8]:

$$C_p^{\delta} = \frac{31460 \cdot 0,15 \cdot 0,12}{1938 \cdot 0,7} = 0,42 \text{ грн}$$

$$C_{np} = \frac{31460 \cdot 0,15 \cdot 0,08}{1938 \cdot 0,7} = 0,28 \text{ грн.}$$

2) Верстат токарно-гвинторізний:

$$C_p = \frac{37675 \cdot 0,15 \cdot 0,08}{1938 \cdot 0,7} = 3,33 \text{ грн.}$$

3) Верстат круглошліфувальний:

$$C_p = \frac{40051 \cdot 0,15 \cdot 0,02}{1938 \cdot 0,7} = 0,08 \text{ грн}$$

Базовий метод:

$$C_{pзaг} = 0,42 + 3,33 + 0,08 = 3,83 \text{ грн.}$$

Проектний метод:

$$C_{pзaг} = 0,28 + 2 \cdot 0,08 = 0,44 \text{ грн.}$$

5.7 Витрати пов'язані з використанням площ, яке займає обладнання 8

$$C_n = \sum_{i=1}^m \frac{F_j \cdot \Pi_{nl}}{\Phi_o \cdot K_u} \cdot t_{K_i} \quad (5.12)$$

де i – номер i -тої операції;

Π_{nl} – річні витрати, пов'язані з використанням 1 м² площі виробничого помешкання, $\Pi_{nl} = 63 \text{ грн/м}^2$;

F – площа приміщення, м²;

j – коефіцієнт додаткової площі, $j = 4$ (наплавка), $j = 4,5$ (токарна), $j = 2,5$ (шліфувальна).

$$C_n^o = \frac{5,06 \cdot 4 \cdot 63}{1938 \cdot 0,7} \cdot 0,12 + 2 \cdot \frac{4,55 \cdot 4,4 \cdot 63}{1938 \cdot 0,7} \cdot 0,08 + \frac{14,47 \cdot 2,5 \cdot 63}{1938 \cdot 0,7} \cdot 0,02 = 0,29 \text{ грн.}$$

$$C_n^{np} = \frac{5,06 \cdot 4 \cdot 28}{1938 \cdot 0,7} \cdot 0,08 + 2 \cdot \frac{14,47 \cdot 2,5 \cdot 28}{1938 \cdot 0,7} \cdot 0,02 = 0,13 \text{ грн.}$$

Таблиця 6.4. Технологічна собівартість базового та проектного способів
зміцнення одної деталі, грн.

Стаття витрат	Технологія зміцнення	
	Базова	Проектна
Витрати на основні матеріали	-	6,8
Витрати на зварювальний дрiт	6,22	0,75
Витрати на вуглецевий газ	0,90	0,33
Витрати на електроенергію	5,8	2,62
Витрати на заробітну плату основних робітників	1,3	0,75
Амортизаційні відрахування на обладнання	0,009	0,006
Витрати на поточний ремонт обладнання	3,83	0,44
Витрати, пов'язані з використанням площі	0,29	0,13
Технологічна собівартість	18,35	11,83

5.8. Визначення економічної ефективності проектної технології

$$Z_{num} = C_{num} + E_n \cdot K_{num}, \quad (5.13)$$

де C_{num} – собівартість зміцнення одиниці виробу, грн;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капіталовкладень,

$E_n = 0,15$;

K_{num} – питома фондосмність виробу, грн.

$$K_{num} = \frac{\sum_{i=1}^m S_{ni} \cdot t_{ni}}{\Phi_o \cdot K_i} \quad (5.14)$$

де m – кількість операцій в технологічному процесі;

S_{ni} – первинна балансова вартість обладнання, технологічного оснащення по i -ій операції та площі будівлі, яку займає обладнання по i -тій операції:

Наплавлювання:

$$S_{ni} = 31460 + 5,06 \cdot 4 \cdot 350 = 38544,00 \text{ грн.}$$

Токарна:

$$Sni' = 37675 + 4,55 \cdot 4,5 \cdot 350 = 44841,25 \text{ грн.}$$

Шліфувальна:

$$Sni' = 40051 + 14,47 \cdot 2,5 \cdot 350 = 52712,25 \text{ грн.}$$

$$K_{num}^{\bar{o}} = \frac{38544,00 \cdot 0,12 + 44841,25 \cdot 0,08 + 52712,25 \cdot 0,02}{1938 \cdot 0,7} = 6,83 \text{ грн.}$$

$$K_{num}^{np} = \frac{38544,00 \cdot 0,08 + 52712,25 \cdot 0,02 \cdot 2}{1938 \cdot 0,7} = 3,83 \text{ грн}$$

$$Z_{num}^{\bar{o}} = 18,35 + 0,15 \cdot 6,83 = 19,37 \text{ грн.}$$

$$Z_{num}^{np} = 11,83 + 0,15 \cdot 3,83 = 12,40 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект від впровадження нового варіанту зміцнення:

$$E = (Z_{num}^{\bar{o}} - Z_{num}^{np}) \cdot A, \quad (5.15)$$

$$E = (19,37 - 12,40) \cdot 5000 = 34850 \text{ грн.}$$

Таблиця 6.5. Економічні показники впровадження нової технології

Економічні показники	Технологія зміцнення	
	Базова	Проектна
Собівартість зміцнення одиниці виробу, грн.	18,35	11,83
Питома фондоемність зміцнення одиниці виробу, грн.	6,83	3,83
Питомі витрати, грн.	19,37	12,40
Річний план зміцнення, шт.	5000	5000
Річний економічний ефект, грн.	34850	

З розрахунків видно, що впровадження нової технології зміцнення деталі «підшипник прайв» НШ-10Г під час її виготовлення економічно вигідне.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У 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 боронування, які традиційно використовуються для зміцнення деталей машин, і встановлена недостатність існуючих технологій боронування, 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 боронування з індукційним нагрівом малоефективні і не мають теоретичного обґрунтування. Проведений аналіз надав початкову інформацію щодо базових режимів боронування та показав актуальність подальших теоретичних досліджень і експериментальних розробок в даній галузі;

2. 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);

3. Розроблено та оптимізовано технологію отримання суцільного борованого шару на виробах 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 боронування необхідно підтримувати температуру процесу в межах від 1100 °С до 1350 °С з питомою потужністю індукційного генератора СВЧ від 0,45 до 0,6 кВт/мм², що забезпечить середню швидкість нагріву в поверхневих шарах виробу не менше 1000 °С/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;

4. Досліджена можливість використання комплексного боронування насичуючою пастою в поєднанні зі швидкісним локальним нагрівом СВЧ для реальних деталей (лопаток турбін, дробометних 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 дробометних лопаток економічний ефект складає 500 тис. грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

84. Mikolajczak D., Kulka M., Makuch N., Dziarski P. Laser borided composite layer produced on austenitic 316L steel. *Arch. Mech. Tech. Mater.* 2016. № 36. P. 3539.
85. Kusuvara T., Morimoto J., Abe N., Tsukamoto M. Laser boronizing of stainless steel with direct diode laser. *Journal of High Temperature Society.* 2010. № 36 (6). P. 295-299.
101. Mayrhofer P. H., Mitterer C., Hultman L., Clemens H. Microstructural design of hard coatings. *Progress in Materials Science.* 2006. Vol. 51, № 8. P. 10321114.

Економічна частина:

7. Дорожкін М.М., Гиммельфарб В.М. Відновлення деталей сільськогосподарських машин. - М.: "Урожай", 1987.-138 с.
8. Драч Е. Г., Велетнів К. М. Економіка і організація виробництва в дипломних проектах: Навч. посібник / За заг. ред. К. М. Великанова, 1996. - 285 с.
23. Чорновіл М. І., Булей І. А., Кропивний В. М. Технологічні планування підприємств та їх підрозділів з ремонту та технічного обслуговування тракторів, автомобілів та іншої сільськогосподарської техніки. Альбом: Навчальний посібник - Кіровоград: Кіровоградський державний технічний університет, 1999 - 175 с.