

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра механіки та інженерії агроecosystem

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**Некрашевич Дмитро Юрійович**

**УДК 631.331**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Підвищення зносостійкості деталей  
сільськогосподарських машин композиційними  
покриттями**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр  
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання  
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Д.Ю. Некрашевич

**Керівник роботи**  
Забродський П.М.  
к.т.н., доцент

**Житомир – 2021**

## АНОТАЦІЯ

**Некрашевич Дмитро Юрійович. Підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин композиційними покриттями. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.**

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

Проведені у магістерській роботі дослідження дозволили розробити технології зміцнення робочих органів сільськогосподарських машин зносостійкими покриттями, у яких у процесі наплавлення не змінюються закладені конструктивно експлуатаційні властивості. Для вирішення цієї проблеми проведено комплекс експериментальних досліджень, який дозволив розробити оригінальні методики отримання однорідної структури при індукційному наплавленні високолегованих хромистих заєвтектичних чавунів на вуглецеві та низьколеговані сталі. Основою методології є розробка можливості управління фазовим складом, структурою та механічними властивостями у наплавлених шарах у високолегованих хромистих доевтектичних чавунах

У процесі індукційного наплавлення на вуглецеві та низьколеговані сталі, виявлені закономірності та встановлені взаємозв'язки між параметрами зносостійкого шару дозволили зробити наукові узагальнення з єдиною науково-технічною позицією.

На підставі розробленої методології запропоновано способи зміцнення конструкції робочих органів сільськогосподарських машин, нові зварювальні (наплавочні) матеріали, технологічні процеси, що забезпечують виконання агротехнічних заходів робочими органами сільськогосподарських машин протягом усього періоду обробітку ґрунту.

*Ключові слова: сталь, зміцнення, індукційне наплавлення, чавун, робочі органи.*

## ANNOTATION

**Nekrashevich Dmitry Yurievich.** Improving the Wear Resistance of Agricultural Machinery Parts with Composite Coatings. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

The research carried out in the master's thesis allowed to develop technologies for strengthening the working bodies of agricultural machinery with wear-resistant coatings, in which in the process of surfacing the inherent structural and operational properties do not change. To solve this problem, a set of experimental studies was conducted, which allowed to develop original methods for obtaining a homogeneous structure by induction surfacing of high-alloy chromium supereutectic cast irons on carbon and low-alloy steels. The basis of the methodology is the development of the ability to control the phase composition, structure and mechanical properties in the deposited layers in high-alloy chromium pre-eutectic cast irons

In the process of induction surfacing on carbon and low-alloy steels, the identified patterns and relationships between the parameters of the wear-resistant layer allowed to make scientific generalizations with a single scientific and technical position.

On the basis of the developed methodology the ways of strengthening of a design of working bodies of agricultural machines, new welding (surfacing) materials, technological processes providing performance of agrotechnical actions by working bodies of agricultural machines during all period of tillage are offered.

*Key words: steel, hardening, induction surfacing, cast iron, working bodies.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ІНДУКЦІЙНОГО НАПЛАВАННЯ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ ХРОМИСТИХ ЧАВУНІВ НА КОНСТРУКЦІЙНІ СТАЛІ.....	9
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ БОРИДНИХ ПОКРИТТІВ СИСТЕМИ $Fe_NV-Fe-V$ .....	20
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН.....	36
ВИСНОВКИ.....	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	47

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** При експлуатації гірничо-збагачувального та металургійного обладнання, робочих органів землерийних та сільськогосподарських машин щорічні втрати металу становлять сотні тисяч тонн внаслідок абразивного зношування [1-4].

Для підвищення ресурсу деталей і вузлів, що працюють в умовах інтенсивного абразивного зносу, їх ділянки, що зношуються, зміцнюються індукційним наплавленням. Один з перспективних та недостатньо вивчених способів зміцнення – це індукційна наплавка з використанням порошкових матеріалів систем Fe-Cr-C, Fe-Cr-CB, Fe<sub>n</sub>B-Fe-B та ін. Дослідженням цього процесу займалися Ткачов В.М., Тененбаум М. М., Сидоров А.І. та ін [5-14].

У процесі формування зносостійкого сплаву на поверхні, що зміцнюється, конструкційних і низьколегованих сталей утворюється хімічна і структурна неоднорідність, в якій відносна зносостійкість її структурних зон змінюється від 0,55 до 1,0 відносно один одного.

Одним із напрямів підвищення експлуатаційної довговічності та надійності робочих органів сільськогосподарських машин є вирішення комплексного завдання, що полягає у створенні електрофізичних, хімічних та технологічних основ управління структурою та властивостями зносостійких покриттів із хромистих чавунів та сумішей механічних типу «ПС», сформованих індукційним наплавленням.

Найважливіша її частина – це формування на поверхні деталей зносостійкого шару, що працює в умовах інтенсивного абразивного знакозмінного і ударно-абразивного зношування. Для цього можуть успішно застосовуватися металозберігаючі технології індукційного зміцнення.

Тому не випадково останніми роками значно активізувалися дослідження області індукційної наплавки там.

Слід зазначити, що в даний час, тільки в Україні, Білорусії, країнах Євросоюзу та США, у Китаї у виробництві автомобілів та тракторів, ґрунтообробних механізмів, деталей залізничної техніки та інших галузях машинобудування, 90-95% усіх наплавочних робіт виконується за допомогою індукційної наплавлення.

Проведений аналіз умов експлуатації робочих органів, зміцнених індукційним наплавленням, показав, що їх передчасне зношування відбувається через утворення неоднорідної структури по перерізу шару при наплавленні хромистих чавунів та сумішей механічних типу «ПС» на вуглецеві або низьколеговані сталі.

З іншого боку, ефективність виробництва та якість продукції нерозривно пов'язані з проблемою повного використання можливостей, закладених у зміцнюваних матеріалах та технологіях їх нанесення на конструкційні сталі. У зв'язку з цим актуальне дослідження впливу фізичних, хімічних та технологічних прийомів або їх комплексного впливу на будову, структуру, фазовий склад у системах Fe-Cr-C, Fe-Cr-C-B, Fe<sub>n</sub>B-Fe-B при індукційному наплавленні.

Зазначені напрямки можуть бути реалізовані шляхом як легування зносостійкого покриття карбідоутворюючими елементами або бором, так і при використанні нагрівання електромагнітним полем підвищеної частоти та оптимізацією складу наплавної шихти та додатковою дією на наплавлений шар електричної дуги вугільного або графітового електрода. Все це дозволяє управляти формуванням первинної структури шару, що наплавляється, а комбінація фізико-хімічних і технологічних впливів дає сукупність нових наукових і технічних рішень, що дозволяють максимально підвищити експлуатаційні характеристики зміцнених виробів.

**Мета та завдання дослідження** Мета роботи полягала у отриманні однорідної структури при індукційному наплавленні високолегованих хромистих заевтектичних чавунів на вуглецеві та низьколеговані сталі.

Завдання досліджень:

1. Моделювання та дослідження процесів індукційного наплавання високолегованих хромистих чавунів на конструкційні сталі;

2. Дослідити вплив структури та властивостей боридних покриттів системи  $Fe_NB-Fe-B$ ;

3. Провести експериментальні дослідження.

**Об'єкт дослідження** – процес індукційного наплавлення високолегованих хромистих заевтектичних чавунів на вуглецеві та низьколеговані сталі.

**Предмет дослідження** – закономірність впливу параметрів процесу наплавлення високолегованих хромистих заевтектичних чавунів на триботехнічні характеристики отриманих покриттів.

**Методи дослідження.** Експериментальні дослідження проводилися в лабораторіях кафедри механіки та інженерії агроєкосистем Поліського національного університету, а польові у виробничих умовах сільськогосподарських підприємств Житомирської області. Аналіз літературних джерел здійснювався аналітико-монографічним методом. Обробку експериментальних даних виконували за допомогою методів математичної статистики з використанням прикладних програм.

#### **Перелік публікацій за темою роботи:**

1. Савченко В. М., Міненко С. В., Некрашевич Д. Ю. Теоретичне обґрунтування можливості отримання пластичних боридних покриттів на поверхнях деталей сільськогосподарських машин. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «*Техніка та технології в агропромисловому виробництві*» (присвячена 55-й річниці заснування інженерно-технологічного факультету Полтавського державного аграрного університету) 07-08 жовтня 2021 року. Полтава. 2021. С. 152-154.

2. Савченко В.М., Куликівський В.Л., Некрашевич Д.Ю., Сливинський В.О. Вплив бору на властивості сталей. «*Сучасні проблеми та перспективи розвитку машинобудування України*», присвяченої 20-й річниці з дня створення факультету конструювання та дизайну Національного

університету біоресурсів і природокористування України. м. Київ. 2021. С. 172-174.

3. Савченко В. М., Сутковий О. В., Шлярчук Ю. П., Некрашевич Д. Ю., Павлюк І. В. Способи плазмового поверхневого зміцнення. Збірник тез доповідей XXII Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" присвячену 121-річчю з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 16–18 жовтня 2021 року, м Ніжин. Ніжин. 2021. С. 217-220.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практичний інтерес для сільськогосподарських підприємств представляє розроблений технологічний процес зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 15 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 48 сторінок комп'ютерного тексту, містить 15 рисунків та 12 таблиць.



## РОЗДІЛ 1

# МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ІНДУКЦІЙНОГО НАПЛАВАННЯ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ ХРОМИСТИХ ЧАВУНІВ НА КОНСТРУКЦІЙНІ СТАЛІ

У сучасному інноваційному машинобудуванні прийом мікролегування конструкційних сталей поряд з грамотно підібраними режимами їхньої термічної та/або хіміко-термічної обробки дозволяють не лише ефективно вирішувати питання розробки нових ресурсозберігаючих технологій та підвищення якості металопродукції, а й збільшувати термін служби деталей, отримувати нові споживчі характеристики та добиватися гарантованих, відтворюваних, добре технологічно успадкованих механічних властивостей матеріалу.

Добре відомо і увійшло багато довідників з металургії позитивний вплив мікролегування бором на прожарюваність конструкційних сталей. Здатність гарантовано та інтенсивно подрібнювати структуру при прискореному охолодженні робить бор обов'язковим компонентом багатьох високоміцних низьколегованих сталей, розробка яких одна із найважливіших напрямів у металургії. Мікродобавки бору дозволяють заощаджувати такі гостродефіцитні легуючі елементи, як нікель, хром і марганець, не знижуючи якості сталі.

Особливостями сталевих сталей є її висока технологічна пластичність, сприятливе співвідношення міцнісних і пластичних властивостей у відпаленому та термозміцненому станах, а також високий рівень характеристик прожарюваності при значно меншому, ніж у легуваних сталях, зміст дефіцитних легуючих елементів (Ni, Cr, Mn, Mo та ін.), про що свідчать роботи Е.М. Грінберга, Н.П. Лякішева, М.В. Бобильова (див. рис. 1.1).

Мікролегування сталей бором дозволяє при меншому, ніж у середньовуглецевих сталях, рівні гарту застосування таких матеріалів при виробництві відповідальних деталей сучасних автомобілів, сільгосптехніки, верстатів, інструментів.

У вітчизняній практиці розроблені та знайшли широке застосування боровмісні марки сталей наступних систем легування: С-Мn-В, С-Мn-Сr-В, С-Мn-Сr-Ni-В. Однак, незважаючи на видимі переваги боровмісної сталі, її впровадження в масове виробництво стримується в основному суто технологічними труднощами, до яких слід віднести необхідність ретельної підготовки розплаву перед введенням бору за такими домішками, як кисень і азот, з метою максимального скорочення можливості зв'язування бору з цими елементами. Цим, як правило, і пояснюється досить низька частка споживання боровмісної сталі українськими машинобудівними заводами, тоді як на європейських та американських заводах частка споживання цієї сталі у 3-4 рази вища.

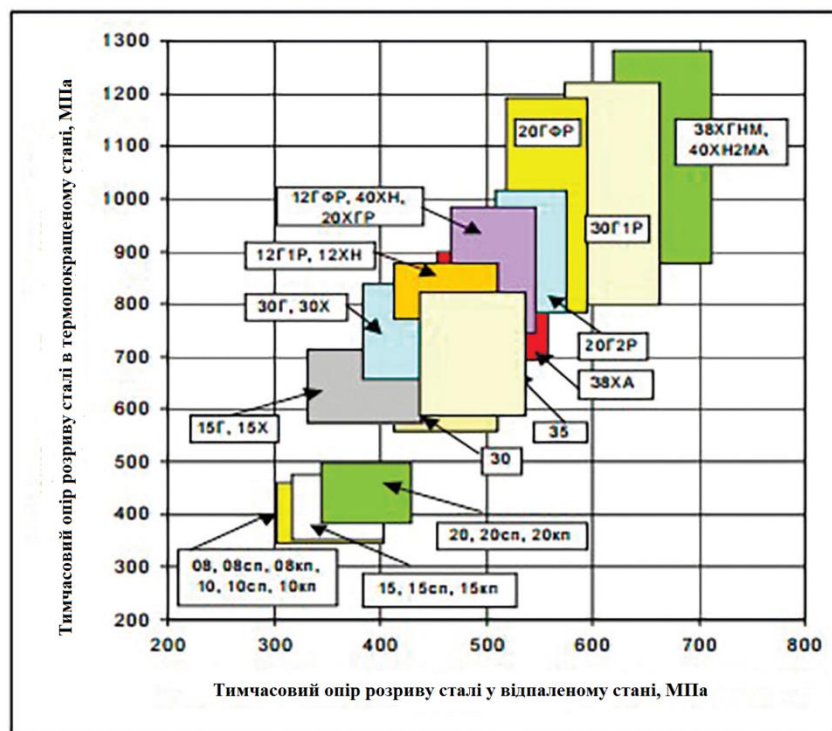


Рис. 1.1. Співвідношення міцності основних марок холодно штампованих сталей і сталей мікролегованих бором

Тому, незважаючи на технологічні переваги боровмісних сталей, їх впровадження в масове виробництво пов'язане з певними труднощами, до яких відносяться складності металургійного характеру (необхідність отримання строго нормованих концентрацій бору в процесі виплавки сталі, підтримання на

заданому рівні вмісту азоту, титану і алюмінію) і обмеження науково-обґрунтованих рекомендацій щодо вибору режиму легування стали бором залежно від вихідного складу, наступних переділів та термообробок, технологічних особливостей виробництва та ін.

Також у цей час накопичено значний експериментальний і теоретичний матеріал, що характеризує поведінку бору в сталях та особливості застосування таких сталей. Тим не менш, аналогічні дослідження для матеріалів зварних та/або наплавних швів мікролегованих бором незначні.

Зміст бору в багатьох сучасних конструкційних сталях незначний (0,001-0,02%), що скоріше відповідає поняттю домішки, а не легуючої добавки. У той же час настільки невеликі добавки бору визивають значне подрібнення зерен, різке поліпшення прожарюваності, підвищення жароміцності в результаті зміцнення меж зерен боридами. Усього 0,002-0,003% бору можуть замінити у сталі до 2% нікелю або до 0,3-0,5% – молібдену. Але тільки дуже малі «гомеопатичні» добавки бору дають позитивні результати.

Так при мікролегуванні бором зростає також твердість та зносостійкість, гаряча пластичність, покращується зварюваність жаростійких аустенітних та спеціальних нержавіючих сталей. Крім того, бор підвищує критичну точку  $A_{c3}$ , і що нижчий вміст вуглецю, то сильніший вплив бору (див. рис. 1.2).

При цьому положення нижньої критичної точки  $A_{c1}$  бор впливу не надає.

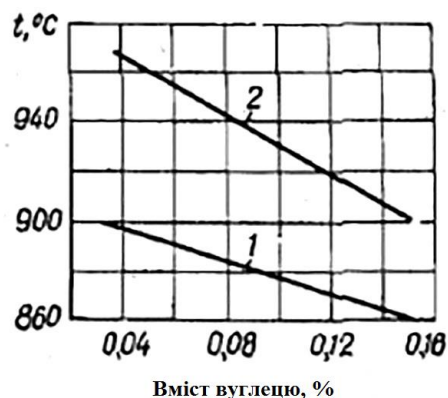


Рис. 1.2. Спільний вплив вуглецю та бору на положення критичної точки  $A_{c3}$ .

Цікавим є вплив бору на кристалізацію сталі. Так мікролегування бором збільшує швидкість зародження центрів кристалізації, зменшує ступінь переохолодження сталі та підвищує швидкість її затвердіння.

Відповідно до сучасних досліджень, запровадження до 0,1% бору різко знижує поверхневе натяг сталі. Цей ефект призводить до адсорбції бору на межах зерен, що ростуть, і уповільнення лінійної швидкості росту кристалів і відповідно до подрібнення (бейнітизації і мартенситизації) структури. При цьому у більшості сталей зона стовпчастої кристалізації скорочується, структура стає однорідною та дрібнозернистою, покращуються пластичні властивості. Подальше збільшення концентрації бору викликає утворення боридної евтектики Fe-B і охрупчівання.

Вважається, що унікальний специфічний вплив бору на прожарювання сталей пов'язаний із зміною в межах зерен та поверхневою активністю (горофільність) бору щодо заліза сталі. Будучи розчинений у малій кількості  $\alpha$ -Fe, бор розподіляється нерівномірно, зосереджуючись по межах зерен. Оскільки атоми бору менші за атоми заліза, то бор, займаючи вільні вакансії за межами зерен, не збільшує, а зменшує спотворення кристалічних ґрат, тим самим підвищуючи роботу зародка утворення нової фази (ферит).

Відомий вплив на уповільнення швидкості зростання фериту за межами зерен у бористих сталях надає також і велика міцність зв'язків атомів B-C у порівнянні зі зв'язками Fe-C та Fe-B, що уповільнює збіднення меж зерен аустеніту вуглецем.

У той же час підвищення вмісту вуглецю в бористій сталі вище 0,1-0,3% надає нейтралізуючий вплив на її прожарювання, що обумовлено утворенням нових фаз – карбідів бору, карбоборидів, борованого аустеніту та перехід бору за межами зерен із твердого розчину в хімічні з'єднання. Випадання за межами зерен дрібнодисперсної боридної фази також сприяє зниженню прожарюваності в результаті спотворення ґрат і зародкового діяства дрібних частинок цієї фази. Тут знову проявляється складна спільна дія C і B, збільшення вмісту в сталі

вуглецю знижує можливу кількість фериту, зменшує зону впливу бору і тим самим ефективність його впливу на прожарювання.

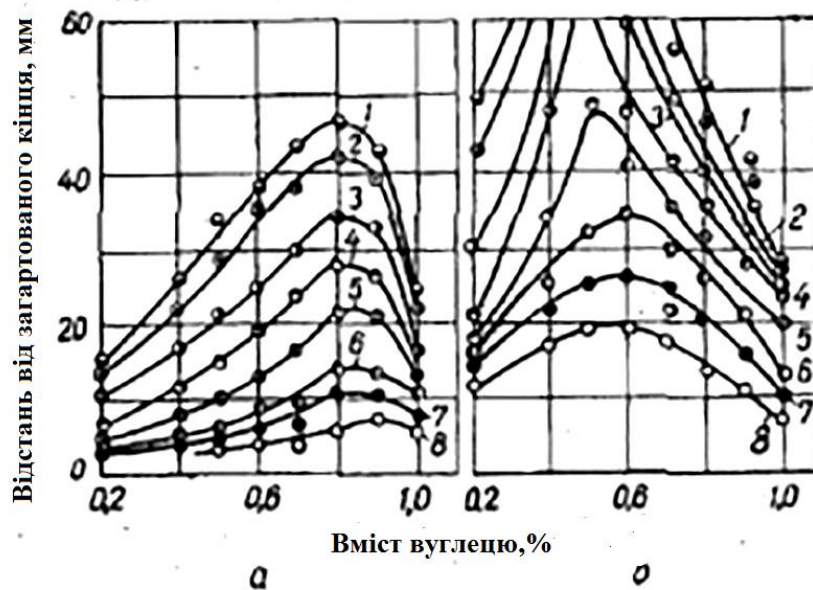


Рис. 1.3. Вплив вмісту вуглецю в мартенситній сталі мікролегованої 0,001 % бору на глибину прожарювання: а – сталь без бору; б - боровмісна сталь з часткою мартенситу 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 99% (1-8) відповідно

Згідно рис. 1.3, найбільше посилення прожарювання під впливом бору спостерігається для низьковуглецевої доевтектоїдної сталі. Максимальна прожарювання спостерігається у сталі, що містить 0,8% С. Для заевтектоїдних сталей ефект впливу бору негативний. Для сталей з 0,4-0,75% дію бору знижується пропорційно вмісту вуглецю в сталі.

Коефіцієнт посилення прожарювання вуглецевих і низьколегованих сталей ( $F_b$ ) під впливом бору може бути виражений рівнянням:  $F_b = 1 + 1,5 (0,9\% C)$ . З якого випливає, що бір не впливає на прожарювання сталі з вмістом вуглецю 0,9% і вище, але має значну ефективність в маловуглецевої сталі. Слід зазначити, що незважаючи на збільшення прожарюваності, бор, однак, не впливає на утворення тріщин при загартуванні.

Ефективність впливу бору знижується і зі зростанням температури нагрівання під загартування. При підвищеній температурі збільшується розчинність бору і внаслідок поверхневої активності концентрація в граничних

зонах збільшується аж до значень, що перевершують максимально можливу розчинність бору в аустеніті з виділенням надлишкової фази Fe<sub>2</sub>B. З цих причин спостерігається екстремальний вплив зростаючого змісту бору в сталі на її прожарювання.

За високих температур і низької швидкості загартування збільшення вмісту бору понад 0,004% вже не позначається на прожарюваності і навіть навпаки – дещо зменшує її.

Тому інтервал оптимальних концентрацій бору для такої властивості стали як прожарювання вельми вузький і, в основному, знаходиться в межах 0,001-0,003%. Саме в цих кількостях дія бору еквівалентна відомій дії присадки 1,33% Ni + 0,31% Cr + 0,04% Mo. Як вказується, дія 0,002% на прожарювання рівнозначно впливу 1,5% Ni . Еквівалентний вміст бору по-різному для різних сталей і залежить від складу і співвідношення елементів (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Кількість легуючих елементів, еквівалентних 0,001% бору, для отримання рівномірного занартування.

Кількість легуючих елементів, еквівалентних 0,001% В, для отримання рівномірного загартування					
Основний склад сталі, %		Еквівалентна кількість легуючих елементів, %			
С	Mn	Mn	Ni	Cr	Mo
0,2	0,75	0,85	2,4	0,42	0,35
0,4	0,75	0,65	1,9	0,35	0,25
0,6	0,75	0,45	1,2	0,20	0,15
0,8	0,75	0,15	0,4	0,07	0,05

Добавка бору до легованих конструкційних сталей дозволяє значно знизити рівень їх легованості такими елементами, як хром, нікель, марганець і молібден, при одночасному збереженні необхідного рівня загартування та інших механічних властивостей.

Так добавка до 0,003% бору збільшує межу пружності і дозволяє створювати нові борсодержащие рессорнопружинні сталі 55ХГР і 55СГ2Р. Тут

підвищення вмісту бору призводить до виділення боридної фази та збіднення бором скупчень навколо дислокацій, що знижує межу пружності.

Боровмісні вуглецеві сталі з успіхом замінюють і марганцеві, що мають підвищену схильність до утворення тріщин при термообробці. Заміна марганцовистих сталей боровмісних дозволяє отримати 10% економії. За досвідом добавка 0,002-0,005% дозволяє звільнитися від дефіцитних легуючих елементів - молібдену і нікелю - і замінити дорогу цементовану сталь 20ХНМ, що йде на виготовлення важко навантажених деталей, більш дешевої 2. Борна сталь має вищу міцність і після цементації набуває вищої твердості. Цементована поверхня містить меншу кількість залишкового аустеніту, що значно підвищує зносостійкість та довговічність деталей зі сталі 20ХГР.

Крім збільшення прожарювання адсорбційні шари бору ускладнюють процес розчинення надлишкових карбідів, наприклад,  $Cr_{23}C_6$  як у сталі Х15Н25, при загартуванні та їх виділення при старінні. Утворення адсорбційного шару на межі розділу зерен супроводжується тим, що активні ділянки поверхонь розділу виявляються вже зайнятими, та процеси розчинення карбідів при загартуванні, а також зворотне виділення внаслідок міграції на внутрішні поверхні при старінні виявляються неможливими.

Легування бором у межах 0,4-0,7% аустенітних сталей з карбідним Х18Н12Б та інтерметалідним 10Х16Н25В5Ю2Т зміцненням також підвищує їх міцнісні властивості. Характеристики тривалої міцності таких аустенітноборідних сталей при 650-700 ° С значно перевершують аналогічні сталі без бору. Крім того, для сталей з борідним зміцненням характерна висока тривала пластичність, що не зменшується зі збільшенням тривалості випробувань. Висока тривала пластичність аустенітно-борідних сталей Х18Н12БР, Х15Н24В4Т2Р, 10Х16Н25В51-02ТР обумовлена високою стабільністю структури та властивостей у процесі тривалих витримок при температурах 800-700 оС.

Аустенітноборидні сталі, на відміну від аналогічних сталей без бору, в результаті дрібнішого зерна і коагуляції зміцнюючої фази мають високу гарячу пластичність поблизу температури солідусу. Ці сталі

завдяки наявності двофазної аустенітно-боридної структури не схильні до утворення гарячих тріщин у шві та навколошовній зоні при зварюванні плавленням, боротьба з якими скрутна при зварюванні жароміцних аустенітних сталей.

Так, легування бором сталі X25H2C8 у кількості 0,2-0,5% покращує її зварюваність, дозволяє позбутися навколошовних гарячих тріщин, не знижуючи міцності за збереження тривалої пластичності.

Ефективність впливу бору на жароміцні властивості сталей пояснюється зміцненням меж зерен боридами, що утворюються у прикордонних зонах, проте розчинність бору у твердому розчині сплавів на основі заліза незначна. Внаслідок гомофільності бір накопичується біля меж зерен, викликає місцеве перенасичення твердого розчину і цим сприяє утворенню боридів на межах зерен навіть за дуже малої загальної концентрації їх у металі.

Так при електронному мікроскопічному дослідженні тонкої фольги сталі у феритній облямівці за межами аустенітного зерна виявлені бориди заліза ( $\text{Fe}_2\text{B}$  та  $\text{FeB}$ ) вже при утриманні сталі до 0,0025% В.

У більшості ж легованих сталей за межами зерен бор утворює складні бориди типу  $(\text{Mo}, \text{W}, \text{Cr}, \text{Ni})_x\text{B}_y$  та карбоборидні фази  $(\text{Cr}, \text{Fe})_2\text{BC}$ ,  $(\text{Cr}, \text{Fe})_{22}(\text{B}, \text{C})_6$  і  $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}(\text{BC})_6$ . Таким чином, адсорбована по межах зерен боридна фаза при надзвичайно малій товщині міжзеренних прошарків забезпечує максимальне гальмування повзучості.

Слід зазначити, що вплив бору на зміну фазового складу легованих сталей полягає в основному у зменшенні розчинності легуючих елементів (наприклад, хрому та вольфраму). Отже, легування сталі бором корисно тільки при малих його змістах, коли гальмування пластичної деформації, що викликається виділенням карбоборидних фаз, переважає в зміцненні сталі. При великих



вмістах бору значна частина легуючих елементів, що зміцнюють твердий розчин, зв'язується в карбоборідних фазах і тому не бере участь у зміцненні твердого розчину.

Наявність бору сприяє деякому перерозподілу елементів. Так, присутність бору в білому чавуні зменшує розчинність хрому та марганцю в цементиті. У процесі відпалу концентрація зазначених елементів у цементиті зростає, бор при цьому гальмує.

Істотний інтерес представляє також технологічна можливість поліпшення деформованості деяких марок бористих сталей. Так, отримання деформованих нержавіючих сталей аустенітного класу ОХ18Н10РЗ і ОХ18Н6Г9РЗ, що містять більше 1,8%, утруднено різким зниженням пластичності, що виключає можливість гарячої деформації в литому стані. Структуру цих сталей утворюють тендітні великі бориди, що нагадують первинний цементит в заевтектоїдних білих чавунах. Обробка таких сталей у процесі кристалізації ультразвуковими коливаннями спричиняє значне подрібнення боридної фази у всіх зонах зливка. Структура стає більш однорідною, що сприяє підвищенню механічних властивостей та покращенню технологічної пластичності. З'являється можливість кування заготовок зі сталі, що містить 3,5%.

Зниження пластичності та ударної в'язкості, укрупнення аустенітного зерна та здатність його до зростання при нагріванні, а також можливість утворення зламів становлять технічні недоліки та інших марок бористих сталей. Деякі технологічні заходи дають змогу уникнути зазначених недоліків. Наприклад, вже описана обробка бористих сталей ультразвуком та введення елементів, що збільшують у структурі кількість аустеніту, підвищують пластичність та ударну в'язкість.

Введення в сталь поряд з бором до 0,02-0,03% Ті надає вплив на зростання зерна, що гальмує, при нагріванні до 370 °С. Збільшення вмісту титану до 0,1-0,15% перешкоджає зростанню зерна у всьому інтервалі температур нагріву (870-1200 °С) при 1,5-годинній витримці.

Такий вплив титану можна пояснити бар'єрною дією різних його сполук, нерозчинних в аустеніті навіть за дуже високих температур.

Підвищення зносостійкості, довговічності деталей гірничорудної промисловості, металургійного обладнання ґрунтообробних та кормопереробних робочих органів, що експлуатують в умовах інтенсивного абразивного та ударно-абразивного зношування, є особливо актуальною проблемою у машинобудуванні. Аналіз роботи сільськогосподарської техніки показує, що в процесі її експлуатації найбільші втрати часу та витрати коштів витрачаються на запасні частини, це відбувається через їхню низьку працездатність. Найбільш швидко зношуються ґрунторізальні робочі органи: лапи культиваторів, сівалки, долота, лемеша, диски луцильників тощо, у кормовиробництві – молотки кормодриловок.

Для подібних деталей небажаним є притуплення ріжучих кромek, що призводить до порушення агротехнічних вимог та скорочення врожайності сільськогосподарських культур, а при кормовиробництві знижується продуктивність та підвищується витрата енергії.

Вартість виробів становить незначну частину загальних витрат господарств на придбання та підтримання працездатності сільськогосподарської техніки. Витрати підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних і кормопереробних машин окупаються дуже короткі терміни з допомогою підвищення врожайності, зменшення простоїв, зниження витрати пального та інших позитивних ефектів справної роботи агрегатів.

Для забезпечення надійної роботи вирішальним фактором є не пошук якихось спеціальних за хімічним складом сталей, а застосування оптимальної технології зміцнення робочого органу.

При правильному виборі матеріалів зносостійкого шару, методів його нанесення на поверхню, що зношується, можливе багаторазове збільшення

ресурсу деталей при порівняно невеликому збільшенні вартості, так як витрати на зміцнюючі матеріали становлять 2-4% від загальної ціни виробу.

У технічній літературі, присвяченій процесам наплавлення, таким як дугова, газова, плазмова, електроіскрове зміцнення, індукційна та ін, перевага зміцнення різних деталей наплавленням між різними процесами визначається двома факторами:

- нанесення зносостійкого матеріалу на місця найбільшого зносу деталі;
- ефективне використання зміцнення швидкозношуваних робочих органів сільськогосподарських машин в умовах великосерійного та масового виробництва.

Так досліджено процес ручного газового наплавлення лемешів, де як зміцнюваний матеріал застосовувався сормайт. З огляду на низьку продуктивність і велику потребу кисню і ацетилену подальша робота з цього методу була припинена.

Для підвищення продуктивності процесу зміцнення проводилися дослідження із застосуванням методу багатоелектродної наплавки. Необхідної якості наплавлення деталі досягнуто не було. Наплавлений метал утворився змінної товщини (до 35 мм замість 13-20). Глибина проплавлення основного металу становила від 1,0 до 2,5 мм, що викликало пропали тонкої частини леза. У межах виникала неоднорідність по хімічному складу. Спосіб не знайшов застосування для наплавлення робочих органів.

Публікувалися роботи з наплавлення робочих органів графітовим пластинчастим електродом, порошковою стрічкою, автоматизованою наплавкою, плазмовим наплавленням електроіскровим методом, по використанню наномодифікаторів, але ці технологічні процеси поширення не отримали через низьку продуктивність і якість наплавлених деталей.

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ БОРИДНИХ ПОКРИТТІВ СИСТЕМИ $Fe_NB-Fe-B$

Для покращення фізико-механічних характеристик поверхні різних деталей, їх зміцнення та підвищення терміну служби в технології машинобудування широко застосовуються методи хіміко-термічної обробки (ХТО), що полягають у впливі на сталеві поверхні температурою та речовинами, що хімічно реагують з матеріалом деталі. При ХТО на поверхні металу утворюються різні функціональні покриття, переважно дифузійної природи, що містять як неметалеві (C, N, S, Si, P, B), так і металеві (Cr, Ti, Al, Ni та ін.) елементи в різних фазових станах, а також продукти їх взаємодії з основним матеріалом деталі (карбіди, нітриди, карбонітриди, інтерметаліди та ін.).

Серед сучасних процесів ХТО особливе місце займають технології насичення поверхневого шару конструкційних та легованих сталей бором – борування. При боруванні на поверхні сталеві деталі вдається отримувати протяжні шари, що відрізняються високою твердістю та міцністю до корозії, абразивною стійкістю та високим опором до зношування. Більшість процесів борування тривалі, енергоємні і важко вбудовуються у технологічні схеми сучасних виробництв.

Інтенсифікація процесів ХТО, зокрема борування, може здійснюватися із застосуванням технологій високошвидкісного нагріву поверхні сталеві деталі з нанесенням на неї боруючого складу струмами високої частоти (ТВЧ) до температур утворення нових фаз та евтектик (1370-1620 К) у системах Fe-B, Fe - BC та Fe-Me-BC, де Me – це легуючий елемент із групи Cr, Mn, Ni тощо. При цьому на відміну від добре вивчених процесів борування легованих сталей із засипок та обмазок при температурах до 1220К відкритими залишаються загальні питання хімічної взаємодії компонентів у таких системах, що впливають на фазовий склад властивості продуктів, що утворюються.

Авторами проводилися дослідження впливу природи боруєчого агента, а також активаторів у складі бору на основні характеристики підшару, що утворюється в процесі ТВЧ-нагріву і борування поверхні досліджених легованих сталей. Відомо, потовщений підшар (200-600 мкм) може значно збільшити термін служби деталі, що зазнає інтенсивного абразивного зношування в особливо важких умовах при обробці щільних піщаних, кам'янистих ґрунтів.

Для зміцнення поверхневих шарів металів та сплавів дифузійне насичення різними металами та неметалами проводиться з використанням обмазок, різних паст, розплавів або газового середовища.

Використовуючи високочастотний нагрівання (ТВЧ), проводилися дослідження щодо скорочення часу технологічного процесу отримання покриття з підшару в основному металі та впливу на формування однорідної структури його при спільному боруванні та зміцненні твердими сплавами.

Сталеву поверхню перед нанесенням обмазки, що борує, зачищають від іржі (окалини) і масел. Процес зачистки від іржі ділянок, якими проводиться підготовка до створення борідного покриття, – трудомістка операція, т.к. вона виконується вручну металевою щіткою, наждачним колом або пальником, або складнішими спеціальними установками для очищення деталі від окалини.

Для видалення іржі з поверхні заготовки або деталі було розроблено оригінальний спосіб і шихта. Спосіб полягає в тому, що алюміній, що входить до складу шихти, здатний відновлювати оксиди металів із перебігом екзотермічних реакцій. Тепло, що утворюється в цьому процесі, видаляє всі органічні забруднення з поверхні, а алюміній, взаємодіючи з іржею і окалиною, відновлює його за рівняннями:



Внаслідок термічної реакції частина окисленого заліза відновлюється, а інша – згоряє.

Для проведення очищення поверхні, на якій проводилося борування, дозатором на неї насипався термітний склад з різним за кількістю співвідношенням компонентів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Склад термітної суміші

№ зразка	Хімічний склад, %	Товщина шару іржі, мм	Результати процесу горіння
1	KClO <sub>4</sub> – 18 Al – 27 окалина – 55	0,03	склад прореагував повністю
2	KClO <sub>4</sub> – 30 Al – 27 окалина – 43	0,04	склад прореагував повністю
3	KClO <sub>4</sub> – 17 Al – 30 окалина – 53	0,0025	запалюється та горить нестабільно
4	KClO <sub>4</sub> – 30 Al – 24 окалина – 46	0,02	процес протікає миттєво

Після впливу термічного складу з поверхні видалено всі забруднення і на деяких ділянках відбулося відновлення оксидів заліза.

Товщину зразків вимірювали мікрометром до очищення та після. Результати вимірювань занесено до таблиці.

Таким чином, розроблений термітний склад забезпечує стабільне горіння та видалення іржі (окалини) з поверхні, що зачищається для підготовки створення борідних покриттів на робочих органах сільськогосподарських машин.

Як боруючі агенти використовували технічний карбід бору В<sub>4</sub>С за ДСТУ та аморфний бір. Флюс складався з прожареної бури, борного ангідриду силікокальцію та зварювального флюсу АН 348 (П-0,66). Він відповідає за хімічним складом тому, що застосовується для індукційного наплавлення. Флюс вводився для розкислення, видалення окисних плівок та перекладу твердофазного процесу у квазірідинному боруванні. Активаторами борування були СаF<sub>2</sub> (фтористий кальцій) і NH<sub>4</sub>Cl (хлористий амоній).

Суміші для створення борідних покриттів наносилися на підготовлені поверхні та закріплювалися на них за допомогою рідкого скла, казеїнового клею або епоксидної смоли, що вводиться до їхнього складу за рахунок зменшення кількості флюсу.

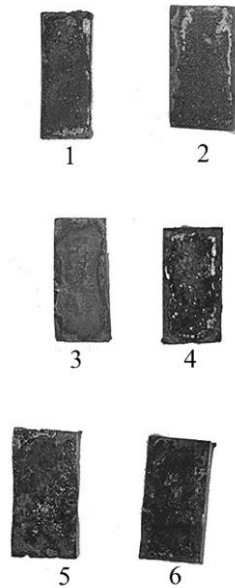


Рис. 2.1. Вплив вмісту флюсу на процес змочування сталі 65Г: 1 – В4С 2% + флюс 8%, час нагрівання 1,5 хв; 2 - В4С92 + 8 флюс, час нагрівання 2,2 хв; 3 – У 84% NH<sub>4</sub>Cl 16% + час нагрівання 2,2 хв; 4 – В4С 84% – NH<sub>4</sub>Cl 16% + флюс 10%, час нагрівання 2,2 хв; 5 - В 84%, NH<sub>4</sub>Cl 6% + флюс 10%, час нагрівання 1,5 хв; 6 – В 84% – NH<sub>4</sub>Cl 6% + флюс 10%, час нагрівання 2,2 хв.

Нагрівання підготовлених зразків виробляли в петльовому індукторі, підключеному до високочастотного лампового генератора ВЧГЗ - 160/0,066. Геометрія індуктора забезпечувала нагрівання досліджуваних зразків. У процесі нагрівання генератор був налаштований на середні режими роботи (анодний струм 5,1 А, мережевий струм 0,78 А, анодна напруга 7,2 кВ).

В індукторі одночасно нагрівалося 18 зразків до температури 1470-1570 К протягом 1,0-2,5 хв., температуру вимірювали ренеєвою термопарою (діаметром 0,2 мм), привареним конденсаторним зварюванням до поверхні зразка. Після витримки при зазначеній температурі нагрівання припинялося, і зразки виймали з індуктора і остигали на повітрі до кімнатної температури.

Змочування поверхні заготовок при розплавленні шихти визначали вмістом у ній компонентів флюсу та часом витримки в індукторі.

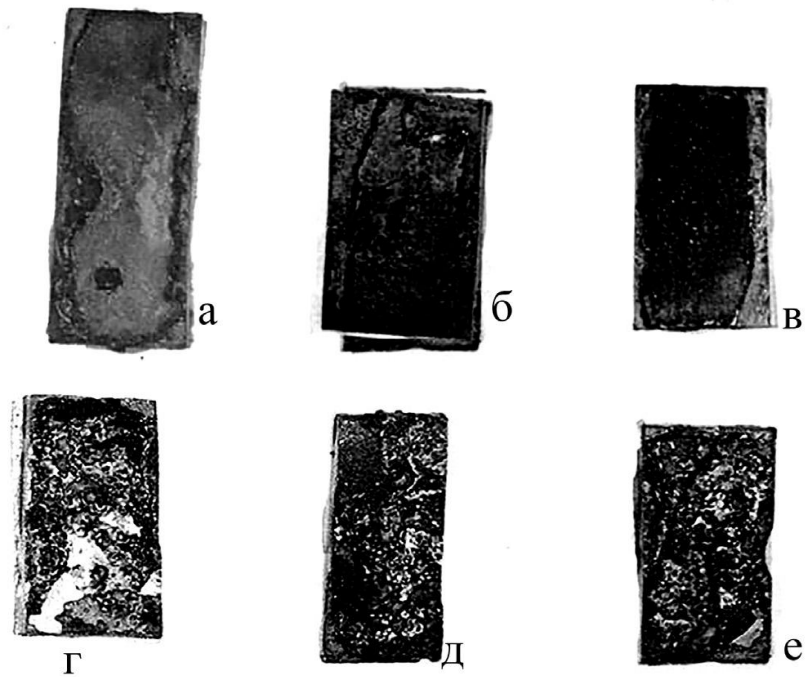


Рис. 2.2. Поверхня затверділого боридного розплаву на зразках зі сталі 65Г: 90% + CaF<sub>2</sub> 5% + Фл 5% 90% + CaF<sub>2</sub> 5% + Фл 5% 90% + CaF<sub>2</sub> 5% + Фл 5% (1,16 хв.) (1,46 хв.) (2,16 хв.)

Змочування розплавленої шихти на поверхні заготовок відбувається повністю (рис. 2.2 а, б, в, г, д, е) і частково розтікається від початкових геометричних розмірів нанесених порошкових матеріалів, незалежно від того, який активатор (NH<sub>4</sub>Cl, CaF<sub>2</sub>) знаходиться в шихті, що містить карбід бору або аморфний бор.

Для того щоб поверхня, що піддається зміцненню, повністю покрилася розплавом, що борює, достатньо 1,16 хв. Час повного змочування визначається складом шихти.

У попередніх експериментах при нанесенні на очищену сталеву поверхню боруючого компонента В<sub>4</sub>С та подальшому індукційному нагріванні до температури 1470-1570 К, яку вимірювали термопарою з різним часом витримки були отримані острівцеві двофазні (FeB + Fe<sub>2</sub>B) боридні покриття товщиною 0,02-0,03 мм, що не задовольняє вимогам, що пред'являються до ґрунтообробних робочих органів через незначну товщину.

Склад досліджуваних сумішей наведено у таблиці 2.2.



Таблиця 2.2 – Склад боруючих сумішей, мас. %

Суміш	Борувальний агент	Активатор	Флюс
I	В.С (90)	-	П-0,66 (10)
Ia	В.С (84)	N HCl (6)	П-0,66 (10)
II	В.С (84)	-	П-0,66 (16)
IIa	В.С (90)	CaF <sub>2</sub> (5)	П-0,66 (5)
III	В (90)	-	П-0,66 (10)
IIIa	В (90)	CaF <sub>2</sub> (5)	П-0,66 (5)

Було встановлено, що при СВЧ-нагріванні сталей Ст3, 50, 50ХГА, 65Г, покритих боруючими складами, при вибраних параметрах процесу ( $T = 1470-1570$  К, витримка 1-2 хв.) на всіх зразках утворюються покриття,

на вигляд нагадують наплавлений сплав. Їх рентгенофазовий аналіз показав присутність фаз: б-Fe, FeV і Fe<sub>2</sub>V, Fe<sub>3</sub> (C,V), Fe<sub>23</sub> (C,V)<sub>6</sub>, мета- та ортоборатів заліза (Fe<sub>3</sub>VO<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>VO<sub>6</sub>, Fe<sub>3</sub>VO<sub>5</sub>), сліди вюстити FeO та FeO · Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, тобто при ТВЧ-нагріві легованих вуглецевих сталей під шаром флюсу П-0,66, що містить від 84 до 90% боруючих агентів, на їх поверхні утворюються складні борідні покриття. Для з'ясування показників та структури отриманих шарів, і навіть стану боридів у яких були вивчені мікрофотографії шліфів.



Рис. 2.3. Структура борідного підшару на сталі 65Г, сформованого за 1 хв. із різних сумішей (x250): а – Ia; б - II; в – IIIa

З рисунку 2.3 випливає, що при вибраних температурних значеннях часу борування структура та стан кордону отриманих підшарів відрізняються. Однак, на відміну від класичних борідних голкоподібних двофазних шарів, на поверхні заготовок формується стійкіша, краща в умовах важкого абразивного, знакозмінного і ударного зносу пластична борідна евтектика з вираженою або дифузійною межею. Змін структури основного металу через перегрівання практично не спостерігається. Створюються борідні покриття трьох типів.

Так для сумішей, що містять як боруючий агент однакову кількість карбиду бору, флюсу і відрізняються тільки наявністю активатора ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{CaF}_2$ ), що сприяє посиленню оборотних дифузійних процесів, особливо при низьких температурах, на початку процесу борування спостерігається утворення дрібнозернистої евтектичної структури з включеннями фази  $\text{Fe}_2$ . Мікротвердість такого зміцнення не вище 700-750 HV при товщині шару до 100 мкм, проглядається чітко помітна межа розділу покриття з основним металом (рис. 2.3 а).

Для суміші II без активаторів у покритті спостерігається виражений ріст дендритів, островів та друзів фази  $\text{FeB}$  у матриці  $\text{Fe}_2\text{B}$ , мікротвердість покриття досягає 1100-1250 HV, товщина шару – до 200 мкм. Покриття характеризується дифузною межею розділу з основним металом (рис. 2.3 б).

Експериментально встановлено, що найбільш реакційноздатними виявилися суміші на основі аморфного бору (рис. 2.7 в). Так, у суміші IIIа, що містить додатково 5% активатора  $\text{CaF}_2$  та 5% флюсу, за 1 хв. товщина шару становила 600 мкм при мікротвердості 2200-2300 HV. Основна структура є переплавленою гомогенізованою залізо-боридною евтектикою з включенням фази  $\text{FeB}$ , що утворилася з такою швидкістю, що з розплаву при його твердінні не встигли виділитися частинки шлаку, крім того, формується межа розділу покриття + основний метал.

Дослідження розподілу мікротвердості отриманих підшарів по глибині показало наявність у них, як правило, двох зон – твердішого поверхневого шару і менш твердого шару, що лежить під ним, протяжність та характеристики яких різняться (рис. 2.3).

Існування такої шаруватої структури в отриманих покриттях в даному випадку пояснюється не наявністю двох фаз  $\text{FeB}$  і  $\text{Fe}_2\text{B}$ , розташованих у матеріалі один за одним, а змістом, що відрізняється однією зміцнюючою фазою по глибині покриття. Вигляд зміцнюючої фази в нашому у разі визначається природою боруючого агента та складом суміші. Про це свідчать як структура

отриманих покриттів, так і залежність товщини, твердості та зносостійкості покриттів, що утворюються на сталях 65Г і 50ХГА за різний час з обмазки на основі  $B_4C$ , а також дані їхнього рентгенофазового аналізу (табл. 2.5).

Борідні підшари, отримані при ТВЧ-нагріві цих зразків протягом 1,5-2 хв., мають іншу структуру (рис. 2.4).

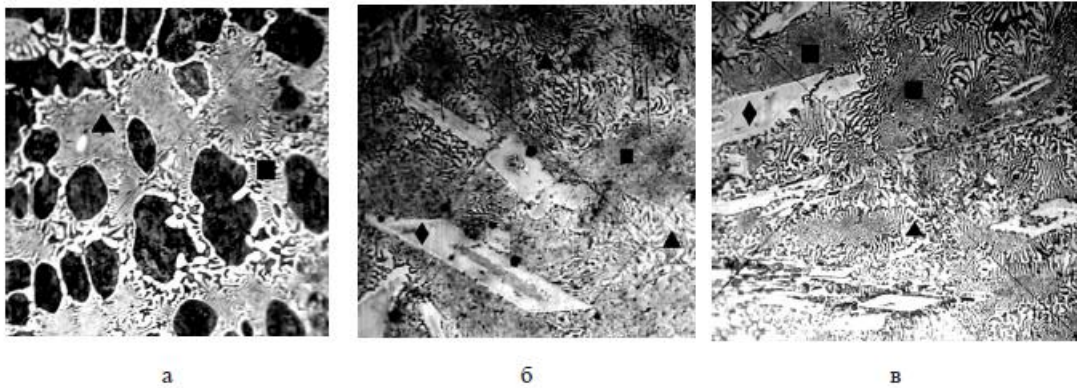


Рис. 2.4. Структура борідних підшарів на сталі 65Г, отриманих за 1,5 хв. із різних сумішей (x300): а – І; б - Па; в – Ша

Як впливає з малюнка 2.4, за таких умов борування утворюються структури двох типів. Так, у покритті, отриманому при ТВЧ-нагріві з суміші, що містить карбід бору і флюс П-0,66 без активаторів, спостерігається розростання ледебурітоподібної залізо-боридної евтектики, яка мала дрібнозернисту структуру на зразках, витриманих при температурі 1200-1570 1 хв., причому склад евтектики змінюється на світліших і темних ділянках. У евтектичній матриці спостерігаються рівномірно розподілені замкнуті карбідні області (рис. 2.4 а).

Мікротвердість покриття, що утворюється 1450-1600 HV, товщина до 300-350 мкм. Введення до складу боруєчої суміші активатора  $CaF_2$  і (або) заміна карбиду бору на активніший аморфний бір Ваморфн призводять до появи в залізо-боридної матриці нових фаз пластинчастих кристалів змішаних карбоборидів Mn і Fe (рис. 5.8б, в). Мікротвердість таких покриттів сталі 65Г досягає максимальних значень 2250-2350 HV, а товщина – 600-800 мкм. Покриття обох типів мають згладжений кордон з основним металом, викликаний

його частковим підплавленням внаслідок посиленого прогріву струмами високої частоти і теплом реакцій, що відбуваються (рис. 2.5 а, в).

У процесі індукційного наплавлення, за наявності бору або його компонентів у наплавній шихті, відбувається періодичне перебіг екзотермічних реакцій (рис. 2.5 а, б). Спостерігається ефект термоциклірування (рис. 2.5 а,б) температурна крива 2. Можна припустити, що термічний процес також позитивно впливає на створення борідних покриттів на зміцнюваних поверхнях деталей.

При додаванні до складу шихти залізного порошку відбувається значний приріст маси (рис. 2.5 а, термогравіметрична крива 2) порівняно з шихтою, у якій відсутня (рис.2.5 б).

На рисунку 5.6 а, б наведені типові структури наплавлених сплавів (ПГ-УС-25 і ПС-14-60) з товщиною борідних підшарів 0,1-0,15 мм, отриманих при ТВЧ-нагріві сталі 65Г під обмазкою, що борює, на основі  $V_4C$  та флюсу П-0,66 без активатора (рис. 5.6 а) та у присутності 5% фториду кальцію (рис. 2.6 б). Основою (матрицею) зносостійкого покриття в обох випадках є залізо – борідна евтектика, проте для цієї сталі частка більш твердих світлих областей у її обсязі значно менша, ніж на зразках сталі 65Г, борованих протягом 1 та 1,5 хв.

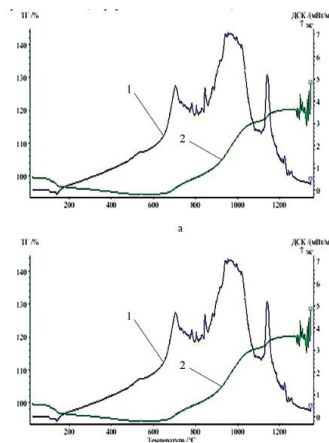


Рис. 2.5. Протікання хімічних реакцій у наплавній шихті; (а) склад – сплав марки ПГ-УС25-80%, флюс (АСМ) – 12%, карбід бору – 8%; б) склад – сплав марки ПГ-УС25 – 80%, флюс (АСМ) – 8%, карбід бору – 8%, порошок заліза ПЖВ – 3 4%.

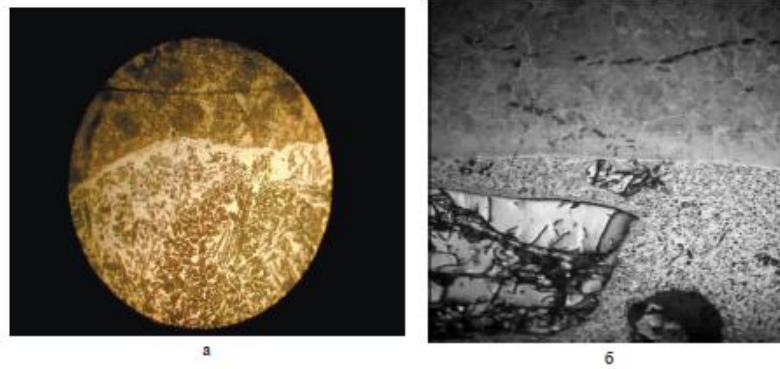


Рис. 2.6. Структура зносостійкого покриття у борідному підшарі, отриманому за 2 хв. для матеріалу: а - ПГ-УС25 на сталі 65Г; б - ПС-14-60 на сталі 50 (х400).

У структурах першого типу (рис. 5.6 а) у покритті добре видно острови та друзи зміцнюючої фази FeB. Подібні структури наведено малюнку 2.6 б. Мікротвердість цих ділянок досягає 2100-2200 НV, а твердість матриці, що утворюється при ТВЧ-бурванні сталі 50ХГА, становить 1700-1800 НV, що на 100-200 одиниць вище, ніж для сталі 65Г, товщина покриття, що утворюється, навпаки, трохи менше, та становить 450-600 мкм. Введення активатора CaF<sub>2</sub> прискорює процес за 2 хв. у покритті не встигають утворюватися включення боридів заліза, а в залізо-боридній матриці видно карбідні області, подібні до тих, які показані на малюнку 2.5, а проте їх площа і загальна частка в структурі помітно менше (рис. 2.5 б). Мікротвердість такого покриття 1300–1400 НV, товщина 450–600 мкм.

Створення зносостійкого боридного покриття робочих органах сільськогосподарських машин вироблялася як на лапових генераторах, а й у перетворювачі. Борідний склад наносився безпосередньо на лезову поверхню заготовки.

На рисунку 2.6 показана стрілчаста лапа "Алтай", встановлена в індуктор з двома паралельними гілками, підключений до високочастотного перетворювача "Еліст 120 ПЗ", з насипаною шихтою, що містить карбід бору до 8%.

Суміш наносилася на лезову поверхню висотою 1,0-1,2 мм спеціальним дозатором. Потім поміщалася індуктор (рис. 2.6) і витримувалася там протягом

1,1-1,2 хв. при температурі 1200-1250 К, потім заготівля остигала, шлак, що утворився, знімався металевою щіткою, і повторно на це ж місце насипався порошок хромистого чавуну марки ПГ-УС25 80% і 20% - флюсу, висотою 1,0-1,2 мм, і у цьому ж індукторі здійснювали наплавлення зносостійкого чавуну протягом 0,58-1,0 хв.

Глибина борваного підшару становила 250-300 мкм. Далі з наплаочного зразка вирізувалися темплети, виготовлялися шавфи для металографічних досліджень на мікроскопі CarlZeissAxioObserverz 1m, і визначалася мікротвердість NetronМН-6 при навантаженні 100 г.



Рис. 2.6. Заготівля стрілкової лапи «Алтай», встановлена в індуктор із двома паралельними гілками

Склад для створення боруючого покриття на сталі 65Г містив 80% карбиду бору та 20% – флюсу.

Характерна структура наплавленого хромистого чавуну на підшар борідного покриття показана рисунку 2.7.

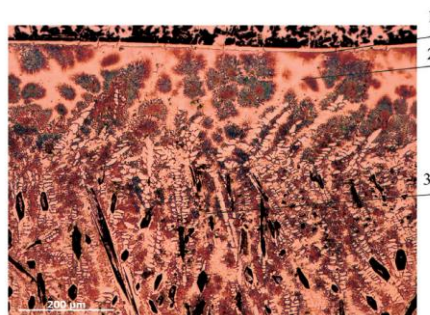


Рис. 2.7. Характерна структура наплавленого сплаву марки ПГ-УС25 на борідному покритті сталі 65Г (товщина підшару 100-150 мкм)



В результаті дифузійних процесів і механічного перемішування основного металу (підшару) сплавом, що наплавляється, не утворюється характерних структурних зон, які створюються при наплавленні порошкових матеріалів типу сормайт.

По лінії розділу наплавленого сплаву та основного металу створюється смужка (1). Поруч із нею розташовується тонко диференційована пластинчаста евтектика (2). Потім на базі хромистих карбідів утворюються складні карбобриди (3). Внаслідок високої термодинамічної активності бору він витісняє вуглець із фазових складових структур наплавленого.

Внаслідок активної дії бору повністю пригнічується утворення доевтектичної структури, і його величина настільки значна в борідному підшарі металу, що зміцнюється, що його достатньо, щоб сформувати нові структури в наплавленому сплаві по лінії з'єднання з основним металом. Мікротвердість наплавленого сплаву на борідний підшар показано рисунку 2.8.

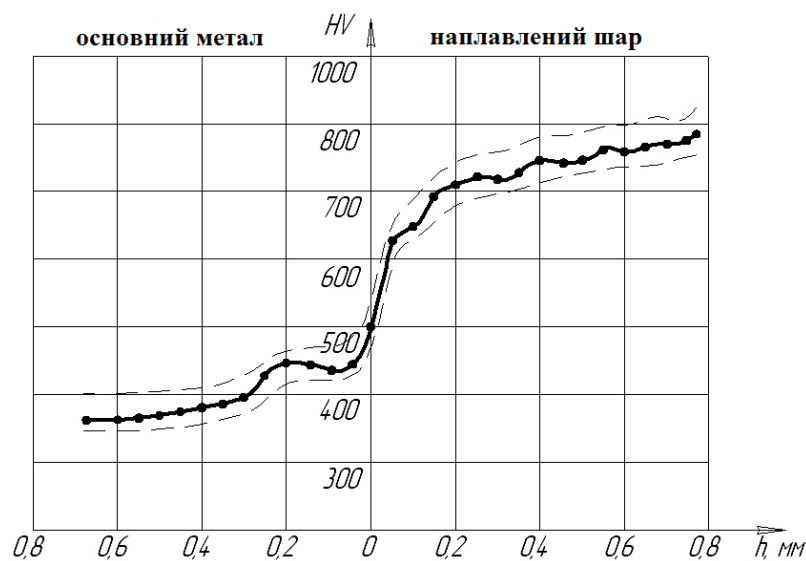


Рис. 2.8. Мікротвердість наплавленого сплаву марки ПГ-УС25 та основного металу 65Г

Проведений мікрорентгеноспектральний аналіз дозволив встановити склад основних фаз боридних підшарів, що виходять при ТВЧ-бурованні досліджених сталей табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати мікрорентгеноспектрального аналізу основних фаз у боридних підшарах на сталі 65Г і 50ХГА

Позначення фази, елементи	Опис фази, морфологія	Склад, елемент, %		Хімічна формула
		ваговий	атомний	
■ -Fe, C, B	матриця – сіре поле в ледебурітоподібній евтектиці	Fe – 57,25 C – 28,02 B – 14,73	21,72 49,42 28,86	$FeC_{23}B_{13}$
■* -Fe, C, B	той же	Fe – 64,31 C – 22,30 B – 13,38	27,12 43,73 29,15	$FeC_{16}B_{11}$
□ – Fe, C, B	зміцнююча фаза – світлі області евтектики	Fe – 50,63 C – 23,11 B – 26,25	17,24 36,59 46,17	$FeC_{21}B_{27}$
◆ – Fe, Mn(Cr), C, B	зміцнююча фаза - пластинчасті кристали або голки	Fe – 64,70 Mn(Cr) – 1,21(1,35) C – 23,01 B – 11,08	28,11 0,54(0,62) 46,49 24,87	$Fe_{31}MnC_{36}B_{51}$ $Fe_{35}CrC_{98}B_{51}$
◆* – Fe, C	зміцнююча фаза – темні замкнуті області	Fe – 86,60 C – 13,40	58,15 41,85	$Fe_{1,3}C$

Примітка. \* Дані для аналогічної фази у покритті на сталі 50ХГА.

Як впливає з даних таблиці 2.3, до складу основної матричної та зміцнювальної фази всіх досліджених покриттів крім заліза і бору входить вуглець, причому його частка коливається від 13,4 до 28 мас. %, що відповідає вуглецевим фазам від цементиту та карбоборидів Fe до спеціальних карбідів та спеціальних карбоборидів Fe, Mn та Cr. Такий склад фаз в отриманих покриттях добре узгоджується з відомою діаграмою стану потрійної системи Fe-C-B, ізотермічні перерізи якої при 900, 1000 та 1080 К наведені в роботі. Основними рівноважними фазами у системі Fe-C-B при вмісті вуглецю до 25, а бору до 35 мас. %, за даними цієї роботи, є диборид заліза  $FeB_2$ , цементит  $Fe_3C$ , борований цементит  $Fe_3(C,B)$  та спеціальний борований карбід  $Fe_{23}(C,B)_6$ . У разі здійснення високошвидкісного процесу ТВЧ-борування створюються умови для утворення метастабільних фаз, фаз змінного складу і твердих розчинів бору і вуглецю в залозі (табл. 2.3). На користь цього свідчать і дані рентгенофазового аналізу (ідентифікація по картотечі JCPDS), що об'єктивно підтверджують існування у



всіх отриманих покриттях тільки фази  $\text{FeB}_2$  та її кристалохімічного димеру  $\text{Fe}_2\text{B}_4$  (рис. 2.8).

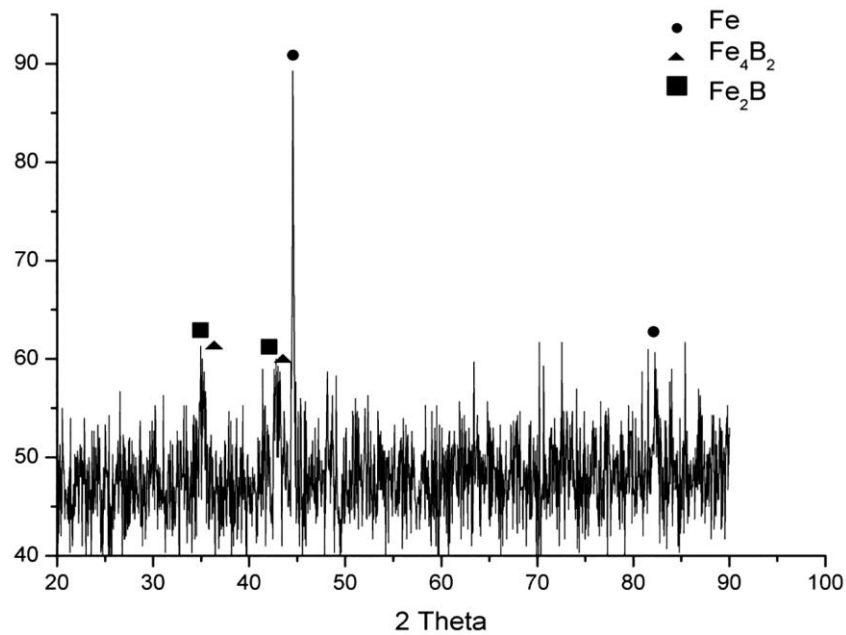


Рис. 2.8. Рентгенограма борідного покриття, отриманого сталі 65Г за 1,5 хв. із суміші Па

Дослідження розподілу мікротвердості отриманих покриттів по глибині показало наявність у них, як правило, двох зон твердішого поверхневого шару і менш твердого шару, що лежить під ним, довжина та характеристики яких різняться (рис 2.9).

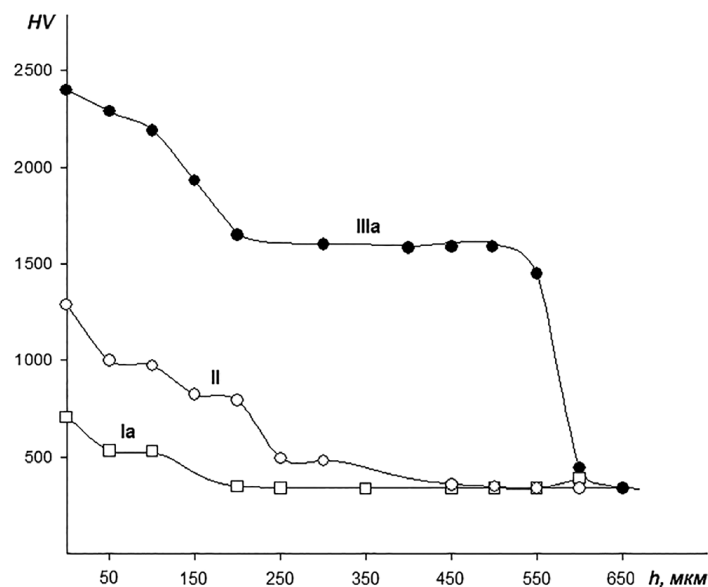


Рис. 2.9. Розподіл мікротвердості по глибині покриттів, отриманих з різних сумішей, що борують, на сталі 65Г за 1 хв.

Таблиця 2.4 – Деякі характеристики покриттів

Склад обмазки (В <sub>4</sub> С: флюс П-0,66) мас. %	Матеріал основи	ф, хв.	h, мкм	МКТ	W, мг	Фазовий склад покриття
84:16	65Г	1	260	2300	100	FeB, Fe <sub>2</sub> B
		2	280	1060	150	Fe <sub>2</sub> B
90:10	50ХГА	1	160	1000	200	б-Fe, FeB, Fe <sub>2</sub> (C,B)
		2	190	1100	300	FeB
84:16	50ХГА	1	100	950	600	б-Fe, FeB, Fe <sub>2</sub> B
		2	150	1100	300	Fe <sub>2</sub> B
90:10	65Г	1	280	2150	150	FeB, Fe <sub>2</sub> B
		2	350	2200	250	FeB, Fe <sub>2</sub> B

Примітка. ф – час витримки деталі індукторі при 1250 год. 1300 °С, хв.; h – товщина зміцнюючого борідного покриття, мкм; МКТ – мікротвердість робочої поверхні, виміряна на ПМТ-3 при навантаженні 100 г HV; W – зношування зразка на 10000 м шляху при терті про нежорстко закріплені абразивні частинки, мг.

Існування такої шаруватої структури в отриманих покриттях у нашому випадку пояснюється не наявністю двох фаз FeB і Fe<sub>2</sub>B, розташованих у металі один за одним, що відрізняється вмістом основної зміцнюючої фази по глибині покриття. Про це свідчать як структура отриманих покриттів (рис. 2.3 та 2.8), так і залежність товщини, твердості та зносостійкості покриттів, що утворюються на ґрунтообробних органах, виконаних у промислових умовах із сталей 65Г та 50ХГА за різний час з обмазки на основі В<sub>4</sub>С без активаторів (табл. 2.4).

### Висновки по розділу

Таким чином, хоча найбільш ефективною в процесі високошвидкісного борування при сВЧ-нагріві і виявилася обмазка на основі складу Ша, що містить аморфний бір, який у присутності флюсу П-0,66 і активатора СаF<sub>2</sub> утворює з основним металом протяжні і тверді покриття, проте з -за наявності вираженої межі розділу з основним металом, наявністю у покритті залишків флюсу та високої вартості аморфного бору для отримання зносостійких покриттів при

ТВЧ-нагріві, слід рекомендувати обмазування на основі складів з карбідом бору та флюсу П-0,66 та проведення процесу борування протягом 1-1,5 хв., на що вказують проведені дослідження:

- введення до складу боруючих обмазок, що містять  $B_4C$ , Ваморфн., активатори  $NH_4Cl$ ,  $CaF_2$  плавленого флюсу для індукційної наплавки П-0,66 дозволяє значно збільшити швидкість процесу борування з твердої в квазірідку фазу;

- встановлено, що на поверхні сталей 65Г і 50ХГА утворюються зносостійкі покриття, що складаються з зміцнювальних фаз (цементит, диборид,  $Fe_2B$  і  $Fe_2B_4$ , карбобориди та спеціальні карбіди Fe, Mn і Cr), розподілених у матриці залізо-боридної евтектики до 800 мкм, мікротвердістю від 700 до 2350 HV, знос яких при терті про незакріплений абразив становить від 100 до 600 мг на 10000 м шляху залежно від природи боруючого агента, складу обмазки, часу витримки та виду сталі.

Тому одночасне борування зміцнюваної поверхні твердого сплаву здійснювали з карбідом бору, при вмісті його у флюсі від 4 до 8%.

### РОЗДІЛ 3

## РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

В даний час у зв'язку зі скороченням застосування в сільському господарстві хімікатів, що не відповідають сучасним вимогам захисту навколишнього середовища, зростає інтерес до механічних засобів боротьби з бур'янами в міжряддях просапних культур, у тому числі до просапних культиваторів зі стрілочастими лапами. Зростання виробництва їх необхідне, але також потрібне підвищення техніко-економічних показників шляхом поліпшення якості кришення ґрунту, зниження тягового зусилля, підвищення їхнього ресурсу за рахунок оптимального зносостійкого покриття.

Сучасні конструкції та способи зміцнення робочих органів леза повинні бути такими, щоб зношування та тягове зусилля створювалися мінімальними, але при цьому забезпечувалося дотримання агротехнічних вимог.

У зв'язку з цим було розроблено орган, у якому в міру затуплення та зміни форми леза, викликаного абразивним зношуванням при експлуатації, не створювалися умови, коли на поверхні леза частки ґрунту зупиняються перед ним і вдавлюються в ґрунт. Утворюється зона зминання, ця зона залежить від товщини леза та сили тертя ґрунту об сталь.

Крім того, при переміщенні затупленого леза в ґрунті відбуваються руйнування зв'язків між частинками та відносно їх переміщення, тобто опір ґрунту характеризується силами внутрішнього тертя та тертя ґрунту про сталь, що в результаті визначає тяговий опір.

Для підвищення ефективності обробки ґрунту на стрілочасті лапи дискретно наносили ділянки твердого сплаву у вигляді смуг і розташовували їх під різними кутами до напрямку докладання тягового зусилля.

На рис. 3.1 показано схему зміцнення стрілочастої лапи.

Плоскоріжучий робочий орган для обробки ґрунту виконаний у вигляді стрілкової лапи 1, кожне крило 2 якої виготовлено з лезом 3. Леза 3 мають зовнішню 4 і внутрішню сторони 5. На зовнішній 4 і внутрішній 5 сторонах леза 3 ділянками з дискретними розривами нанесені зміцнюючі шари 6 і 7. Ділянки 7 зміцнюючого шару розташовують за місцем проекції дискретних розривів зміцнюючих ділянок 6 зовнішньої сторони 4 леза 3.

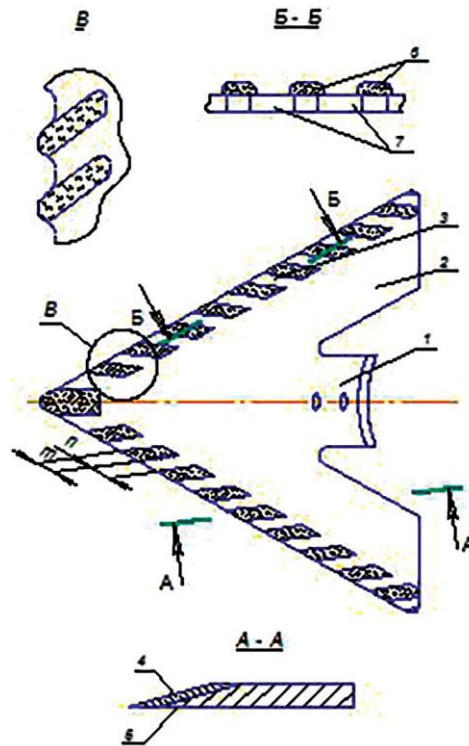


Рис. 3.1. Схема нанесення твердого сплаву з наступним високоенергетичним нагрівом (імпульсний нагрів)

Робочий орган для обробки ґрунту працює наступним чином. При русі в ґрунті лезо 3 підрізає пласт ґрунту з корінням, що знаходиться в ній. Підрізається пласт переміщається по верхній поверхні леза 3 і обрушується з заднього боку на дно борозни, внаслідок чого відбувається його крошення.

У процесі підрізання пласта на лезо робочого органу діють значні питомі навантаження, ґрунт ущільнюється, і ущільнена ділянка переміщається вздовж леза, викликаючи його знос. Відомо, що коефіцієнт тертя ґрунту об сталь досягає 0,8. Тому при розміщенні ділянок під кутом  $\pm 12^\circ$  до напрямку докладання тягового зусилля у виїмках між зміцненими ділянками, утвореними внаслідок

зношування, не відбувається залипання ґрунту. Це знижує тяговий опір робочого органу та питомий тиск на лезо з боку ґрунту. Автором експерименту ментально встановлено, що поруч із зонами «залипання» ґрунту суттєво збільшується знос у результаті підвищення питомого її тиску. Виконання зміцнення леза проводять 3 наступним чином. На лезо певної довжини, наприклад, на зовнішній стороні електроіскровим методом 4 наносять ділянки зміцнюючого шару 6 з твердого сплаву методом електроіскрового зміцнення різної ширини (m), однакової довжини проміжками (n) між ними. З іншого боку леза високоенергетичним методом нагрівання (струмами високої частоти) зміцнюються ділянки 7, розташовані за місцем проекції дискретних розривів зміцнювальних ділянок 6 зовнішньої сторони 4 леза 3.

У процесі незначної експлуатації ріжуча кромка формується таким чином, що вона має не тільки пилкоподібну форму, а й гребенеподібну (як «розведене» полотно ножівки або пилки). Ця форма леза (порівняно з відомими) зменшує можливість утворення потиличної фаски у леза (за рахунок змінної твердості як вздовж леза, так і по перерізу), усуває можливість закруглення ріжучої кромки, що в сукупності зменшує тяговий опір та покращує експлуатаційні властивості порожниць та стріл. лап.

Для експлуатаційних випробувань було зміцнено стрілчасті лапи СЗС-2.1 індукційною наплавкою. Твердий сплав ПГ-С27 наносили окремими ділянками (рис. 3.1) завширшки 5-6 мм, залишаючи непосилені ділянки 5-6 мм (твердістю HRCe 53-60). Потім з іншого боку з використанням високоякісного генератора ВЧИ 3-160/0,066 спеціальним індуктором (що має з трьох сторін феритне покриття) зміцнювали з зворотної сторони леза стрілчастої лапи під шаром охолоджуючої рідини в тому ж напрямку, що й ділянки, зміцнені індукційним наплавленням, але асиметрично наплавленим (твердість HRCe 60-65) поверхонь.

На рисунку 3.1 також показані розріз А-А, Б-Б зміцненого леза та схема розташування зміцнених ділянок твердим сплавом та високоенергетичним

нагріванням. Після деякого напрацювання (В) лезо набуває пилкоподібної форми з ефектом «розведеного» полотна ножівки або пили.

Випробування плоскорізального робочого органу для обробки ґрунту проводили в польових умовах на легкому суглинку при посіві пшениці. Для порівняння було поставлено на випробування відпалені робочі органи.

Встановили на сівалки робочі органи те щоб вони перебували у однакових умовах зносу. Напрацювання на кожну стрілчасту лапу склала 9,3 га, після цього їх зняли з посівного агрегату, очистили від ґрунту, промили і просушили, а потім зважили, виміряли кут потиличної фаски, ширину потиличної фаски та лінійне зношування леза лапи. Отримані результати зведено у таблиці 3.1.

Аналіз результатів польових випробувань плоскорізального робочого органу для обробки ґрунту показує, що лінійне зношування і ширина потиличної фаски в порівнянні з зміцненими за відомою технологією зменшилися на 22-28 і 20-26% відповідно, а по відношенню до відпаленої - у кілька разів.

Це пояснюється тим, що при використанні пропонованих конструктивних ознак досягається мінімальне ковзання частинок ґрунту вздовж леза і тим самим зменшується зношування крил лап. Ріжуча частина леза має змінну твердість. Це забезпечує ефект самозаточення, а гребниста форма в процесі експлуатації запобігає зім'яттю ґрунту.

Для дослідження було взято експериментальні лапи (сталь 65Г) з нижнім наплавленням леза твердим сплавом (табл. 3.2).

Партію наплавної шихти, склад якої складався з наступних компонентів сплаву марки ПГ-УС25 – 84%, флюс 8% та 8% карбиду бору. Наплавку зробили з нижнього боку. Порівняльний аналіз проводили при встановленні лап на один агрегат.

Результат польових вимірів наведено у таблиці 3.2.

Результати дослідження зміни товщини леза, лінійного та вагового зносу дослідних лап, отримані у процесі випробувань у ґрунті (табл. 3.3), наведено у таблицях 3.4. та 3.5.

Таблиця 3.1 – Зношування стрілчастої лапи в залежності від напрацювання.

РО		Напрацювання 1 лапу, га	Лінійний знос лапи, мм	Ширина фаски, мм	Кут фаски, град.
Серійні	1	9,3	3,8	2,41	52
	2		3,4	2,2	51
	3		3,1	2,35	50
	4		2,9	2,40	49
	5		3,4	2,0	50
	6		3,0	1,9	48
	7		3,1	2,5	53
	8		3,6	2,7	52
	9		3,3	3,8	54
Пропонованої конструкції	10	9,3	2,3	1,8	37
	11		2,5	1,75	36
	12		2,8	1,9	38
	13		2,6	2,8	39
	14		2,3	1,7	37
	15		2,6	1,9	39
	16		2,4	1,6	36
	17		2,5	1,8	38
	18		2,7	1,9	40
Лапи, піддані відпалу	19	9,3	13,3	15,96	41
	20		13,7	3,06	42
	21		13,5	6,0	40
	22		13,9	6,14	43

Таблиця 3.2 – Твердість та маса експериментальних лап

№ п/п	№ лапи	Середнє значення твердості в HRCe		Маса лап до посіву, г
		основний метал	наплавлений шар	
1	0	21-23	50-53	1050
2	00	22-27	51-53	1072
3	1	23-25	50-53	1080
4	11	19-22	50-59	1072
5	3	25-29	51-53	1076
6	33	25-29	50-55	1100
7	5	25-29	52-55	1082
8	55	40-43	50-54	1084
9	8	20-24	50-53	1094
10	88	19-21	50-54	1064



Таблиця 3.3 – Твердість і маса експериментальних лап

№ п/п	№ лапи	Середнє значення твердості в HRCe		Маса лап до посіву, г
		основний метал	наплавлений шар	
1	7	22-24	65-69	1062
2	9	25-28	67-70	1071
3	13	21-27	67-69	1070
4	15	20-25	67-70	1100
5	17	24-29	66-70	1072
6	21	23-28	68-70	1082
7	34	25-27	66-70	1084
8	35	26-29	68-71	1082
9	19	27-29	67-69	1091
10	2	24-29	66-68	1064

Таблиця 3.4 – Середній агрегатний склад ґрунту в шарі 0-10 см

Розмір фракції, мм	> 0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	< 0,001	У < 0,01
Кількість фракції, % на абсолютно суху навіску	0,9	75,4	9,5	2,0	4,9	7,3	14,2

Таблиця 3.5 – Характеристики лінійного та масового зносу лап

Переміщення лапи	№ лапи	Питоме напрацювання, га	Лінійний знос крила лапи, мм	Лінійний знос носка лапи, мм	Знос по вазі, г
По сліду трактора	3	32,61	9,6	42,0	288
	33	32,61	6,2	39,2	266
	11	32,11	6,4	59,2	334
	8	24,06	12,7	52,2	370
Ср. по ділянці	-	-	8,7	48,2	314,5
Повз слід трактора	0	29,58	6,2	16,3	152
	1	13,56	-	-	-
	00	29,58	7,3	-	316
	5	5,00	-	-	-
	55	29,58	6,2	32,7	188
	88	23,42	4,6	49,3	270
Ср. по ділянці	-	-	6,1	32,8	231,5

З даних табл. 3.5 випливає, що лінійне зношування носка лапи в середньому в 5,5 разів інтенсивніше лінійного зношування крила лапи. Це пов'язано з тим, що носок лапи в процесі обробітку ґрунту стикається з недеформованим ґрунтом, а крило – з надламаним шаром ґрунту. Рух шкарпетки

в недеформованому ґрунті характеризується швидким зношуванням зміцненої зони, а далі - інтенсивним зношуванням зміцненої зони основи робочого органу

Внаслідок такого характеру зношування вже після питомого напрацювання (припадає на одну лапу) 15-20 га обрис її форми набуває вигляду трапеції (рис. 3.2).

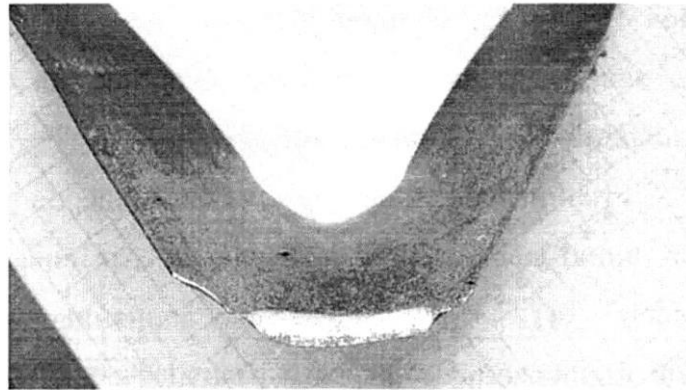


Рис. 3.2. Вид лап, зміцнених сплавом ПГ-С27, після напрацювання 15-20 га при додаванні бору в наплавну шихту характер зносу набуває іншого вигляду.

Порівнюючи ділянки за слідом (середня щільність ґрунту 1,40 кг/см<sup>3</sup>) і поза слідом трактора (середня щільність ґрунту 1,26 кг/см<sup>3</sup>), можна відзначити, що лінійне зношування крила, носіння і масове зношування лап по сліду трактора в 1, 4-1,6 рази інтенсивніше (табл. 3.7) (рис. 3.3, крива 1 та 2).

Середні чисельні значення геометричних параметрів лап, встановлених слідом трактора і поза слідом, розглянуті у таблиці 3.6.

Таблиця 3.7 – Середні значення показників зносу лап у поступовій динаміці

Ділянка	Питоме напрацювання га	Лінійне знос крила лапи, мм	Лінійне знос носка лапи, мм	Радіус самозат. кромки, мм	Довжина самозат. кромки	Ширина зворотньої фаски, мм
По сліду трактора	3,03	1,3	1,7	0,32	0,44	1,77
	8,36	2,4	6,8	0,37	0,95	1,26
	12,61	2,8	15,4	0,30	1,32	1,11
	16,58	3,5	21,4	0,40	1,49	0,92
	32,61	7,8	46,8	0,42	1,07	1,55
Повз слід трактора	5,33	0,6	1,2	0,33	0,13	2,03
	9,58	1,1	1,6	0,28	0,39	1,58
	13,56	1,8	4,8	0,32	0,51	1,35
	29,58	5,9	24,5	0,28	1,03	1,37

Числові характеристики, розглянуті у таблицях, графічно відображені на рисунку.

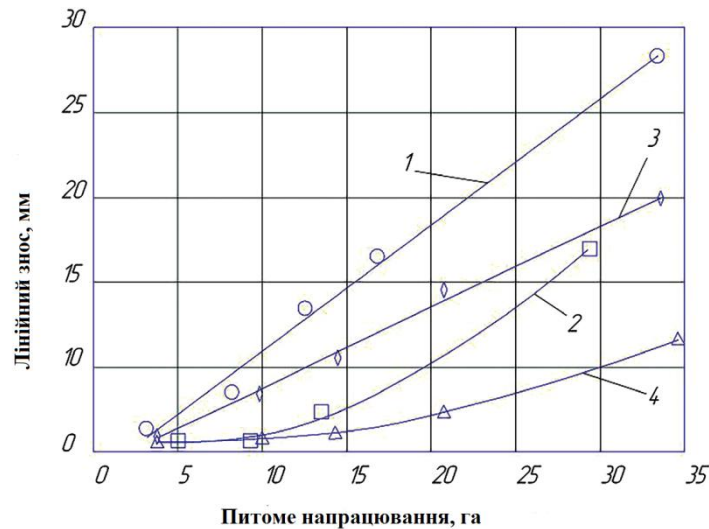


Рис. 3.3. Залежність лінійного зносу носка лапи від напрацювання – (крива 2 та 4 – вироблялося борідне покриття)

Рівняння регресії такі:

$$U_{сл} = -3,2304 + 1,3654N_{уд} + 0,0053N_{уд}^2; \quad (3.1)$$

$$- U_{зв} = 1,2117 - 0,2286N_{уд} + 0,0344N_{уд}^2; \quad (3.2)$$

$$U_{слб} = -1,8435 + 0,9189N_{уд} + 0,0009N_{уд}^2 \quad (3.3)$$

$$- U_{звб} = 1,6005 - 0,1828N_{уд} + 0,0157N_{уд}^2. \quad (3.4)$$

На рис. 3.3 (крива 1, 2) показана залежність лінійного зношування носка лапи, зміцненого твердим сплавом, від напрацювання. Як видно з отриманих даних, початковий період зношування лап, що йдуть слідом

трактора має більш динамічний характер, і вся крива дуже близька до лінійної залежності. Лінійне зношування носка лап, що йдуть по менш щільному ґрунті, в початковий період має більш пологий характер. На графіку це відображено кривою, що має увігнутий характер. Порівнюючи криві ділянок зношування, слід зазначити, що вони розташовуються паралельно деякій відстані друг від друга. Це вказує на те, як впливає ущільнення ґрунту трактором на зношування робочого органу.

Робочий орган, зміцнений додатково карбідом бору, має зносостійкість в 1,5-3,8 рази більше, але характер зносу має той самий кривий вид 3 і 4.

Лінійне зношування леза лап по сліду і поза слідом трактора подібне на всій ділянці зношування і відрізняється на 20-25%. Відповідно, криві розташовані практично паралельно при індукційному наплавленні. Однак різниця зношування при боруванні в порівнянні з індукційною наплавкою кривою 1,3 зменшується в 2,5-3,5 рази.

Необхідно відзначити, що лапи сівалки СЗС-2.1 з нижнім наплавленням твердим сплавом досить стійкі до зношування крила. Знос крил досить рівномірний і за величиною невеликий (якщо не враховувати сколювання кромки), але знос на останньому вимірі дуже великий (трикутне обрис лап набуває форми трапеції).

Сколювання кромки леза і шкарпетки пов'язано переважно з низькою твердістю основного металу. Також у процесі відстеження зношування лап було помічено, що відбувається надмірне самозагострення. Воно більше спостерігається на шкарпетках лап, і його величина поступово знижується в міру віддалення від шкарпетки вздовж крила.

В результаті проведених експериментів (стрілчастих лап СЗС-2.1) отримано дані, які виявили можливість підвищити зносостійкість робочих органів у 2,5-3,5 рази на різних ґрунтах шляхом коригування технологічного процесу індукційного наплавлення.

Дослідження, проведені у 2019-2021 рр., показали, що характер зношування робочих органів сівалок СЗС-2.1 залежить від щільності оброблюваного ґрунту, вихідних геометричних параметрів, а також від характеру зміцнення носка та крила лапи. Випробування робочих органів у польових умовах показують відмінність у лінійному зносі та загостренні лез лап, що йдуть слідом трактора і поза цим слідом. Велика нерівномірність зношування також залежить від наявності на полях зі стерневим тлом ущільнених слідів від проходу комбайнів восени.

## Висновки по розділу

Виявлено, що при роботі наплавлених індукційним наплавленням лап радіус кромки леза практично не залежить від щільності ґрунту та напрацювання. Внаслідок цього з'являється можливість збільшення ресурсу обробітку ґрунту до 50-60 га на одну лапу шляхом отримання однорідності наплавленого шару та легування його бором.

Таким чином, проведені дослідження дозволили встановити характер впливу окремих технологічних факторів на знос поверхнево-зміцнених стрілочастих лап у реальних польових умовах, таких як спосіб нанесення обмазки, що борує, на поверхню леза робочого органу, попередня підготовка поверхні, час витримки при температурі 1200-130 термообробка.

При цьому зношування лап за окремими параметрами становить 8-27%, що збільшує їх ресурс, порівняно з комерційними зразками, в 2-3 рази.

Запропоновано зношування поверхнево зміцнених лап характеризувати інтегральними показниками – зміною площі перекриття ( $J_s$ ) та середнім ваговим зносом ( $J_m$ ).

За результатами дослідження було запропоновано конструктивно іншу форму зміцнювальних покриттів на лезі стрілочастих лап, яка наведена в роботах.

## ВИСНОВОК

Проведені у роботі дослідження дозволили розробити технології зміцнення робочих органів сільськогосподарських машин зносостійкими покриттями, у яких у процесі наплавлення не змінюються закладені конструктивно експлуатаційні властивості.

Для вирішення цієї проблеми проведено комплекс експериментальних досліджень, який дозволив розробити оригінальні методики отримання однорідної структури при індукційному напавленні високолегованих хромистих заевтектичних чавунів на вуглецеві та низьколеговані сталі.

Основою методології є розробка можливості управління фазовим складом, структурою та механічними властивостями у напавлених шарах у високолегованих хромистих доевтектичних чавунах

У процесі індукційного напавлення на вуглецеві та низьколеговані сталі, виявлені закономірності та встановлені взаємозв'язки між параметрами зносостійкого шару дозволили зробити наукові узагальнення з єдиною науково-технічною позицією.

На підставі розробленої методології запропоновано способи зміцнення конструкції робочих органів сільськогосподарських машин, нові зварювальні (наплавочні) матеріали, технологічні процеси, що забезпечують виконання агротехнічних заходів робочими органами сільськогосподарських машин протягом усього періоду обробітку ґрунту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горшкова А.А.. Справочник по изготовлению отливок из высокопрочного чугуна. Киев : Машгиз. 1960. 301 с.
2. Таран Э.А. Особенности обработки чугуна железо-магний порошковыми брикетами. *Литейное производство*. 1972, № 7. С. 30.
3. Рябчиков И.В. Состояние и перспективы производства и применения комплексных сплавов с редко-и щелочноземельными металлами. Москва : Черметинформация. 1980. 247 с.
4. Баранчиков В. И. Обработка специальных материалов в машиностроении : справочник. Москва : Машиностроение, 2002. 264 с.
5. Григорьев С. Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента. Старый Оскол : ТНТ, 2011. 379с.
6. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. Москва : Машиностроение. 1982. 320с
7. Якубов Ф. Я. Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента. Симферополь : Крымучпедгиз, 2005. 300 с.
8. Кіндрачук М. В. Трибологія: підручник. Вид-во НАУ «НАУ – друк», 2009. 392с.
9. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов 2-е изд. переработ. и доп. / под ред. А. В. Чичинадзе. Москва : Машиностроение, 2001. 664с.
10. Ковальчук Ю. О., Дідур В. В., Кравченко В. В. Застосування лазерного зміцнення сталі 65Г для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних знарядь. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2012. Вип. 25, ч. 1 С. 74–80.
11. Костецкий Б. И. Трение, смазка и знос в машинах. Киев : Техніка. 1970. 396 с.

12. Костецкий Б. И. Износостойкость деталей машин. Киев, Москва : МАШГИЗ, 1950, 168 с.

13. Аулін В. В., Тихий А. А. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості і надійності робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами : монографія. Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2017. 278 с.

14. Борак К. В., Руденко В. Г., Кравчук А. В., Добранський С. С. Фізичні, хімічні та механічні процеси в трибосистемі «робочий орган – ґрунт». Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка : Технічні науки. 2017. Вип. 181. С. 143–147.

15. Гевко Р. Б., Ткаченко І. Г., Павх І. І. Машини сільськогосподарського виробництва : навч. посіб. Тернопіль, 2005. 228 с.