

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів та технологій
Кафедра матеріалознавства

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»
Застосування високошвидкісного борування для
підвищення стійкості деталей ґрунтообробної техніки /
Using accelerated boriding for improve the durability of
tillage machinery parts**

спеціальності 132 "Матеріалознавство"

освітня програма "Індустріальний інжиніринг і менеджмент"

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ(ПМ)с-31
Яловський Павло Миколайович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Гусачук Дмитро Анатолійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 20__ р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Гусачук Дмитро Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Індустріальний інжиніринг і менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Мельничук М.Д.

“ 11 ” 02 2025 року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Яловському Павлу Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Застосування високошвидкісного борування для підвищення стійкості деталей ґрунтообробної техніки*

керівник роботи *Гусачук Дмитро Анатолійович, к.т.н., доцент*,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “07” 02 2025 року № 02 78/01-

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи « 05 » червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи *Зразки матеріалу (сталі 65Г), технологія обробки, технічні умови, стандарти*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *вступ; аналіз технічної літератури;*

опис методики досліджень; вивчення впливу високошвидкісного борування на структуру сталі 65Г; дослідження впливу високошвидкісного борування на властивості сталі 65Г; висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1 слайд – Характеристика сталей для деталей ґрунтообробної техніки; 2, 3 слайди – Методика дослідження; 3 слайд – Підготовка зразків для аналізу та випробувань; 4 слайд – Структура сталі 65Г; 5-7 слайди – Структура зразків сталі 65Г після борування; 8, 9 слайди – Вплив борування на властивості сталі 65Г; 9 слайд – основні висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормокон- троль</i>	<i>доцент кафедри матеріалознавства к.т.н. Мисковець С.В.</i>		

7. Дата видачі завдання «11» 02 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	<i>Вступ. Аналіз літературних джерел.</i>	<i>06.05.2025</i>	
2.	<i>Планування та виконання експерименту.</i>	<i>20.05.2025</i>	
3.	<i>Опис та аналіз результатів експерименту, розробка рекомендацій та висновків</i>	<i>03.06.2025</i>	

Здобувач вищої освіти _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Яловський П.М. Застосування високошвидкісного борування для підвищення стійкості деталей ґрунтообробної техніки (на матеріалах звіту з переддипломної практики та даних завдання до кваліфікаційної роботи).
Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП "Індустріальний інжиніринг і менеджмент" спеціальності 132 "Матеріалознавство". Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку, у вигляді презентації досліджень. У розділах роботи висвітлено: аналіз використання конструкційних сталей для робочих деталей обробки ґрунту, процесів зміцнення сталей, методику досліджень, структуру та властивості сталі 65Г, вплив борування на структуру та властивості поверхневих шарів сталі 65Г, практичні рекомендації щодо оптимізації термічної обробки деталей зі сталі 65Г. Текстова частина містить 48 сторінок тексту, 20 рисунків, 4 таблиці, 21 літературних джерел та посилань, 1 додаток у вигляді презентації результатів досліджень. Презентація представлена на 9 слайдах.

В кваліфікаційній роботі досліджено процес високошвидкісного борування конструкційних сталей для потреб обробки ґрунту у сільгоспмашинобудуванні, на основі чого встановлено вплив борування на структуру та властивості поверхневих шарів сталі 65Г, розроблено практичні рекомендації щодо удосконалення технологічних процесів зміцнення поверхні робочих деталей ґрунтообробної техніки.

Ключові слова: сталь, поверхнева стійкість, технологія, термічна обробка, борування, структура, поверхневий шар, твердість, механічні властивості.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Яловський			<i>Застосування високошвидкісного борування для підвищення стійкості деталей ґрунтообробної техніки / Using accelerated boriding for improve the durability of tillage machinery parts</i>	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Гусачук					3	48
Реценз.						ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. ПМ(ІІІ)с-31		
Н. Контр.		Мисковець						
Затверд.		Мельничук						

ANNOTATION

Yalovskyi P. Using accelerated boriding for improve the durability of tillage machinery parts (based on the materials of the report on bachelor's practice and the data of the assignment for qualifying work). Manuscript.

Qualifying work of a bachelor of the Educational Program "Industrial engineering and management" in the specialty 132 "Materials Science". Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The qualification work consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of sources used, and an appendix in the form of a research presentation. The sections of the work cover: analysis of the use of structural steels for working parts of soil processing, steel hardening processes, research methodology, structure and properties of 65Г steel, the effect of boriding on the structure and properties of surface layers of 65Г steel, practical recommendations for optimizing heat treatment of parts made of 65Г steel. The text part contains 48 pages of text, 20 figures, 4 tables, 21 literary sources and references, 1 appendix through presentation of research results. The presentation is presented on 9 slides.

The qualification work investigated the process of high-speed boriding of structural steels for soil cultivation in agricultural machinery, based on which the effect of boriding on the structure and properties of surface layers of 65Г steel was established, and practical recommendations were developed for improving technological processes for strengthening the surface of working parts of soil cultivation equipment.

Key words: steel, surface resistance, technology, heat treatment, boriding, structure, surface layer, hardness, mechanical properties.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1.....	8
АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	8
1.1. Робочі елементи ґрунтообробної техніки	8
1.2. Характеристика сталей для деталей ґрунтообробки	10
1.3. Структура і властивості боридних шарів	12
1.4. Способи борування сталей.....	15
1.5. Постановка мети кваліфікаційної роботи	18
РОЗДІЛ 2.....	19
МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	19
2.1. Відбір та підготовка зразків для досліджень	19
2.2. Підготовка мікрошліфів	21
2.3. Методика дифузійного насичення бором	23
2.4. Методика вимірювання твердості дифузійного шару	27
2.5. Випробування на спрацювання дифузійного шару	29
РОЗДІЛ 3.....	31
ВПЛИВ ВИСОКОШВИДКІСНОГО БОРУВАННЯ НА СТРУКТУРУ СТАЛІ 65Г	31
3.1. Структура сталі 65Г у початковому стані	31
3.2. Структура поверхневих шарів сталі 65Г після борування	32
3.3. Структура сталі 65Г після гартування та відпуску	36
РОЗДІЛ 4.....	39
ВПЛИВ ВИСОКОШВИДКІСНОГО БОРУВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ 65Г	39
4.1. Твердість дифузійного шару сталі 65Г	39
4.2. Зносостійкість боридного шару на сталі 65Г	42
ВИСНОВКИ	45
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46
ДОДАТКИ	

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Одним із способів покращення стійкості проти зносу є формування методом хіміко-термічної обробки (ХТО) на поверхнях деталей 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. Підвищення активності тих процесів ХТО, які направлені на адсорбцію, дифузію активних атомів насичуючої речовини та інших факторів може значно скоротити тривалість обробки та покращити властивості зміцнюваної поверхні.

У матеріалознавстві борування сталі є перспективним видом термохімічного дифузійного процесу, метою якого є впровадження твердих і зносостійких борідних частинок в поверхневі шари металу. Боріди, що утворюються, утворюють надзвичайно зносостійкі зони, що складаються переважно з бориду заліза. У формуванні шару беруть участь та інші хімічні елементи, якими легована сталь – хром, нікель, ванадій тощо, які також утворюють відповідні інтерметалідні сполуки високої стійкості від зношування та корозії. Для технології штампування важливо також, що застосування процесу супроводжується підвищенням деформованості.

Борування застосовують для підвищення зносостійкості виробів із металів та сплавів. Для борированих шарів характерні висока корозійна стійкість у низці агресивних середовищ, підвищена окалиностойкість, збереження твердості при нагріванні. Це дозволяє використовувати боровані вироби в особливо жорстких умовах експлуатації: тертя ковзання без мастила, абразивне зношування, зношування у вакуумі, при підвищених та високих температурах, в агресивних середовищах.

Необхідною умовою формування дифузійного шару є наявність насиченої поверхні активного атомарного бору; крім того, температура і

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

тривалість витримки повинні забезпечити протікання дифузії атомарного бору сталі з утворенням хімічних сполук – боридів заліза.

Боруванню можна піддавати будь-які сталі. Борований шар має голчасту будову і складається з боридів FeB на поверхні і Fe₂B. Під шаром борид розташовується перехідний шар, що складається з α-розчину бору в залозі. На легованих сталях під шаром суцільних боридів утворюється зона α-розчину, боридів заліза та легуючих елементів.

Властивості боридних шарів, крім природних властивостей боридів, визначаються комплексно фазовим складом та співвідношенням фаз, особливостями будови структури шару, що виникають внаслідок проходження дифузійних процесів. Основними напрямками регулювання структурою та властивостями борованих шарів є склади насичувальних середовищ та температурно-часові параметри технології борування.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Робочі елементи ґрунтообробної техніки

Серед безлічі використовуваних в теперішній час технологій мінімальної обробки ґрунту найбільшого поширення набули процеси, засновані на зниженні глибини обробки, зменшенні інтенсивності впливу на ґрунт, а також мінімізації кількості проходів ґрунтообробних агрегатів по полях, за рахунок суміщення кількох технологічних операцій в одній машині – ґрунтообробному комплексі, особливо в посушливих і підсушувальних районах [1]. Для здійснення основних агротехнічних заходів щодо ресурсозберігаючих технологій зараз створено безліч машин, основним робочим органом яких є плуги, рала, диски, леміхи, стрілочасті лапи плоскорізи, біла подрібнювачі, долота розпушувачі, насадки ріжучі (рисунок 1.1). При цьому знос робочих елементів цих органів, що працюють у складі культиваторів, розпушувачів, сівалок і комплексів як основних ґрунтообробних знарядь, є головним параметром, що знижує не тільки економічні показники, але і якість здійснюваних агрозаходів сільськогосподарських господарств [2, 3].

Різання ґрунту є найбільш розповсюдженою технологічним прийомом в агропромисловому комплексі. Зі всього об'єму механізованих робіт, до 70 % складають такі операції як: оранка, культивація, боронування, збирання зернових і технічних культур. Відповідно, від технічного стану леза робочого органу сільськогосподарської техніки, залежать більшість показників роботи машини. В першу чергу це стійкість ходу робочих органів за глибиною, середня глибина культивації, ступінь підрізання бур'янів, ступінь забивання робочих органів та прилипання до поверхні леза ґрунту; тяговий опір робочих органів тощо.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8



а



б



в



г

Рисунок 1.1 – Типи робочих деталей для обробітку ґрунту:

а – плоскорізи; б – розпушувач культиватора;

в – леміш; д – лапа культиватора

На робочій ділянці за тривалої роботи деталі формується фаска, яка може негативно впливати на якість обробки ґрунту за глибиною, також змінюється профіль носка, геометрія і ширина леза робочого органу [3]. Затуплені лапи культиваторів і леміхи плугів збільшують тяговий опір агрегатів, що зменшує продуктивність. У більшості випадків така ситуація викликає ріст витрат пального на 15...20 %. Таким чином, у зв'язку з нерівномірністю спрацювання ріжучих частин, та інших поверхонь робочих деталей сільськогосподарської техніки постає необхідність їх зміцнення.

Слід зазначити також, що робочі органи сільськогосподарських знарядь експлуатуються в умовах агресивного зовнішнього середовища, що викликано додаванням у ґрунт різних добрив, у присутності вологи. На знос деталей ґрунтобробних машин, які безпосередньо мають контакт з абразивною масою, значно впливає вологість ґрунту [4]. В залежності від типу ґрунту, це може як збільшити, так і зменшити рівень спрацювання деталі. Всі ці фактори, чинять суттєвий вплив на робочі органи ґрунтобробної техніки, що робить їх

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР 1325.00.00.000 ПЗ

Арк.

9

непридатними до експлуатації, практично через декілька діб інтенсивної роботи машин. Розробка ефективних технологій зміцнення деталей робочих органів ґрунтобробних машин є важливим завданням сільськогосподарського машинобудування [5].

1.2. Характеристика сталей для деталей ґрунтообробки

Робочі деталі для безпосереднього обробітку ґрунту сільськогосподарської техніки мають забезпечувати високу зносостійкість в умовах постійного тиску ґрунту та абразивного тертя, локальних ударних навантажень за умов потрапляння в зону контакту каміння. Разом з тим сталь має мати достатню в'язкість для протидії знакозмінним ударним навантаженням, мати достатню пружність [6].

Враховуючи такі умови роботи робочі деталі ґрунтообробної техніки часто виготовляють з конструкційних ресоропружинних сталей (таблиця 1.1), з підвищеним вмістом вуглецю [7]. Ці сталі містять незначну кількість таких легуючих елементів як манган, сіліцій, іноді хром та ванадій. Механічні характеристики цих сталей, в залежності від термообробки, змінюються у широких межах [8-10].

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталей для робочих деталей ґрунтообробної техніки

№ п/п	Марки сталі	Вміст елементів, %						
		C	Si	Mn	Gr	V	Ni	Cu
1	65Г	0,62...0,70	0,17...0,37	0,9...1,2	≤0,25	–	≤0,25	≤0,2
2	55С2	0,52...0,60	1,5...2,0	0,6...0,9	≤0,30	–		
3	60С2	0,57...0,65	1,5...2,0	0,6...0,9	≤0,30	–		
4	50ХГА	0,47...0,52	0,17...0,37	0,8...1,0	0,9...1,2	–		
5	50ХФА	0,46...0,54	0,17...0,37	0,5...0,8	0,8...1,1	0,1...0,2		

Більшість механічних характеристик ресоро-пружинних сталей залежать від технології виконання та режиму зміцнюючої термообробки [11]. Для деталей ґрунтообробної техніки рекомендують проводити загартування цих сталей в оліві з наступним середнім чи високим відпусканням. Високе відпускання дозволяє підвищити вязкісн характеристики, але зменшує твердість та контактну стійкість поверхні проти дії абразивних часток ґрунту.

Застосовуючи високий відпуск для цих сталей рекомендується використовувати технології поверхневого зміцнення деталей, зокрема способи хіміко-термічної обробки. Для ресорних сталей доцільним є застосування процесу дифузійного насичення поверхні бором, який здатний формувати поверхневі шари з високою твердістю. Поєднанням такої обробки можна досягнути гарного результату для порівняно дешевих марок сталі, зокрема сталі 65Г [12, 13].

Сталь 65Г – це міцний та стійкий до впливу навколишнього середовища матеріал, який широко застосовується у різних галузях. Завдяки своїм механічним властивостям та зручності обробки, ця сталь є одним із найбільш затребуваних матеріалів в інженерному машинобудуванні, будівництві, автомобілебудуванні та сільгоспмашинобудуванні [14]. Застосування хіміко-термічної обробки дозволяє значно розширити межі використання даної марки сталі, зокрема і для виготовлення деталей ґрунтообробної техніки: диски борон, леміші, плуги, розпушувачі тощо.

1.3. Структура і властивості боридних шарів

Борування, як процес термохімічної обробки, відомий понад сто років та в останні роки стрімко розвивається [15].

Борування – це термохімічна обробка поверхні, за якої бор дифундує в матеріал основи та з'єднується з ним, утворюючи на поверхні одно- або двофазні шари бориду металу. На відміну від багатьох інших обробок поверхні, тверді шари бориду можна утворити на більшості сплавів та металів

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

шляхом дифузії бору. Борування чорних металів призводить до утворення або одношарового (Fe_2B), або двошарового ($\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$) шару з певним складом. Товщина утвореного шару (відома як глибина корпусу) впливає на механічну та хімічну поведінку борованих сталей, що залежить від температури борування, часу обробки та потенціалу бору, що оточує поверхню зразка [16]. При збільшенні часу обробки та температури області FeB стають набагато глибшими (рисунок 1.2), і вони ростуть з компактних та орієнтованих кристалів Fe_2B . Фази ростуть переважно в площині (002), збільшуючи механічне напруження на межі розділу $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$ через значну різницю між коефіцієнтами розширення обох фаз у діапазоні від 473 до 873 К [17].

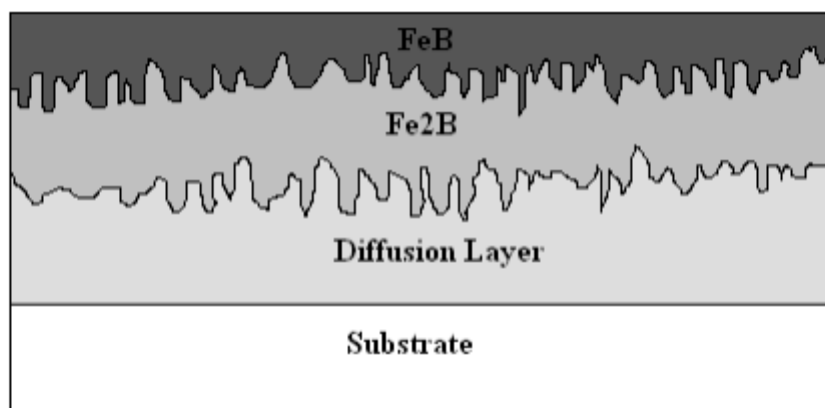


Рисунок 1.2 – Структура боридних шарів на конструкційних сталях [16]

Загальна глибина шару знаходиться в межах 0,15...0,35 мм при мікротвердості 1600...2000 HV (рисунок 1.3). Таким чином, за борування твердість поверхні сталей є найбільшою з усіх процесів хіміко-термічної обробки. Більшість легуючих елементів, особливо нікель, хром та молібден, забезпечують більш плавний перехід твердості борованого шару до аналогічних показників основного металу [18].

Розчинність бору у вуглецевих сталях при температурах близько 1000 °С не перевищує 0,008 %, проте вже при нагріванні від 750 до 950 °С починається інтенсивне утворення дуже твердих борід FeB і Fe_2B . Важливим елементом якості є оптимальне розподілення тепла в печі, що використовується для обробки.

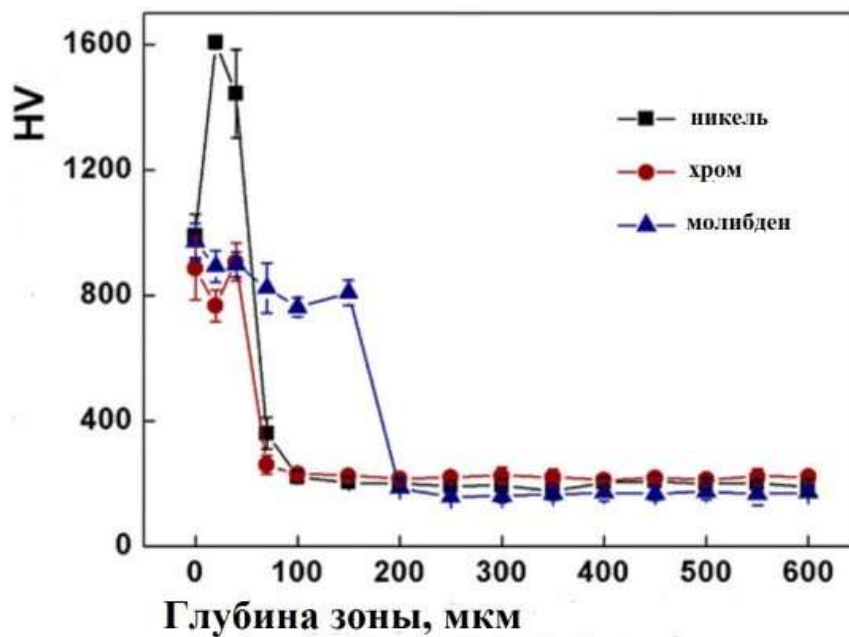


Рисунок 1.2 – Вплив легуючих елементів на розподіл мікротвердості у борваному шарі конструкційної сталі 40X

Завдяки своїй кристалічній структурі борідний шар винятково добре зв'язується з основним матеріалом. Незважаючи на високу твердість, бориди мають значно меншу крихкість, ніж карбіди або нітриди, в цьому - гідність методу. Однофазні борідні покриття мають меншу крихкість, ніж двофазні.

Характерним явищем є утворення під шаром боридів зони зміцнення, що містить підвищений відсоток карбідів (зона 3 на рисунку 1.2). Насичуючи поверхню, бор відтісняє вуглець у глибинні ділянки. Завдяки цьому в підповерхневих шарах сталі утворюється структура перліту, причому глибина цієї зони може навіть перевищувати товщину шару, що містить борід.

Властивості борідних шарів, крім природних властивостей боридів, визначаються комплексно фазовим складом та співвідношенням фаз, особливостями будови структури шару, що виникають внаслідок проходження дифузійних процесів. Основними напрямками регулювання структурою та властивостями борованих шарів є склади насичувальних середовищ та температурно-часові параметри технології борування.

1.4. Способи борування сталей

Процес борування проводиться для створення твердих та зносостійких поверхневих шарів. Для контролю процесу та отримання боридних шарів з бажаними властивостями дуже важливо знати, як параметри борування та хімічний склад обробленої сталі впливають на боронування. Важливим є вивчення впливу вмісту вуглецю у вуглецевих сталях, температури борування та тривалості борування на кінетику росту боридних шарів. Відомі експериментальні результати показують [15-17], що існує лінійна залежність між вмістом вуглецю та значеннями енергії активації, а також між вмістом вуглецю та частотними факторами. У багатьох дослідженнях показано, що температура борування має найбільший вплив на товщину боридного шару. Вплив тривалості процесу не є суттєвим, тоді як вміст вуглецю в сталі має найменший вплив на товщину боридного шару.

На сьогоднішній день існує декілька технологій підвищити експлуатаційні характеристики сталі, найпоширенішою та досить ефективним з яких є борування. В результаті борування сталі в солях поверхневий шар металу добре насичується атомами бору.

Досить поширене борування плугів, борування лемешів та інших деталей, а також штампувального та ріжучого інструменту, оскільки воно дозволяє отримати більш міцний та твердий метал з підвищеними якостями та зносостійкістю в умовах абразивного контакту [18].

Метод борування поверхні збільшує зносостійкість сталі в агресивних середовищах і при температурі до 800°C.

У промисловій практиці застосовують такі різновиди борування деталей:

- рідинне електролізне;
- безелектролізне рідинне;
- газове;
- порошкове.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Умови першого способу не вимагають дорогого обладнання, а тому застосовується частіше. Сутність способу полягає в тому, що в металевому тиглі розплавляють буру, а потім завантажують туди заготовки, що підлягають обробці, і графітовий стрижень. Вироби підключають до катода, в той час як графітовий стрижень, що володіє високою теплостійкістю, виконує роль анода. Під впливом електричного струму і високих температур термодифузійні процеси активізуються, а атомарний бір, що виділяється, дифундує в поверхневі шари, де і утворює бориди.

Обробку рідинним боруванням ведуть у розплаві бури, до складу додають також 30...40% карбід бору. На відміну електролізного борування, кінцевий результат не визначається формою заготовки. Основний недолік методу в тому, що робочий розплав швидко виснажується, що обмежує застосування описаного способу [18].

Сучасні процеси хіміко-термічної обробки борування часто ведуться із застосуванням порошків [19], що містять карбід бору з додаванням хлористого амонію, що здешевлює процес і дозволяє обходитися без спеціального обладнання. Порошкове борування особливо підходить для нелегованих та низьколегованих сталей. Зі збільшенням вмісту легуючих елементів швидкість дифузії і, отже, товщина досяжного борідного шару зменшується. Процес трудомісткий, тому використовується переважно у масовому промисловому виробництві.

Газове борування характеризується підвищеною активністю термодифузійних процесів. Тому його можна застосовувати за менш високих температур (від 600 °С). Недолік способу – підвищена вибухонебезпечність і токсичність газових сумішей, що застосовуються.

Діапазон матеріалів, що боруються, різноманітний: від чавуну і литої сталі до сплавів на основі нікелю і спеціальних матеріалів, наприклад, стеліту. Сталі, що містять надлишковий відсоток кремнію та алюмінію, для такої термічної обробки не підходять. Насиченням поверхні бором можна досягти наступних переваг:

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

- підвищити поверхневу зносостійкість виробів, особливо абразивного зносу;
- знизити коефіцієнт тертя ковзання: навіть при розриві мастильної плівки катастрофічного пошкодження поверхонь сплаву, що труться, не відбувається;
- підвищити корозійну стійкість при адгезійному зносі;
- збільшити кавітаційну стійкість, знизити шкідливий вплив кислот та інших агресивних середовищ.

Порівнюючи метод порошкового боровання з іншими методами боровання, можна зазначити, що метод порошкового боровання має переваги з точки зору простоти та економічної ефективності. Тому метод порошкового боровання є більш кращим [19]. У цьому методі порошкова суміш для боровання складається з різних твердих речовин (порошків), таких як атомарний бор, активатор та розріджувач. Бор, необхідний для формування шару бориду, забезпечується джерелами бору, а активатори активують процес боровання. Для того, щоб розбавити джерело бору до певного рівня, щоб концентрація вільного бору була на бажаному рівні, розріджувач повинен бути присутнім у середовищі боровання.

Метод широко застосовується у різних галузях промисловості: під час виробництва різної арматури, відповідальних елементів підйомно-транспортного устаткування, зубчастих передач і трансмісій, бурового оснащення, електроінструментів тощо.

До суттєвих недоліків поверхневого зміцнення технологіями боровання є низька пластичність покриттів і висока вартість боровміщуючих компонентів. В світовій практиці широке використання набуває насичення боровміщуючими компонентами поверхні відносно не коштовних доступних матеріалів. В окремих випадках використовуються технологічний процес з попереднім насиченням поверхневого шару бору методами хіміко-термічної обробки (ХТО).

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

1.5. Постановка мети кваліфікаційної роботи

З аналізу практики борування конструкційних вуглецевих та низьколегованих сталей встановлено, що порівняно дорогі високоякісні леговані сталі для робочих деталей ґрунтообробної техніки, можна замінити більш дешевими аналогами. Зокрема ресорна сталь 65Г має відповідний комплекс міцності, твердості в'язкості, що робить її ефективною для виготовлення деталей борон, плугів та лемішів. Підвищення абразивної стійкості робочих поверхонь та корозійної стійкості можливе із застосуванням процесу борування, як ефективного способу хіміко-термічної обробки сталей.

Отже, метою роботи є зменшення собівартості зміцнюючої поверхневої термічної обробки при застосуванні процесу борування для робочих деталей ґрунтообробної техніки у сільгоспмашинобудуванні.

Основним завданням роботи є розробка практичних рекомендацій щодо оптимізації технологічного процесу борування сталі 65Г у процесі виготовлення деталей сільгосптехніки.

В роботі застосовується удосконалений процес зміцнюючої обробки, який полягає в дифузійному насиченні поверхні сталі 65Г атомарним бором, отриманим з борвмісних порошків у вигляді обмазок на зразках сталі. Використання процесу твердофазного порошкового борування та більш дешевої сталі 65Г, на відміну від діючого процесу нітроцементатації високоякісних сталей, дозволяє суттєво спростити технологію термічної обробки та зменшити час дифузійного насичення.

Скорочення матеріальних витрат для виготовлення дисків борон, лемішів плугів, зменшення часу на технологічний процес є показниками, які дозволять зменшити собівартість термообробки деталей за умов використання звичайного устаткування, без витрат на оновлення обладнання.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Відбір та підготовка зразків для досліджень

З метою моделювання процесу дифузійного насичення поверхневих шарів сталі 65Г бором та формування боридного шару, у роботі були підготовлені спеціальні зразки сталі у формі циліндрів діаметром у 10...12 мм, та довжиною 20...25 мм. Зразки готувались з сортового прокату сталі 65Г отриманого у відповідності з ДСТУ 8429:2015 "Прокат із ресорно-пружинної вуглецевої та легованої сталі. Технічні умови".

Спочатку від круглого прокату сталі 65Г діаметром 16 мм відрізували стрижні завдовжки 250...300 мм (рисунок 2.1) багатообертовою углової шліфувальною машиною, з використанням дискових відрізних кругів. З отриманих стрижнів на токарних верстатах нарізались циліндричні зразки потрібних розмірів. Обточуванням на токарному верстаті отримували чисту поверхню зразка для виконання термохімічної обробки, що зменшувало спотворення результатів експерименту.



Рисунок 2.1 – Стрижні, відрізані від прокату сталі 65Г

Як відомо, точіння на токарному верстаті відбувається при значно менших швидкостях різання, в порівнянні з шліфувальними машинами. Тому отримані зразки для виконання досліджень характеризувались відсутністю

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

спотворень структури від температурних явищ, що можуть супроводжувати процеси механічної обробки. Зовнішнім обточуванням знімались дефектні шари циліндричної поверхні прутків під час вирізання зразків для аналізу на токарно-гвинторізальному верстаті.

Довжина відрізаних а токарному верстаті циліндричного зразка 20...25 мм (рисунок 2.2), була оптимальною для подальшого приготування мікрошліфів для аналізу структурного стану, з допомогою оптичної мікроскопії, та проведення експериментальної обробки. Для дослідження стану приповерхневих шарів зразків сталі 65Г після виконання дифузійного насичення та термічної обробки, зразки після очищення та знежирювання заливали у бакелітове вяжуче чи епоксидну смолу. Це відомий спосіб підготовки зразків для локального металографічного аналізу, особливо поверхневих шарів металів, коли необхідно досягти чіткості зображення



Рисунок 2.2 – Форма зразків для мікроаналізу, окремо та залитих бакелітом

Такий спосіб підготовки зразків дозволяв уникнути значного спотворення зображення у полі мікрошліфа, під час фотографування структури та металографічного аналізу. Це також дозволяло виконувати більш якісну фіксацію цифрових зображень мікроструктури, використовуючи цифрову камеру оптичного мікроскопу. Для фотографування структури досліджуваних зразків використовували цифрову камеру CMOS.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

2.2. Підготовка мікрошліфів

В роботі для мікроаналізу структури готувались мікрошліфи зразків за відомою методикою.

Для приготування мікрошліфів спочатку виконували грубе сточування поверхні на абразивному крузі шліфувального верстату, що дозволяло отримати рівну пласку поверхню досліджуваних зразків. Під час обробки зразок періодично поливали водяним розчином гліцерину малої концентрації.

Після грубого шліфування поверхню очищували спиртом та виконували ручне шліфування на шліфшкурках фірми "Matador" із зернистістю P250...P1000 (рисунок 2.3). Для спрощення завдання вирізані раніше циліндричні зразки розрізались на коротші для зручності виконання шліфування. Для дослідження структури зразків, що проходили хіміко-термічну обробку, зразок заливали бакелітом. Це дозволяло уникнути завалів країв зразка з отриманням чіткого зображення структури дифузійного шару під час спостережень.



Рисунок 2.3 – Шліфувальний папір фірми "Starcke"

Після тонкого шліфування здійснювали полірування робочої поверхні мікрошліфа, як фінішний процес підготовки. Для цього застосовували полірувальний верстат з горизонтальним розміщенням робочого диску верстату.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

На диск верстату закріплювали тонкий гладкий папір, на який наносили мікрополірувальну алмазну пасту, спочатку більшої зернистості, а потім меншої. Диск верстату обертався зі швидкістю 400...500 обертів за хвилину.

В процесі полірування застосовували стандартні абразивні пасти з мікропорошків алмазу, зернистістю 20, 7, 5 та 3 мкм. Цього вистачало для швидкого видалення рельєфу попереднього абразиву. При переході від пасти однієї до іншої зернистості повністю заміняли підкладний папір. Зразок при цьому також повертали на 45...90°, по відношенню до попереднього.

Дослідження структури підготовлених мікрошліфів виконували із застосуванням металографічних оптичних мікроскопів МІМ-10, ММП-14Ц (рисунок 2.4). Спочатку осліджували поверхню шліфа у нетравленому стані при малих збільшеннях. Такі спостереження дозволяли виявити неметалеві вclusions чи тріщини в матеріалі, встановити їх форму та кількість.



Рисунок 2.4 – Металографічні мікроскопи ММП-14Ц, МІМ-10

Дослідження травленої поверхні зразка дозволяє виявити характер структури матеріалу, структуру дифузійного шару. Для травлення поверхні мікрошліфа ресорної сталі 65Г застосовували добре відомий реактив під назвою "Ніталь", а саме розчин азотної кислоти у спирту (3...5 % HNO₃).

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Дослідження протравленої структури зразків здійснювали при збільшеннях мікроскопу до 1000 разів.

Для металографічного дослідження боровані зразки були вирізані, а поперечні перерізи закріплені в провідній смолі гарячим способом. Потім зразки були шліфовані за допомогою абразивного паперу SiC та поліровані пастою з оксиду алюмінію розміром 0,05 мкм. Для виявлення деталей мікроструктури борованих шарів було використано техніку гарячого травлення. Використовувався спеціальний реагент, що складався з фероціаніду калію та гідроксиду калію. Мікроструктурні спостереження проводилися за допомогою оптичного мікроскопа. Мікроструктурну характеристику також проводили за допомогою ММП-14Ц, оснащеного цифровою камерою.

Товщину борованого шару розраховували як середнє значення приблизно зі 10 вимірювань, проведених у різних місцях поперечного перерізу металографічного зразка. Основною проблемою під час цих вимірювань була голкоподібна морфологія боридів. Товщину зони FeV та загальну товщину шару (FeV + Fe₂V) вимірювали за допомогою процедури, запропонованої Кунстом. Вимірювання проводили за допомогою цифрових зображень борованих шарів. Товщину зони FeV та всього шару FeV + Fe₂V вимірювали через постійні інтервали. При цьому враховували голкоподібну морфологію боридів.

2.3. Методика дифузійного насичення бором

Борування з використанням струмів високої частоти – це порівняно новий метод хіміко-термічної обробки, при якому поверхня металу насичується бором для підвищення його твердості, зносостійкості та корозійної стійкості. Швидкісне нагрівання струмами високої частоти (СВЧ) прискорює процес борування і дозволяє більш точно контролювати глибину та структуру дифузійного шару.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Перевага при боруванні струмами високої частоти полягає у прискоренні процесу: ТВЧ нагрівання дозволяє скоротити час обробки, порівняно із звичайними способами. Також такий спосіб дозволяє здійснювати локальне нагрівання: можливість нагрівання тільки необхідної частини виробу, що зменшує енерговитрати та деформації. Процес ТВЧ борування дозволяє досягати більш точного контролю температури та глибини проникнення бору, а також поліпшення структури шару: ТВЧ нагрівання може впливати на структуру та властивості дифузійного шару, запобігаючи утворенню небажаних структур.

Перед термохімічною обробкою, що полягала у насиченні поверхні сталі 65Г бором, зразки промивали дистильованою водою, знежирювали ацетоном та промивали спиртом. Борування проводилося в порошковій суміші, що містила борвмісні агенти: карбід бору (B_4C) або аморфний бор (B) як джерело бору, а також активатори процесу – хлористий амоній (NaH_4Cl) та кальцію фторид (CaF_2), та флюсуючий компонент – флюс ПВ-209 для індукційного паяння та зварювання чорних металів. Вміст цих складових підбирали за рекомендаціями, у відповідності даних практичного застосування подібних процесів швидкісного борування у практиці поверхневого зміцнення високовуглецевих сталей у порошкових сумішах. Було використано три типи сумішей, склад яких представлено у таблиці 2.1. Борвмісні боруючі агенти використовували у вигляді порошків

Таблиця 2.1 – Склад борвмісних сумішей для приготування активної пасту під час борування поверхні зразків сталі 65Г

Позначення суміші	Боруючий агент (вміст)	Активатор (вміст)	Флюс ПВ-209, %
1	B_4C (95 %)	–	5
2	B_4C (90 %)	NaH_4Cl (5 %)	5
3	B_4C (90 %)	CaF_2 (5 %)	5

У дослідженнях для високошвидкісного боровання використовувалася метод порошкового боровання з підготовкою суспензії активної пасти та нанесенням її на потрібні ділянки зразка. Це дозволяло порівняти вплив змін у матеріалі, що зазнав насичення, з нейтральними ділянками після нагрівання СВЧ під час дифузійного насичення.

В якості в'язучого для приготування рідкої суспензії порошоків використовували спиртовий розчин, гідролізований етилсилікат, рідке скло, клею БФ-2, попередньо розведений в ацетоні або інші сполучні, кріплення, клеї або лаки. При приготуванні суміші використовують спосіб, при якому попередньо відновлюють борний ангідрид алюмінієм. В отриману суміш вводять решту компонентів, готують обмазку, наносять її на ділянки поверхні зразка, що підлягають дифузійному насиченню. Нанесення підготовленої суспензії виконували вручну пензликом на попередньо підготовлені та знежирені стрижневі зразки сталі 65Г. Після нанесення зразки висушували (рисунок 2.5) та піддавали витримці у сушильній шафі для повного видалення вологи з нанесеної обмазки.



а



б

Рисунок 2.5 – Зразки сталі 65Г до (а) та після (б) нанесення активної обмазки, на основі карбіду бору

Після затвердіння активної обмазки зразки піддавали нагріванню в індукторі високочастотного генератора індукційного струму (рисунок 2.6). Як відомо нагрів СВЧ здатний швидко розігріти заготовки зі сталі до високих температур, які можуть сягати навіть температури плавлення сталі. З іншого

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

боку, перевагою нагріву є індукування струмів Фуко у поверхневих шарах зразків, які піддаються безпосередньо дифузійному насиченню активним бором із нанесеної на них обмазки. Це спрощувало локалізацію процесу в актуальних ділянках, передбачених технологічним принципом поверхневого хіміко-термічного зміцнення.



Рисунок 2.6 – Нагрів зразка в індукторі

Тому у процесі такого нагріву важливим завданням було контролювати температуру поверхні, що частково спрощувалось суттю технології нагрівання за допомогою СВЧ. Температуру на поверхні зразка, а відповідно і самого процесу дифузійного насичення контролювали за допомогою високотемпературного безконтактного інфрачервоного пірометра Benetech GM1500, з діапазоном вимірювання температури до 1500 °С та похибкою вимірювання +/-1,5 °С.

Регулювання температури зразка під час дифузійного насичення бором здійснювали за допомогою зміни потужності високочастотного генератора. Для цього, попередньо здійснювали серію пробних налаштувань процесу для звичайних зразків сталі 65Г без нанесення обмазки та з активною обмазкою, що дало відтворювати шкалу потужності у відповідності до температури.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Зразки боровали з використанням різних параметрів процесу температур 1100, 1150 та 1200 °С та тривалості: 2, 5, 8 та 12 хвилин, за режимом, що зображений на. У всіх випадках борування проводилося за однієї фіксованої температури, з коливаннями не більше 5 %, протягом одного певного періоду часу.

Під час нагріву зразок розміщували вертикально та опирали на один з його торців. Для цього під індуктором генератору розміщували підкладку з вогнетривкої шамотної цегли. Так досягалось стаціонарне розміщення зразка без контакту його поверхні з індуктором.

2.4. Методика вимірювання твердості дифузійного шару

Загальна методика вимірювання твердості матеріалів полягає у втискуванні чи проникненні твердого індентору у поверхню зразка. За цим принципом працюють більшість приладів вимірювання твердості матеріалів. В роботі твердість зразків сталі 65Г вимірювали за допомогою твердоміра фірми NOVOTEST, моделі ТС-БРВ. Для виконання вимірювання поміщаємо на робочому столику твердоміра зразок та за допомогою навантажуючого пристрою втискуємо в зразок індентор. Далі вмикаємо прилад, і після зняття навантажень індикаторний прилад твердоміру показує значення твердості. Даний прилад забезпечує можливість регулювання параметрів вимірювання, зокрема, сили та часу втискання наконечника вздовж його осі перпендикулярно до поверхні матеріалу.

Незважаючи на простоту вимірювань на цьому твердомірі, під час роботи слід дотримуватись загальних вимог щодо підготовки зразків та виконання вимірювань. Величину твердості матеріалу отримують з величини проникнення індентора в його поверхню. Від глибини проникнення залежить величина відбитка, що залишився на місці вдавлювання. Для усіх стандартних способів вимірювання твердості металів, при вдавлюванні індентора відбувається локальна пластична деформація поверхні металу. За більшого

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

опору металу пластичній деформації, буде менша глибина проникнення індентора, і навпаки буде вища твердість.

Твердості по методу Роквела визначається в умовних одиницях за декількома шкалами. Для вимірювання твердості зразків сталі 65Г в роботі використовували спосіб вимірювання за шкалою С. У даному випадку в поперню зразка втискується алмазний конус, з кутом вершини 120°. Індентор вдавлюється послідовно, за прикладання двох наступних навантажень: попереднього $P=10$ кН і основного $P=150$ кН. Твердість відліковують по приладу за шкалою С. За одиницю твердості прийнята величина, що відповідає лінійному переміщенню індентора на 2 мкм.

Для визначення твердості поверхневого шару сталі 65Г, що насичений бором, у роботі застосовували метод мікротвердості. При цьому застосовувався твердомір фірми NOVOTEST моделі ТС-МКВ для визначення мікротвердості металів. У відповідності до принципу його роботи, у якості індентору застосовується індентор у вигляді алмазної піраміди. В основі піраміди лежить квадрат. Кут при вершині між протилежними гранями піраміди становить 136°. Піраміда втискається у зразок сталі під невеликим навантаженням від 2 до 100 Н, викликаючи локальну пластичну деформацію металу поверхні. У процесі втиснення піраміди залишається чіткий відбиток, за формою характерного ромбу з діагоналями, що приблизно рівні між собою.

Для отримання числа твердості за методом мікро Віккерса H_v чи мікротвердості, необхідно за допомогою вмонтованого оптичного мікроскопу з індикаторною шкалою, виміряти довжину кожної діагоналі відбитку, встановивши середнє значення довжини. За середнім значенням довжини діагоналі відбитку розраховують мікротвердість користуючись формулою:

$$H_{\mu} = 18540 \cdot \frac{P}{d^2},$$

де P – навантаження на індентор, в грамах;

d – довжина діагоналі відбитку, мкм.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Під час вимірювання мікротвердості враховували можливий розкид значень твердості, тоб то можливий вплив суміжних структурних складових та фаз сталі 65Г з іншими значеннями мікротвердості, також різні товщини вимірюваних елементів структури, статистичні похибки вимірювань тощо. Для можливості статистичної обробки результатів експерименту на кожному зразку проводили щонайменше три вимірювання, та проводили усереднення отриманих даних.

За отриманими значеннями твердості сталі 65Г після дифузійного насичення бором її поверхні, оцінювали відносну зносостійкість поверхневих шарів, для умов роботи, що характерні для робочих елементів обробки ґрунту сільськогосподарської техніки. За цим принципом вважали, що чим більші значення твердості поверхневого шару сталі, тим буде вища стійкість поверхні ресорної сталі 65Г проти спрацювання в умовах контакту з ґрунтом.

2.5. Випробування на спрацювання дифузійного шару

Випробування на зносостійкість проводилися в умовах сухого тертя без змащення. Пара тертя складалася з нерухомого контрзразка у формі пластини та рухомого зразка зі сталі 65Г, поверхня якого насичена бором. Форма зразка відповідала формі розмірам після високошвидкісного бурування. Нерухомий контрзразок був виготовлений із загартованої та низьковідпущеної підшипникової сталі з твердістю 65 за HRC. Під час випробувань використовувалися такі параметри: навантаження 5 кгс, швидкість обертання зразка сталі 65Г становила 250 об/хв, тривалість 4 год. Схема випробування на зносостійкість з положеннями зразка та контрзразка показана на рисунку 2.7. Початкова площа контакту між зразком та контрзразком була лінійною. Зі збільшенням часу зношування у випробуваному зразку утворювалася доріжка тертя. Форма цієї доріжки тертя відповідала формі зовнішньої циліндричної поверхні контрзразка з радіусом приблизно 10 мм. Тому контактний тиск змінювався під час випробування на зношування і його було важко визначити.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Трибологічні властивості досліджували для двох зразків: неборованої сталі 65Г, борованої при різних температурах та з різним часом і складом активної обмазки.

Хоча загальна тривалість випробування становила 4 години, маси зразка та контрзразка вимірювалися після кожної години випробування. На основі отриманих результатів було визначено параметри, що описують зносостійкість: коефіцієнт інтенсивності зношування за масою зразків 65Г, відношення втрати маси до довжини доріжки зношування маси для контрзразків.

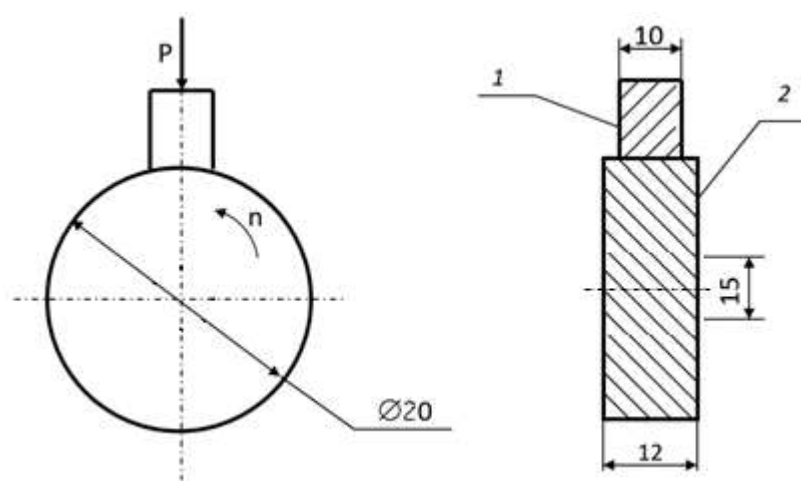


Рисунок 2.7 – Схема навантаження під час тертя

Перед випробуванням на зносостійкість зразки піддавали припрацюванню, на протязі 5 хвилин.

Інтенсивність вагового зносу (I_g) поверхні тертя:

$$I_g = \frac{m_1 - m_2}{L},$$

m_1, m_2 – маса зразків до і після випробування, г;

L – шлях тертя, км.

Оскільки вал зразок має криволінійну поверхню, то для відносно точного оцінювання зносу дифузійних борівмісних шарів, що мають малу товщину, час випробування був незначним: по одній години на дорожку ковзання.

РОЗДІЛ 3
ВПЛИВ ВИСОКОШВИДКІСНОГО БОРУВАННЯ НА
СТРУКТУРУ СТАЛІ 65Г

3.1. Структура сталі 65Г у початковому стані

Ресоропружинна сталь марки 65Г відноситься до високовуглецевих низьколегованих марганцевих сталей. Вміст марганцю в цій сталі становить 0,9...1,2 %. Цей елемент відіграє важливу роль у покращенні властивостей сталі. Марганець підвищує міцність, твердість, стійкість до зносу та опір ударним навантаженням, не знижуючи пластичності. У поєднанні з вуглецем, марганець підвищує межу пружності та твердість сталі, що важливо для довговічності, покращує здатність сталі витримувати ударні навантаження, підвищує стійкість сталі до зносу, що важливо для деталей, що піддаються тертю та стиранню.

Макроструктура циліндричних зразків характеризувалась однорідністю поверхні (рисунок 3.1), без присутності видимих неозброєним оком пор, тріщин чи неметалевих включень.



Рисунок 3.1 – Макрозрізи циліндричних зразків сталі 65Г

У початковому стані структура зразків (рисунок 3.2) відповідала дрібнодисперсній структурі сталі 65Г, що характерна для гарячекатаного прокату.

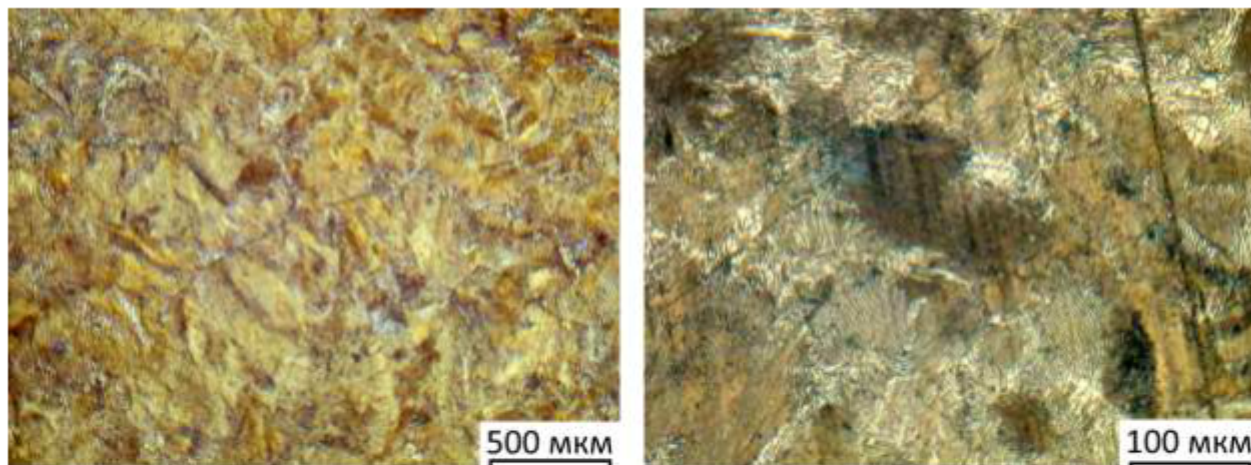


Рисунок 3.2 – Мікроструктура циліндричних зразків сталі 65Г у початковому стані

Структура зразків сталі мали переважно перлітну структуру, з незначними залишками фериту, що концентрувались іноді по границям зерен перліту. Перліт, як евтектоїдна суміш характеризувався середньою дисперсністю структури, що відповідала 5...7 балу за ступенем диспергованості пластин цементиту та фериту. Така структура сталі була оптимальною для проведення дифузійного насичення поверхні сталі бором з використанням боровмісних сумішей у вигляді густих обмазок.

В дослідженнях встановлено однорідність структури циліндричних зразків сталі 65Г за об'ємом, що гарантувало рівномірність розподілення твердості та стабільність інших механічних характеристик сталі.

3.2. Структура поверхневих шарів сталі 65Г після борування

Нагрівання підготовлених зразків здійснювали в петльовому водоохолоджуваному мідному індукторі діаметром 50 мм, під'єднаному до високочастотного генератора ВЧГ-15. Налаштування контуру та геометрія індуктора забезпечували нагрівання досліджуваних зразків до температури 1300 °С протягом 30...40 секунд, з наступною витримкою при заданій температурі. Після витримки за потрібної температури (1100...1250 °С) протягом певного часу (2...10 хвилин) зразки виймалися з індуктора, і охолоджувались на спокійному повітрі до кімнатної температури.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Відомо, що коли температура борування перевищує 1000 °С, внаслідок процесів росту і розпаду зерен основних фаз, розпад і диспропорціонування карбідів та інші аналогічні процеси в сталях, швидкості борування можуть зростати в 2...4 рази, при збільшенні температури на кожні 15 ... 20 °С, і процес переходить з дифузійного до характеру хімічної реакції. Так при температурі 1100...1200 °С, відповідно до досліджень, вдається за кілька хвилин отримати товщину боридного однофазного шару до 0,2...0,4 мм, при цьому нагрівання деталі здійснюється СВЧ в спеціальній термітній суміші.

Було встановлено, що при швидкісному нагріванні СВЧ зразків зі сталі 65Г, покритими боруєчими складами при вибраних параметрах процесу (Т=1100...1250 °С, витримка 1 хв), утворюються покриття, що на вигляд нагадують наплавлений твердий сплав (рисунок 3.2). Товщина шару могла сягати до 0,05 мм. Згідно порівняльного аналізу, оцінюючи стан отриманого дифузійного шару, встановлено, що за структурою він відповідає бориду заліза Fe₂B. Загальною структурою шару не містить полів монобориду, у структурі спостерігаються незначна кількість пор та неметалевих включень.

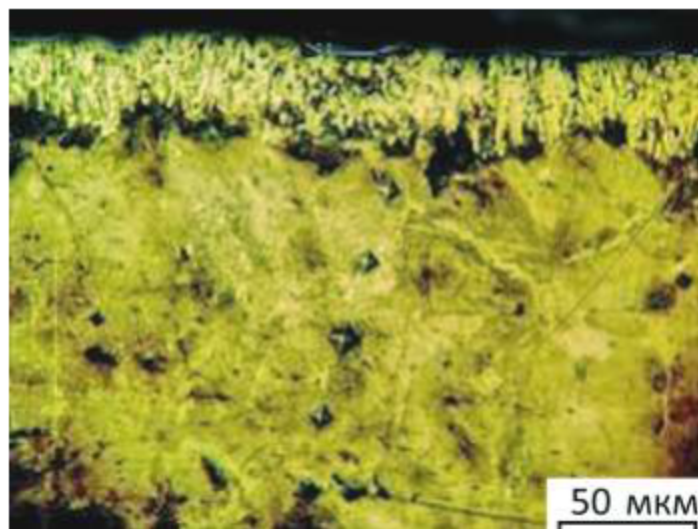


Рисунок 3.2 – Структура поверхні сталі 65Г після швидкісного індукційного нагрівання та витримки протягом 1 хвилини

З пробних результатів борування сталі 65Г за швидкісного нагрівання СВЧ встановлено, що під шаром флюсу ПВ-209 з вмістом активного компоненту у вигляді карбиду бору В₄С не менше 90 %, формуються складні

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

боридні покриття, вже безпосередньо під час нагрівання сталі. Незначні витримки, до кількох хвилин, стабілізують процес насичення, викликаючи розвиток інтенсивної дифузії активного бору, з можливістю протікання хімічних реакцій.

У дослідженнях встановлено, що в залежності від складу активної обмазки, якою покривали поверхню зразків, залежить ступінь активації процесу насичення, а також динаміка дифузії бору. Це впливає на товщину шару боридів на поверхні зразків сталі сталі 65Г (рисунок 3.3). За вимірюваннями товщини шару встановлено, що суміш номер 3, на основі карбід бору (B_4C) з фторидом кальцію (CaF_2) як активатором процесу активатором у присутності флюсу ПВ-209, дозволяє отримати більшу товщину дифузійних шарів в порівнянні з іншими сумішами: номери 1 та 2.

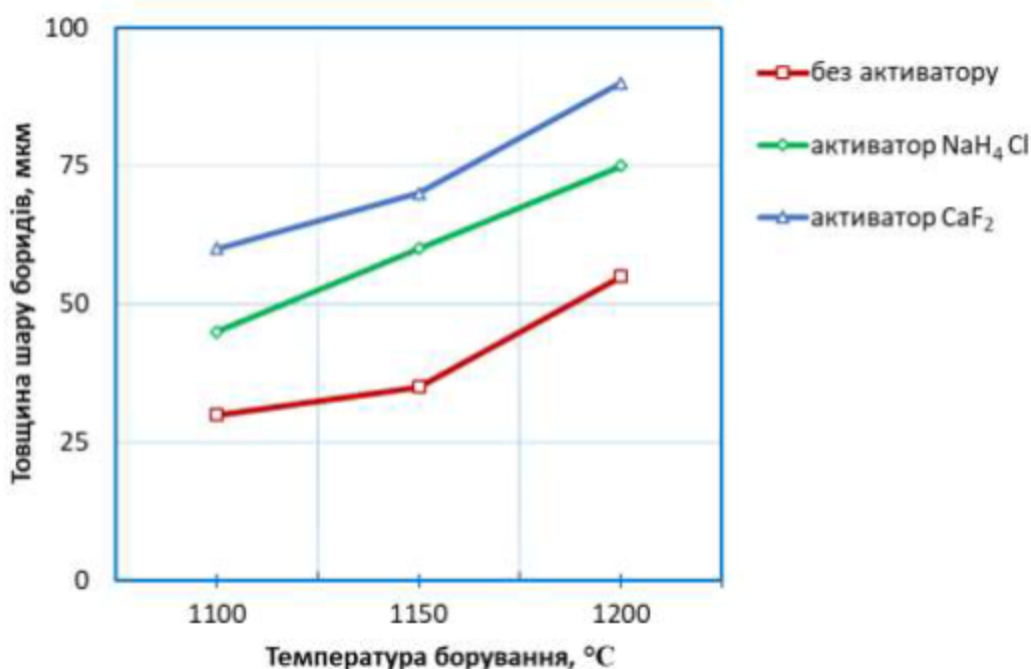


Рисунок 3.3 – Вплив складу суміші на товщину шару боридів (час витримки 5 хвилин)

Отже як активатор процесу фторид кальцію є більш ефективним компонентом твердої активної обмазки для насичення бором, за умов високошвидкісного борування з нагрівом зразків СВЧ. В подальших дослідках використовували в процесі підготовки зразків суміш номер 3 (див. таблицю 2.1). Суміш готували з відповідних порошків у кількісному

співвідношенні: карбід бору (B_4C) 90 %; кальцію фторид (CaF_2) 5 % та флюсуючого компоненту ПВ-209 – 5 %.

У дослідженнях процесу борування зразків сталі 65Г із застосуванням активних обмазок та швидкісного нагріву СВЧ, було встановлено, що товщина шару боридів на поверхні зразків залежить від часу витримки. З приведених на рисунку 3.4 фотознімків структури видно, що за збільшення часу витримки товщина дифузійного шару боридів збільшується. Найбільша товщина дифузійного шару досягається при витримці 12 хвилин.

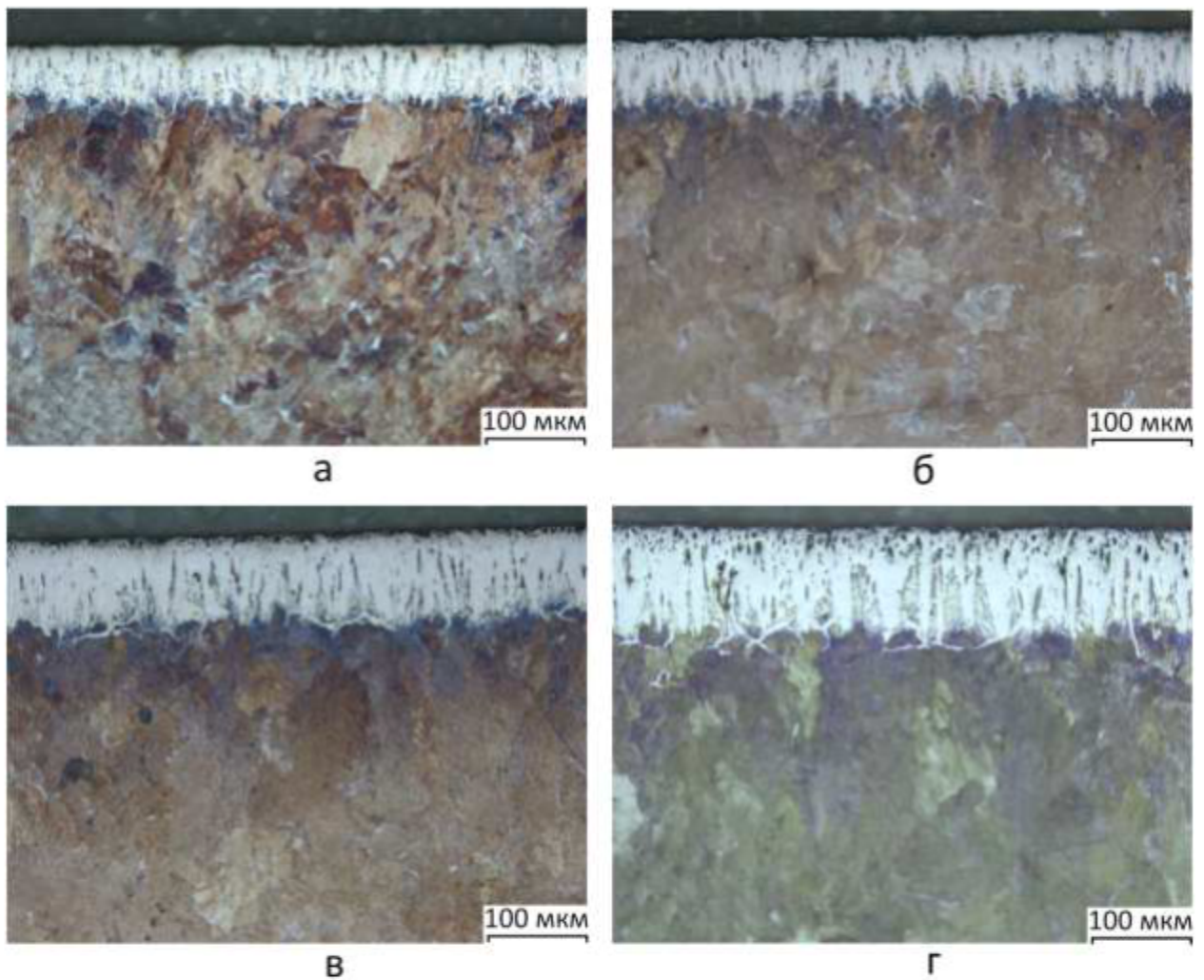


Рисунок 3.4 – Структура поверхні сталі 65Г для зразків, які піддавались дифузійному насиченню за температури 1200 °С, з часом витримки:

а – 2 хв; б – 5 хв; в – 8 хв; г – 12 хв.

У дослідженнях структури морфологічних особливостей дифузійного шару було помічено, що хоча збільшення витримки під час процесу насичення поверхні сталі 65Г за високих температур 1100...1200 °С, товщина шару

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

боридів збільшується (рисунок 3.5), проте їх якість погіршується. На поверхні боридного шару помітні пори, що свідчить про виникнення рихлості його структури. Переважна більшість дрібних та середніх пор присутня у верхніх ділянках боридного шару. Ці пори можуть викликати появу тріщин за ударного навантаження. Також зовнішня пористість може сприяти насиченню вологою поверхні еталей ґрунтообробної техніки, що прискорюватиме процеси корозії.

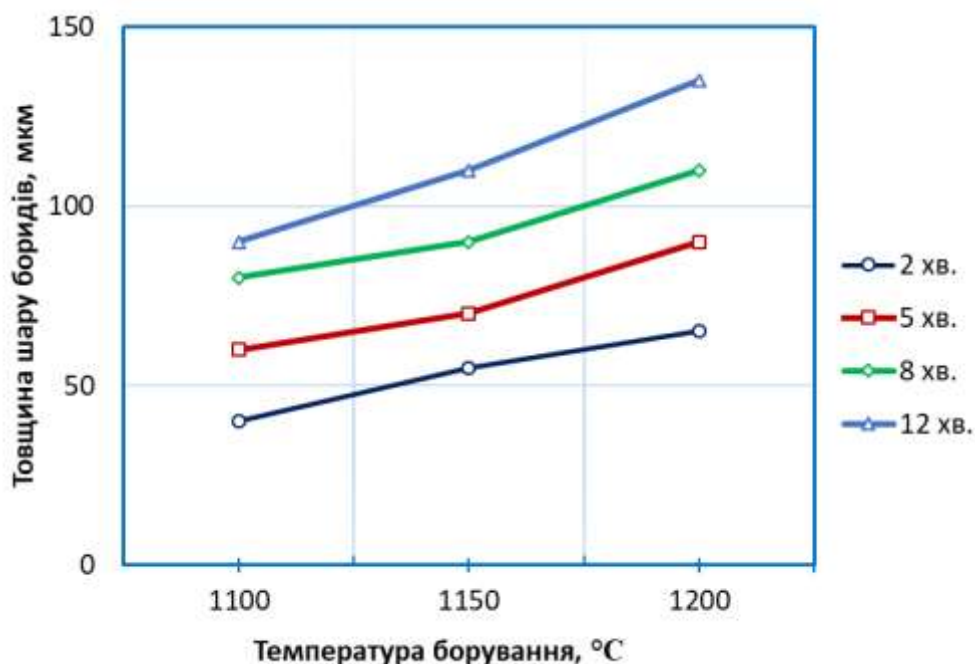


Рисунок 3.5 – Залежність товщини шару боридів на поверхні сталі 65Г від температури та часу витримки

Збільшення пористості та дефектності погіршує міцність шару боридів та зменшує його стійкість в процесі експлуатації виробу. За ударного навантаження на поверхні такого дифузійного шару можуть виникати тріщини, що викликатимуть локальне руйнування.

3.3. Структура сталі 65Г після гартування та відпуску

Як зазначалось раніше зразкі сталі 65Г після дифузійного високошвидкісного насичення бором можна піддавати гартуванню для загального зміцнення структури сталі. Такий додатковий процес підвищує

загальну твердість сталі та, відповідно, збільшує жорсткість виробів, що покращує загальну стійкість деталей після високошвидкісного борування.

Процес загальної зміцнюючої термічної обробки ресорно-пружинної сталі 65Г складається з процесу гартування та наступного відпускання. Режим гартування сталі 65Г (рисунок 3.6) включає нагрівання до температури 800...820°C з подальшим охолодженням в трансформаторній оливі. Після гартування проводиться середнє відпускання при температурі 350...400°C. У процесі гартування сталі 65Г важливо уникати різкого охолодження, щоб запобігти утворенню тріщин.

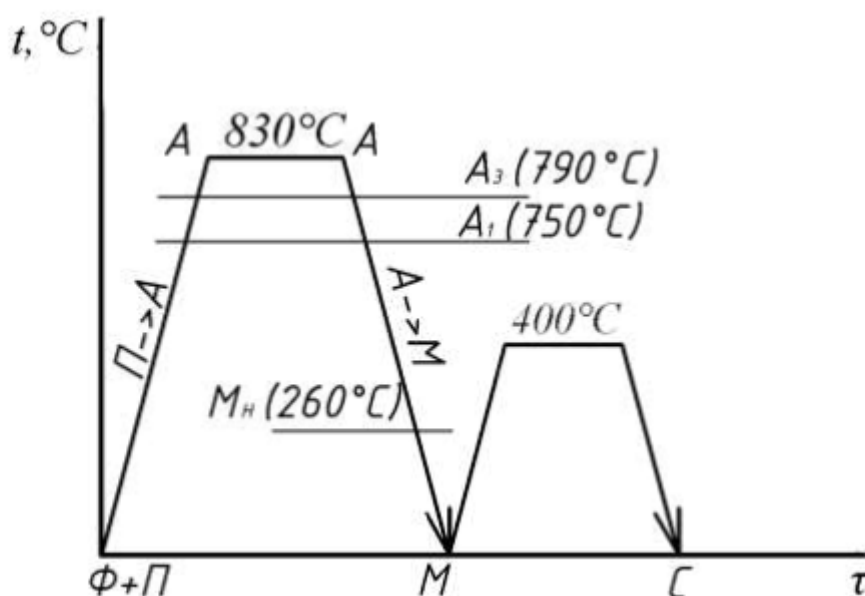
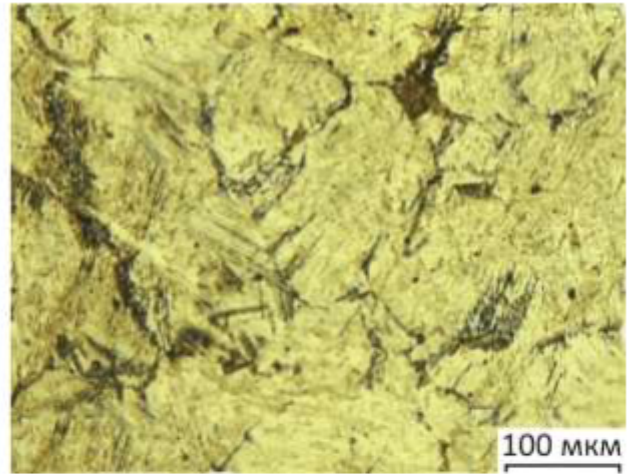
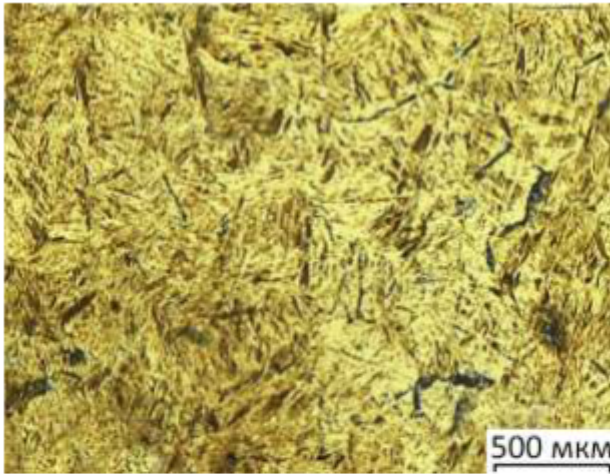


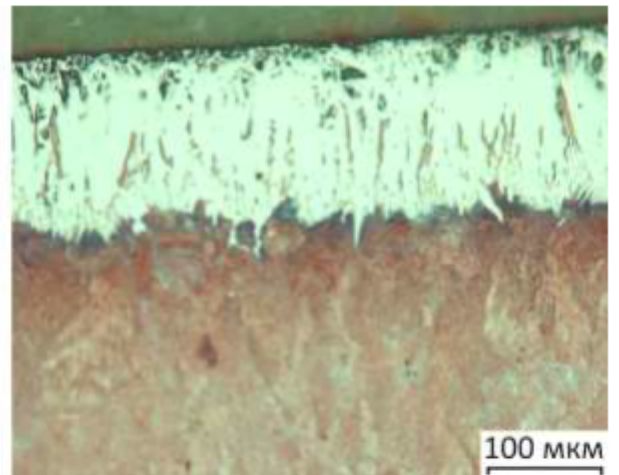
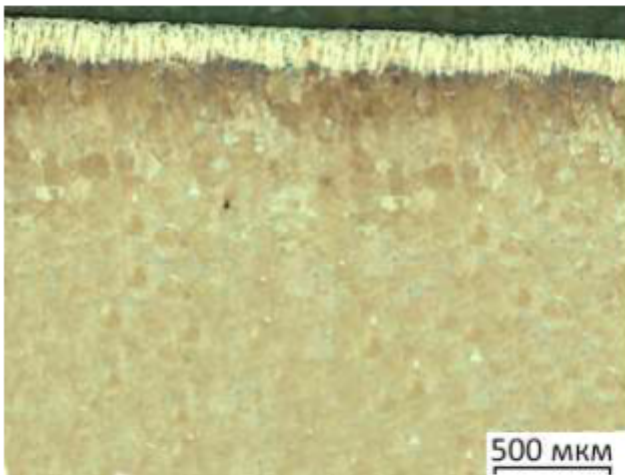
Рисунок 3.6 – Режим гартування сталі 65Г

Метою такого дослідження було оцінити вплив гартування та відпуску на стан боридного шару, який був сформований після індукційного високошвидкісного насичення в обмазці з активним бором. Структуру боридного шару оцінювали під оптичним мікроскопом, використовуючи збільшення мікроскопу у 100 та 500 разів.

З отриманих цифрових зображень структури загартованих зразків сталі 65Г (рисунок 3.7) після насичення поверхні бором видно, що процес гартування з наступним середнім відпуском не змінює структуру дифузійних шарів. Форма, товщина та перехідна зона боридного шару практично не змінюються.



серцевина зразка



поверхневий шар

Рисунок 3.7 – Структура зразків сталі 65Г після гартування та відпуску

Структура серцевини зразків сталі 65Г набуває після відпускання сорбіто подібної будови. Така структура гарантує достатню твердість і, головне, жорсткість деталей, що забезпечить кращу стійкість боридних шарів на поверхні зразків, у випадку коли деталі зазнають великих згинальних чи скручуючих навантажень.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР 1325.00.00.000 ПЗ

Арк.

38

РОЗДІЛ 4
ВПЛИВ ВСОКОШВИДКІСНОГО БОРУВАННЯ НА
ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ 65Г

4.1. Твердість дифузійного шару сталі 65Г

Твердість дифузійного шару боридів, отриманого на поверхні сталі ресорно-пружинної 65Г, оцінювали в роботі за значеннями мікротвердості. Мікротвердість шарів вимірювали на твердомірі фірми NOVOTEST моделі ТС-МКВ згідно описаної раніше методики.

Дослідження розподілу мікротвердості отриманих дифузійних шарів по глибині показало наявність у них, твердішого поверхневого шару і менш твердого шару, що лежить під ним, протяжність та характеристики яких різняться. Вимір мікротвердості проводилося за середнім значенням в межах площі одного відбитка. Відбитки твердості виконували спочатку на поверхні шару, ближче до її краю. Далі продовжували вимірювання у глиб шару боридів, до перехідної зони та зони початку основного металу.

Одним з недоліків класичного методу визначення середньої товщини шару є те, що він нічого не вказує про морфологію шару. Два шари з однаковою середньою товщиною можуть бути абсолютно різними морфологічно та під час експлуатації. А саме, чим ширші та щільніші зубці боридів, тим компактнішим буде шар, що має відобразитися на значеннях твердості. Аналіз на основі вимірювання мікротвердості дає можливість більш детального аналізу морфології. Для ілюстрації переваг цього методу нижче наведено результати для шарів однакового складу обмазки, отриманих на сталі 65Г за різного часу та температур витримки (рисунк 4.1). Якщо порівняти отримані дані, можна виявити, що середня товщина шару на сталі 65Г зростає за підвищення температур борування та часу витримки при цих температурах. Проте, якість отриманих шарів при великих витримках погіршується, що можна бачити по зменшенню твердості шару на краю його поверхні.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Зменшення значень твердості пов'язане з наявністю порожнин та рихлості на поверхні шарів, що викликано насиченням газами при збільшенні тривалості нагріву за високих температур борування.

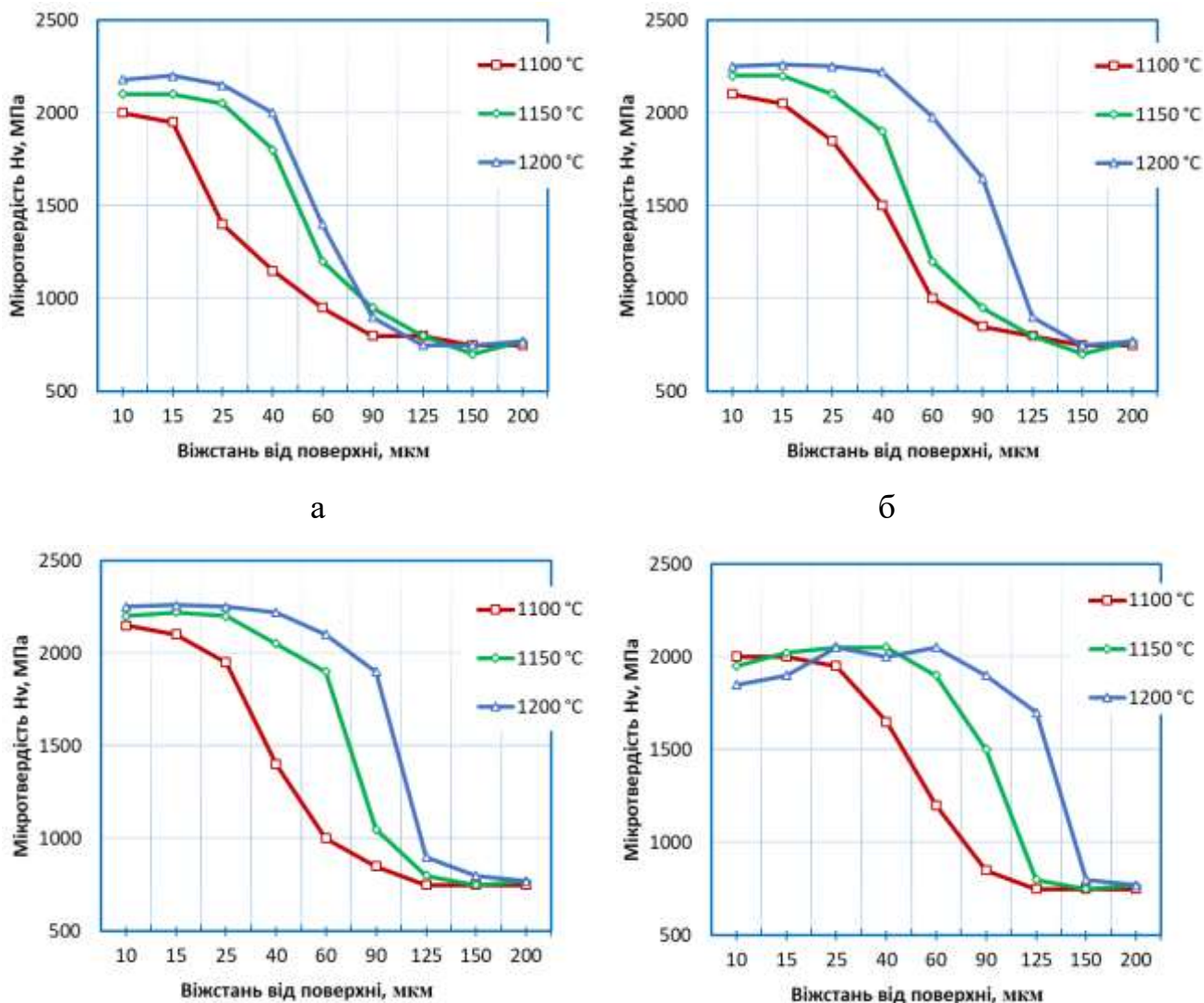


Рисунок 4.1 – Розподіл мікротвердості за глибиною дифузійного шару сталі 65Г в процесі високотемпературного борування для часу витримки:

а – 2 хв; б – 5 хв; в – 8 хв; г – 12 хв.

Як видно з результатів вимірювання мікротвердості при більших температурах насичення бором проходить більш ефективно, з формування дифузійних шарів більшої товщини: до 100 мкм при витримці 8...12 хвилин. Але збільшення часу витримки викликає розрихлення шару боридів та зменшення твердості поверхні, що видно з останнього графіка.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

З отриманих графіків видно, що на товщину боридного шару суттєво впливає час витримки та температура. Оптимальними температурами високошвидкісного борування сталі 65Г з нагрівом СВЧ є температури 1150...1200 °С.

Можна також спостерігати, що в перехідній області частка боридної фази є високою. Різні криві для шарів за різної температури показують відмінності в їхній морфології. Хоча середні товщини при високих температурах насичення приблизно рівні, можна спостерігати, що шар при більших витримках має більшу товщину, враховуючи компакту частину, тобто частину шару з високою часткою боридної фази. Оскільки їх середні товщини однакові, це означає менш виражену зубчастість. Що стосується зубчастої частини, то діаграми показують, що ці два шари мають не тільки різну товщину зубчастої частини, але й відрізняється за зовнішнім виглядом. Висока частка боридної фази в зубчастій частині сталі 65Г вказує на те, що боридні зубці товстіші та щільніше розподілені, ніж у шарах, отриманих при менших витримках. Різна морфологія шарів також відображається на кривих твердості поперечного перерізу. Більша товщина компактної частини шару призвела до збереження високої твердості на більшій глибині. Більша частка боридної фази в середній частині шару на сталі також призвела до вищої твердості порівняно з меншими витримками. Слід наголосити, що у випадку боридного шару, окрім твердості, важливу роль у його поведінці під час використання відіграє також ступінь чистоти шару, що гарантує хороше зчеплення шару з підкладкою.

Існування шаруватої структури в отриманих покриттях при великих витримках, в нашому випадку пояснюється наявністю двох фаз FeB і Fe₂B, розташованих у матеріалі один за одним, а змістом основної зміцнюючої фази, що розрізняється, по глибині покриття. Про це свідчать як структура отриманих покриттів, так і залежність товщини, твердості та зносостійкості покриттів, що утворюються на ґрунтообробних деталях.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

З огляду на вищезазначене, можна сказати, що аналіз на основі аналізу твердості є простим методом, який дозволяє точніше характеризувати боридні шари та пропонує багато переваг порівняно з чисто візуальними. Що стосується товщини шару, її можна визначити на основі глибини, на якій розташована адекватна частка боридної фази. Крім того, крива зміни твердості не тільки дає уявлення про морфологічний характер шару, але й шар можна розділити на компактні та зубчасті частини. Хоча результати цих досліджень були кількісними, їх зв'язок з товщиною шару та типом матеріалу був якісним. Поділ шару на компактну та зубчасту частини дозволить провести подальші дослідження з метою кількісного зв'язку морфології боридного шару з його трибологічними властивостями, тобто дослідити вплив товщини компактної частини шару та його зубчастої частини на поведінку шару за різних умов зношування.

Додатковою перевагою аналізу на основі об'ємних часток боридів є точніше визначення твердості поперечного перерізу, що має велике значення в промисловому застосуванні, оскільки деякі деталі машин мають вимоги не лише до твердості поверхні, але й до твердості на певній глибині. Більш точні дані про розподіл твердості поперечного перерізу відкривають можливість визначення ефективної товщини боридного шару на основі значення твердості, що забезпечує ефективну зносостійкість. Такий підхід до визначення середньої товщини термодифузійних шарів не є рідкістю, оскільки товщини цементованих та азотованих шарів також визначаються на основі твердості.

4.2. Зносостійкість боридного шару на сталі 65Г

Випробування на зносостійкість проводилися в умовах сухого тертя без змащення. Пара тертя складалася з нерухомого контрзразка у формі пластини та рухомого зразка зі сталі 65Г, поверхня якого насичена бором.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

В процесі випробувань оцінювали втрату маси зразка за визначиний однаковий час спрацювання зразків сталі 65Г, що були насичені бором за різними режимами дифузійного високотемпературного борування в індукторі.

Попередні випробування на знос протягом однієї години показали високу зносостійкість сталі після борування. При такому часі випробування на деяких зразках не вдавалося визначити різницю маси зразка до випробування, та після випробувань на знос. Тому у роботі було прийняє рішення збільшити загальний час випробування до 4 годин. Під час випробувань вимірювали також величину спрацювання після кожної години тертя. Циліндричний зразок знімали з машини та зважували.

Більш точні та достовірні результати випробувань на знос отримали після повного циклу випробування кожного зоазка протягом 4 годин роботи в умовах тертя (таблиця 4.1). Після визначення маси зразків встановлено наявність втрати маси, особливо для зразків, що борувались при невеликому часі витримки – 2 хвилини.

Таблиця 4.1 – Результати випробувань на знос сталі 65Г після борування протягом 4 годин, швидкість тертя 0,25 м/с

Температура борування	Величина спрацювання поверхні, мгр			
	тривалість борування 2 хв.	тривалість борування 5 хв.	тривалість борування 8 хв.	тривалість борування 12 хв.
1100 °С	310	290	285	300
1150 °С	260	195	165	200
1200 °С	250	190	160	210

З даних таблиці видно, що збільшення температури борування підвищує стійкість зразків сталі 65Г в умовах сухого тертя, з навантаженням 5 кг та швидкістю ковзання 0,25 м/с. Найбільшою стійкістю характеризуються зразки сталі 65Г, які піддавали дифузійному насиченню бором при температурі 1200 °С, протягом 8 хвилин, що видно з рисунку 4.2.

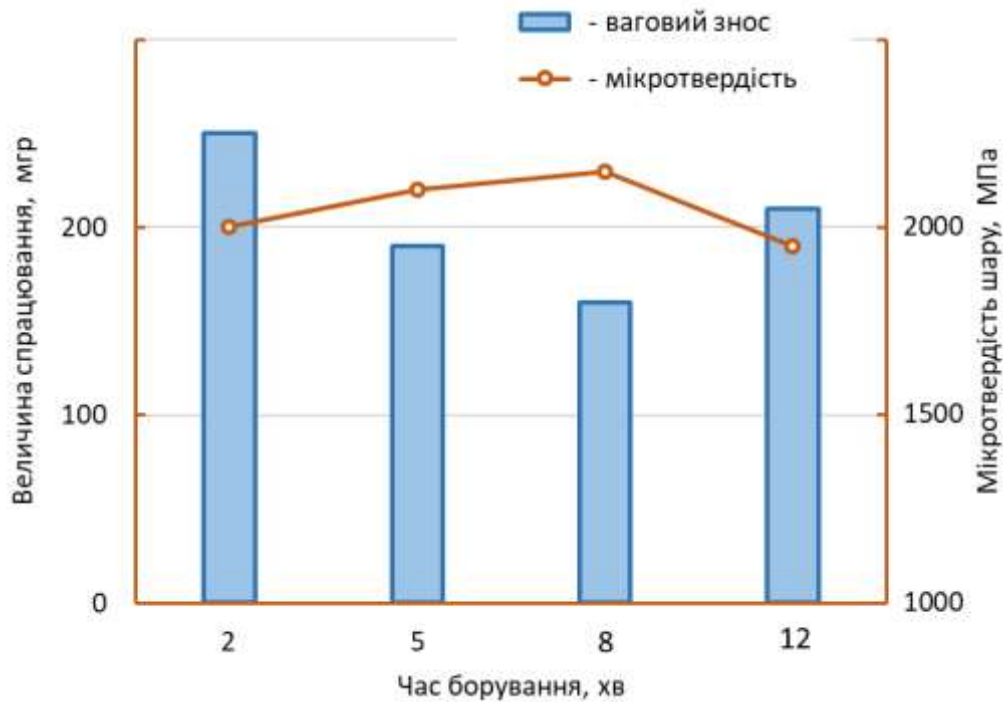


Рисунок 4.2 – Дані вагового зносу зразків сталі 65Г для температур дифузійного насичення 1200 °С

Як видно з даних рисунку найменший ваговий знос поверхні мають зразки, що піддавались боруванню протягом 8 хвилин. Температура борування при цьому становила 1200 °С. Ці зразки сталі 65Г мали найбільшу стійкість протягом всього часу випробувань – 4 години.

Збільшення часу високотемпературного борування СВЧ до 12 хвилин викликає зменшення стійкості в умовах сухого тертя, що корелює із значеннями мікротвердості поверхні зразків. Причиною погіршення стійкості є встановлене під час досліджень структури та морфології дифузійного шару його рихдість та наявність значної кількості пор. Ці пори концентруються переважно у поверхневих зовнішніх мікрошарах боридного шару, де можливе формування моноборидів заліза за великого часу насичення поверхні високовуглецевих сталей. Цей борид заліза має меншу твердість в порівнянні з диборидом заліза Fe_2B , як основної складової боридних шарів. Таким чином підвищення часу витримки за високотемпературного борування сталі 65Г з нагрівом СВЧ більше за 8 хвилин є недоцільним.

ВИСНОВКИ

У роботі досліджено процес високошвидкісного борування сталі 65Г для підвищення стійкості робочих деталей ґрунтообробної техніки. Процес дифузійного насичення бором виконували в обмазках на основі порошків карбід бору (B_4C), хлористого амонію ($NaNH_4Cl$), фториду кальцію (CaF_2), та флюсуючий компонента ПВ-209 для індукційного паяння та зварювання чорних металів.

У дослідженнях процесу борування встановлено, що застосування фториду кальцію (CaF_2) як активатора процесу дифузії бору в поверхневі шари сталі 65Г є більш ефективним, в порівнянні з порошком хлористого амонію. Флюсуючий компонент ПВ-209 покращує процес, захищаючи поверхню від окислення за високих температур борування з нагрівом СВЧ.

Встановлено, що для сталі 65Г, яка часто застосовується для виготовлення робочих деталей сільськогосподарської техніки (плуги, леміші, рала та лапи культиваторів, ріжучі диски тощо), можливе застосування процесу високошвидкісного борування з метою підвищення зносостійкості поверхні. Найкращими параметрами процесу високошвидкісного борування сталі 65Г у твердих обмазках з нагрівом СВЧ є температури нагрівання 1150...1200 °С та час витримки 5...8 хвилин.

У роботі розроблено практичні рекомендації щодо технологічних режимів процесу високошвидкісного борування сталі 65Г для зміцнення її поверхні, шляхом формування зносостійких шарів на основі боридів заліза.

Прийняті проектні рішення дозволяють підвищити твердість, зносостійкість і контактну міцність поверхонь робочих деталей ґрунтообробної техніки та підвищити їх термін експлуатації.

Запропоновано склад активної пасти, на основі карбіду бору, яка має у своєму складі недорогі та нетоксичні компоненти (90 % карбіду бору B_4C , 5 % кальцію фториду CaF_2 , 5 % флюсу ПВ-209) та дозволяє прискорити процес насичення, з отриманням стійких поверхневих шарів.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Каталог сільськогосподарської техніки: навчальний посібник / За ред. Тіщенко Л.М., Мельника В.І. – Харків: ХНТУСГ ім. П.Василенка, 2021. – 450 с.
2. Болтянська Н. І., Маніта І. Ю. Забезпечення надійності сільськогосподарської техніки / Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового лісового та транспортного комплексів», 2020. – № 21. – С. 139-147. <https://doi.org/10.37700/ts.2020.21.139-147>.
3. Аскеров М. Г. Нові матеріали для виробництва змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки / М. Г. Аскеров // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2021. – № 2 (8). – С. 3-8.
4. Технологічне забезпечення довговічності технічних трибосистем : монографія / О. В. Диха, В. П. Свідерський, О. С. Дробот, Н. С. Машовець. – Хмельницький: ХНУ, 2021. – 178 с.
5. Брижаний І. Дослідження відносної абразивної стійкості робочих органів сільськогосподарських машин. Техніка і технології АПК, 2017. – №6(93). – С. 17-19.
6. Денисенко, М. І. До питання відновлення та зміцнення деталей робочих органів ґрунтообробної техніки / М. І. Денисенко // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: зб. наук. пр. - Кропивницький: ЦНТУ, 2023. – Вип. 7(38). – Ч. 1. – С. 86-99.
7. ДСТУ 8429:2015 Прокат із ресорно-пружинної вуглецевої та легованої сталі. Технічні умови.
8. Металознавство: навчальний посібник / І. В. Прокопович. – Одеса: Екологія, 2020. – 308 с.
9. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство, розділ Матеріалознавство: Навчальний посібник / Л.Г. Бодрова, Г.М. Крамар, Я.О.Ковальчук, І.В. Коваль – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. – 157 с.

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

10. Леговані сталі та сплави : навч. посіб. / Л. Ф. Руденко, Т. П. Говорун. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 171 с.

11. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. – 89 с.

12. Чернявський К. С. Дослідження технології термодифузійного зміцнення деталей сільськогосподарської техніки (на прикладі дисків лушпильника): кваліфікаційна робота магістра: спец. 133 – Галузеве машинобудування; наук. кер. О. І. Тришевський. Харків: ДБТУ, 2023. 69 с.

13. Козаченко О.В. Оптимізація параметрів локального зміцнення леза лапи культиватора / О.В.Козаченко, О.М.Шкрегаль, В.С.Каденко, В.В.Гончаров // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів: Науковий журнал. – Харків: ХНТУСГ, 2017. – Вип.7. С.149-155.

14. Герук С.М., Руденко В.Г., Бучко І.О. Ремонт та зміцнення робочих органів дискових борін. Вісник ТДАТУ, 2020. – № 6. – С. 87-91.

15. Michal Kulka, Current Trends in Boriding. Springer Nature Switzerland AG 2019. p. 283. ISBN 978-3-030-06781-6 <https://doi.org/10.1007/978-3-030-06782-3>.

16. Чернета О.Г. Технології борування і їх вплив на модифікування поверхні / Математичне моделювання, 2022. - № 1(46). - С.125-130. [https://doi.org/10.31319/2519-8106.1\(46\)2022.258451](https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(46)2022.258451).

17. Ipek Ayvaz, S., Aydin, I. Effect of the Microwave Heating on Diffusion Kinetics and Mechanical Properties of Borides in AISI 316L. Trans Indian Inst Met 73, 2635–2644 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02072-x>.

18. Łukaszewicz, G., Tacikowski, M., Kulka, M., Chmielarz, K., & Świątnicki, W. A. (2023). The Effect of Hybrid Treatment Combining Boriding and Nanobainitising on the Tribological and Mechanical Properties of 66SiMnCrMo6-6-4 Bearing Steel. Materials, 16(9), 3436. <https://doi.org/10.3390/ma16093436>.

19. Milinović, Andrijana & Marušić, Vlatko & Konjatić, Pejo & Berić, Nikolina. (2022). Effect of Carbon Content and Boronizing Parameters on Growth

					БР 1325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Kinetics of Boride Layers Obtained on Carbon Steels. Materials. 15. 1858.
<https://doi.org/10.3390/ma15051858>.

20. Безпека життєдіяльності: навч. посіб. / Т. Є. Стищенко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк, І. І. Хондак. – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 336 с.

21. Проектування засобів індивідуального захисту працюючих : навч. посіб. / В.І. Голінько, Л.Д. Третьякова, С.І. Чеберячко; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро : НГУ, 2017. 181 с.

					<i>БР 1325.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Вим.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		48