

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

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра механіки та інженерії агроєкосистем

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

**ДЕРЕВИЦЬКИЙ ВОЛОДИМИР ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

**УДК 631.31**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Підвищення довговічності робочих органів горизонтально-  
фрезерних культиваторів**

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 \_\_\_\_\_ В. О. Деревецький

**Керівник роботи**

**Забродський П. М.**

кандидат технічних наук, доцент

**Житомир – 2021**

## АНОТАЦІЯ

**Деревицький Володимир Олександрович. Підвищення довговічності робочих органів горизонтально-фрезерних культиваторів. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.**

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

В магістерській роботі встановлено, що високотемпературна циклічна обробка розплаву сприяє отриманню структури білого чавуну і відсутності виділень графіту, тобто весь надлишковий (крім твердого розчину) вуглець йде на утворення зносостійкої фази – цементиту.

Доведено, що процес нанесення зносостійкого шару білого чавуну електродуговим способом і способом електроіскрового наплавлення не веде до появи в структурі нанесеного шару графітової фази, тобто зберігається структурна спадковість матеріалу не утворювати графітові включення в процесі розплавлення електрода (перенесення металу на деталь і охолодження до кімнатної температури).

Виробничі випробування показали, що зміцнення робочих органів горизонтально-фрезерним культиваторів нелегованим білим чавуном є актуальним і перспективним, так як їх зносостійкість після обробки така ж, як і при зміцненні дорогими високолегованої сплавами, що дозволяє суттєво підвищити їх довговічність.

*Ключові слова: електродуговий, електроіскровий, наплавлення, білий чавун, зносостійкість, довговічність*

## ANNOTATION

**Derevitsky Vladimir Alexandrovich. Increasing the durability of the working bodies of horizontal milling cultivators.** – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

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

In the master's thesis it is established that high-temperature cyclic processing of the melt contributes to the structure of white cast iron and the absence of graphite, ie all excess (except solid solution) carbon goes to the formation of a wear-resistant phase - cementite.

It is proved that the process of applying a wear-resistant layer of white cast iron by electric arc method and electrospark surfacing method does not lead to the appearance in the structure of the applied layer of graphite phase, ie the structural heredity of the material is not formed. .

Production tests have shown that the strengthening of the working bodies of horizontal milling cultivators with undoped white cast iron is relevant and promising, as their wear resistance after processing is the same as when strengthening expensive high-alloy alloys, which can significantly increase their durability.

*Keywords: electric arc, electrospark, surfacing, white cast iron, wear resistance, durability.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ СПОСОБИ НАНЕСЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ.....	8
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	21
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТІВ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ФРЕЗЕРНИХ КУЛЬТИВАТОРІВ...	24
ВИСНОВКИ.....	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	35

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** В даний час будь-яка промисловість потребує нових зносостійких матеріалах, які не змінюють своїх властивостей під впливом різних зовнішніх впливів.

Як матеріали для зносостійких покриттів використовуються дорогі сплави, такі як сормайт, високолегований чавун та інші матеріали, що містять в своєму складі велику кількість дефіцитних легуючих елементів – хром, нікель, вольфрам, молібден, кобальт та інші, що призводить до різкого збільшення собівартість виготовлення виробів.

При використанні більш дешевого нелегованого чавуну в процесі електродугового його наплавлення частина вуглецю виділяється у вільному стані у вигляді пластинчастого графіту, різко знижує міцність і зносостійкість нанесеного шару, а частина, що залишилася вуглецю в цементиті, не забезпечує необхідного рівня твердості і зносостійкості.

В результаті проведених досліджень науковою школою кафедри механіки та інженерії агроєкосистем, розроблені способи отримання нелегованого білого чавуну, в структурі якого при охолодженні розплаву з будь-якою швидкістю не утворюється графітна фаза.

У сільськогосподарському виробництві робочі органи ґрунтообробних машин і знарядь (лемеші плугів, долота, стрілочасті лапи культиваторів і сівалок, диски луцильників і ін.) для забезпечення достатнього рівня міцності і в'язкості виготовляють з вуглецевої або низьколегованої конструкційної сталі з вмістом вуглецю від 0,45 до 0,75 % з наступною зміцнюючою термообробкою – загартуванням і відпусткою. Така термообробка не забезпечує достатнього рівня абразивної зносостійкості в роботі при контакті леза з ґрунтом, тому на нього наноситься, найчастіше за допомогою наплавлення, певний шар більш зносостійкого, але дорогого матеріалу.

Тому, застосування більш дешевого нелегованого білого чавуну в якості матеріалу для зносостійких покриттів стали, відпрацювання технології їх нанесення, дослідження одержуваних структури і властивостей, є актуальними.

**Мета і задачі дослідження.** Вивчення основних закономірностей формування структури і властивостей зносостійкого шару при наплавленні деталей машин і агрегатів нелегованої білим чавуном.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- на основі аналізу способів нанесення зносостійких покриттів вибрати оптимальний спосіб для підвищення довговічності робочих органів горизонтально-фрезерних культиваторів;
- Розробити методику досліджень фізико-механічних та триботехнічних властивостей покриттів;
- Провести дослідження та проаналізувати отримані результати

**Об'єкт дослідження:** процес формування зносостійких шарів на основі білого чавуну.

**Предмет дослідження:** закономірності зміни триботехнічних властивостей наплавлених поверхонь робочих органів горизонтально-фрезерних культиваторів від способу та режимів нанесення покриття

**Методи дослідження.** Досліджено виконано з використанням методів механіки, триботехніки, хімотології, оптичної мікроскопії та прикладної фізики. Обробку експериментальних методів виконували із застосуванням математичної статистики, методики планування та обробки експерименту за допомогою прикладних програм на ПК.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. **Деревицький В. О.** Основні способи нанесення зносостійких покриттів. Збірник тез V-ї *Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»*. 28-29 березня 2019 року м. Житомир. ЖАТК. С.

2. **Деревицький В. О.** Структура зносостійких шарів на основі білого чавуну. *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 9-10 квітня 2020 року. Житомир : ЖАТК. С.

3. **Деревицький В. О.** Мікротвердість зносостійких шарів на основі білого чавуну. IX Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (5-24 жовтня 2020 року, смт. Глеваха Київської області, Національний науковий центр «ІМЕСГ» НААН України. м. Київ, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Видавничий центр НУБіП України, 2020. [Електроний ресурс] – <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати роботи можуть бути впроваджені в ремонтних майстернях аграрних підприємств при підвищенні зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 17 найменування. Загальний обсяг роботи становить 31 сторінок комп'ютерного тексту містить 3 таблиці та 6 рисунків.

## **РОЗДІЛ 1**

### **ОСНОВНІ СПОСОБИ НАНЕСЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ**

Наплавлення – це процес нанесення шару металу або сплаву на поверхню виробу. Воно дозволяє отримувати деталі з поверхнею, що відрізняється за властивостями від основного металу, наприклад жароміцні, високу зносостійкість при підвищених і нормальних температурах, корозійну стійкість. Наплавлення може проводитися як при виготовленні нових деталей, так і в ремонтно-відновлювальних роботах, істотно подовжуючи термін експлуатації деталей і вузлів, забезпечуючи цим високий економічний ефект.

Наплавлення в порівнянні з іншими способами відновлення дає можливість отримувати на поверхні деталей шар необхідної товщини і потрібного хімічного складу, високої твердості і зносостійкості. Воно ефективно, коли необхідно наплавить шар товщиною понад 3 мм (наприклад, при виготовленні або ремонті деталей ходової частини тракторів і сільськогосподарських машин), глибоке проплавлення небажано, так як воно збільшує деформацію деталі [1-7].

Поверхні деталей, відновлені наплавочними процесами, мають по перерізу неоднорідні фізико-механічні властивості, хімічний склад і мікроструктуру. Механічні властивості наплавленого шару (міцність, твердість і інші) найчастіше значно вище, ніж у матеріалу самої деталі. До особливостей наплавлених деталей також відносяться мікронерівності наплавлення, неметалеві включення і пористість зовнішнього шару. Товщина покриття, що наноситься значно більше величини зносу.

#### **1.1 Дугове наплавлення в середовищі вуглекислого газу**

Цей спосіб наплавлення в значній мірі відрізняється від інших способів відновлення деталей - не потрібно ні флюсів ні електродних покриттів. Дуга



між електродом і виробом горить у струмені газу, котрий витісняє повітря з плавильного простору і захищає розплавлений метал від впливу кисню та азоту [8].

Автоматична наплавка в середовищі вуглекислого газу має такі переваги: при наплавленні відсутні шкідливі виділення і шлакові кірки; відкрита дуга дає можливість спостерігати і коригувати процес, проводити наплавлення при будь-якому просторовому положенні наплавлювальної площини, механізувати наплавлення, виконувати на дрібних деталях [6].

## 1.2 Індукційне наплавлення

В основі способу наплавлення лежить використання теплового ефекту, що виникає в поверхневих шарах металу при впливі на нього змінного електричного поля високої частоти.

У роботах [1-3] розглядається приготування флюсів, вибір типу індукторів і відпрацювання процесу наплавлення. Були проведені польові випробування, які показали, що середній виробіток наплавленого лемеші складала 60-70 га, стандартні лемеші 12-16 га – до повного зносу.

Металографічні дослідження показали, що наплавлений шар має дендритну будова первинних карбідів, розташованих на тлі твердого розчину. Структура наплавленого металу від перехідної зони до поверхні змінюється мало. Сормайт є високолегованим чавуном і тому при нагріванні частинки порошку покриваються плівкою оксидів типу  $(Fe, Cr)_2O_3$ ,  $FeO$  [7].

У роботах [4, 5] на прикладі сплаву сормайт досліджувалася структура шару після наплавлення струмами високої частоти. Дана класифікація структурних зон наплавлення, з'ясовані закономірності, що визначають будову і зносостійкість наплавленого шару.

Автори виділили в наплавленному виробі в загальному випадку шість структурних зон:

I - заевтектичних стан з первинних карбідів і карбідів евтектики. До надлишкових карбідів примикають ділянки структурно-вільного аустеніту. Твердість досягає 56-57 HRC.

II - евтектична, являє собою карбідну евтектику ледебуритного характеру. Твердість 50-53 HRC.

III - доевтектичний, характеризується наявністю дендритів твердого розчину (легованого аустеніту) і карбідної евтектики. Твердість 46 HRC.

IV – гранична смужка твердого розчину (легованого аустеніту), часто з голками мартенситу.

V – дифузійна зона, крайка тонкопластинчатого перліту, що виникає внаслідок дифузії вуглецю з сормаїту.

VI – основний метал, ферит і перліт з ознаками перегріву [87].

Були зроблені наступні висновки. При індукційної наплавленні сплаву сормаїт утворюється біметалічне з'єднання, в мікроструктурі якого можна виділити шість зон. За товщиною наплавленого шару спостерігається закономірна зміна фазового складу концентрації вуглецю і легуючих елементів. Аустеніт перших двох структурних зон менше легований хромом, ніж аустеніт доевтектоїдної зони. Зміна параметрів технологічного режиму наплавлення (температура і швидкість нагріву) супроводжується суттєвими коливаннями розмірів структурних зон, а отже, і властивостей наплавленого шару в цілому [4].

Найменшою зносостійкість при абразивному зносі володіє доевтектична зона. Перегрів при наплавленні призводить до розвитку доевтектичної зони і зниження працездатності наплавлених деталей [4].

В роботі [6] розглядаються способи отримання евтектичних термодифузійних наплавлених покриттів. Метою даної роботи було створити спосіб обробки, що сприяє розширенню номенклатури легуючих елементів і збільшення товщини зміцнювального евтектичного шару.

При даному способі наплавлення проводиться нагрів виробу з попередньо нанесеним на його зміцнену поверхню порошкових матеріалів, до температури плавлення легкоплавких металів, що входять до складу суміші. Причому в її склад включають елементи, що утворюють евтектику з матеріалом зміцнюваного виробу при температурі меншій, ніж температура насичення. Відбувається часткове розплавлення порошкової шихти. В даному способі немає необхідності в окремому приготуванні шихти евтектичного складу [6].

### **1.3 Наплавлення в середовищі активних газів**

Застосування для наплавлення і захисту зварювальної ванни аргонно-порошкової суміші дозволяє отримувати високу якість шарів, наплавлених сплавами як на залізній, так і на нікелевій основі [8, 9].

В роботі Сидорова А.І. детально описуються способи застосування таких газів як аргон, вуглекислий газ і азот. Для отримання якісних покриттів застосовується спосіб фізико-хімічного захисту, який передбачає не тільки фізичне відтискування захисним газом від переплавляється дугою металу навколишнього повітря, а й одночасне забезпечення хімічного захисту. Як елементи, що забезпечують хімічний захист, були досліджені сильні розкислювачі алюміній, титан, марганець, які додавали в порошкові тверді сплави [8].

Однак плазмова наплавлення в середовищі вуглекислого газу за результатами авторів [7, 8] не дала бажаного ефекту. Було відзначено нерівномірне формування шару, багато бризгів, виникнення окремих пір, значного перегріву деталі, велику текучість.

При використанні в якості захисного середовища повітря шари формуються, як при наплавленні в середовищі вуглекислого газу, але спостерігаються пори, головним чином, на кордоні з основою. Для усунення пор в сормайт додавали сильні розкислювачі. Однак уникнути повністю

утворення пор не вдалося, крім того, процес наплавлення в повітряному середовищі супроводжувався сильним нагріванням деталі з значним проплавленням її поверхні [88].

Наплавлення в захисному середовищі азоту не отримало широкого застосування.

При зварюванні підвищений вміст азоту в металі шва шкідливо, оскільки азот, розчиняючись, утворює нітрид, які зміцнює шов, але значно знижують пластичність. У той же час наявність нітридної фази при відсутності пор в наплавленому шарі часто буває корисним [8].

Грохольський Н.Ф. в своїй роботі описує спосіб наплавлення лемешів і відвалів зернообразним твердим сплавом. Лемеші виготовлені з лемішних сталей Л53 і 65Г і ремонтуються відтягненням леза ковальським способом з наступною термічною обробкою, відтягненням леза з наплавленням його твердим сплавом і приваркою нової смуги.

Великими технологічними можливостями при відновленні деталей в умовах ремонтного виробництва володіє дугове наплавлення з газополум'яним захистом. Спосіб дозволяє наплавляти на щільні шари, застосовувати доступні і відносно дешеві вуглецеві матеріали.

Метал, наплавлений високовуглецевими дротами на сталеві деталі, добре сприймає загартування. Можна також наплавляти сталевим низьковуглецевим дротом чавунні деталі. Наплавляється шар в цьому випадку має гарну оброблюваність.

Особливістю способу є те, що захисні гази в зварювальну зону подаються двома концентричними потоками: в зовнішньому потоці – природний газ або пропан-бутанова суміш і у внутрішньому потоці – кисень. При цьому природний газ і продукти його згоряння захищають зварювальну зону від проникнення азоту з повітря. Однак вуглеводневий газ викликає при зварюванні рясну пористість. Шкідливий вплив газу на щільність наплавленого металу подається вузьким внутрішнім потоком в зону дуги [8].

## 1.4 Наплавлення з використанням концентрованих джерел нагріву

Технології лазерного зміцнення, легування, наплавлення поверхонь тертя є пріоритетними напрямками для підвищення зносостійкості і надійності вузлів тертя і робочих органів машин. Лазерні технології забезпечують локальний нагрів з відсутністю або мінімальними деформаціями і охолодження за механізмом теплопровідності вглиб матеріалу, як правило, без застосування охолоджуючих середовищ. Лазерне наплавлення використовує як джерело тепла концентрований промінь лазера.

Отримання поверхневих шарів з високими фізико-механічними властивостями пов'язано з високими швидкостями нагрівання й охолодження, 104...106 °C/с. В даний час лазерні технології застосовуються практично у всіх галузях промисловості – від аерокосмічного до сільськогосподарського виробництва.

Лазерне зміцнення і наплавлення використовуються при виготовленні різних вузлів тертя. Ці методи використовують для деталей циліндропоршневої групи двигунів внутрішнього згорання. Для підвищення зносостійкості втулки дизеля в два рази досить зміцнити 25% площі поверхні робочої частини дзеркала циліндра. Підвищується опір задиру деталей циліндропоршневої групи в 1,8 рази. При лазерній гратчастій модифікації після припрацювання створюється мікрорельєф поверхні тертя, що сприяє утриманню мастильного матеріалу.

При обробці поверхні лазерним променем круглої форми в центрі плями час впливу пропорційно його діаметру, а по краях вона падає до нуля. В результаті при зміцненні поверхні деталі по краях доріжки виникають значні зони відпустки і втрачається до 40% енергії.

Крім того, розподіл енергії всередині плями нерівномірний, що веде до нерівномірності фізико-механічних властивостей зміцненого шару.

Для усунення цих недоліків розроблені скануючі пристрої з хитаючими й обертовими дзеркалами з частотою 150- 600 Гц, що дозволяють отримати на поверхні плями квадратної або прямокутної форми. При цьому вирівнюється час впливу на деталь і щільність потужності по перетину лазерного пучка. Різко зменшуються зони відпустку: з 5...1,5 мм до 0,1...0,2 мм на кордоні зміцненого шару і основного матеріалу. Продуктивність процесу обробки при високочастотному скануванні лазерного променя при оптимальному режимі роботи в 2 рази вище, ніж при зміцненні круглим розфокусованим променем [9, 10]. Немає перегріву виробу, поводок і викривлення.

Технологія лазерного наплавлення дозволяє замінити класичну хіміко-термічну технологію азотування, борування, цементації, нітроцементації. При цьому різко скорочується тривалість технологічного циклу виготовлення, знижується собівартість виготовлення, поліпшується екологія виробництва.

Визначено оптимальні режими процесів і досліджені властивості металів в отриманих поверхневих шарах. Його щільна мілкодисперсна структура, висока твердість і якісне з'єднання з металом основи свідчать про підвищення експлуатаційних характеристик оброблюваної деталі [8, 9].

### **1.5 Електроіскрове наплавлення**

Метод електроіскрового легування ріжучого інструменту заснований на явищі електричної ерозії і полярного перенесення матеріалу анода (інструмент) на катод (зміцнюючих деталей) в умовах імпульсних розрядів в газовому середовищі. Завдяки полярному ефекту, переважний перенесення еродуємого матеріалу (анода) на катод забезпечує формування на деталі поверхневого шару з необхідними фізико-хімічними властивостями. При твердості ножів куттеров 51-57 HRC, після зміцнення сплавом ВК60М мікротвердість підвищилася в 3,8 рази. В середньому зносостійкість і ресурс зростають в 1,5-2 рази, сумарна

товщина покриття становить 150-200 мкм при чорнової і 80-120 мкм при чистової обробки [113, 114]. 67

Зміцнення методами електроіскровий обробки застосовують для підвищення зносостійкості і твердості поверхні деталей машин, що працюють в умовах підвищених температур в інертних газах; жаростійкості і корозійної стійкості поверхні; довговічності металорізального, деревообробного, слюсарного і іншого інструменту; створення шорсткості під подальше гальванічне покриття; полегшення пайки звичайним припоєм труднопаяємих матеріалів (нанесення проміжного шару, наприклад, міді); збільшення розмірів зношених деталей машин при ремонті; зміни властивостей поверхонь виробів з кольорових металів. Створює можливість значно змінювати вихідні фізичні і хімічні властивості поверхневого шару (твердість, зносостійкість, жаростійкість і т.д.) як швидкорізальної, так і інших інструментальних сталей [11].

Електроіскровий спосіб обробки деталей заснований на явищі електричної ерозії (руйнування матеріалу електродів) при іскровому розряді. Під час пробивання іскри між електродами потік електронів, що рухається з величезною швидкістю, миттєво нагріває частина поверхні анода до високої температури (10000...15000 °C); метал плавиться і навіть переходить в газоподібний стан, в результаті чого відбувається вибух. Частинки розплавленого металу анода, які відірвалися викидаються в міжелектродному простір і в залежності від його середовища (газова або рідка) досягають катода і осідають на ньому або розсіюються. Це властивість іскрового розряду і використовують в практиці. При нарощуванні металу деталь підключають до катода, а при знятті (обробці) – до анода. Інструменту (одному з електродів) надають коливальний рух від вібратора для замикання і розмикання ланцюга і отримання іскрового розряду [11].

При електроіскровій обробці відбуваються:

- нагрів матеріалу електродів і перетворення його в газоподібний стан;

- перенесення матеріалу в розрядному проміжку з анода на катод; дифузія матеріалу, що наноситься в розплав металу відновлюваного елемента в місці розряду; -

утворення твердих розчинів і дрібнодисперсних карбідів в результаті швидкого затвердіння рідкої фази і локального гартування з величезними швидкостями охолодження [11].

Нанесення твердих зносостійких покриттів товщиною до 0,1 мм відносять до зміцнення, а нанесення покриттів більшої товщини – до наплавлення.

Покриття, нанесене на відновлювану поверхню деталі, має міцний зв'язок з основою, тому що його вміст супроводжується хімічними та дифузійними процесами [1, 11].

Ці процеси ведуть на установках, виготовлених за схемою, показаної на рис. 1.1, з використанням конденсатора 4. Деталь 3, підключена до катода, нарощується інструментом (анодом) 2, виготовленим з матеріалу, призначеного для нанесення на поверхню деталі. Колювання анод отримує від магнітного вібратора 1, підключеного до мережі змінного струму звичайної частоти.

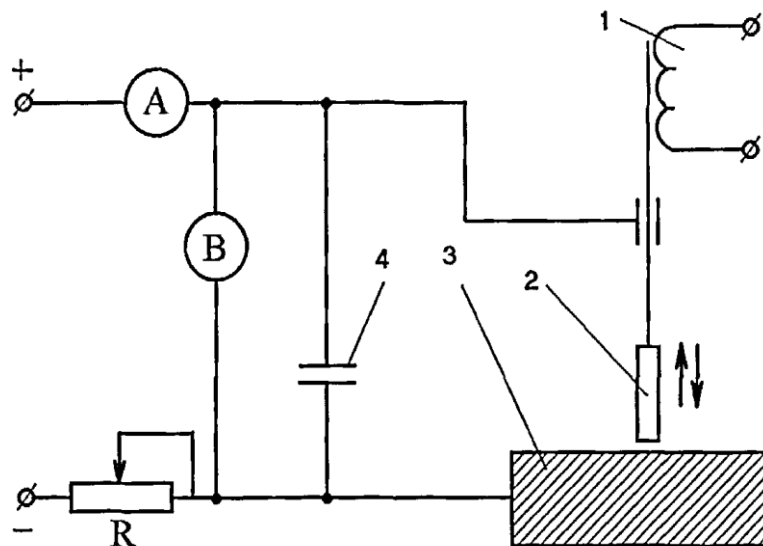


Рис. 1.1. Схема установки для електроіскрової обробки: 1 – вібратор; 2 – інструмент (анод); 3 – деталь; 4 – конденсатор.



## 1.6 Способи підвищення зносостійкості наплавленого шару

Великий вплив на зносостійкість здійснює спосіб наплавлення. Збільшення напруги на дузі призводить до зростання вмісту азоту в наплавленому шарі металу, що в свою чергу сприяє підвищенню твердості. При низькому вмісті азоту в наплавленого металу утворюються дрібнодисперсні виділення нітридів і карбонітридів, які розташовуються біля кордонів зерен [98].

Наплавлений метал, що володіє високою теплостійкістю (з великим вмістом вуглецю, вольфраму і кобальту, а також типу швидкорізальних сталей) має порівняно низькі значення термічної стійкості [9].

Наплавлення хромовольфрамового сплаву на режимах, що забезпечують порівняно високу швидкість охолодження в області мінімальної стійкості аустеніту і уповільнене охолодження при мартенситних перетворення, дозволяє отримати високолегований твердий розчин, високий вміст залишкового аустеніту в металі і дрібне зерно, що властиво процесам гартування [100].

Для підвищення терміну служби деталей машин, що працюють в умовах ударно-абразивного зносу і негативних температур, доцільно застосовувати наплавочні сплави, леговані азотом і титаном [101].

Підвищення зносостійкості наплавленого металу без зниження його опору ударному навантаженню при спільному легуванні титаном і азотом обумовлюється утворенням карбонітридів титану і перерозподілом вуглецю між фазами, подрібненням структури, збільшенням кількості залишкового аустеніту.

Застосування наплавлювальних сплавів, додатково легованих титаном і азотом, підвищує працездатність наплавлених деталей [11].

В роботі [2] описані дослідження наплавлень зносостійких з азотом. Легування зносостійких наплавочних матеріалів азотом при наявності сильних нітридоутворюючих елементів дозволяє збільшити їх зносостійкість в 2-3 рази

в порівнянні з аналогічними сплавами без зниження їх опірності дії ударного навантаження. Азот утворює в наплавленому металі тверді дрібнодисперсні карбонітриди, що сприяють підвищенню зносостійкості і подрібненню зерна.

Все різноманіття використовуваних систем легування сплавів на залізній основі можна звести до чотирьох груп.

До першої групи належать наплавочні сплави, де хром є головним елементом, що формує властивості сплаву (при наявності певного вмісту вуглецю). Зазвичай в хромисті сплави вводять ще один або два легуваних елементів в невеликій кількості, які суттєво впливають на властивості наплавленого металу. До другої групи слід віднести високомарганцеві наплавочні матеріали. До третьої - сплави з вольфрамом як основного легуючого елемента. Четверта група матеріалів, що застосовуються при роботі в умовах абразивного зношування, є сплави з трьома легувальними елементами і більше. Зазвичай це сплави типу швидкорізальних сталей. Всі наплавочні матеріали є високовуглецевими сплавами [13].

Велике значення для формування мікроструктури мають попередній підігрів, умови охолодження, сила струму.

Якщо наплавлений метал працює на стирання абразивом, необхідно, щоб він володів високою твердістю. Підвищення твердості особливо важливо, якщо наплавлений шар відповідає простим вуглецевим або низьколегованим сталям. При деяких складах високолегованого наплавленого металу високий відпустк дозволяє додатково підвищувати твердість.

В якості основного металу для виготовлення деталей під наплавлення рекомендується проводити сормайт [14] і застосовувати вуглецеву сталь, що забезпечує хорошу зварюваність і незначні відмінності коефіцієнта теплового розширення.

При наплавленні в більшості випадків необхідний попередній нагрів деталі. Температура попереднього загального нагріву деталі повина бути не

нижче 650°C. Верхньою межею температурного нагріву слід вважати для сталей 800-900 °C і 700 °C для чавуну [105-108].

Після закінчення операції наплавлення необхідно забезпечити повільне і рівномірне охолодження деталі, щоб уникнути отримання тріщин в наплавленому шарі. Найкращі умови охолодження деталі створюються порошком слюди, сухим гарячим піском, деревним вугіллям, золою.

Без спеціальної термічної обробки можуть застосовуватися наплавлені деталі, які не потребують за умовами роботи високої поверхневої твердості (деталі, що працюють з ударом і при великих навантаженнях).

Загартування слід проводити в маслі в інтервалі температур нагріву для сормайт 850-960 °C. Відпуск проводиться в залежності від умов роботи наплавленої деталі і необхідної поверхневої твердості. Відпал сормайту проводиться з метою полегшення його механічної обробки. Температура відпалу становить 850-900 °C [9].

В роботі [12] розглядаються можливості наплавлення високотвердими зносостійкими матеріалами. При наплавленні тривалість терміну служби зміцнених або відновлених за допомогою твердих сплавів деталей збільшується в порівнянні з ненаплавленим мінімум в три рази.

Впровадження високоміцних зносостійких наплавочних матеріалів (сормайт HRC 49-54) обмежується можливостями існуючих способів їх механічної обробки.

Деталі, наплавлені сормайтом, реліт обробляються із заданою точністю і шорсткістю абразивним або алмазним шліфуванням.

Одним з основних напрямків, які забезпечують отримання високотвердих зносостійких поверхневих шарів зі збільшенням терміну служби деталей, є наплавка надтвердими зносостійкими матеріалами і сплавами, а також наступна якісна обробка наплавлених поверхонь.

## **Висновки по розділу 1**

Аналіз існуючих способів отримання зносостійких покриттів для підвищення терміну служби робочих органів ґрунтообробних машин дав підстави застосувати електродуговий і електроіскровий способи їх нанесення.

Для вибору найбільш простого і недорогого способу отримання нелегованого білого чавуну необхідно проведення дослідження структури і властивостей матеріалу електродів і одержуваних зносостійких покриттів.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті раніше проведених досліджень [3] розроблені способи отримання нелегованого білого чавуну, що має структурну спадковість, що виражається в тому, що при подальшому розплавленні і охолодженні наплавляемого чавуну в металевій основі не утворюється графітна фаза.

Як наплавочний матеріал використовувався нелегований білий чавун, отриманий способом термоциклювання. Його склад наступний, в %: 3,8-4,2 С, 0,75 Si, 0,24 Mn, 0,08 S, 0,08 P, решта – Fe.

Пропонований спосіб обробки рідкого чавуну економічний, забезпечує видалення графіту і підвищення межі міцності на 70-140 МПа, а твердості – на 230-260 МПа.

З даного чавуну заливкою в металеві форми були виготовлені електроди, за допомогою яких наплавляють робочі органи ґрунтообробних машин електродуговим і електроіскровим способом.

В результаті наших власних досліджень процесу графітизації був запропонований "водневий" механізм формування виділень графіту в чавуні, що полягає в тому, що зниження розчинності газових домішок, і в першу чергу водню при переході "рідке - тверде" призводить до утворення несучільностей, що створюють сприятливі умови для виділення на них вуглецю у вигляді графіту та інших надлишкових фаз.

Розробили і реалізували прогресивні способи видалення надлишкового водню з метою запобігання виділень графіту в чавуні при кристалізації і охолодженні [3].

Металографічний аналіз проводився за допомогою багатофункціонального оптичного мікроскопа «OPTON» з виходом (за допомогою відеокамери «SIEMENS») на ПК. Перегляд мікроструктури проводився як на мікроскопі, так і на моніторі при збільшенні x300, x750.

Фотографування мікроструктури в операційній оболонці «WINDOWS» проводилося за допомогою програми «TVTar». В окремих випадках вивчення мікроструктури і зйомка її на негативну плівку проводилася на оптичному металографічному мікроскопі МБІ-6 при збільшенні  $\times 10$ ,  $\times 260$ ,  $\times 300$  і  $\times 500$ ,  $\times 750$ .

Мікроструктура доменного (переробного) чавуну вивчалися на шліфах, виготовлених по ДСТУ (укорочений спосіб мокрого шліфування).

Процес приготування шліфів включав такі основні операції: вирізку і підготовку поверхні, шліфування, механічне полірування і травлення.

Для вивчення мікроструктури виробу після наплавлення вирізали зразки для вивчення зміни структури по ряду поперечних перерізів.

Після вирізання і торцювання, поверхню зразка шліфували різним наждачним папером, розміщеного на плоскому диску шліфувального верстата.

Для мокрого шліфування використовували водостійку шліфувальну шкурку. Під час шліфування на кожній шкірці зберігалася одне і те ж положення зразка, щоб всі риси на його поверхні були паралельні. При переході до шкірки наступного номера напрямок шліфування міняли на  $90^\circ$  і проводили його до повного видалення всіх рисок, що утворилися під час попередньої обробки.

Полірування служить для видалення дрібних рисок, що залишилися після шліфування, і отримання гладкої дзеркальної поверхні. Процес полірування зазвичай включав дві – три операції: полірування на алмазних пастах, тонке полірування механічним способом проводять на колах, обтягнутих тканиною і безперервно змочуваних водною суспензією. Як абразив для таких суспензій застосовувався оксид алюмінію.

Полірування закінчувалося після того, як мікрошліф набував дзеркальну поверхню.

Знову ж правильним критерієм високої якості поверхні мікрошліфа є відсутність на ній дефектів у вигляді рисок і подряпин. Для виявлення

мікроструктури металів і сплавів використовували травлення шліфів в 3% -ому розчині азотної кислоти протягом 10 секунд. Використовувалося обладнання: шліфувальний верстат «Неріс» типу 3E881, верстат СШПМ-2.

Вимірювання твердості – поширений вид випробування матеріалів.

Переваги: не викликає серйозного пошкодження випробуваного матеріалу; не вимагає виготовлення спеціальних зразків; для випробування на твердість досить обробити невелику ділянку поверхні напилком, шліфувальним кругом або шліфувальної папером.

Нами застосовувався метод вимірювання твердості по Роквеллу (за шкалою С при кімнатній температурі. Наконечник стандартного типу (алмазний конус) вдавлювався в випробуваний зразок під тиском двох послідовно прикладених навантажень – попереднього і загального [11].

Число твердості по Роквеллу при вимірюванні за шкалою С визначають шляхом вдавлення алмазного конуса.

Для вимірювання мікротвердості використовувався прилад ПМТ-3.

## **Висновки по розділу 2**

В другому розділі магістерської роботи розроблена методика лабораторних досліджень нанесених зносотійких матеріалів для підвищення довговічності робочих органів горизонтально-фрезерних культиваторів.

### РОЗДІЛ 3

## РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТІВ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ФРЕЗЕРНИХ КУЛЬТИВАТОРІВ

Наплавлені робочі органи горизонтально-фрезерних культиваторів, піддавалися металографічним дослідженням.

Для цього з робочих органів вирізалися зразки в перетинах перпендикулярних різального леза по всій довжині.

Давно відомо, що знос виробів з білого чавуну найменший у порівнянні з низьколегованими сталями і сірим чавуном. Він поступається лише високолегованим сталям, що містять більшу кількість хрому.

Однак, одержувані в даний час вироби, що мають наскрізну структуру білого чавуну, мають складний хімічний склад, містять велику кількість легуючих елементів і мають високу вартість.

Існуючі ж технології нанесення нелегованого чавуну на ріжуче лезо ґрунтообробного і іншого інструменту призводять до появи виділень пластинчастого графіту, різко підвищують крихкість і знижують характеристики міцності матеріалу.

З рис 3.1 чітко видно утворення в наплавленому шарі пластинчастих графітових включень – так званих "тріщин" в металевій основі (темна складова структури) і зниження мікротвердості при переході: основний метал – наплавлений шар – поверхня (квадратні відбитки).



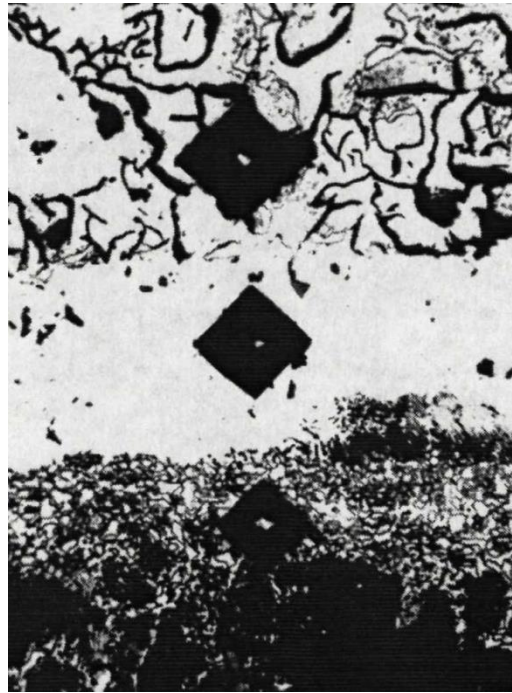
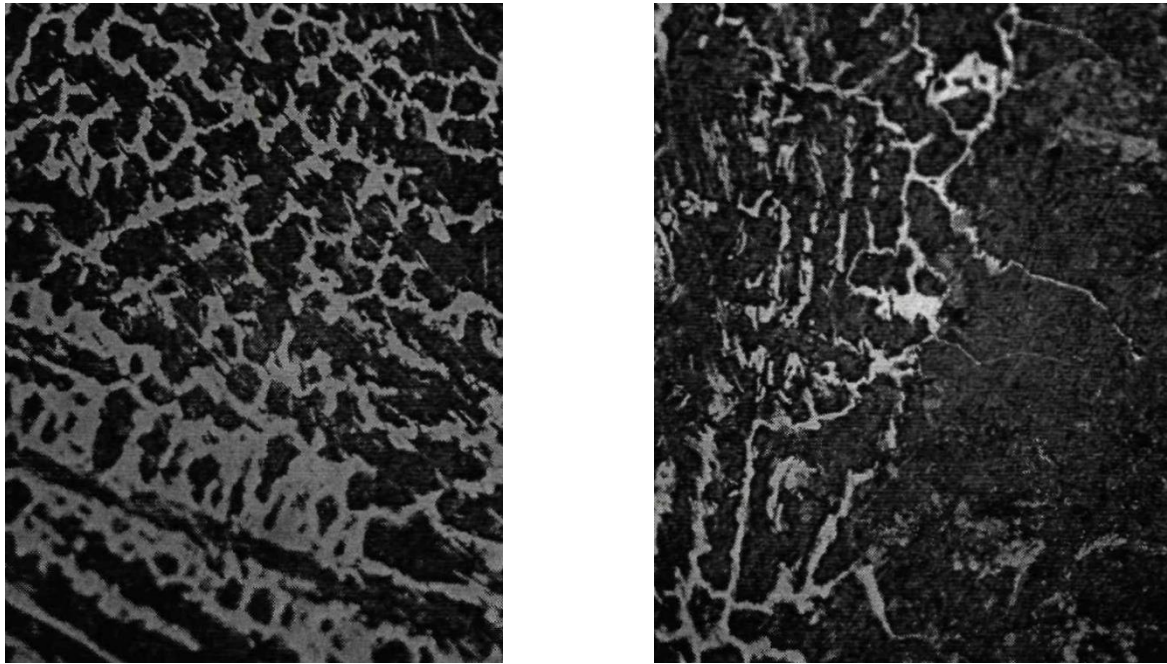


Рис. 3.1 – Мікροструктура сталі 55 після наплавлення звичайним чавуном (без високотемпературного термоциклічного обробітку (ВТЦО) і вимірювання мікротвердості,  $\times 450$ ).

Аналіз структури наплавленого електродуговим способом шару чавуну, підданого ВТЦО, виявив відсутність виділень графіту після кожного з застосовуваних трьох способів наплавлення (рис. 3.2). Структура матеріалу в усіх трьох випадках наплавлення перліто-цементитна.

Електродуговим способом наплавлення можна отримати практично будь-яку товщину наплавленого шару, здійснюючи обробку за один або кілька проходів. У структурі наплавленого металу, рис. 3.2, а, чітко простежується відсутність графіту, а більша частина вуглецю знаходиться у вигляді цементиту. Тобто зносостійкість забезпечена.

Однак даний вид обробки веде до сильного розігріву основного металу в прилеглий зоні і як наслідок до утворення грубозернистої структури в зоні термічного впливу (рис. 3.2, б).



а)

б)

Рис. 3.2 Мікроструктура наплавленого шару (а) і зони термічного впливу (б) після електродугової наплавки чавуну на сталь 55, х300.

Необхідно зауважити, що отриманий нами експериментальний нелегований білий чавун, має досить високу міцність (450-510 МПа) і спадковість збереження структури від виділень графіту.

Після простої термічної обробки твердість чавуну може бути підвищена до HRC 58-67 з гарантованою відсутністю тріщин. Перераховане дозволяє вважати, що отриманий білий чавун без виділень графіту, в будь-яких перетинах відливаються заготовок, є перспективним матеріалом, що становить серйозну конкуренцію легованим сталям, в тому числі застосовуються для виготовлення сільськогосподарського інструменту.

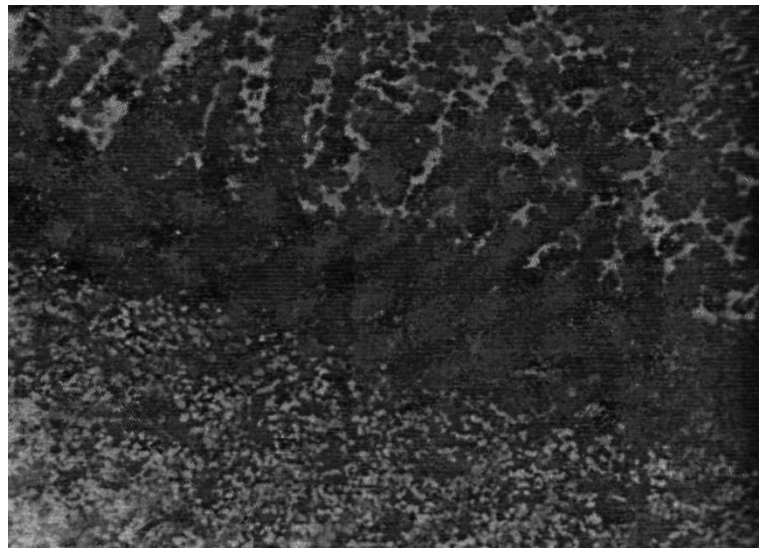
Металографічний аналіз наплавленого шару зразків після електроіскрового способу наплавлення виявив мікроструктуру білого чавуну і показав відсутність виділень графіту. Спостерігається дуже мала зона зчеплення (приблизно 1-2 мм). У той же час в основному металі немає структури перегріву, на відміну від електродугового способу наплавлення.

Перехідна зона (зона зчеплення) є основною характеристикою якості наплавленого з'єднання. При аналізі сполук, отриманих за допомогою

сормаїту, така зона відсутня (рис. 3.3). Більш того, після наплавлення електродами сплаву сормаїт в перехідній зоні є ділянки графітизації, які є готовими тріщинами і призводитимуть до відколювання наплавленого шару навіть при невеликих навантаженнях. Відсутність перехідної зони, а, отже, і різке падіння властивостей наплавлених з'єднань пов'язано зі ступенем легування наплавленого металу.



а x260



б x110

Рис. 3.3 - Мікроструктура з'єднань наплавлених електродуговим способом: а – сталь 65Г – сормаїт 1; б – сталь 65Г – нелегований білий чавун.

Важливим є питання забезпечення механічних властивостей термоциклованого чавуну. Ці властивості повинні бути порівнянні з

властивостями високоміцного чавуну з кулястою формою графіту, або високолегованого без виділення графіту.

Таблиця 3.1 – Механічні властивості термоциклічного чавуну

Чавун	Кількість циклів	Механічні властивості	
		$\sigma_B$ , МПа	НВ, МПа
Термоциклічний	2	300-350	410-430
	6	360-400	440-480
	10	400-450	510-530
Відомий (високоміцний)	-	230-260	210-217

У табл. 3.1 наведені результати випробування механічних властивостей термоциклованого чавуну. При порівнянні з даними, наведеними у відомих роботах для високоміцного чавуну, можна помітити, що термоциклічний чавун без виділень графіту набагато міцніше, ніж високоміцний з кулястим графітом. У той же час механічні властивості всіх легованих чавунів містять десятки відсотків легуючих елементів набагато нижче, ніж міцність термоциклічного чавуну.

З наведених у таблиці даних видно, що пропонований спосіб отримання чавуну в порівнянні з відомим забезпечує видалення графіту і підвищення межі міцності на 70-140 МПа, а твердості – на 230-260 МПа.

Був проведений замір твердості після наплавлення робочих органів горизонтально-фрезерних культиваторів способами: електродуговим в середовищі захисного газу (аргону), ручній і газової киснево-ацетиленового зварювання. Твердість наплавленого матеріалу після обробки і характер одержуваних структур наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Твердість і структура наплавленого матеріалу робочих органів горизонтально-фрезерних культиваторів

Спосіб наплавлення	Твердість, HRC	Вид структури
Електродугова ручна	53-57	Перлітно-цементитна
Дугова в середовищі аргону	52 -55	Перлітно-цементитна
Газова киснево-ацетиленова	48-52	Перлітно-цементитна
Електроіскрова з обертаючим електродом	65-67	Перлітно-цементитна

Робочі органи піддавалися термічній обробці, яка полягала в наступному:

- гартування з 830 °С, у воді і після наплавлення низькому відпустку з температури 200 °С;

- відпал при 830 °С, охолодження в печі.

Після проведення електроіскрового наплавлення обертовим електродом нами проведені заміри твердості і мікротвердості. У табл. 3.3 представлені режими електроіскрового наплавлення обертовим електродом робочих органів горизонтально-фрезерних культиваторів.

Таблиця 3.3 - Режими електроіскрового наплавлення обертовим електродом

Робочий орган відпалений перший ряд			
Напруга U, В	20	30	40
Сила струму I, А	45	50	50
Число обертів, хв <sup>-1</sup>	111, 141,890	111, 141,290,890	141,290
Робочий орган загартований перший ряд			
Напруга U, В	20	40	
Сила струму I, А	30	55	
Число обертів, хв <sup>-1</sup>	111, 141,890	141,290, 890	
Робочий орган загартований другий ряд			
Напруга U, В	30	40	

Продовження таблиці 3.3.

Сила струму I, А	45	50	
Число обертів, хв <sup>-1</sup>	111, 141,290, 890	111, 141,290, 890	
Робочий орган загартований другий ряд			
Напруга U, В	30	40	
Сила струму I, А	40	50	
Число обертів, хв <sup>-1</sup>	111, 141,290, 890	111, 141,290, 890	

На рис. 3.4 представлена залежність твердості від товщини наплавленого шару. Видно, що значення твердості після наплавлення в поверхневому шарі становить в середньому 850-920 НV. Зниження значень твердості від перехідного шару до основного металу незначне – до 420-380 НV.

При збільшенні числа обертів спостерігається підвищення твердості наплавленого шару, але відбувається різке її зниження в перехідному шарі.

При високих швидкостях обертання електрода наплавлений шар виходить, приблизно, дорівнює 0,8 мм. При збільшенні числа проходів відбувається збільшення товщини зони зчеплення і зони наплавленого металу.

Виходячи з вище викладеного, оптимальним режимом обробки є числл обертів: 111 об/хв, 141 об/хв при напрузі 40 В, силі струму 50 А.

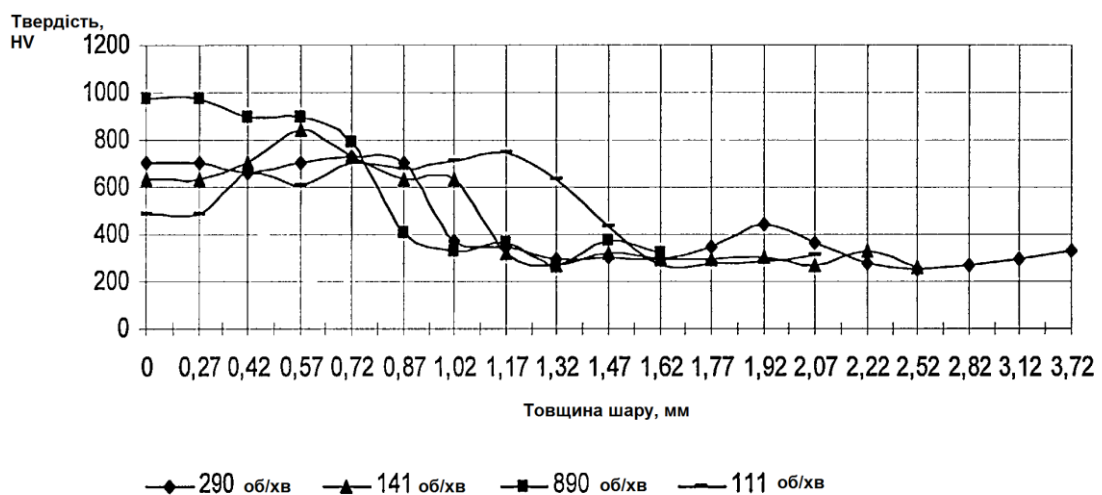


Рис. 3.4. Твердість робочого органу горизонтально-фрезерного культиватора, відпаленої при 830 °С, з нанесенням покриття по режиму U = 40 В, I = 50 А.

Провівши такі самі дослідження для всіх режимів обробки і після вивчення структури і визначення твердості можна зробити наступні висновки:

1. Наплавлення робочого органу відпаленого з першого ряду необхідно проводити по режиму  $U = 30 \text{ В}$ ,  $I = 45 \text{ А}$ ,  $890 \text{ об/хв}$ , при цьому виходить оптимальна товщина наплавленого шару приблизно  $0,8\text{-}1 \text{ мм}$  і твердість не змінюється стрибкоподібно і дорівнює  $800 \text{ HV}$ .

2. Оптимальним режимом наплавлення робочого органу відпаленого з другого ряду є  $U=30 \text{ В}$ ,  $I= 50\text{А}$ ,  $111 \text{ об/хв}$ . Твердість по Віккерсу наплавленого шару з даного режиму обробки становить  $1000\text{-}1100$ , а товщина шару  $0,6\text{-}0,8 \text{ мм}$ .

3. Проводити зміцнення загартованого робочого органу з першого ряду необхідно по режиму  $U = 40 \text{ В}$ ,  $I = 50\text{А}$ ,  $890 \text{ об/хв}$ . При використанні даного режиму зміцнення товщина наплавленого шару становить  $2 \text{ мм}$ , а твердості по Віккерсу становить в середньому  $1000$ .

4. Оптимальним режимом зміцнення загартованого робочого органу з другого ряду є наступний  $U = 40 \text{ В}$ ,  $I = 55\text{А}$ ,  $290 \text{ об/хв}$ , товщина наплавленого шару складає  $1,8\text{-}2 \text{ мм}$  і твердість  $800 \text{ HV}$ .

Визначення зносостійкості наплавленого шару здійснювалося відповідно до рекомендацій ДСТУ. Використовувався метод випробування на зносостійкість наплавлених поверхонь при терті його про не твердо закріплені абразивні частинки.

Суть методу полягає в тому, що при однакових умовах виробляють тертя зразків досліджуваного і еталонного матеріалів про абразивні частинки, що подаються в зону тертя і притискається до зразка, що обертається гумовим роликком, вимірюють знос зразків випробовується і еталонного матеріалів, а зносостійкість випробувального матеріалу оцінюють шляхом порівняння його зносу з зносом еталонного зразка [10].

Для отримання еталонного зразка нами були використані робочі органи ґрунтообробних машин, наплавлені сормайтотом, які найбільш часто застосовуються у виробництві, але мають велику вартість.

Отримані дані по зносостійкості еталонних зразків і зразків після електроіскрового наплавлення наведені на рис. 3.5.

Значення зносу, г

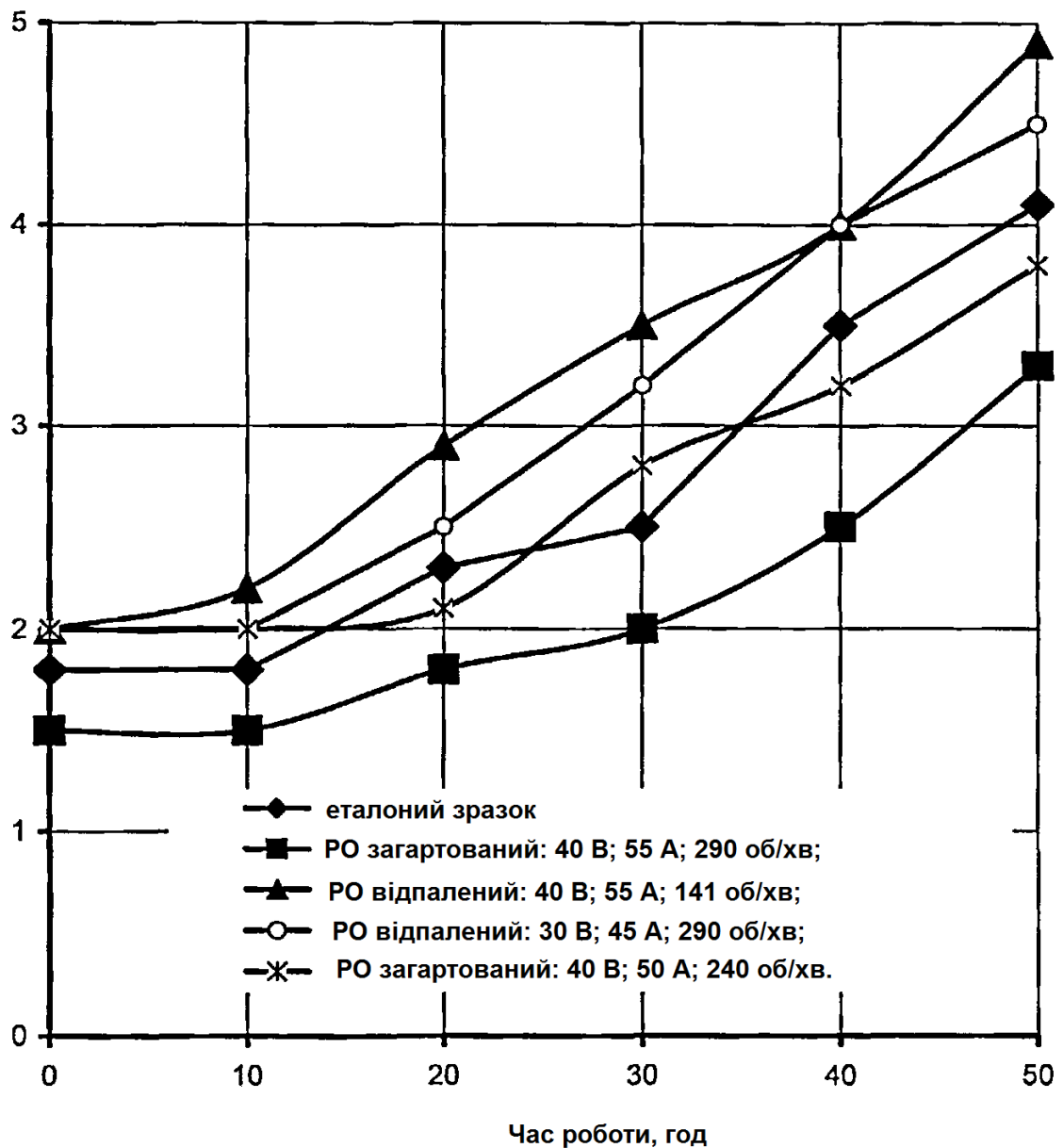


Рис. 3.5. Порівняльна зносостійкість еталонного і наплавлених зразків

Перевірка зносостійкості наплавленого шару так само проводилася натурними випробуваннями горизонтально-фрезерних культиваторів в польових умовах.



На горизонтально-фрезерних культиваторів крім робочих органів, зміцнених термічною обробкою (гарт + відпустку), встановлювалися деталі, наплавлені сормайттом і наші дослідні зразки, оброблені по різних режимах. Після певного напрацювання машини (вимірювана в гектарах) проводився замір геометричних розмірів робочого органу і порівнювався з вихідним до обробки.

### **Висновки по розділу 3**

Дослідні робочі органи горизонтально-фрезерних культиваторів пропрацювали без заміни протягом всього сезону виконуваних робіт і показали зносостійкість, в три рази більшу, ніж зносостійкість тільки підданих термообробці. Також була усунена необхідність проводити заміну робочих органів в польових умовах і обмежених термінах проведення сільськогосподарських робіт.

## ВИСНОВКИ

Отримані в роботі експериментальні дані з вивчення структури і властивостей, отриманих запропонованим способом, а також наплавлених ними зносостійких шарів робочих органів горизонтально-фрезерних культиваторів дозволяє зробити наступні висновки.

1. Високотемпературна циклічна обробка розплаву сприяє отриманню структури білого чавуну і відсутності виділень графіту, тобто весь надлишковий (крім твердого розчину) вуглець йде на утворення зносостійкої фази – цементиту.

2. Процес нанесення зносостійкого шару білого чавуну електродуговим способом і способом електроіскроного наплавлення не веде до появи в структурі нанесеного шару графітової фази, тобто зберігається структурна спадковість матеріалу не утворювати графітові включення в процесі розплавлення електрода (перенесення металу на деталь і охолодження до кімнатної температури).

3. Виробничі випробування показали, що зміцнення робочих органів горизонтально-фрезерним культиваторів нелегованим білим чавуном є актуальним і перспективним, так як їх зносостійкість після обробки така ж, як і при зміцненні дорогими високолегованої сплавами, що дозволяє суттєво підвищити їх довговічність.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кравцов Т. Г. Электродуговая наплавка электродной лентой. Москва : Машиностроение, 1978. 168 с.
2. Николаенко М. Р, Кузнецов М. Д. Наплавка деталей машин. Учеб. пособие. Брянск: БИТМ, 1995. 132 с.
3. Рябцев И. А., Сенченков И.К. Теория и практика наплавочных работ. Киев: Екотехнологія, 2013. 400 с.
4. Усынин В. Ф., Бесхлебный В. А. Наплавка и напыление. Наплавка в машиностроении и при ремонте оборудования. Учебное пособие. Калининград: Калининградский государственный технический университет (КГТУ), 2011. 236 с.
5. Ткачев. В. Н. Индукционная наплавка твердых сплавов. Москва : Машиностроение 1970 стр.183
6. Рябцев И. А., Сенченков И. К. Теория и практика наплавочных работ. Київ : Екотехнологія, 2013. 400 с.
7. Николаенко М. Р, Кузнецов М. Д. Наплавка деталей машин. Учеб. пособие. Брянск: БИТМ, 1995. 132с.
8. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. Laser Cladding. Boca Raton, London, New York, Washington: CRC Press, 2005. 263 p.
9. Батманов В. А. Сварка чугуна. Москва; Свердловск : Машгиз, 1961. 144 с.
10. Березін Л. Я. Експериментальні методи у зварюванні. Конспект лекцій. Чернігів: Чернігівський національний технологічний університет (ЧНТУ), 2014. 198 с.
11. Ельцов В. В. Технология сварки плавлением. Учебное пособие. Тольятти: Тольяттинский государственный университет (ТГУ), 2019. 181 с.
12. Ющенко К. А., Борисов Ю. С., Кузнецов В. Д., Корж В. М. Інженерія поверхні. Київ : Наукова думка, 2007. 557 с.

13. Носов А. В., Быков Д. В. Электроискровая обработка металлов. М.: Коиз, 1953. 166 с.
14. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Электроискровая обработка токопроводящих материалов. М.: Академия наук СССР, 1958. 184 с.
15. Химухин С. Н., Ри Хосен, Ри Э. Х. Структура и свойства металлов и сплавов при электроискровом воздействии. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. 127 с.
16. Носов А. В. Электроискровая обработка металлов. Москва: "Всесоюзное кооперативное издательство", 1953. 168 с.
17. Николенко С. В., Ри Хосен. Электродные материалы для электроискрового легирования с минеральными и самофлюсующимися добавками. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. 206 с.