

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

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра машиновикористання та сервісу технологічних систем

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

**ВАЩУК ЮРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ**

**УДК 631.312**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Обґрунтування технологічного методу підвищення  
довговічності робочих органів плугів**

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

\_\_\_\_\_Ю.В. Ващук

**Керівник роботи**

Борак К.В.

кандидат технічних наук

**Житомир – 2021**

## АНОТАЦІЯ

**Вашук Юрій Володимирович. Обґрунтування технологічного методу підвищення довговічності робочих органів плугів. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.**

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

В магістерській роботі запропоновано застосування магнітно-електричного зміцнення для зміцнення та відновлення робочих органів плугів.

На підставі експериментальних досліджень зносостійкості покриттів встановлено, що порівняно зі сталлю 45, загартованої до твердості 52-54 HRC, найбільшою зносостійкістю при терті кочення з проковзуванням мають покриття з порошку Fe-2%V (вище в 1,7-2,2 рази), при терті ковзанні – покриття з порошку ФБХ-6-2 (вище в 1,7-1,9 раза). Це дозволило рекомендувати для пар тертя, що працюють при терті кочення з проковзуванням, використовувати покриття з порошку Fe-2%V, а при терті ковзанні – покриття із порошку ФБХ-6-2.

На підставі отриманих результатів досліджень розроблено та впроваджено у виробництво технологію зміцнення та відновлення типових робочих органів плугів МЕЗ у постійному магнітному полі, працюючих при великих навантаженнях.

Результати досліджень можуть бути використані в ремонтних підприємствах при зміцненні та відновленні та інших робочих органів ґрунтообробних машин (стрілчастих лап, робочих органів глибокорозпушувачів, дискових робочих органів).

*Ключові слова: магнітно-електричне зміцнення, плуг, знос, робочий орган, твердість.*

## ANNOTATION

**Yuriy Vashchuk Volodimirovich.. Establishment of the technological method for the advancement of the operational efficiency of the working organs of the plows.** – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

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

In the master's robot, the provision of a magnetic-electric change for the change and renewal of the working organs of the plows has been made.

At the beginning of the experimental tests of the wear rate, the coatings were installed, which were torn from steel 45, hardened to a hardness of 52-54 HRC, the highest wear rate when rubbed to the top of the blasted 2% Fe, 2 , for grated kovzanni - powder FBH-6-2 (vishche in 1.7-1.9 times)). This allowed us to recommend for couples rubbing, cleaning when rubbing with puddles, scorching with Fe-2% V powder, and when rubbing with powders - scrubbing with FBH-6-2 powder.

At the latest, the results have been broken up until recently, and it has been broken down into the technology of changing and updating the typical working organs of MEU plows from a permanent magnetic field, which are efficient at great new jobs.

The results can be used in repair shops in case of changing and renewed working organs of robotic machines (small paws, working organs in glibokorozushuvachiv, disks

*Key words: magnetic-electric change, plow, wear, working body, hardness.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СПОСОБИ І ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІЦНЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН.....	8
РОЗДІЛ 2. ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПОКРИТІВ ВИКОНАНИХ МАГНІТНО-ЕЛЕКТРИЧНИМ ЗМІЦНЕННЯМ В ПОСТІЙНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ.....	17
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС МАГНІТНО-ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ПЛУГІВ.....	27
ВИСНОВКИ.....	31
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	32

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Відомо [1, 2], що у процесі ремонту техніки деталі із зношеними поверхнями досить часто замінюються новими, що призводить до збільшення собівартості ремонту. При цьому вартість запасних частин у структурі витрат за ремонт становить понад 50 % [1].

Слід зазначити, що економічна доцільність відновлення зношених робочих поверхонь деталей обумовлена їх повторним використанням, внаслідок якого економія може сягати 30–35 % від вартості ремонту [1, 2]. Собівартість відновлення більшості деталей становить 30–50% і, як правило, не перевищує 60–70% преїскурантних цін нових деталей, а витрата металу порівняно з виготовленням у 20–30 разів нижче. Ресурс відновлених деталей з використанням зміцнювальних технологій збільшується у 1,2–2,5 рази.

При нанесенні зміцнювальних покриттів на нові деталі машин дещо збільшується вартість виробів, проте суттєво знижуються витрати на ремонтні роботи.

Закордонний досвід зміцнення та відновлення деталей сільськогосподарської та автотракторної техніки також доводить економічну доцільність вторинного використання запасних частин. Так, на спеціалізованому підприємстві фірми «International Harvester» відновлюють зношені деталі сільськогосподарських машин, двигунів, водяних насосів, зчеплень. Вартість відновлення колінчастих валів, валів приводних, осей, муфт та інших деталей автотракторної техніки складає 20–25 % вартості виготовлення, а ресурс становить 100 % нового. На спеціалізованій ділянці фірми Caterpillar відновлюють наплавленням деталі ходової частини гусеничних тракторів, полотна гусениць. На заводі фірми "London Transport Chiswick" відновлюють зношені деталі двигунів, коробок передач, задніх мостів вантажних автомобілів та автобусів. Собівартість відновлення деталей становить 50–70% ціни нових, а ресурс становить 80–90%. Найбільш популярними на вторинному ринку

використання запасних частин є великі вузли, агрегати та його деталі: двигуни, турбіни, гідропневмоагрегати, колінчасті вали, вали карданних передач, коробок передач та інших [5, 6, 8].

З вищесказаного можна дійти невтішного висновку, що зміцнення нових та відновлення зношених деталей на підприємствах ремонтного виробництва є актуальним завданням. В першу чергу це стосується великогабаритних деталей складної та простої сільськогосподарської техніки.

**Мета роботи:** вивчення механізму зношування зносостійких покриттів, отриманих магнітно-електричним зміцненням в постійному магнітному полі та вибір матеріалів наплавлення для різних умов зношування.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити такі **завдання:**

- виконати огляд та обґрунтувати напрями підвищення післяремонтного ресурсу робочих органів плугів;

– обґрунтувати магнітно-електричним зміцненням для отримання якісних зносостійких покриттів та розробити технологічний процес відновлення та зміцнення робочих органів плугів;

– провести лабораторні дослідження на зношування для встановлення оптимальних режимів магнітно-електричного зміцнення в постійному магнітному полі.

**Об'єкт дослідження:** процес відновлення та зміцнення робочих органів плугів магнітно-електричним зміцненням.

**Предмет дослідження:** технологія зміцнення робочих органів плугів магнітно-електричним зміцненням в постійному магнітному полі з використанням суміші порошкових матеріалів та встановлення оптимальних режимів магнітно-електричним зміцненням в постійному магнітному полі.

**Методи дослідження.** Дослідження проводилися з використанням сучасних інформаційних технологій на основі законів математики, фізики та у відповідність до теорії надійності. Експериментальні дослідження проводилися за стандартними загальновідомими методиками з використанням сучасного

обладнання. Результати експериментів оброблялися за допомогою методів математичної статистики.

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

1. Борак К. В., **Ващук Ю. В.** Сучасні методи підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. Збірник тез доповідей XXII Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" присвячену 121-річчю з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 16–18 жовтня 2021 року, м Ніжин. Ніжин. 2021. С. 130-133.

2. Борак К. В., **Ващук Ю. В.** Козловець С. В. Методика визначення триботехнічних характеристик ґрунтового середовища. Збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної онлайн конференції «Сучасні проблеми та перспективи розвитку машинобудування України», присвяченої 20-й річниці з дня створення факультету конструювання та дизайну Національного університету біоресурсів і природокористування України. м. Київ. 2021. С. 140-144.

3. Борак К.В., Олександрович О., Самчук Д., **Ващук Ю.** Аналіз абразивних властивостей ґрунтів. Збірник тез VII-ї всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» 31 березня 2021 року. Житомир : ЖАТК. С. 179-181.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практичний інтерес для сільськогосподарських підприємств представляє запропонована технологія підвищення зносостійкості органів плугів.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 14 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 33 сторінки комп'ютерного тексту, містить 3 таблиці і 5 рисунків.

## РОЗДІЛ 1

### СПОСОБИ І ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІЦНЕННЯ ІВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

У ремонтному виробництві набули поширення технології нанесення матеріалів покриттів, що забезпечують відновлення або поліпшення властивостей поверхневих шарів зношених деталей і спеціальні способи зміцнення поверхонь деталей за допомогою утворення зносостійких шарів або пластичного деформування матеріалу.

Системна модель технології відновлення та зміцнення у загальному вигляді може бути представлена поєднанням вхідних потоків речовини, енергії, інформації, а спосіб обробки – у вигляді підсистем: енергетичної та інформаційної. Перша доставляє та перетворює енергію, необхідну для впливу на матеріал заготівлі з метою зміни його фізико-механічних властивостей. Друга управляє потоками енергії та речовини, забезпечуючи їх доставку у необхідній кількості у задане місце робочого простору з метою забезпечення необхідних форми, розмірів та властивостей поверхні деталі. Процес енергетичного впливу здійснюється в кілька етапів. На першому етапі енергія, що підводиться, перетворюється на робочу  $E_{роб}$  за допомогою технологічного обладнання. На другому етапі робоча енергія перетворюється на енергію впливу  $E_{вплив}$  на оброблювану поверхню. На третьому етапі енергія впливу призводить до утворення фізико-хімічних механізмів  $M_{ф.х.}$  обробки заготовки, є головним елементом формування параметрів процесу обробки (продуктивність, енерговитрати, якість поверхні тощо):

$$\Pi_{\Omega} = \{ E_{роб} \rightarrow E_{вплив} \rightarrow M_{ф.х.} \}. \quad (1)$$

Для зміцнення та відновлення деталей машин найбільше застосування отримали наплавлення та напилення через універсальність та гнучкість процесів [3, 10, 11].



Наплавлення застосовується для відновлення деталей машин і створення на поверхні деталі шару, що має високу зносостійкість, корозійну стійкість, жароміцність та інші властивості [7, 8, 12]. Істотними недоліками способів наплавлення є термічний вплив на основний метал, у тому числі на поверхні, що не відновлюються, деформації деталей, значні припуски на механічну обробку, неможливість нанесення покриттів на поверхню тонкостінних і порожнистих деталей [4, 12]. Основними технологіями, що використовуються в даний час, є: газове наплавлення, вібродугове наплавлення, наплавлення під шаром флюсу, плазмове наплавлення порошкових матеріалів, електроконтактне приварювання металевого шару, індукційне наплавлення [3, 6, 8].

Для відновлення малогабаритних деталей з локальним зносом (вилки шестерень коробок передач, деталі газорозподільного механізму) та зміцнення деталей ґрунтообробних машин (лемеші, дискові ножі, диски сівалок і луцильників, лапи культиваторів) застосовується газове наплавлення [6, 12, 13]. У цьому процесі джерелом нагріву є ацетиленокисневе полум'я, як присадковий матеріал використовуються прутки або порошки зносостійких сплавів. Переваги газового наплавлення – простота та доступність обладнання та технології; можливість отримання наплавленого металу практично будь-якої системи легування; незначне проплавлення основного металу та мінімальне перемішування основи з наплавленим присадочним матеріалом (близько 8-10%) [6, 13]. Недоліки методу – низька продуктивність; мінливість якості наплавленого металу, що залежить від кваліфікації робітника.

Вібродугове наплавлення застосовується для нанесення шарів завтовшки 0,5–3,0 мм на зовнішніх та внутрішніх поверхнях циліндричних деталей [6, 8, 9]. Процес наплавлення здійснюється при вібрації електрода з подачею рідини, що охолоджує, на наплавлену поверхню. Технологія відрізняється простотою реалізації та експлуатації установок. Недоліки – розбризкування електродного матеріалу та його підвищена витрата; значний термічний вплив на деталь; підвищена ймовірність виникнення у покриттях раковин, пір, тріщин [6, 9].

Відновлення деталей ходової частини тракторів, сільськогосподарських машин здійснюється наплавленням під шаром флюсу [7, 8, 11].

У цьому процесі наплавочними матеріалами є дроти, стрічки різного складу і можлива подача присадного матеріалу в зону наплавлення [6, 11]. Технологія характеризується великою продуктивністю процесу та простотою обладнання; можливістю управління складом та властивостями наплавленого покриття додатковим легуванням; здатністю отримання товщини покриття 08-100 мм. Недоліки – значне перемішування основного та присадного металів; підвищене нагрівання деталі; неможливість наплавлення на деталі діаметром менше 55 мм; необхідність видалення шлакової кірки [6, 7].

Для нанесення покриттів на зношені поверхні відповідальних деталей (колінчасті вали, вали турбокомпресорів, штоки гідроциліндрів, пробки молочних кранів) та зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин (диски ножів, лапи культиваторів, плоскорізи) застосовується плазмове та газополумеве наплавлення. Як матеріали для наплавлення таких деталей використовуються порошки сплавів на залізній основі і сплавина нікелевій основі. Технологія відрізняється малим проплавленням основи та високою якістю наплавленого металу; можливістю наплавлення тонких шарів із застосуванням різних присадних матеріалів [1]. Позитивні якості – універсальність обладнання; можливість нанесення покриттів із металів, сплавів, оксидів, карбідів та їх поєднань; відсутність процесу окислення напилюваного матеріалу та основи; більш висока міцність зчеплення з основою і знижена пористість покриттів у порівнянні з покриттями, отриманими іншими способами. Недоліки – дорогі спеціальні джерела енергії; можливість використання установок лише у стаціонарних умовах [5, 7].

Відома технологія наплавлення на робочі органи сільськогосподарських машин та зношені поверхні деталей автотракторної техніки з використанням електроконтактного нагріву [3, 13]. При електроконтактному приварюванні як присадковий матеріал застосовуються порошки, дроту і стрічки [5, 9].

Залежно від зносу деталі товщину шару, що приварюється, можна регулювати в межах 0,1-0,5 мм, що дозволяє скоротити припуски і знизити трудомісткість подальшої обробки [6, 7]. Переваги технології – відсутність проплавлення основного металу; мінімальні деформації наплавлених деталей; загартування шару безпосередньо в процесі приварювання; відсутність вигорання легуючих елементів; зменшення витрати металу порівняно з наплавленням у 3–4 рази [3, 8, 10]. Недоліки – низька продуктивність процесу та якість наплавленого шару; відсутність серійного виробництва устаткування[3].

Для зміцнення тонких плоских деталей сільськогосподарської техніки застосовують індукційний спосіб наплавлення [6, 10].

При індукційному наплавленні суміші порошку зносостійкого сплаву і флюсу товщина покриття становить 1,0...2,0 мм. Переваги – висока продуктивність; можливість наплавлення тонких шарів; відсутність вигорання вуглецю та легуючих елементів; можливість механізації та автоматизації процесу. Недоліки – висока вартість устаткування; перегрів основного металу; присадковий матеріал має бути легкоплавкішим ніж основний [6].

Занурення в розплавлений метал (наморожування) застосовується для відновлення та зміцнення деталей робочих органів сільськогосподарської та дорожньої техніки [2]. Основними недоліками процесу є велика енергоємність обладнання та неможливість нанесення зносостійких покриттів із тугоплавких матеріалів.

Напилення застосовується для підвищення зносостійкості, корозійної стійкості, жароміцності або відновлення зношених деталей. У процесі напилення на поверхні виробу формуються покриття з нагрітих до температури плавлення частинок присадного матеріалу внаслідок впливу теплоти спалювання горючої суміші або дугового розряду. Як присадковий матеріал використовуються метали, сплави, неметалеві матеріали, композиційні суміші, дріт [5, 12]. Більшість способів напилення мають високу продуктивність, мінімальний

температурний вплив на матеріал основи та дозволяють точно регулювати товщину покриття та припуск на механічну обробку [10, 11].

Основними недоліками є витрата дорогих газів; невисока зчеплюваність покриття з основою; неможливість нанесення тугоплавких матеріалів; інтенсивні окислювальні процеси [10]. Тим не менш, останнім часом для відновлення колінчастих валів двигунів внутрішнього згоряння транспортних засобів та підвищення довговічності вузлів тертя різного технологічного обладнання застосовується газополум'яне нанесення дротяних та порошкових матеріалів на оброблювані поверхні з активуючим впливом на газополумєневий факел. Технологія дозволяє підвищити міцність зчеплення покриттів на відрив до 40-50 МПа, досягти значень густини покриттів понад 90%, забезпечити пористість покриттів у межах 5-7% [8].

Найбільш поширеними технологіями в ремонтному виробництві є електродугова металізація і плазмове напилення [6, 13]. Електродугова металізація застосовується для відновлення стикових площин головок циліндрів та колінчастих валів двигунів, для нанесення антифрикційних покриттів, для захисту від корозії робочих органів машин для внесення добрив та гербіцидів, машин для кормовиробництва.

Технологія відрізняється високою продуктивністю по масі матеріалу, що наноситься (до 25 кг/год) і площі поверхні; простотою обладнання та технології; можливістю нанесення покриттів на поверхні деталей із різних матеріалів [4, 10]. Недоліки – невисока якість покриттів (велика пористість, знижена міцність зчеплення покриттів); вигорання легуючих елементів в електричній дузі в присутності кисню [2, 4].

Для зміцнення робочих органів сільськогосподарської техніки (лемеша культиваторів, зуби борін) та отримання матеріалів із високою корозійною стійкістю використовується спосіб плакування вибухом [1, 2]. Він забезпечує утворення міцного металевого зв'язку матеріалів покриття та основи в результаті протікання процесу з високою швидкістю, не вимагає застосування дорогого та

складного обладнання. Недоліки – висока енергоємність процесу і тривалість підготовчих операцій [3, 5].

При наплавленні самопоширювальним високотемпературним синтезом утворюються композиційні зносостійкі покриття, що включають карбіди тугоплавких металів, в результаті чого забезпечується міцне з'єднання покриття з основою [3, 9]. Недоліками даного способу є необхідність підбору матеріалів для утворення в результаті реакції речовини, що володіє великою енергією активації; низька продуктивність процесу нанесення покриттів; складне та дороге обладнання [10, 12].

Наплавлення просоченням забезпечує отримання композиційного покриття за допомогою нагрівання заготовки в печі до температури, що перевищує температуру плавлення металокерамічного твердого сплаву або вольфраму литого карбіду [1, 9, 11]. Спосіб застосовується з метою зменшення пористості покриттів та надання їм антифрикційних властивостей. Недоліки – висока енергоємність та вартість обладнання.

Електроіскрова обробка застосовується для зміцнення поверхневого шару металу за допомогою нанесення тонкого шару композиційного матеріалу завтовшки до 0,3 мм з властивостями, близькими до властивостей матеріалу електрода [3, 4]. Переваги електроіскрової обробки – відсутність нагрівання деталі у процесі обробки; висока міцність зчеплення нанесеного матеріалу із основою; можливість локальної обробки поверхні; відсутність необхідності спеціальної попередньої підготовки деталі [3, 5]. Недоліки – підвищена шорсткість покриттів; різнотовщинність сформованого шару; складність отримання покриттів із неелектродних матеріалів; необхідність застосування компактних електродів [4, 6, 7].

Лазерна технологія отримання покриттів полягає в утворенні на поверхні виробу захисних оболонок при нагріванні променем лазера, як з розплавленням присадкового та поверхневого шарів матеріалу так і за рахунок структурних змін поверхні металу [5, 8]. Спосіб дозволяє у межах змінювати властивості поверхні

виробів [9, 10]. Недоліками способу є невисока продуктивність і велика вартість обладнання [6, 7].

Для поліпшення фізико-механічних властивостей виробів застосовується термічна обробка [1]. Хіміко-термічна обробка застосовується для підвищення експлуатаційних властивостей поверхневого шару деталей з допомогою збільшення твердості. У процесі хіміко-термічної обробки відбувається зміна складу поверхневого шару виробу на глибину до 0,3-2,0 мм. Недоліки – велика тривалість та енергоємність процесу; значний термічний вплив на матеріал; екологічно небезпечний технологічний процес[3].

Термічна обробка виробів у магнітному полі, заснована на використанні енергії зовнішнього магнітного поля (постійного, змінного або імпульсного), дозволяє підвищити статичну міцність, зносостійкість, межу витривалості деталей машин у 1,2–1,5 рази [2]. Це зумовлено позитивним впливом термічної обробки на процеси структурних та субструктурних змін при фазових переходах під впливом зовнішнього магнітного поля. Недолік способу – необхідність застосування спеціального технологічного обладнання, оснащення та контрольної-керуючої апаратури [2].

Зміцнення матеріалу при його поверхневому пластичному деформуванні (ППД) засноване на навмисному спотворенні кристалічної решітки металу в результаті механічного впливу [3]. Обробка робочих поверхонь деталей статичними способами ППД (обкатуванням, розкочуванням, дорнуванням, вигладжуванням та ін.) дозволяє збільшити довговічність різьблення на валах і гайках на 35-40% і підвищити межу втоми зубів зірочок щонайменше ніж 40 %. Динамічні способи ППД (обробка дробом або спеціальними інструментами та ін.) застосовуються для зміцнення пружин, ресор, гвинтів [3].

Для підвищення результату зміцнення деталей використовується комбінована обробка, що ґрунтується на поєднанні різних способів ППД з термічними, хімічними або електрофізичними впливами [4, 5]. Так, для зміцнення зовнішніх та внутрішніх циліндричних поверхонь валів, різьблень,

шліців, шпонкових пазів, зубів зірочок та шестерень застосовується електромеханічна обробка поверхонь деталей [5–7].

При електромеханічній обробці в результаті одночасного термічного та силового впливів електричного струму та деформуючого електрода-інструменту, а також інтенсивного охолодження металу утворюється дрібна, однорідна та щільна структура оброблюваної поверхні зі значним підвищенням твердості та появою «білого шару» – безструктурного мартенситу [8].

Комбіноване зміцнення нанесенням покриттів і ППД дозволяє підвищити на 10-50% мікротвердість основи, знизити в 2-8 разів шорсткість поверхні і знизити припуск на подальшу механічну обробку, сформувати стискаючі залишкові напруження. Відомий спосіб, що поєднує нанесення багатошарових композицій електроерозійним методом з алмазним вигладжуванням (вібровигладжуванням), який забезпечує параметр шорсткості  $R_a = 0,1-0,4$  мкм, збільшує ресурс роботи спряжень більш ніж у 3 рази [4].

Останнім часом набув поширення комбінований спосіб зміцнення ППД циліндричних деталей та робочих органів сільськогосподарських машин у змінному електромагнітному полі [3]. Обробкою деталей типу тіл обертання цим способом з напруженістю електромагнітного поля 0,2-5,0 кА/м і зусиллям накатного пристрою 1,0-5,0 кН забезпечується зниження напружень розтягу, підвищення твердості до 40-60 % на глибину зміцнення до 4,5 мм. При цьому підвищується зносостійкість обробленої поверхні до 45–60 % [9].

Використання енергії електромагнітного поля для зміцнення та відновлення деталей запропоновано рядом дослідників, які працювали під науковим керівництвом академіків Є. Г. Коновалова, П. І. Ящеріцина: Б. П. Чемісовим, Г. С. Шульовим, І. Ф. Марченко, Л. М. Акулович, В. І. Абрамовим, Б. П. Борисовим. Подальший розвиток процес обробки в електромагнітному полі отримав у дослідженнях Л. М. Кожуро, В. І. Гальго, М. Л. Хейфеца, Т. К. Романової і був названий електромагнітним наплавленням, оскільки, за їх твердженням, енергія електромагнітного поля та шляхи її

перетворення при термомеханічному впливі на зміцнювану поверхню є домінуючими факторами, що визначають фізико-хімічний характер нанесення покриття. Однак у подальших дослідженнях авторів Л. М. Акуловича, Ф. І. Пантелеєнко, В. А. Люцко, М. П. Кульгейко, А. В. Мирановича встановлено, що процес формування зміцненого поверхневого шару в електромагнітному полі має обмеження за товщиною покриття, а за механізмом фізичних явищ відноситься до зміцнювальних методів. Тому технологія, що розглядається, повернулася до колишньої назви – магнітно-електричне зміцнення (МЕЗ).

Пристрої для реалізації процесу МЕЗ можуть бути виконані як за однополюсною так і за двополюсною схемою. Двополюсна схема за інших рівних умов забезпечує більш високу стабільність процесу та його продуктивність, а однополюсна – більш універсальна.

### **Висновки по розділу**

Аналіз сучасних технологій зміцнення і відновлення показав, що актуальним завданням у ремонтному виробництві є підвищення надійності і довговічності деталей машин і механізмів, що швидко зношуються. З урахуванням того, що для процесу МЕЗ характерні відсутність термічної деформації та спеціальної попередньої підготовки поверхонь деталей, спосіб найбільш раціонально застосовувати для зміцнення і відновлення великогабаритних суцільних і порожнистих деталей. Проте відповідність вимогам вітчизняних ремонтних підприємств та доцільність реалізації способу з цією метою не підтверджена ні експериментально, ні його впровадженням. Таким чином, виникає необхідність у розробці, експериментальному дослідженні застосування технології зміцнення та відновлення поверхонь деталей магнітно-електричним зміцненням у постійному магнітному полі.



## РОЗДІЛ 2

### ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПОКРИТІВ ВИКОНАНИХ МАГНІТНО-ЕЛЕКТРИЧНИМ ЗМІЦНЕННЯМ В ПОСТІЙНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ

Відомо [8, 10], що у процесі експлуатації через абразивного зношування відбувається втрата працездатності у 75-80% сільськогосподарської техніки. На процес зношування при терті здійснює основний вплив структура та фізико-механічний комплекс властивостей поверхневого шару матеріалу, від яких залежить характер динамічних структур, що формуються, механізми руйнування і кінетика зношування [6, 7].

Слід зазначити, що для забезпечення необхідної працездатності поверхонь тертя, ефективними є захисні покриття отримані МЕЗ, структура, зносостійкість і антифрикційні властивості яких можуть бути оптимізовані [8]. Враховуючи, що специфіка зношування покриттів проявляється у впливі структури, хімічного складу, суцільності та пористості покриттів, зміні величин мікротвердісті, представляє практичний інтерес оцінка зносостійкості покриттів, отриманих наплавкою ФМП в постійному магнітному полі.

Найчастіше МЕЗ зміцнюють і відновлюють посадкові поверхні деталей типу тіл обертання під слабо- і середньонавантажени підшипники ковзання, які піддаються впливу агресивних і абразивних середовищ умовах тертя зі змащенням [1, 2].

Водночас відомі випадки зміцнення деталей, у яких робочі поверхні знаходяться в контакт з абразивним середовищем.

У зв'язку з цим метою досліджень було вивчення механізму зношування зносостійких покриттів, отриманих МЕЗ в постійному магнітному полі та вибір матеріалів наплавлення для різних умов зношування.

У рамках проведених досліджень ставилося завдання оцінити зносостійкість зразків з покриттями, отриманими наплавленням ФМП Fe-2% V,

Fe-Ti та ФБХ-6-2 на установці моделі УНП 1, із зносостійкістю зразків із сталі 45, загартованих нагрівання СВЧ на глибину 1,2-1,6 мм до твердості 52-54 HRC.

На циліндричні зразки із зовнішнім діаметром 40 мм, внутрішнім – 16 мм і висотою 12 мм зі сталі 45, підданим нормалізації наносилися покриття товщиною до 0,5 мм на діаметр. Після цього зразки з покриттями шліфувалися на круглошліфувальному верстаті моделі ЗБ12 колами карбиду кремнію зеленого зернистістю 16-25 (наприклад, 1 300×40×127 63С 25-16 СМ 1 7 До 35 м/с) поверхні  $R_a = 0,63$  мкм, що відповідає шорсткості реальних деталей, які працюють у трибоспряженнях

В роботі випробування зразків з покриттями (рис. 2.1) проводились відповідно до вимог ДСТУ на машині тертя моделі 2070 СМТ-1 (рис. 2.2) за стандартною методикою за схемами «диск-колодка» (рис. 2.3а) та «диск-диск» (рисунок 2.3 б) при порівняльній оцінці зносостійкості при терті ковзання та терті кочення з 10%-м проковзуванням.



Рис. 2.1. Фотографії зразків з покриттями, що використовувалися в процесі триботехнічних досліджень: *a* – до початку випробувань; *б* – після припрацювання з конртілом; *в* – після закінчення випробувань.



Рис. 2.2. Установка для випробовування на тертя та зношування

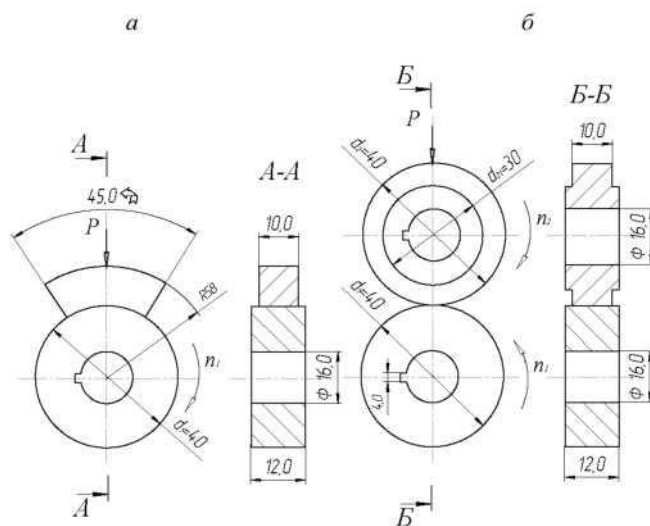


Рис. 2.3. Схеми триботехнічних досліджень матеріалів покриттів в умовах тертя ковзання (а) та тертя кочення з проковзуванням (б). Схема випробування: а – «диск-колодка», б – «диск-диск».

Контртіла застосовувалися з наступних матеріалів: чавун ХТВ (для умов тертя ковзання) та сталі ШХ15, підданій загартування в камерній печі та відпуску до твердості 60–62 HRC (для умов тертя кочення з проковзуванням). Вибір цих матеріалів як спряжених деталей обумовлений наступними обставинами:

- Чавун в більшій мірі, ніж інші матеріали, зберігає фізико-механічні властивості в процесі тертя ковзання та є одним із поширених матеріалів у машинобудуванні;

- високовуглецева хромиста сталь ШХ15 застосовується для виготовлення тіл кочення невеликих перерізів (роликів, кульок).

При дослідженні зносостійкості в умовах тертя ковзання зі змащувальним матеріалом використовувалося масло індустріальне І-Г-А-32, а в умовах тертя кочення з проковзуванням – трансмісійне масло ТМ-3-18 (ТАП-15В). Оливи перед випробуваннями відфільтровувалися. При терті зі змащувальним матеріалом, що містить абразив, в оливу додавали частинки кварцового піску, подрібнені до розміру менше 30,0 мкм у кількості 0,05-0,25 г/см<sup>3</sup>. Масляно-абразивну суміш у кількості 40 мл заливали у ванну пристосування.

При цьому для кожної партії зразків використовувалася свіжа порція суміші. Абразивні частинки у зваженому стані в період випробувань підтримувалися лопатями крильчатки, посадженої на одному валу із зразком. Стабільність температурного режиму суміші підтримувалася пропусканням води через подвійне дно ванни. Температура мастильного матеріалу під час випробувань підтримувалася на заданому рівні (25,0–95,0 °С) у камері 4 (рис. 4.4) за допомогою електричних нагрівачів 15 загальною потужністю 3,5 кВт і вимірювалася хромель-копелевою термопарою 14, підключеної до реєструючого приладу Ф 564 (13) компенсаційними проводами. Температурний режим зразків та контртіл контролювався за допомогою хромель-копелевої термопари 9 та електронного потенціометра КСП-4 (10), встановленого у вимірювальному блоці машини тертя.

На всіх етапах дослідження зносостійкості зразки заздалегідь припрацьовувались з колодкою або диском. Закінчення припрацювання визначалося по стабілізації величини моменту тертя пари та температури. Для забезпечення точності та достовірності досліджень зносостійкості зразки з покриттями та еталонні випробовувалися в умовах, максимально наближених до

експлуатаційних. Так, режим випробувань відповідав реальним усередненим умовам роботи деталей ґрунтообробних машин для яких характерні наступні значення: величина навантаження на зразок  $P = 0,35$  кН (тиск у місці контакту 2,5 МПа); відносна швидкість ковзання  $V_c = 2,0$  м/с (частота обертання  $n = 750$  хв<sup>-1</sup>); температура оливи у ванні  $t_m = 25$  °С ( $T = 298$  К).

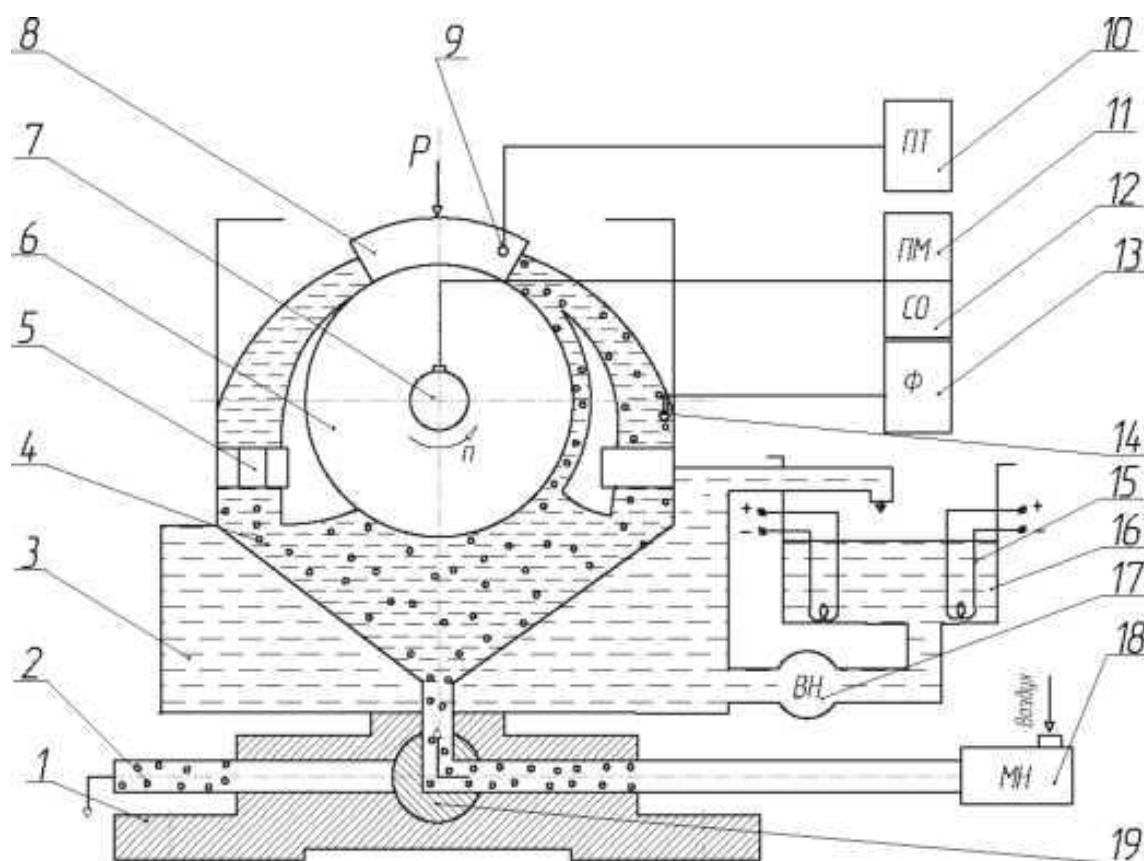


Рис. 2.4. Принципова схема установки для триботехнічних досліджень матеріалів покриттів: 1 – корпус камери; 2 – трубка для зливу олії; 3 – кожух охолодження; 4 – камера для олії (масляно-абразивної суміші); 5 – магнітні пробки; 6 – зразок для випробувань на зношування; 7 – шпindelь машини; 8 – колодка зразка; 9, 14 – термопара; 10 – потенціометр; 11 – потенціометр для виміру моменту тертя; 12 – лічильник оборотів зразка; 13 - прилад Ф 564; 15 - електронагрівач; 16 – бак із водою; 17 – водяний насос; 18 – мембранний насос; 19 – триходовий кран

Дослідження зносостійкості зразків з покриттями та еталонних в умовах тертя кочення з 10%-м проковзуванням виконувались із застосуванням методу математичного планування експерименту. Як досліджуваний параметр

приймалася інтенсивність зношування зразків. Факторами, що варіюються при зношуванні покриттів зі змащувальним матеріалом були навантаження на верхній зразок  $P$ , температура оливи у ванні  $t_m$  і відносна швидкість кочення  $V_k$ . При зношуванні покриттів з мастильним матеріалом, забрудненим частинками абразиву, крім вищевказаних, використовувався фактор – концентрація абразивних частинок у оливі  $K_q$ . Згідно з методикою дослідження зносостійкості, режим випробувань відповідав умовам роботи деталей трансмісій автотракторної техніки, для яких характерні: відносна швидкість кочення  $V_k$  (0,5–3,0 м/с); навантаження на зразок  $P$  (0,5–2,5 кН); температура оливи у ванні  $t_m$  (25–90 °С); концентрація абразивних частинок у оливі  $K_q$  (0,05–0,25 г/см<sup>3</sup>). При терті кочення проковзуванням ( $\eta$ ) оцінювалося співвідношенням частоти обертання ( $n_2$ ) веденого диска діаметром ( $d_2$ ) до частоти обертання ( $n_1$ ) провідного диска діаметром ( $d_1$ ) за умови  $d_1 \approx d_2$  ( $\eta = n_2/n_1$ ).

Час випробування зносостійкості покриттів в різних умовах зношування при терті ковзання і кочення з проковзуванням приймалося таким, щоб шлях тертя для зразків, що досліджуються на різних режимах, був однаковим. Він становив  $20 \cdot 10^3$  м при терті зі змащувальним матеріалом та  $6 \cdot 10^3$  м під час тертя зі змащувальним матеріалом із частинками абразиву. Це пов'язано з меншою інтенсивністю зношування за наявності мастила та необхідністю збільшення зносу для зменшення похибки вимірювання. Випробовувалися партії по п'ять зразків.

Для визначення зношування зразків використовувався лінійний метод. Вимірювання зразків виконувалося оптичним довгоміром ІЗВ-1, точність вимірювання якого у двох взаємно перпендикулярних площинах за двома перерізами становила  $\pm 0,5$  мкм. Вимірювальною базою були циліндричні стрічки, що не зношуються, по краях зразка. Контртіла вимірювалися у центральній площині за двома перерізами. Різниця розмірів зразка та контртіла в кожному перерізі до та після зношування становила величину зношування за час випробування.

Аналіз даних показує, що вплив на зносостійкість покриттів має не тільки хімічний та фазовий склад наплавлених шарів, а й якість покриттів (пористість, суцільність та ін), технологічні параметри процесу наплавлення та конструктивне виконання магнітних систем пристроїв МЕЗ.

Триботехнічні характеристики покриттів, отриманих МЕЗ у постійному магнітному полі представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Триботехнічні характеристики покриттів, отриманих МЕЗ

Матеріал ФМП	Параметр					
	Інтенсивність зношування $I$ , мкм/км		Момент тертя $M_{тр}$ , Н-м		Коефіцієнт тертя $f$	
	З оливою	З оливою і частинками абразиву	З оливою	З оливою і частинками абразиву	З оливою	З оливою і частинками абразиву
Fe-2% V	2,1	3,2	0,61	0,83	0,08	0,11
Fe-Ti	2,7	4,2	0,72	0,84	0,10	0,12
ФБХ-6-2	1,7	2,4	0,63	0,78	0,09	0,10
Еталон (сталь 45, 52-54 HRC)	3,2	4,7	0,71	0,84	0,10	0,12

Встановлено [157], що в різних умовах зношування при терті ковзання найбільшу зносостійкість мають покриття з феромагнітного порошку ФБХ-6-2 (рис. 2.5).

Так, зносостійкість цих покриттів в 1,7-1,9 рази вища за зносостійкість зразка. Зносостійкість покриттів із ФМП Fe-2%V в порівнянні з еталоном більше 1,3–1,5 разу. Покриття із ФМП Fe-Ti мають зносостійкість, майже рівну стандарту.

У порядку зменшення зносостійкості покриттів при терті ковзання останні можна розташувати в наступній послідовності: ФБХ-6-2 → Fe-2% V → Fe-Ti → еталон (сталь 45, 52-54 HRC).

Аналіз результатів триботехнічних досліджень контртіла та покриттів (табл.2.2) показує, що мінімальний знос пар сполучень при терті ковзання з оливою отримано для покриттів з феромагнітних порошоків ФБХ-6-2 та Fe-2%V. Це обумовлено в першу чергу наявністю в структурі покриттів залишкового аустеніту – пластичної та м'якшої фази, яка виконує роль демпфера, що знижує динамічні навантаження на поверхню і прискорює процес припрацювання пари «деталь-контртіло».

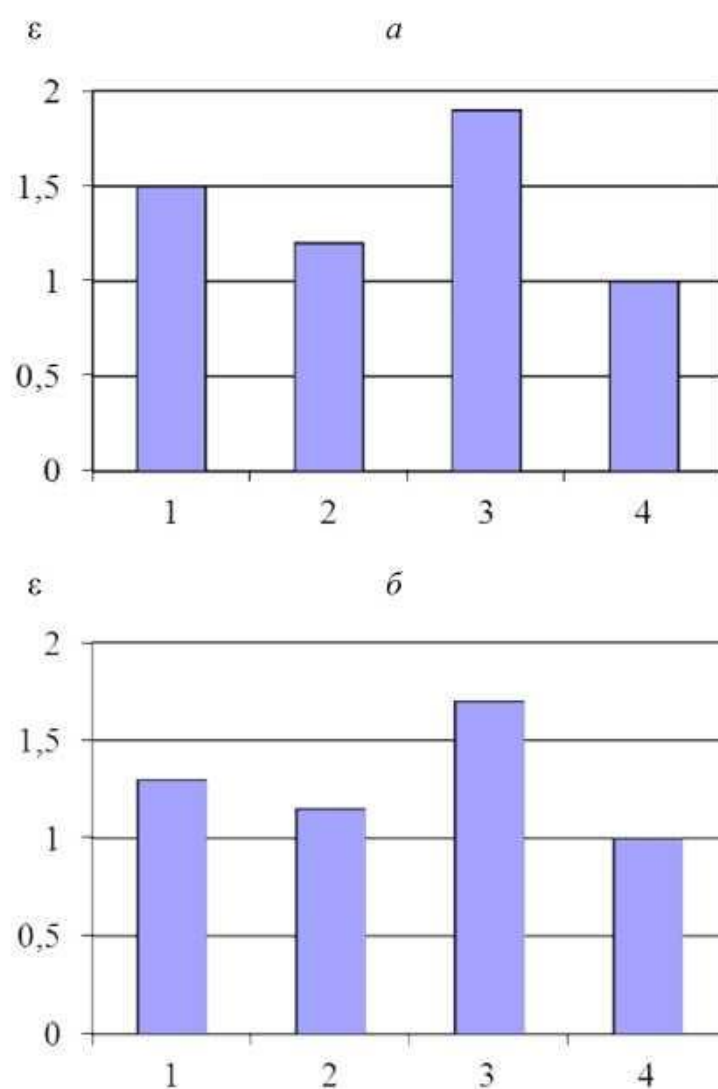


Рис. 2.5 Діаграми відносної зносостійкості покриттів з ФМП Fe-2%V (1), Fe-Ti (2) та ФБХ-6-2 (3), еталона (4): Умови тертя ковзання: а – зі змащувальним матеріалом; б – зі змащувальним матеріалом з частинками абразиву



Таблиця 2.2 – Інтенсивність зношування контртіла

Матеріал ФМП	Інтенсивність зношування контртіла $I$ , мкм/км	
	з оливою	З оливою і частинками абразиву
Fe-2%V	2,5	3,5
Fe-Ti	2,5	4,1
ФБХ-6-2	2,8	3,7
Еталон (сталь 45, 52-54 HRC)	3,5	4,7

Позитивна роль метастабільного аустеніту у покритті з порошку ФБХ-6-2 виражається у тому, що він добре протистоїть зношуванню при терті ковзання з мастильним матеріалом внаслідок утворенню при терті в поверхневому шарі мартенситу деформації, але й міцно утримує від викришування дрібні карбіди хрому та бору.

В умовах гідроабразивного зношування (масло з частинками абразиву) найменший знос пар спряжень отриманий для покриття з порошку ФБХ-6-2, що обумовлено присутністю у наплавленому шарі гартового мартенситу, комплексних боридів і ферробориду.

Слід зазначити, що мінімальне зношування пари тертя «покриття з порошку ФБХ-6-2-чавун ХТВ» також пояснюється мінімальною пористістю та максимальною суцільністю покриття.

Встановлено [157], що пара тертя «покриття з порошку Fe-Ti-чавун ХТВ» має в порівнянні з іншими досліджуваними трибоспряженнями найбільші момент і коефіцієнт тертя ковзання з оливою та оливою з частинками абразиву.

## Висновки по розділу

Отже, для пари тертя, що працює під час тертя ковзання з частинками абразиву, рекомендується використовувати покриття з феромагнітного порошку ФБХ-6-2, а для нерухомих спряжень – покриття з ФМП Fe-2% або Fe-Ti.

Аналіз результатів випробувань зносостійкості покриттів показав, що розкид експериментальних даних вкладається у 5–7 %.

## РОЗДІЛ 3

### ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС МАГНІТНО-ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ПЛУГІВ

Типовий технологічний процес зміцнення та відновлення з застосуванням МЕЗ у постійному магнітному полі композиційних феромагнітних порошків на робочі органи плугів складається з наступних операцій:

**1. Очищення та миття деталей** від забруднень у вигляді грязьових відкладень, абразивних та металевих частинок. Основними засобами для очищення є: лужні (луги, лужні солі) та синтетичні миючі засоби (синтетичні поверхнево-активні речовини, натрієві солі неорганічних кислот), наприклад, МЛ-51, МЛ-52, Темп-100, Лабомід-101. Очищення проводиться у температурному інтервалі 70–100°C, час обробки – 4–6 год, концентрація – 50 г/л.

**2. Дефектація та сортування деталей** проводиться з метою визначення технічного стану деталей: деформації та зношування поверхонь, цілісності матеріалу, зміни властивостей та характеристик робочих поверхонь, збереження форми.

#### **3. Підготовчі операції:**

3.1. Попередня механічна обробка поверхні.

Як правило, попередня обробка поверхонь не потрібна.

3.2. Підготовка композиційного феромагнітного порошку для наплавлення. При цій операції виконується вибір хімічного та отримання необхідного фракційного складу порошку. Залежно від хімічного складу композиційного порошку може змінюватись його фракційний склад у межах 100–320 мкм. Необхідний фракційний склад виходить розсіюванням на приладі типу 029 з ситами, що мають комірки 100; 125; 160; 200; 250; 320 мкм. Для забезпечення рівномірної подачі та гарної сипучості ФМП перед наплавленням його просушують при температурі 120-150 °С.

3.3. Підготовка робочої рідини для наплавлення. Для цього необхідно виконати дегазацію, деіонізацію, знезараження та диспергування робочої рідини

3.4. Підготовка установки для МЕЗ та налаштування обладнання для роботи. Операція включає наступну послідовність робіт: 1) вибираються раціональні режими МЕЗ (сила технологічного струму, магнітна індукція в робочому зазорі, витрата композиційного порошку і РР, зернистість ФМП); 2) виконуються операції з підготовки установки УНП 1 та необхідних пристосувань до роботи (установка та закріплення деталі в центрах верстата, заправка порошком бункера-дозатора та робочою рідиною до необхідного рівня ємності, встановлення робочого зазору та ін.); 3) здійснюється попереднє відпрацювання режиму МЕЗ.

**4. Магнітно-електричне зміцнення.** Нанесення покриттів виконується у наступній послідовності: 1) повідомлення руху деталі; 2) подача до робочого зазору ФМП та РР; 4) включення технологічного струму; 5) контроль технологічних, енергетичних та кінематичних параметрів у процесі МЕЗ; 6) демагнітизація деталі.

**5. Механічна обробка покриттів за МЕЗ.** Деталі плугів з покриттям не піддаються механічній обробці

**6. Контроль розмірів деталей та якості покриттів.** При відновлення деталей проводиться поточний, проміжний і остаточний контроль. Поточний контроль виконується вибірково як на окремих операціях технологічного процесу, так та на готових деталях. Проміжний контроль проводиться поопераційно, за згрупованими операціями.

За результатами виробничої апробації встановлення моделі УНП 1 рекомендовано раціональні режими технологічного процесу зміцнення та відновлення циліндричних поверхонь деталей (табл. 3.1). Встановлено, що внаслідок застосування МЕЗ підвищилися зносостійкість зміцнених та відновлених поверхонь деталей автотракторної техніки у 1,65–1,90 разів.

Таблиця 3.1. – Раціональні режими технологічного процесу зміцнення та відновлення робочих органів плугів

Технологічний параметр метода обробітку	Режим операції технологічного процесу
Магнітно-електричне зміцнення	
1. Щільність технологічного струму $I$ , А/мм <sup>2</sup>	1,90
2. Величина магнітної індукції $B_p$ , Тл	0,70
3. Швидкість подачі $S$ , мм/с	0,19
4. Швидкість заготовки $V$ , м/с	0,05
5. Зернистість порошку	240-320
6. Величина робочого зазору $\delta$ , мм	1,55
7. Витрата композиційного порошку $q$ , г/(с×мм <sup>2</sup> )×10 <sup>-3</sup>	2,95
8. витрата РР $q$ , дм <sup>3</sup> /(с×мм <sup>2</sup> )-10 <sup>-3</sup>	0,4
9. Композиційний порошок	ФБХ-6-
10. Змащувально-охолоджуюча рідина	5%-й розчин емульсола Э2 у воді

Вирішення проблеми підвищення довговічності деталей сільськогосподарських машин пов'язано:

-з розробкою нових високоефективних технологій, які характеризуються високою продуктивністю, низькою енергоємністю, безвідходністю, екологічною чистотою і дозволяють отримати високу якість деталей, що виготовляються і відновлюються;

-з удосконаленням діючих технологічних процесів відновлення та зміцнення зношених поверхонь деталей, що забезпечують 100%-не відновлення ресурсу та необхідні експлуатаційні властивості машин.

У зв'язку з цим проведені дослідження показують високу ефективність розвитку процесу МЕЗ за рахунок:

- розробки та створення принципово нових технологічних схем та пристроїв, що реалізують процес МЕЗ;
- застосування різних композиційних порошків у складі паст та регулювання технологічними параметрами МЕЗ;
- створення комбінованих (МЕЗ та МАО) та поєднаних (МЕЗ та ППД) способів зміцнення та відновлення поверхонь деталей машин;
- удосконалення конструкцій виконавчих та робочих механізмів (органів) встановлення МЕЗ;
- управління тепловими процесами нагріву та плавлення основного та наплавлюваного матеріалу;
- управління глибиною та ступенем зміцнення поверхневого шару деталей за допомогою регулювання електромагнітного та термомеханічних потоків у робочій зоні установки МЕЗ;
- розробки методології вибору операцій МЕЗ, що дозволяє одночасно оптимізувати технологічний процес зміцнення та відновлення робочих поверхонь деталі та прогнозувати довговічність деталей та вузла в цілому;
- механізації та автоматизації процесу МЕЗ у дрібно- та середньосерійному виробництвах.

### **Висновки по розділу**

В третьому розділі магістерської роботи розроблено технологічний процес відновлення та зміцнення робочих органів плугів, які піддаються інтенсивному абразивному зношуванню.

## ВИСНОВКИ

На підставі експериментальних досліджень зносостійкості покриттів встановлено, що порівняно зі сталлю 45, загартованої до твердості 52-54 HRC, найбільшою зносостійкістю при терті кочення з проковзуванням мають покриття з порошку Fe-2%V (вище в 1,7-2,2 рази), при терті ковзанні – покриття з порошку ФБХ-6-2 (вище в 1,7-1,9 раза). Це дозволило рекомендувати для пар тертя, що працюють при терті кочення з проковзуванням, використовувати покриття з порошку Fe-2%V, а при терті ковзанні – покриття із порошку ФБХ-6-2.

На підставі отриманих результатів досліджень розроблено та впроваджено у виробництво технологію зміцнення та відновлення типових робочих органів плугів МЕЗ у постійному магнітному полі, працюючих при великих навантаженнях.

Результати досліджень можуть бути використані в ремонтних підприємствах при зміцненні та відновленні та інших робочих органів ґрунтообробних машин (стрілчастих лап, робочих органів глибокорозпушувачів, дискових робочих органів).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Попов В.С. Зносостійкість, сплави відновлення та зміцнення деталей машин. Запоріжжя: Вид-во ВАТ «Мотор Січ», 2006. 420 с.
2. Bayer R.G. (Ed.) Engineering Design for Wear. CRC Press, 2004. 422 p.
3. Stachowiak Gwidon W. Wear: Materials, Mechanisms and Practice. John Wiley & Sons Ltd, 2005. 480 p.
4. Самохвалов В.Н. Высокоэнергетические методы размерной и упрочняющей обработки. Самара : Самарский университет, 2019. 73 с.
5. Боровский Г.В., Григорьев С.Н., Маслов А.Р. Современные технологии обработки материалов. Москва : Машиностроение, 2015.
6. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. Ленинград : Машиностроение, 1986. 176 с.
7. Акулович Л.М., Миранович А.В. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники. Минск: Белорусский государственный аграрный технический университет (БГАТУ), 2016. 236 с.
8. Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. Технология упрочнения машиностроительных материалов. Одесса : Изд-во НГГУ им. Петра Могилы, 2005. 352 с.
9. Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Филонов И.П. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин. Минск : УП "Технопринт", 2000. 268 с.
10. Борак К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.05.11 / Поліський національний університет, м. Житомир. 2021. 380.
11. Аулін В. В., Тихий А. А. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості і надійності робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами : монографія. Кропивницький : Лисенко В.Ф., 2017. 278 с.



12. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М. : Машиностроение, 1982. 212 с.

13. Шульц В.В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента. Л.: Машиностроение, 1990. 208 с.

14. Романенко В.А. и др. Сельскохозяйственные машины (устройство, работа и основные регулировки). Краснодар: КубГАУ, 2014. 232 с.