

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти
«магістр»

на тему: «Підвищення зносостійкості та довговічності валів
сільськогосподарських машин після ремонту»

КРМ.133ГМмд(ОНП)_21.15.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за міждисциплінарною
освітньо-науковою програмою
*«Сервісна інженерія в
агропромисловому виробництві»*
за спеціальностями *133 Галузеве
машинобудування, 208 Агроінженерія*
ступеня вищої освіти *магістр*
групи 133ГМ_мд_21[2](ОНП)
НІКОЛАЄНКО Артем

Керівник: к.т.н., доцент
ДУДНИК Володимир

Рецензент: к.т.н., доцент
ГОРБЕНКО Олександр

Полтава – 2026 року

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Міждисциплінарна освітньо-наукова програма
«Сервісна інженерія в агропромисловому виробництві»
Спеціальності: 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія»
Ступінь вищої освіти *магістр*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри механічної
та електричної інженерії,
канд. техн. наук, доцент,
Станіслав ПОПОВ
30 червня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

НИКОЛАЄНКО Артем

1. Тема роботи: *«Підвищення зносостійкості та довговічності валів сільськогосподарських машин після ремонту»*, керівник роботи *канд. техн. наук, доцент ДУДНИК Володимир*, затверджено засіданням кафедри, протокол №18 від 30.06.2025 р.
2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи – 20 травня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: *аналіз літературних джерел Полтавської обласної універсальної наукової бібліотеки імені Івана Котляревського; аналіз літературних джерел Національної бібліотеки України імені Володимира Вернадського; сучасний досвід підприємств машинобудування та АПК за тематичним спрямуванням.*
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
Розділ 1. *Аналіз існуючих досліджень.*
Розділ 2. *Теоретичні положення.*
Розділ 3. *Методика досліджень.*
Розділ 4. *Результати експериментів.*
Розділ 5. *Практична реалізація розробок.*
5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *1. Обґрунтування теми кваліфікаційної роботи. 2. Основні завдання дослідження. 3. Дослідження впливу частоти обертання деталі, продуктивності та режимів наплавлення на формування металопокриттів. 4. Дослідження мікроструктури. 5. Зносостійкість та втомна міцність наплавленого металопокриття. 6. Оцінка економічної ефективності впровадження проектних рішень. 7. Висновки.*

6. Консультанти розділів *кваліфікаційної роботи*

Розділ	Власне ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання отримав
Практична реалізація розробок	Володимир ДУДНИК, доцент кафедри механічної та електричної інженерії		
	Петро МАКАРЕНКО, професор кафедри економіки та публічного управління		
	Павло ПИСАРЕНКО, завідувач кафедри екології, збалансованого природокористування та захисту довкілля		

7. Дата видачі завдання 30 червня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з.п.	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір і затвердження теми роботи	До 30.06.25	
2	Складання і затвердження розгорнутого плану та завдання на кваліфікаційну роботу	21.07-27.07.25 15.12-28.12.25	
3	Опрацювання літературних джерел		
4	Збір, вивчення і обробка інформації, необхідної для виконання роботи	20.04-26.04.26	
5	Виконання розділів роботи	27.04.26-10.05.26	
6	Оформлення тексту роботи		
7	Попередній захист роботи на кафедрі	11.05-15.05.26 18.05-20.05.26	
8	Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень і пропозицій		
9	Нормалізаційний контроль		
10	Захист кваліфікаційної роботи	25.05-31.05.26	

Здобувач вищої освіти _____ Артем НІКОЛАЄНКО
(підпис)Керівник роботи _____ Володимир ДУДНИК
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 5 розділів, 1 додаток, 5 рисунків, 2 таблиці, 31 використане джерело, 61 сторінка.

Об'єкт дослідження – технологічний процес плазмового наплавлення деталей типу «вал» за допомогою порошкової суміші.

Предмет дослідження – технологічні параметри та режими плазмового наплавлення порошковими матеріалами, що забезпечують формування зносостійкого наплавленого шару на поверхні деталей типу «вал» сільськогосподарських машин, а також дослідження впливу складу порошкової суміші та режимів наплавлення на довговічність відновлених деталей.

Постановка актуальної технічної задачі – розроблення та удосконалення технологічного процесу плазмового наплавлення із застосуванням порошкових сумішей, що дозволить отримати наплавлений шар із підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Мета роботи – підвищення зносостійкості та довговічності відремонтованих деталей типу «вал» машин сільськогосподарського призначення шляхом удосконалення технології плазмового наплавлення.

Практичне значення – полягає в удосконаленні технології відновлення деталей типу «вал» сільськогосподарських машин шляхом використання плазмового наплавлення порошковими матеріалами. Пропоновані технологічні рішення дозволяють підвищити зносостійкість відновлених поверхонь, збільшити ресурс роботи деталей, знизити витрати на ремонт та підвищити ефективність використання машинно-тракторного парку.

У **першому розділі** проведено огляд умов та видів зношування валів сільськогосподарських машин. Проаналізовано літературні джерела та розглянуто способи поверхневого зміцнення даних деталей.

У **другому розділі** наведено теоретичні положення визначення параметрів та режими плазмового наплавлення для відновлення деталей типу «вал».

У **третьому розділі** приведена методологічна схема проведення досліджень, схема експериментальної установки та прилади, що використовувалися у дослідженнях.

У **четвертому розділі** приведено результати досліджень впливу частоти обертання деталі, продуктивності та режимів наплавлення на формування металопокриттів. Представлено дослідження мікроструктури відновлених деталей.

У **п'ятому розділі** було приділено увагу питанням охорони праці, екологічної експертизи та економічної ефективності удосконалення.

Рекомендації щодо використання результатів роботи – результати можуть використовуватись на ремонтних та сервісних підприємствах агропромислового комплексу при відновленні деталей типу «вал» сільськогосподарських машин.

Сфера застосування результатів роботи – машинобудування, сервісна інженерія.

Ілюстраційна частина кваліфікаційної роботи – 10 аркушів.

Результат перевірки тексту пояснювальної записки на плагіат за допомогою сервісу StrikePlagiarism: унікальність тексту – 91,5 %.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра присвячена підвищенню зносостійкості та довговічності відремонтованих деталей типу «вал» машин сільськогосподарського призначення шляхом удосконалення технології плазмового наплавлення.

Ключові слова: НАПЛАВЛЕННЯ, ШАР, ВІДНОВЛЕННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕЖИМИ, ТЕРМІЧНИЙ ВПЛИВ, ДУГА, МЕТАЛОПОКРИТТЯ, МІКРОТВЕРДІСТЬ, МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ.

ANNOTATION

The master's qualification work is dedicated to increasing the wear resistance and durability of repaired shaft-type parts of agricultural machinery by improving plasma surfacing technology.

Keywords: DEPOSITION, LAYER, RECOVERY, TECHNOLOGICAL MODES, THERMAL IMPACT, ARC, METAL COATING, MICROHARDNESS, BONDING STRENGTH.

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	7
1	АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
	1.1 Короткий огляд умов зношування спряжень	9
	1.2 Способи поверхневого зміцнення	11
2	ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ	20
	2.1 Визначення параметрів плазмового наплавлення	20
	2.2 Режими наплавлення	21
3	МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	26
	3.1 Методологічна схема проведення досліджень	26
	3.2 Експериментальна установка та прилади	27
4	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	34
	4.1 Дослідження впливу частоти обертання деталі, продуктивності та режимів наплавлення на формування металопокриттів	34
	4.2 Дослідження мікроструктури	37
	4.3 Зносостійкість та втомна міцність наплавленого металопокриття	40
5	ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК	43
	5.1 Екологічна експертиза.....	43
	5.2 Охорона праці	45
	5.2.1 Актуальність проблеми безпеки людини у виробничому середовищі	45
	5.2.2 Вимоги з охорони праці при плазмовому наплавленні.....	47
	5.2.3 Аналіз формування травмонебезпечних ситуацій.....	49
	5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження проектних рішень	50
	ВИСНОВКИ.....	53
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	54
	ДОДАТКИ.....	56

ВСТУП

Одним із найважливіших напрямів забезпечення запасними частинами машин та обладнання підприємств АПК є організація відновлення зношених деталей.

Сприяючим фактором розвитку та вдосконалення ремонтної бази є створення великих спеціалізованих підприємств з використанням високовиробничих відновлювальних технологій, що забезпечують однакову міцність та зносостійкість відновлених деталей з новими.

Забезпечення рівномірності та зносостійкості відновлених деталей є найважливішим завданням у технічному переозброєнні сільськогосподарського ремонтного виробництва. Її вирішення дозволить скоротити номенклатуру та обсяг запасних частин та значно підвищити ресурс машин до капітального ремонту [1, 2].

Особливо актуальною є ця проблема для деталей типу «вал» з малими величинами зносу до 0,2 мм, які займають особливе місце в ремонтному виробництві. Відновлення їх відомими способами наплавлення обмежується термічним зміцненням на матеріал основи, втратами металу і дорогих легуючих компонентів, що йдуть в стружку, і необхідністю додаткової операції – термічної обробки.

Один з напрямків у вирішенні цієї проблеми – розробка нових технологічних процесів нанесення тонкошарових високоміцних покриттів на основі металевих порошків.

До таких способів відноситься формування металопокриттів із розпилених порошків плазмовим наплавленням.

У зв'язку з цим подальше вдосконалення та дослідження способу плазмового наплавлення з метою отримання щільних металопокриттів для відновлення деталей з малими величинами зносу є актуальним завданням, що має важливе народногосподарське значення.

Об'єкт дослідження – технологічний процес плазмового наплавлення деталей типу «вал» за допомогою порошкової суміші.

Предмет дослідження – технологічні параметри та режими плазмового

наплавлення порошковими матеріалами, що забезпечують формування зносостійкого наплавленого шару на поверхні деталей типу «вал» сільськогосподарських машин, а також дослідження впливу складу порошкової суміші та режимів наплавлення на довговічність відновлених деталей.

Постановка актуальної технічної задачі – розроблення та удосконалення технологічного процесу плазмового наплавлення із застосуванням порошкових сумішей, що дозволить отримати наплавлений шар із підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Мета роботи – підвищення зносостійкості та довговічності відремонтованих деталей типу «вал» машин сільськогосподарського призначення шляхом удосконалення технології плазмового наплавлення.

Практичне значення – полягає в удосконаленні технології відновлення деталей типу «вал» сільськогосподарських машин шляхом використання плазмового наплавлення порошковими матеріалами. Пропоновані технологічні рішення дозволяють підвищити зносостійкість відновлених поверхонь, збільшити ресурс роботи деталей, знизити витрати на ремонт та підвищити ефективність використання машинно-тракторного парку.

Практичні результати роботи – проаналізовано умови роботи та характер зносу деталей типу «вал» сільськогосподарських машин, обґрунтовано доцільність використання плазмового наплавлення для їх відновлення, визначено оптимальні технологічні параметри плазмового наплавлення порошковою сумішшю.

Рекомендації щодо використання результатів роботи – результати можуть використовуватись на ремонтних та сервісних підприємствах агропромислового комплексу при відновленні деталей типу «вал» сільськогосподарських машин.

Апробація. Основні положення виконаної роботи доповідались і обговорювались:

- на XI Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Інноваційні аспекти систем безпеки праці, цивільного захисту та захисту інтелектуальної власності» (Україна, Полтава, 16-17 квітня 2026 року).

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Короткий огляд умов зношування спряжень

При тривалій експлуатації машин зношування деталей супроводжується зниженням експлуатаційних показників, що, зокрема, викликає погіршення якості продукції, що виготовляється. Зношування робочих поверхонь деталей нерідко вимагає їхньої повної заміни. Це підвищує собівартість виробництва через великі амортизаційні відрахування [2, 3].

Можна зробити висновок, що основними видами несправностей в машинах є: порушення в спряженнях поверхонь заданої посадки, зниження опору матеріалу навантаженням циклічного характеру[4-9].

На основі всебічного вивчення видів тертя (чистого, сухого, граничного, напівсухого, напіврідинного та рідинного), факторів, що впливають на процес тертя (механічних, фізико-хімічних, теплових та електричних), а також інших досліджень такими вченими як Б.І. Костецький та ін. продовжено низку класифікацій видів зношування [4, 5, 8]. Існуючі класифікації мають дві мети [5, 8]: дати класифікацію видів зносу для його вивчення та боротьби з ним шляхом оцінки застосування різних матеріалів та сплавів, металопокриттів, зміцнюючої технології та інших заходів підвищення довговічності деталей машини.

Провідну роль виникнення того чи іншого виду зносу деталі відіграють умови роботи, обумовлені: властивостями довкілля; властивостями контактуючих матеріалів; динамічною взаємодією деталей та середовища [8]; величиною швидкості відносного ковзання поверхонь, що труться (для рухомих сполучень); величиною та характером впливу навантаження [5, 6] і т.п. За наявності певних переважаючих факторів виникають різні види зношування.

Більшість пар деталей виходить з ладу через природне механічне зношування, викликане зовнішнім тертям при відсутньому або безпосередньому впливі абразиву і великої кількості інших факторів, по-різному поєднуються в конкретних умовах експлуатації машини. При цьому процес зношування

обумовлений протіканням на поверхнях, що контактують, комплексу механічних, фізичних, хімічних і структурних змін.

Оскільки аналізовані процеси тертя і зношування є складними динамічними системами з великою кількістю змінних і взаємопов'язаних параметрів, що важко піддаються розрахункам [4], вивчення проблеми рівномірності [2, 6] стосовно деталей з малими величинами зношування багатьма вченими проводилися розрахунково-експериментальним шляхом.

З робіт дослідників випливає, що вали ведучих коліс, вали коробок передач, осі колінчасті та осі котків, спряжені з підшипниками кочення, зношуються в середньому на 0,01...0,04 мм [1, 10, 11]. За даними досліджень [1, 2] приблизно 53% автомобільних деталей вибраковуються при зносі 0,1 мм і 32% при зносі 0,1...0,3 мм.

Автором [1, 10] встановлено, що 59% валів тракторів вибраковувалися при зносі менше 0,1 мм та 26% при зносі в межах 0,1...0,3 мм на діаметр. Фундаментальні дослідження та узагальнення, проведені вченими за розподілом при вибракуванні сталевих деталей тракторів показали, що деталі зі зносом до 0,2 мм становлять 50...70% від загальної кількості деталей, що підлягають відновленню [10, 11].

Вивчення впливу вторинних процесів: питомого навантаження, швидкості відносного ковзання, середовища, що розділяє поверхні, роду і стану матеріалів, якості поверхонь, встановлено, що навантаження на опори більшості валів сягає 1 МПа. Руйнування поверхні деталей при експлуатаційних навантаженнях відбувається не тільки через їх деформування, але й втому металу, що виникає через багаторазове механічне перевантаження.

Активна хімічна дія середовища на матеріали сполучених деталей, взаємодія їх з киснем повітря, вплив підвищеної температури і вологості призводить до корозійного зношування, що є складовою загального процесу руйнування деталей машини.

Однією з причин зниження міцності з'єднань з початком явища ковзання поверхневих шарів валу щодо маточини, викликає фретинг-корозію посадкових

місць [7, 8]. Розвиток фретинг-корозії відбувається за наявності динамічного навантаження та малих переміщень деталей щодо один одного.

Стан структури металу, якість поверхонь, насамперед їх макро- та мікрогеометрія, мають вирішальний вплив на процес зношування. Встановлено, що найбільшу зносостійкість має дрібнозерниста структура. Підвищення вмісту вуглецю, легованих елементів кремнію, нікелю, хрому, марганцю, бору, молібдену та вольфраму сприяє підвищенню твердості та високої зносостійкості [4, 12].

1.2 Способи поверхневого зміцнення

В даний час розроблені та широко застосовуються в промисловості різні способи наплавлення металів. Дослідженню різних способів відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки методами нарощування металопокриттів присвячено роботи багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених [12-21].

Огляд результатів дослідження цих авторів дозволяє зробити висновок: зварювання та наплавлення – найбільш поширені способи відновлення зношених та пошкоджених деталей при ремонті машин і сільськогосподарської техніки, існують різні способи наплавлення – газова, електродугова, в середовищі вуглекислого газу, електроіскрова, лазерна, вібродугова, електроконтактна, плазмова та інші, кожен спосіб характеризується особливостями, що в сукупності визначають можливість застосування для відновлення конкретних деталей. Тому при напавленні прагнуть застосувати також способи, які, здатні забезпечуючи якість з'єднання, одночасно з максимальною продуктивністю і ефективністю процесу.

Високу продуктивність і якість наплавленого металу забезпечують автоматичним напавленням під флюсом [13-15]. Назва цього способу пов'язана з тим, що дуга при напавленні електродними матеріалами (дротом, стрічкою та ін.) прихована під шаром флюсу, попередньо насипаного на поверхню основного

металу.

Можливість наплавлення при великій силі струму і високій енергії забезпечує цьому способу високу продуктивність при хорошій якості металу, що наплавляється. Під флюсом можна отримувати шари металу майже будь-якого хімічного складу шляхом легування одним із трьох способів: застосування легованого електродного дроту; нанесенням легуючих домішок на поверхню деталі; застосуванням легуючих флюсів [5, 8]. Для наплавлення сталей з підвищеною твердістю та зносостійкістю практичне застосування знайшли: трубчастий порошковий дріт; наплавлення по дозованому шару феросплавів; легування наплавленого металу через керамічний флюс.

Водночас цьому способу наплавлення притаманні такі недоліки: більш висока вартість обладнання, ніж для ручного дугового наплавлення електродами; непридатність для наплавлення малих виробів складної форми; велика зона термічного впливу на основу деталі, що відновлюється (3...4 мм); наявність великих залишкових розтягуючих напружень, що знижують втомну міцність і викликають короблення деталі; низька ефективність при відновленні деталей із малими зносами.

Газове наплавлення – один із способів зварювання плавленням, що протікає в умовах часткового оплавлення основного металу при використанні високотемпературного полум'я, одержуваного при спалюванні суміші газу з киснем. Газ, що використовується при газовому напавленні, повинен задовольняти наступним трьом вимогам:

- 1) висока температура полум'я при згорянні;
- 2) висока швидкість горіння;
- 3) висока теплота згорання.

Ацетилено-кисневе полум'я, що забезпечує нагрівання до високих температур, найбільш прийнятне для газового наплавлення (або зварювання), тому саме поняття газового зварювання зазвичай асоціюється саме зі зварюванням цим полум'ям.

При напавленні, на відміну зварювання, бажана мала глибина

проплавлення основного металу, тому наплавлення виконують способом швидкісного зварювання (способом Лінда). При зварюванні (наплавленні) таким способом використовують пальник з соплом великого діаметру, нагріваючи основний метал полум'ям. При зварюванні з використанням горючої суміші, збагаченої ацетиленом, на поверхні металу осідають частинки відновленого вуглецю, утворюючи тонкий шар завтовшки близько 0,02 мм. Внаслідок зниження точки плавлення металу відбувається розплавлення тільки тонкому поверхневому шарі. Виникнення цього явища, що називається запотіванням, свідчить про готовність основного металу до газового наплавлення. Запотівання основного металу у поєднанні із застосуванням присадного матеріалу створює особливо сприятливу умову для газового наплавлення з незначним проплавленням основного металу. Поява запотівання дозволяє визначити момент нагрівання до температури наплавлення і точніше вибрати час подачі наплавного матеріалу.

Разом з тим поверхні при наплавленні цим способом виникає підвищення вмісту вуглецю в наплавленому металі, що несприятливо впливає на його механічні властивості та корозійну стійкість. У зв'язку з цим в даний час розглянутий спосіб застосовують тільки при наплавленні високохромистого сплаву на основі заліза, стеліту та інших високовуглецевих наплавочних матеріалів, тоді як при нанесенні покриттів з корозійно-стійкої сталі, для якої навуглецювання протипоказано, застосовують способи дугового наплавлення вольфрамовим електродом.

Газове наплавлення забезпечує наступні переваги:

- 1) незначне проплавлення основного металу;
- 2) можливість наплавлення дрібних деталей складної форми;
- 3) зменшення небезпеки виникнення тріщин, оскільки процес наплавлення включає попередній підігрів та подальше уповільнене охолодження;
- 4) низька вартість зварювального обладнання.

Водночас для газового наплавлення характерні й недоліки:

- 1) низька продуктивність при наплавленні масивних деталей, що

потребують тривалого попереднього підігріву;

- 2) висока кваліфікація зварювальника;
- 3) велика зона теплового впливу.

Газове наплавлення в даний час застосовують тільки в спеціальних областях (при виготовленні клапанів високотемпературних систем високого тиску, двигунів внутрішнього згорання тощо).

В основі вібродугового методу наплавлення – явище контактного зварювання металів та електричної дуги. Цей спосіб наплавлення відрізняється від звичайних зварювальних процесів наявністю коливань електрода з частотою 50...100 Гц, низькою напругою джерела зварювального струму 12...24 і проводиться в струмені охолоджуючої рідини або в газових середовищах. Крапля металу електродного дроту перетворюється на зварювальну ванну під час замикання електродного проміжку. Процес перенесення крапель характеризується циклічною зміною зварювального струму та напругою дуги. Наплавлюваний валик товщиною 0,5...2,5 мм інтенсивно охолоджується за рахунок тепловідведення в деталь, що охолоджується рідиною і загартовується, що призводить до виникнення напруженого стану самого шару, розвитку тріщин у наплавленому металі та зниження міцності деталі (до 60%).

Якість наплавленого шару покращується за допомогою статичного та динамічного зміцнення в гарячому стані [13, 20], електромагнітного впливу на процес шароутворення [8, 19] та інших методів.

Для відновлення деталей машин застосовують індукційні методи наплавлення [12, 18, 19]. Це наплавлення засноване на використанні струмів високої частоти. Переваги цього методу: висока продуктивність процесу (до 20 кг/год); висока якість наплавленого шару за шорсткістю поверхні, хімічним складом, щільністю та однорідністю; незначне проплавлення основного металу (10..5% товщини наплавленого шару) при високій міцності зчеплення зміцненого шару з основним матеріалом.

Індукційне наплавлення широко використовується при відновленні та зміцненні деталей, що піддаються інтенсивному абразивному зношуванню

(плоских і внутрішніх циліндричних поверхонь) і в деяких умовах є єдино допустимим. Однак для деталей типу «вал» з невеликими ступенями зношування його використання обмежене складністю технологічного процесу та особливостями металургійних процесів наплавлення (температура шихти відстає від температури основного металу).

Застосування лазера дає змогу отримувати покриття з високою твердістю, абразивною стійкістю та високою адгезійною міцністю [15, 16, 22]. Для формування покриттів, що компенсують знос, перед лазерною обробкою на поверхні деталей наносять зварювальний матеріал, який може бути у вигляді порошків, стрічок, дроту тощо.

Лазерний промінь, проходячи по підготовленій поверхні, розплавляє наповнювач і формує шар заданого складу з заданими властивостями. З метою зменшення термічного впливу зазвичай вибирають сплави на основі нікелю, так як вони мають температуру плавлення за величиною нижче, ніж сталі, до того ж нікелеві сплави відрізняються високою стійкістю до зносу, корозії та міцністю.

Однак вони порівняно дорогі [15, 16].

При лазерному наплавленні товщина покриттів, що забезпечує хорошу якість становить 0,1...1,0 мм. Твердість покриттів 8000...12000 МПа. Наплавлений шар має високий ступінь однорідності.

До дефектів в наплавленому шарі відносять наявність тріщин. У поверхневому шарі утворюються розтягуючі напруження, невеликої величини 100...800 МПа. Також процес лазерного зміцнення та відновлення потребує великих витрат електроенергії, дорогого обладнання та високої кваліфікації фахівців.

Перспективними при відновленні деталей є електроконтактне наплавлення та електромагнітне нанесення порошків. Сутністю, що супроводжує їх електрофізичні явища, оптимальні режими наплавлення та експлуатаційні властивості відновлених деталей займалася велика кількість дослідників.

До недоліків цих процесів слід віднести складність обладнання, механізації

та дозування металевого порошку.

Усі дослідники відзначають, що у деталей, відновлених наплавкою, зазвичай, знижуються динамічна і циклічна міцність. Це пояснюється загальними недоліками, більшою чи меншою мірою властивим усім металопокриттям: неоднорідною литою структурою, що володіє порівняно низькими механічними властивостями; наявністю різних дефектів зварювального або гартового характеру (пор, тріщин, шлакових включень тощо); збереженням у наплавному металі та зоні термічного впливу залишкових розтягуючих напружень. Залежно від виду та умов наплавлення основний вплив на якість металопокриттів можуть надавати ті чи інші причини. Тому для вирішення експлуатаційних показників машин при відновленні деталей застосовуються зміцнюючі методи обробки: поверхневе загартування з нагріванням ТВЧ або газовим полум'ям; поверхневе пластичне деформування; електромеханічна обробка та інші. Застосування перерахованих прийомів зміцнення підвищує механічні властивості та довговічність металопокриттів, але потребує додаткових витрат під час ремонту. Разом з тим перераховані методи наплавлення не дозволяють, як правило, отримувати тонкошарові покриття, що призводить до нераціонального використання дорогих легуючих елементів, що йдуть в стружку при механічній обробці.

У напрямку отримання тонкошарових високолегованих покриттів найбільш перспективними є електрофізичні способи наплавлення, такі як електроіскрова, електроімпульсна, лазерна і плазмова наплавлення.

Покриття, що одержуються цими способами, відрізняються: високою міцністю зчеплення з матеріалом основи; як правило, не вимагають попередньої підготовки; можливе нанесення покриттів не тільки з металів та їх сплавів, а й з композиційних матеріалів; дозволяють отримати біметалічну деталь з пластичною та міцною серцевиною та твердою зносостійкою поверхнею.

Дослідженнями встановлено, що зносостійкість деталей, покритих твердим сплавом, підвищується в 2...6 разів і утворюється міцне зчеплення

покриття з вихідним матеріалом внаслідок дифузії зміцнюючого металу поверхневий шар деталі [12, 18, 22].

При ручному електроіскровому нарощуванні низька продуктивність та якість покриттів [17, 18]. Механізація електроіскрового нарощування [18, 19] розробкою установок типу ЕФІ-10М, ЕФІ-11Б, ЕФІ-66 дозволила підвищити продуктивність та якість покриттів. Однак мала товщина шарів, що наносяться, і висока шорсткість поверхонь обмежують їх застосування у відновленій технології деталей спряження.

Збільшення потужності імпульсів струму призвело до створення та розвитку електроімпульсного способу нарощування покриттів, в якому традиційно збережена схема електроіскрового легування шляхом періодичного контактування електрода з поверхнею деталі, що відновлюється [17-19]. При пропусканні струму великої потужності електрод оплавляється та переноситься на деталь у рідкій фазі. Електроімпульсне нарощування дозволило збільшити товщину шару, при цьому ускладнився технологічний процес, знизилася втомна міцність деталей до 30...70% [6], нерівномірно розподіляється твердість та неоднорідна мікроструктура покриття.

Найбільш важливе місце серед технологій відновлення та зміцнення поверхонь деталей машин останнім часом займає плазмове напилення та наплавлення [12, 17]. Плазма є високотемпературним сильно іонізованим газом. Висока концентрація теплової енергії дає можливість використовувати її для нагрівання основного та присадкового матеріалу і завдяки цьому для отримання покриттів із матеріалів з високою температурою плавлення [12, 19].

При плазмовому напиленні відсутнє проплавлення поверхневих шарів основного металу, покриття виходять пористими за низької міцності зчеплення з основою. Як матеріали для отримання покриттів застосовуються: тугоплавкі метали (вольфрам, молібден, бориди, карбіди).

Відновленню деталей автотракторних двигунів методом плазмового напилення присвячено багато дослідження, в яких показано, що плазмова

технологія дозволяє отримати покриття з підвищеною зносокорозійною стійкістю, а також жароміцністю [13, 1]. Але цей спосіб поки що не знайшов широкого застосування. У роботі досліджено різні режими плазмового відновлення деталей двигунів автомобілів та тракторів порівняно з існуючою технологією відновлення зварюванням. Розроблено спосіб збільшення ресурсів відновлюваних деталей автотракторних ДВЗ з підвищеною міцністю зчеплення у 2 рази.

Стендові прискорені випробування двигунів СМД-60, 62, 64, а також КамАЗ-740, ЗІЛ-130 показали збільшення моторесурсу по відношенню до базового варіанта відновлення в середньому в 1,4 рази.

У роботі доведено, що напилення необхідно проводити закритим плазмовим струменем з подачею на поверхню деталі, що вийшла із зони плазмового напилення аргону, нагрітого до певної температури. Подібна суміш порошків ПН-851015, ПР-НД42СР та ПР-Х4Г2РС2Ф у співвідношенні 2:1:1 дає збільшення міцності зчеплення з 58,9 МПа до 100 МПа при зменшенні товщини покриття з 1,5 до 0,3 мм.

Висновки і постановка завдань досліджень

1. Для відновлення деталей машин застосовуються різні види наплавлення: індукційна за допомогою променя лазера; електроконтактне та електромагнітне нанесення порошків; електроіскрова, електроімпульсна та плазмова.

2. У деталей, відновлених наплавкою, як правило, знижуються динамічна і циклічна міцність, що пояснюється наявністю пор, тріщин, шлакових включень, збереженням у наплавному металі та зоні термічного впливу залишкових напружень, що розтягують.

3. Покриття, одержувані лазерною та плазмовою наплавками, відрізняються високою міцністю зчеплення з матеріалом основи, як правило, не вимагають попередньої підготовки, можливе нанесення покриттів з металів, їх

сплавів та композиційних матеріалів, дозволяють отримати біметалеву деталь з пластичною та міцною серцевиною та твердою зносостійкістю.

4. Для плазмового наплавлення застосовуються порошки на основі нікелю, кобальту та заліза. Присадка бору та кремнію знижують температуру плавлення сплаву, що дозволяє отримати тонкий шар металу наплавлення при малій мірі (менше 10%) проплавлення основного металу. Домішка бору підвищує твердість та зносостійкість металу наплавлення.

5. Аналіз літературних джерел показав, що є ще резерв підвищення ефективності використання плазмової наплавки шляхом комбінованих композиційних порошкових матеріалів з включенням бору, кремнію та інших елементів.

Виходячи з цього, були сформульовані основна мета і завдання дослідження.

Мета дослідження – підвищення зносостійкості та довговічності відремонтованих деталей типу «вал» машин сільськогосподарського призначення шляхом удосконалення технології плазмового наплавлення.

Завдання дослідження:

1. Обґрунтувати процентний вміст легуючих елементів та елемента-активатора в порошковій суміші, для забезпечення підвищеної твердості та зносостійкості деталей після плазмового наплавлення.

2. Визначити основні параметри режиму плазмового наплавлення, для отримання якісних шарів та міцного зчеплення металопокриття з металом деталі.

3. Уточнити функціональну залежність швидкості наплавлення від діаметра валу, що наплавляється.

4. Провести порівняльні експериментальні дослідження якості відновлення колінчастих валів плазмовою наплавкою з дослідним та стандартним порошками.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

2.1 Визначення параметрів плазмового наплавлення

Якість наплавленого металу залежить від багатьох параметрів [18]:

1. Сили струму стиснутої дуги J_{CB} , А:

$$J_{CB}=40\sqrt[3]{D} . \quad (2.1)$$

2. Напруження дуги U_d , В.

3. Витрати плазмо утворюючого газу Q_p , л/хв.

4. Витрати транспортуючого (захисного) газу $Q_{тр}$, л/хв.

5. Частоти обертання деталі n , хв⁻¹:

$$\left(n = \frac{1000 \cdot V_H}{60 \cdot \pi D} \right) , \quad (2.2)$$

де D – діаметр деталі;

V_H – швидкість наплавлення.

6. Діаметр каналу сопла:

$$d_c=(1/1,2)d_k , \quad (2.3)$$

де d_c – діаметр катода дорівнює 3 мм.

7. Довжини каналу сопла, поглиблення електрода в канал:

$$L_k=(1,1/1,3)d_c . \quad (2.4)$$

8. Швидкість подачі порошку (витрата порошку пр/хв) $Q_{пор}$.

9. Розміру гранулометричного складу (має бути 40-200 мкм).

10. Крок наплавлення (величини перекриття валиків $m = 0,4-0,7$) мм.

11. Величина усунення плазмотрону з zenіту z визначається кутом осі електрода до виробу 18-22°. Це необхідно для кристалізації зварювальної ванни і запобігання стіканню металу.

Збільшення J_{CB} призводить до перегріву наплавленого металу та

збільшення проплавлення основного металу (приводить до утворення гарячих тріщин.)

Стабільність процесу наплавлення та якість наплавленого шару значною мірою залежать від витрати плазмоутворювального та захисного газу, надмірна витрата якого призводить до видування рідкого металу або порошку. Потік захисного газу повинен спливати з сопла ламінарно та надійно захищати краплі розплавленого металу та всю розплавлену ванну від зіткнення з повітрям.

Швидкість наплавлення (лінійна) стала, змінюється лише частота обертання деталі залежно від її діаметра (формула 2.2).

Занадто велика швидкість веде до порушення формування поверхні і нерівномірної ширини шару, що наноситься.

Швидкість наплавлення у прямій залежності від частоти обертання деталі та швидкості закінчення (подачі) порошку.

При дотриманні техніки та виборі оптимальних параметрів режиму наплавлені вироби мають високі технологічні властивості.

Витрата плазмоутворюючого газу 5-6 л/хв.

Витрата газу, що транспортується 0,5-1 л/хв.

Крок наплавлення (подача) 2,5-3 мм/об.

Витрата порошку 2-го шару (при необхідності 10-20 гр/хв.).

2.2 Режими наплавлення

При наплавленні вуглецевої сталі зварюваність оцінюють за вуглецевим еквівалентом [13, 21]:

$$C_e = C = \frac{1}{6}Mn + \frac{1}{24}Si + \frac{1}{40}Ni + \frac{1}{5}Cr + \frac{1}{4}Mo + \frac{1}{50}B. \quad (2.5)$$

У зоні, що примикає до наплавленого шару, відбувається зміна властивостей основного металу під впливом температури наплавлення. У цій

зоні, яка називається зоною термічного впливу, метал має максимальну твердість і найбільшу чутливість до тріщин.

Підвищення вуглецевого еквівалента основного металу супроводжується максимальним підвищенням твердості у зоні термічного впливу.

Тому при наплавленні вуглецевої сталі вуглецевий еквівалент служить показником, що використовується для оцінки зварювальних властивостей металу.

Між вуглецевим еквівалентом та максимальною твердістю в зоні термічного впливу існує практично лінійна залежність:

$$H_{\max} = (600 C_e + 40) \pm 40, \quad (2.5)$$

де H_{\max} – максимальна твердість у зоні термічного впливу по Віккерсу (навантаження 100 Н);

C_e – вуглецевий еквівалент.

При наплавленні становить проблему утворення гарячих тріщин [20]. Виникнення тріщин пояснюється так. Під час кристалізації наплавленого шару на межах кристалічного зерна утворюється легкоплавкий розплав (евтетика), наявність якого на межах зерна стає причиною руйнування металу під впливом деформації усадки.

Для оцінки чутливості до гарячих тріщин Уілкінсон [20] запропонував показник, який розраховується за виразом:

$$K = \frac{C(S+P+\frac{Si}{25}+\frac{Ni}{100})}{3 Mn+Cr+Mo+V}. \quad (2.6)$$

Основний метал істотно впливає на склад і твердість наплавленого металу.

Вплив основного металу на твердість наплавленого металу перестає позначатися лише з третього шару.

Склад n-го шару наплавленого металу можна розрахувати за рівнянням [20]:

$$C_w = C_r + \left(\frac{P}{100}\right)^n (C_p - C_f), \quad (2.7)$$

де C_w – вміст елемента в n -му шарі наплавленого металу, %;

C_f – склад елемента в нерозбавленому металі, %;

C_p – вміст елемента в основному металі;

n – число наплавлених шарів;

P – ступінь проплавлення, %;

$$P = \left[\frac{A}{(A+B)} \right] \cdot 100, \quad (2.8)$$

де A – площа наплавленого металу по перерізу;

B – площа ділянки проплавлення основного металу по перерізу.

Якість наплавленого металу залежить від вибору режиму процесу. Застосування високої щільності струму призводить до підвищення тепловиділення в деталь, що супроводжується збільшенням обсягу рідкого металу та глибини наплавлення.

Силу зварювального струму J_{CB} , A , і напруга U, V , джерела живлення вибираємо за формулами:

$$J_{CB} = 40 \sqrt[3]{D}; \quad (2.9)$$

$$U = 21 + 0,04 J_{CB}, \quad (2.10)$$

де D – діаметр деталі.

Зі зростанням сили струму збільшується глибина проплавлення, у той час як підвищення напруги забезпечує більшу рухливість плазми, що дещо знижує глибину проплавлення та робить наплавлення ширшим.

Швидкість наплавлення характеризується коефіцієнтом наплавлення, $g/(A \cdot t)$, що визначається за формулою:

$$K_H = 2,3 + 0,065 \frac{J_{CB}}{d}, \quad (2.11)$$

де d – діаметр плазмової дуги, мм.

Швидкість переміщення плазмотрона або швидкість наплавлення, м/год

обумовлюється шириною наплавлення і глибиною проплавлення і може бути знайдена за формулою:

$$V_H = \frac{K_H I_{CB}}{F \cdot \gamma \cdot 100^2} \quad (2.12)$$

де F – площа поперечного перерізу наплавленого шару, см^2 ;

γ – густина металу шва, г/см^3 .

Підставивши вираз (2.9) та (2.10) у формулу (2.12), отримаємо:

$$V_H = \frac{\left(2,3 + 0,065 \cdot \frac{40 \sqrt[3]{D}}{d}\right) \cdot 40 \sqrt[3]{D}}{F \cdot \gamma \cdot 100}, \quad (2.13)$$

Оскільки площа поперечного перерізу наплавленого шару дорівнює $B \cdot H$, то:

$$V_H = \frac{\left(2,3 + 0,065 \cdot \frac{40 \sqrt[3]{D}}{d}\right) \cdot 40 \sqrt[3]{D}}{B \cdot H \cdot \gamma \cdot 100}, \quad (2.14)$$

Враховуючи, що при наплавленні ширина шва повинна укладатися в ширину зони гарантованої змочуваності, то [1]:

$$B = B_{\max} = 4 \sqrt{\gamma n \frac{T_{\max}}{T_{\min}}} a (t_0 - t), \quad (2.15)$$

де T_{\max} – максимальна температура нагріву поверхні деталі в центрі п'ятна нагріву;

T_{\min} – мінімальна температура поверхні основного металу, при якій можливе змочування його наплавленим рідким металом;

a – коефіцієнт теплопровідності основного металу;

t_0 – постійна часу;

t – тривалість процесу змочування основного металу ($t=0$).

Постійна часу t_0 знаходиться за виразом [1]:

$$t_0 = \frac{1}{4ak^2}, \quad (2.16)$$

де k – Коефіцієнт зосередженості ($k = 0,36$).

Підставляючи вирази (2.15) та (2.16) у формулу (2.14) знайдемо:

$$V_H = \frac{2,3\sqrt[3]{D} + \frac{2,63}{d}\sqrt{D^2}}{10H \cdot \gamma \cdot \sqrt{\gamma n \frac{T_{max}}{T_{min}} a \left(\frac{1}{4ak} - t \right)}}. \quad (2.17)$$

Ми отримали формулу визначення швидкості наплавлення (м/год).

Використовуючи вираз (2.2) і підставляючи в нього числові значення, визначене за формулою (2.17) можна отримати частоту обертання деталі задаючи різні значення її діаметра за умови постійного значення швидкості наплавлення, м/год (рис. 2.1).

Рисунок 2.1 - Графік залежності частоти обертання деталі від діаметра наплавлюваної шийки валу

3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Методологічна схема проведення досліджень

Аналіз формування металопокриттів, впливу природи матеріалу на утворення шару та встановлення деяких закономірностей формування покриття із заданою товщиною дозволили отримати деякі передумови, що показують можливість отримання щільних високочносостійких металопокриттів. Однак ці передумови та припущення щодо взаємозв'язку параметрів процесу, а також виведення теоретичної залежності вимагали експериментальної перевірки та дослідження.

Експериментальними дослідженнями процесу нанесення покриттів плазмовим способом на деталі передбачалося вирішення трьох основних завдань цього дослідження. Такими основними завданнями, як ми вважаємо, є

1. Вибір оптимальних порошкових наплавальних сумішей.
2. Визначення та встановлення основних параметрів та режимів способу, що забезпечують отримання якісних шарів та міцне зчеплення отриманого покриття з металом деталі (зразка).
3. Визначення працездатності одержаних металопокриттів. Відповідно до поставлених завдань було передбачено поетапне проведення дослідження.

На першому етапі дослідження передбачалося виявлення основних залежностей та параметрів плазмового способу нанесення покриття, а також з'ясування ступеня впливу цих параметрів на кількість і якість шару, що наноситься.

Передбачалося, що основними параметрами, що визначають процес та результати нанесення шару, є сила струму, напруга, продуктивність. Передбачалося виявити ступінь впливу зазначених параметрів на якість покриття з використанням порошкових сумішей.

На цьому етапі передбачалося виявити оптимальний склад комплексної залізо-боро-хромо-нікелевої основи та вплив основних легуючих елементів на

щільність покриття, якість зчеплення отриманого шару, його твердість та зносостійкість. Крім того, передбачалося враховувати і такі технологічні показники, як тепловий вплив на метал зразка, швидкість нанесення металопокриття, втрати порошку та перевірити раніше виведені технологічні залежності.

Наприкінці дослідження передбачалося проведення відновлення плазмовим способом зношених поверхонь у кількох реальних деталей двигунів тракторів та комбайнів.

3.2 Експериментальна установка та прилади

Виходячи зі способу отримання покриття на циліндричній деталі, що відновлюється, по гвинтовій лінії в якості бази для експериментальної наплавної установки був прийнятий токарно-гвинторізний верстат типу 1М63 (рис. 3.1).

Рисунок 3.1 - Токарно-гвинтовий верстат 1М63 переобладнаний для
наплавлення

На токарно-гвинтовому верстаті 1М63, переобладнаному для наплавлення колінчатих валів і деталей типу «вал» частота обертання шпинделя змінювалася від 0,3 до 10 хв⁻¹, на установці виконано кріплення плазмотрона та порошкового

живильника на супорті верстата за допомогою стійки ізолюваної від маси верстата.

Основним робочим органом у комплекті оснащення є плазмотрон, який служить для створення та стабілізації стиснутої електричної дуги (плазми) палаючої між електродом плазмотрона і наплавленим виробом у потоці плазмоутворюючого газу (аргону).

Плазмотрон (рис. 3.2) складається з корпусу 4, сопла 5, ізолюючої втулки 2, електрода 1, трубки 3 для подачі охолоджувальної води до вольфрамового наконечника електрода.

Рисунок 3.2 - Розріз плазмотрону

1 - вольфрамовий електрод, 2 - ізолювана втулка, 3 - трубка, 4 - плазмотрон із міді, 5 - плазмоутворююче сопло

Корпус плазмотрону має бути виготовлений із чистої міді М1 МО. Для забезпечення надійної подачі газу необхідно, щоб торець ізолюючої втулки 2 розташовувався по зрізу отвору подачі аргону.

Плазмоутворююче сопло 5, виготовлене з чистої міді М1 МО запресовано в корпус плазмотрона, за рахунок чого забезпечується щільний контакт сопла з водоохолоджуваним корпусом плазмотрона. Зміну плазмоутворюючого сопла можна здійснювати без виключення подачі води в плазмотрон.

Важливим вузлом плазмотрона є катод – електрод, що складається з мідної основи у вигляді водоохолоджуваної трубки 3, припаяної до активної вольфрамової вставки діаметром 3 мм з гостро заточеним кінцем,

відцентрованим щодо каналу плазмоутворюючого сопла. Порушення центрування може спричинити:

- ненадійне збудження дуги;
- швидке зношування сопла внаслідок ексцентричного його оплавлення;
- вихід з ладу сопла та електрода внаслідок утворення подвійної дуги.

Під час зношування катода напруженість стовпа дуги змінюється, що позначається на ефективності нагрівання частинок порошку та формування наплавленого шару.

Поверхня сопла та наконечник електрода не повинні мати напливів, задирок, бризок металу, нагару.

Струм до сопла для живлення чергової дуги підводиться через корпус плазмотрона 4 та трубки підведення води. Герметизація порожнини плазмоутворюючого газу забезпечена втулкою 2 за рахунок її щільної посадки на електрод 1 і корпус плазмотрона. Електрод 1 виготовлений із лантонованого або ітрованого вольфраму.

Струмознімач призначений для підключення зварювального кабелю з негативним потенціалом від джерела живлення до електрода плазмотрону.

Тримач плазмотрона виготовлений з діелектричних матеріалів і призначений для кріплення плазмотрона до стійки кріплення струмознімача, а також для забезпечення надійної ізоляції між електродом та корпусом плазмотрона між електродом і стійкою.

Охолодження електрода, сопла плазмотрону та трубки подачі порошку послідовне. Порошковий живильник складається з дозатора, барабана, приводу порошкового живильника, бункера для порошкових матеріалів, сполучних шлангів.

Як привод порошкового живильника використовується привід склоочисника з двигуном постійного струму на 12 В у зборі з черв'ячним редуктором, на вихідний вал якого встановлений барабан.

На корпусі редуктора закріплено дозатор. Змінюючи частоту обертання барабана на пульті, можна плавно регулювати витрату порошку по вольтметру.

Застосування транспортуючого газу забезпечує збільшення швидкості руху частинок порошкового матеріалу, за рахунок чого вони надходять до серцевини факела.

Потоки плазми та розплавленого металу повинні бути спрямовані перпендикулярно поверхні зварювальної ванни. Розплавлений метал повинен надходити у ванну тільки на відстані 2-3 мм від її головної частини, тому подача порошку трубкою 2 повинна бути плавною строго перпендикулярно до осі каналу сопла (рис. 3.3)

Рисунок 3.3 - Принципова схема розташування валу і плазмотрону

Перед наплавленням попередньому підігріву піддаються колінчасті вали зі сталі з вмістом вуглецю $C > 0,45\%$. Попередній підігрів необхідний для запобігання появі тріщин у наплавленому шарі, а також видалення конденсату, мастила з поверхні шийки та виявлення тріщин у основі металу. Зона нагріву шийки (0,3 - 0,5) ширини шийки. Температура нагрівання $180^{\circ}\text{C} - 220^{\circ}\text{C}$ до появи характерного кольору. Деталі типу «вал» $\varnothing < 60$ мм – без підігріву.

Наплавлення роблять [13, 14, 21] по ширині шийки, не доходячи до жолобів 3 мм. Це необхідне для збереження динамічної міцності колінчастого валу. У міру наплавлення окисні та шлакові включення збивати та шов простукують мідною киянкою – ущільнюють. Вибір товщини наплавленого

шару ведеться залежно від величини зношування. Діаметр наплавленої шийки підсумовується з номінального або необхідного розміру та припуску на механічну обробку.

$$D_{\text{напл}} = d_{\text{ном}} + \delta, \quad (3.1)$$

де $d_{\text{ном}}$ – номінальний розмір, мм;

δ – припуск на механічну обробку, мм (2,5).

Наприклад, діаметр зношеної шийки біля валу двигуна СМД 60 до 2,5 мм.

Номінальний діаметр корінної шийки 92,25 мм.

$92,25 + 2,5 = 94,75$ мм – діаметр наплавленої шийки.

Товщина шару, що наплавляється, складе $94,75 - 92,25 = 2,5/2 = 1,25$ мм – на сторону.

Якщо одного шару недостатньо, необхідно наплавити 2-й шар з перервою за часом 5-7 хв.

До складу експериментальної установки входять: плазмотрон, порошковий живильник, джерело живлення, пульт керування з контрольно-вимірювальною апаратурою (вольтметр, амперметр, пристрій для дозування), а також апаратура для вимірювань зразків після наплавлення (табл.3.1).

Таблиця 3.1 – Перелік апаратури під час проведення експерименту

Найменування	Тип
Металографічний мікроскоп	МІМ-7
Ваги аналітичні	АДВ-200
Прилад для вимірювання мікротвердості	ТП-7Р-1
Твердомір	ТК-2М
Профілограф-профілометр	Калібр-201
Емісійний – спектрометр	«SPECTROLAB»
Головка індикаторна годинникового типу з ціною поділу 0,01 мм	
Мікрометри з межами 0-25,25-50, 50-75	

Деталі автомобілів, тракторів та інших сільськогосподарських машин виготовляються з різних марок сталей, чавунів та ін. Для важко навантажених відповідальних деталей застосовують леговані сталі марок 18ХГТ, 30ХГТ, а деталей, які працюють у умовах тертя, – марганцеві сталі марок 20Г, 40Г, 65Г [10, 23]. Однак переважна більшість автотракторних деталей типу валів і осей,

що відновлюються різними способами, виготовляють із сталі 45, тому як зразки для дослідження ми взяли колінчасті вали двигунів Д-440, ЯМЗ-240 і вали комбайнів.

Оскільки у більшості автотракторних деталей знос становить 0,15 мм на бік, товщина покриття, що наноситься, обмежувалася величиною, що дорівнює 1,2 мм з урахуванням припуску на механічну обробку. Як зразок був узятий колінчастий вал двигуна Д-440 виготовлений зі сталі 45 хімічного складу: С - 0,47%, Сг - 0,2, Мп - 0,79 і Р - 0,018% зі зношеними шатунними і корінними шийками до 0,2 мм на діаметр.

Плазмова наплавка проводилася безпосередньо після підігріву за температури 180°C...220°C (рис. 3.4). Спочатку наплавлялися шатунні шийки, потім корінні.

Рисунок 3.4 - Попередній підігрів шийки колінчастого валу

У дослідях за основу для складання композицій використовувалися порошкові суміші та сплави з добавками порошкових композицій. За гранулометричним складом застосовувалися порошки 40...100 мкм.

На якість металопокриття великий вплив мають режими наплавлення [1] (робочий струм, напруга, швидкість наплавлення). При нанесенні металопокриттів по гвинтовій лінії з перекриттям шарів особливого значення набуває крок наплавлення. Відомо, що зі збільшенням кроку наплавлення

покращується зчеплення з основним металом, його середня твердість.

При зварювальних процесах крок наплавлення вибирається таким, щоб наступний валик перекривав попередній на $1/4...1/2$ його ширини.

На підставі вище викладеного після попередніх дослідів було прийнято такі режими нанесення металопокриттів:

- сила струму стиснутої дуги, А – 230...240;
- напруга дуги, В – 20...30;
- витрата плазмоутворюючого газу, л/хв – 5...6;
- витрата транспортуючого (захисного) газу, л/хв – 0,5...1;
- швидкість наплавлення, м/год – 40...42;
- витрата порошку, г/хв – 40...50;
- гранулометричний склад порошку, мкм – 40...200;
- крок наплавлення, мм/об – 2...3;
- частота обертання валу, хв⁻¹ – 2...3;
- відстань від сопла до деталі, мм – 10...11.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1 Дослідження впливу частоти обертання деталі, продуктивності та режимів наплавлення на формування металопокриттів

Рисунок 4.1 - Залежність товщини шару Н та зони термічного впливу від сили робочого струму та частоти обертання деталі %:

△ 180А ▲ 180А А - 180А; □ 230А ■ 230А В - 230А; ○ 250А ● 250А С - 250А

4.2 Дослідження мікроструктури

Рисунок 4.2 - Мікроструктура наплавленого шару марки (ПР-Н4Д2М):
а) шар наплавлення; б) перехідний шар наплавлення в основний метал

Рисунок 4.3 - Мікроструктура наплавленого шару марки (ПР-400Н25С6Г3Х3Р):
а) шар наплавлення; б) перехідний шар наплавлення в основний метал

4.3 Зносостійкість та втомна міцність наплавленого металопокриття

Рисунок 4.4 - Графік нанесення зразків:

- 1 - наплавлення експериментальним порошком марки ПР-400Н25С6Г3ХЗР;
2 - наплавлення порошком марки ПР-Н4Д2М

Таблиця 4.1 – Знос зразків (валу) наплавлених різним складом порошкової суміші та колодки (втулки)

Число оборотів, тис.□	Марка порошку□	Зношування ролика (валу), мг□	Зношування колодки (втулки), мг□
18□	ПР-400Н25С6Г3ХЗР□	28□	200□
36□		45□	400□
54□		95□	650□
72□		140□	900□
18□	ПР-Н4Д2М□	35□	450□
36□		85□	600□
54□		120□	850□
72□		155□	1050□

Висновки за результатами експериментальних досліджень

1. Товщина наплавленого шару, кількість матеріалу, що переноситься на деталь, глибина зони термічного впливу і глибина ерозійного впливу (зняття) залежать від швидкості обертання деталі і потужності режимів. Кожному значенню сили струму відповідає певна величина швидкості обертання деталі, при якій створюються умови узгодженості в часі кількості електричної енергії, що підводиться, з подачею робочого порошку в плазму, а приріст металопокриття і товщина шару мають максимальну позитивну величину.

Зі зменшенням частоти обертання деталі V_d від 3,5 до 1,5 хв^{-1} , товщина шару змінюється H_{\max} від 1,12 до 1,36 мм і різко знижується. Якісному формуванню шару відповідає такі технологічні режими: сила робочого струму $J = 230\text{А}$, напруга джерела $U = 30\text{В}$, швидкість обертання деталі $V_d = 2,3...2,7\text{ хв}^{-1}$ і продуктивність процесу $C = 40...42\text{ м/год}$.

При оптимальних технологічних параметрах і товщині шару, що дорівнює 1,2 мм, зона термічного впливу не перевищує 0,6 мм, а величина ерозії становить 0,06...0,1 мм і знаходиться у межах припуску на механічну обробку.

2. Гарне узгодження теоретичних та експериментальних даних дає підставу рекомендувати формулу (2.17) для застосування в розрахунках щодо визначення швидкості формування металопокриттів при плазмовій наплавці.

3. Підвищення вмісту нікелю в суміші на залізо-нікель-мідній основі типу ПР-Н4Д2М підвищує кількість матеріалу, що переноситься на деталь і якісні показники шару. Зміною вмісту в суміші легуючих елементів вуглецю, хрому, нікелю та введення бору змінюються фізико-механічні властивості покриттів: мікротвердість HV_{726} ; зносостійкість, товщина шару $H = 1,20...1,36$ та

пористість $\Pi = 2...20\%$. При цьому найменшій пористості 2% відповідає мінімальна товщина шару 1,20 мм, що наноситься, при наступному вмісті легуючих елементів С - 4,0%, Сг - 3,1%, В - 0,57%, Ні - 24,9%.

4. Твердість, зносостійкість і міцність зчеплення металопокриттів, що наносяться сумішшю складу ПР-400Н25С6Г3Х3Р, підвищується на 15...20% порівняно з наплавленням стандартним порошком ПР-Н4Д2М при швидкості наплавлення 40...42 м/год і частоти обертання деталі 2,3...2,7 хв⁻¹.

5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

5.1 Екологічна експертиза

Екологічна експертиза – це діяльність експертів, врегульована відповідними нормативно-правовими актами, що полягає в аналізі, перевірці та оцінці документації, проектів та рішень щодо їх відповідності вимогам охорони навколишнього природного середовища та раціонального використання природних ресурсів [24]. Її основним призначенням є запобігання можливим негативним наслідкам для довкілля.

Основними цілями екологічної експертизи є:

- науково обґрунтоване визначення відповідності проектних рішень сучасним екологічним вимогам до їх затвердження уповноваженими державними органами;
- запобігання негативному впливу на екосистеми з боку діючих чи запланованих об'єктів у процесі їх функціонування чи реалізації.

Екологічна експертиза може здійснюватися в різних формах: державній, громадській та інших. Її проведення є обов'язковою умовою здійснення господарської чи іншої діяльності, яка може впливати на стан навколишнього природного середовища.

Процес проведення еколого-експертної оцінки включає три основні етапи [25]:

- підготовчий етап – перевірка наявності необхідної інформації та відповідності поданих проектних матеріалів вимогам законодавства;
- основний (аналітичний) етап – детальне дослідження та аналіз даних щодо об'єктів експертизи;
- завершальний етап – узагальнення результатів, оцінка отриманих даних та підготовка експертного висновку.

Екологічні аспекти відіграють важливу роль у галузі машинобудування, оскільки ця галузь істотно впливає на довкілля. Особливо це актуально в

сучасних умовах розвитку технологій та впровадження нових виробничих процесів та модернізованої техніки в Україні.

Екологічна експертиза спрямована на підготовку висновків щодо відповідності запланованої або вже здійснюваної діяльності вимогам законодавства у сфері охорони довкілля, раціонального використання та відтворення природних ресурсів, а також забезпечення екологічної безпеки.

Основними завданнями екологічної експертизи є регулювання громадських відносин у цій сфері з метою гарантування екологічної безпеки, охорони навколишнього середовища, раціонального використання природних ресурсів та захисту екологічних прав та законних інтересів громадян.

Головна мета екологічної експертизи полягає у запобіганні негативному впливу антропогенної діяльності на природне середовище та здоров'я населення, а також у визначенні рівня екологічної безпеки господарської діяльності та оцінці екологічного стану окремих територій та об'єктів [24].

Технологічні процеси в сільському господарстві повинні базуватися на екологічно обґрунтованих та раціональних нормах.

Відповідно до теми дослідження, джерелом можливого забруднення довкілля виступає ремонтна майстерня. Функціонування ремонтної майстерні та прилеглої території, зокрема складу для зберігання нафтопродуктів, може впливати на стан довкілля. У зв'язку з цим пропонуються певні заходи, спрямовані на запобігання його забрудненню.

У ремонтній майстерні основними джерелами забруднення атмосферного повітря є технологічне обладнання, встановлене на її території. Відповідно до загальних санітарно-гігієнічних вимог встановлено гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі виробничих приміщень: сірчистий ангідрид – 10 мг/м³, оксид вуглецю – 20 мг/м³, діоксид азоту – 5 мг/м³, тверді частинки – 1 мг/м³ [25].

Для підтримання належної якості повітря, крім існуючої вентиляційної системи, необхідно встановити додаткові пристрої очищення повітря від забруднюючих речовин. Зокрема, для видалення пилу пропонується включити

до загальної вентиляційної системи циліндричний циклон типу ЦН-15, який ефективно очищує повітря від пилових частинок.

Також пропонується використання місцевої вентиляції з очищенням повітря у сопловому вихровому пиловловлювачі, що забезпечує ефективне уловлювання дрібнодисперсних частинок розміром менше 3 мкм [26].

Джерелами забруднення ґрунтів та ґрунтових вод можуть бути паливно-мастильні матеріали та стічні води санітарно-побутових приміщень. Стічні води майстерні підлягають попередній нейтралізації шляхом змішування у фільтр-відстійнику, після чого пропускаються через вапняний розчин. В результаті цього процесу відбувається їх повна нейтралізація, після чого вода може направлятися у накопичувальний басейн для подальшого повторного використання.

Відпрацьовані технічні рідини, мастила та відстії дизельного палива збираються окремо в герметичні ємності, де вони відстоюються протягом двох місяців. Після цього їх перекачують в автоцистерні та транспортують до пунктів збору відпрацьованих мастил і технічних рідин на нафтобазі. Зважаючи на можливі затримки з вивезенням цих відходів, необхідно забезпечити регулярний контроль за їх своєчасним вивезенням та не допускати попадання нафтопродуктів у ґрунт.

Отже, запропоновані заходи сприятимуть мінімізації негативного впливу ремонтної майстерні на довкілля під час сервісного обслуговування та ремонту сільськогосподарської техніки.

5.2 Охорона праці

5.2.1 Актуальність проблеми безпеки людини у виробничому середовищі

Актуальність проблеми безпеки людини у виробничому середовищі зумовлена постійним розвитком промисловості, ускладненням технологічних

процесів та широким застосуванням сучасної техніки та обладнання. У процесі трудової діяльності працівники часто піддаються впливу різноманітних небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які можуть негативно впливати на їхнє здоров'я, працездатність та навіть життя. До таких факторів належать механічні, хімічні, фізичні та біологічні фактори, а також психофізіологічні навантаження [27-29].

Забезпечення безпечних умов праці є одним із найважливіших завдань сучасного виробництва. Це пов'язано з необхідністю збереження життя та здоров'я працівників, підвищення ефективності праці та зменшення кількості виробничих травм та професійних захворювань. Наявність безпечного виробничого середовища сприяє підвищенню продуктивності праці, покращенню морально-психологічного клімату в колективі та зниженню економічних втрат підприємства.

Особливо актуальним це питання є у сфері технічного обслуговування та ремонту машин та обладнання, де працівники мають справу з підвищеними ризиками: рухомими механізмами, електричним струмом, підйомно-транспортними засобами, шкідливими речовинами, підвищеним рівнем шуму та вібрації. Недотримання вимог охорони праці або неправильна організація робочого місця можуть призвести до нещасних випадків та аварійних ситуацій [29].

Тому важливим напрямом діяльності підприємств є розроблення та впровадження комплексу організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та профілактичних заходів, спрямованих на створення безпечних умов праці. Значну роль у цьому відіграє система управління охороною праці, яка передбачає навчання працівників правилам безпеки, контроль за дотриманням нормативних вимог, застосування засобів індивідуальної та колективної захисту, а також постійне удосконалення виробничих процесів.

Таким чином, проблема безпеки людини в виробничому середовищі

залишається надзвичайно актуальною і потребує комплексного підходу до її вирішення. Створення безпечних умов праці є важливою передумовою збереження здоров'я працівників, підвищення ефективності виробництва та забезпечення сталого розвитку підприємств.

5.2.2 Вимоги з охорони праці при плазмовому наплавленні

Вимоги з охорони праці при плазмовому наплавленні спрямовані на забезпечення безпечних умов праці під час виконання робіт, пов'язаних із застосуванням високих температур, електричної енергії, стиснених газів та інтенсивного випромінювання. Дотримання цих вимог дозволяє запобігти травмам, опікам, ураженню електричним струмом та впливу шкідливих виробничих факторів [27-28].

До виконання робіт з плазмового наплавлення допускаються особи, які:

- досягли 18-річного віку;
- пройшли медичний огляд;
- пройшли спеціальне навчання та інструктаж з охорони праці;
- ознайомлені з правилами експлуатації обладнання та пожежної безпеки.

Працівник повинен знати будову установки для плазмового наплавлення, правила користування обладнанням, а також способи надання першої допомоги при нещасних випадках.

Робоче місце повинно бути обладнане:

- справною вентиляційною системою для видалення шкідливих газів та аерозолів;
- захисними екранами для запобігання впливу ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання;
- засобами пожежогасіння (вогнегасниками, ящиками з піском);
- заземленням електрообладнання.

Освітлення робочої зони повинно відповідати санітарним нормам, а проходи та робочі майданчики мають бути вільними від сторонніх предметів.

Перед початком роботи необхідно:

- перевірити справність плазмової горілки, джерела живлення та системи подачі газу;

- переконатися у надійності з'єднання електричних кабелів та заземлення;

- перевірити герметичність газових шлангів та редукторів;

- підготувати необхідні засоби індивідуальної захисту.

Під час виконання плазмового наплавлення забороняється:

- працювати зі знятим або несправним захисним обладнанням;

- торкатися струмопровідних частин установки;

- виконувати роботи у вологому одязі або взутті;

- працювати при несправній вентиляції.

Працівник повинен використовувати засоби індивідуальної захисту:

- захисну маску або щиток зі світлофільтром;

- вогнестійкий спецодяг;

- захисні рукавиці;

- спеціальне взуття;

- респіратор при роботі у приміщеннях із підвищеною концентрацією аерозолів.

Під час плазмового наплавлення забороняється зберігати поблизу робочого місця легкозаймисті матеріали. Газові балони повинні зберігатися в спеціально відведених місцях та бути надійно закріпленими. У разі виникнення пожежі необхідно негайно припинити роботу, відключити обладнання від електромережі та скористатися засобами пожежогасіння.

Після завершення робіт необхідно:

- вимкнути джерело живлення установки;

- перекрити подачу газу;

- упорядкувати робоче місце;
- перевірити відсутність тліючих матеріалів чи джерел займання.

Таким чином, суворе дотримання вимог охорони праці під час плазмового наплавлення забезпечує безпечні умови роботи, знижує ризик травматизму та сприяє збереженню здоров'я працівників.

5.2.3 Аналіз формування травмонебезпечних ситуацій

Аналіз потенційно небезпечних умов, які існують або можуть виникати безпосередньо в процесі виробництва, показав, що їх можна поділити на кілька основних груп [29]:

- умови, що визначають рівень небезпеки виробничого обладнання або робочого місця, пов'язані з конструктивними недоліками окремих вузлів чи машин;
- фактори, що призводять до помилок працівників у процесі роботи – зокрема, низький рівень кваліфікації та недостатні знання з питань охорони праці;
- обставини, що створюють ризик потрапляння працівників у небезпечну зону через відсутність належного контролю за дотриманням вимог безпеки, а також інші подібні причини.

Будь-яке порушення цілісності організму або порушення його функцій під впливом небезпечного фактора визначається як травма.

Якщо травмування людей стало наслідком аварії технічної системи, то цей випадок слід розглядати як подію, спричинену аварійною ситуацією. Це особливо актуально для систем, у складі яких одночасно функціонують людина та машина.

У разі виходу з ладу обладнання чи його окремих елементів, що призвело до раптової зупинки роботи та значних матеріальних збитків, таке явище визначається як аварія.

Оскільки в людино-машинних системах механізми виникнення травм та аварій мають спільні риси, надалі ці процеси розглядаються паралельно.

Розроблення на підприємстві планів запобігання, локалізації та ліквідації пожеж, а також регулярне проведення тренувань персоналу дає змогу уникнути надзвичайних ситуацій або мінімізувати їх наслідки.

5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження проектних рішень

Економічний ефект від впровадження розпиленого порошку при плазмовому наплавленні визначаємо за собівартістю відновлених колінчастих валів двигуна ЯМЗ-240 у порівнянні з собівартістю наплавлених валів за базовою технологією.

Відповідно до методики [30], розрахунок річного економічного ефекту від застосування нового технологічного процесу відновлення деталей плазмовим наплавленням проводився за формулою:

$$E = (Z_1 - Z_2)A_r, \quad (5.1)$$

де E – економічний ефект, грн.;

Z_1 і Z_2 – наведені витрати відновлення однієї деталі, що виробляються за допомогою базової та нової технології, грн.;

A_r – річний обсяг відновлення деталей за допомогою нової технології.

Наведені витрати відновлення одного колінчастого валу є сумою собівартості відновлення та нормативного прибутку.

$$Z_1 = C_1 + E_B \cdot K_1, \quad (5.2)$$

$$Z_2 = C_2 + E_B \cdot K_2, \quad (5.3)$$

де C_1 і C_2 – собівартість відновлення за базовою та новою технологіями, грн.;

K_1 і K_2 – питомі капітальні вкладення у виробничі фонди за базовою та новою технологіями відновлення, грн.;

E_B – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, $E_B = 0,15$.

Колінчасті вали, відновлені плазмовим наплавленням зі зміненим композиційним складом у відсотковому співвідношенні і введенням бору до 1%, мають поліпшені якісні показники, в результаті яких підвищується довговічність. Показником довговічності є коефіцієнт відносної довговічності, визначений співставлення коефіцієнтів довговічності деталей, відновлених базовим і новим способами:

$$n = \frac{K_o}{K_N} \quad (5.4)$$

де K_o – коефіцієнт довговічності деталі відновлений базовим способом;

K_N – коефіцієнт довговічності деталі відновленої за новою технологією.

Річний економічний ефект від застосування нового способу відновлення деталі з урахуванням коефіцієнта довговічності розраховується за формулою:

$$\epsilon = (C_2 - C_1 n) A_r, \quad (5.5)$$

де A_r – річний обсяг відновлення колінчатих валів.

Собівартість плазмового наплавлення одного колінчастого валу складе за новою технологією:

$$C_1 = Z_{\text{п}} + A + C_{\text{м}} + C_{\text{ел}} + (P_{\text{пр}} + H_{\text{р}}), \quad (5.6)$$

де $Z_{\text{п}}$ – заробітна плата виробничих робітників з нарахуваннями;

A – амортизаційні відрахування;

$C_{\text{м}}$ – вартість основних матеріалів;

$C_{\text{ел}}$ – вартість електроенергії;

$P_{\text{пр}}$ – інші витрати;

$H_{\text{р}}$ – накладні витрати.

Основну частку у визначенні собівартості складає заробітна плата робітників:

$$Z_{\text{пл}} = T_{\text{м}} C_{\text{п}} K_{\text{п}}, \quad (5.7)$$

де $T_{\text{м}}$ – трудомісткість ремонту одного колінчастого валу, люд.;

$C_{\text{п}}$ – середня тарифна ставка, грн. 1 год. робочого часу;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт, що враховує доплати до основної заробітної плати робітників.

Відповідно до нормативів годинна ставка робітника при наплавленні становить 150 грн., а при шліфуванні 120 грн., амортизаційні відрахування становлять 10% сумарної зарплати, тобто 27 грн.

Вартість матеріалів, тобто. вартість порошку $C_M = 750 \times 4 = 3000$ грн.

Витрата електроенергії на наплавлення одного колінчастого валу з потужністю установки 25 кВт:

$$C_{\text{ел}} = C_{\text{кВт}} \cdot K_{\text{ел}}, \quad (5.8)$$

де $C_{\text{кВт}}$ – вартість одного кВт/год;

$K_{\text{ел}}$ – загальна витрата електроенергії за годину.

$$C_{\text{ел}} = 9,60 \cdot 25 = 240,0 \text{ грн.}$$

Інші та накладні витрати становлять (100..120%) до основної заробітної плати робітників [31], становить 27 грн.

Отже, собівартість наплавлення одного колінчастого валу двигуна ЯМЗ-240 складе за новою технологією:

$$C_1 = 270,0 + 27,0 + 3000,0 + 240,0 + 27,0 = 3564,0 \text{ грн.}$$

Вартість наплавлення за базовою технологією C_2 становить 3100,0 грн.

Річний економічний ефект складе:

$$E = (C_2 - C_1 \cdot \eta) A_r, \quad (5.9)$$

де η – коефіцієнт відносної довговічності, що дорівнює 0,85.

$$E = (3100,0 - 3564,0 \cdot 0,85) 2000 = 140800 \text{ грн.}$$

Отримані розрахунки підтверджують економічну ефективність виконаної роботи, а впровадження розробленого технологічного процесу дасть ремонтному підприємству можливість самостійно забезпечувати наявність необхідних запчастин для розглянутих видів обладнання.

ВИСНОВКИ

1. Показано доцільність відновлення зношених поверхонь деталей машин порошковим матеріалом з додаванням до нього елемента активатора - бору.

2. Уточнено розрахункову залежність швидкості плазмового наплавлення, що враховує максимальну температуру нагрівання поверхні деталі в центрі плями нагріву, мінімальну температуру поверхні основного металу, при якій можливе змочування його рідким наплавленим металом, коефіцієнт температуропровідності основного металу, тривалість процесу змочування і товщину наплавленого шару.

3. Якісному формуванню шару, що наплавляється, відповідають наступні технологічні режими наплавлення: сила робочого струму 230 А, напруга джерела 30 В, частота обертання деталі (2,3...2,7) хв⁻¹ і швидкість наплавлення 40...42 м/год. При рекомендованих технологічних режимах та товщині шару, що дорівнює 1,20 мм, зона термічного впливу не перевищує 0,6 мм, а величина ерозії становить 0,06...0,1 мм і знаходиться в межах припуску на механічну обробку.

4. Встановлено, що для підвищення мікротвердості до HV 726 та зносостійкості відновленої поверхні, утворення товщини наплавленого шару не менше 1,20 мм і пористості 2...20% необхідно виконувати плазмове наплавлення із застосуванням порошкової суміші (С – 4,0%, Сг – 3,1%, Ni – 24,9%, В – 0,57%, F – основа) та уточненими режимами наплавлення. При цьому твердість, зносостійкість та міцність зчеплення металопокриття підвищується на 15...20% порівняно з наплавленням стандартним порошком.

5. Найбільша зносостійкість відновлених поверхонь деталей машин з твердістю HV 726 при товщині наплавленого шару 1,20 мм досягається при частоті обертання деталі 2,3...2,7 хв⁻¹ та швидкості наплавлення 40...42 м/год.

6. Річний економічний ефект відновлення колінчастих валів двигунів ЯМЗ-240 плазмовим наплавленням за рахунок застосування розробленої технології становив 140800 грн. при відновленні 2000 валів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сідашенко О.І., Науменко О.А. Ремонт машин та обладнання агропромислового виробництва. Київ: Ліра-К, 2018. 544 с.
2. Булгаков В.М., Ружило З.В. Надійність і ремонт машин. Київ: Центр учбової літератури, 2019. 380 с.
3. Blank L., Tarquin A. Engineering Economy. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2012. 944 p.
4. Bhadeshia H.K.D.H. Steels: Microstructure and Properties. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 624 p.
5. Hutchings I., Shipway P. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 408 p.
6. Suresh S. Fatigue of Materials. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 679 p.
7. Waterhouse R.B. Fretting Fatigue. London: Applied Science Publishers, 1981. 336 p.
8. Blau P.J. Friction Science and Technology. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. 971 p.
9. Rabinowicz E. Friction and Wear of Materials. 2nd ed. New York: Wiley, 1995. 336 p.
10. Dudnikov A.A. , Dudnikov I.A. , Dudnyk V.V., Burlaka, O.A. (2021). METHODS OF RESTORING PARTS OF AGRICULTURAL MACHINES. *Scientific Progress & Innovations*, (2), 280-285. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.02.37>
11. Кравчук В.І., Мельник Ю.Ф. Відновлення та зміцнення деталей машин АПК. Київ: НУБіП України, 2020. 295 с.
12. Davis J.R. Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. Materials Park: ASM International, 2001. 338 p.
13. Kou S. Welding Metallurgy. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2003. 480 p.
14. Cary H.B., Helzer S.C. Modern Welding Technology. 6th ed. New York: Pearson, 2005. 736 p.
15. Steen W., Mazumder J. Laser Material Processing. 4th ed. London: Springer,

2010. 558 p.

16. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. Laser Cladding. Boca Raton: CRC Press, 2005. 264 p.

17. Lugscheider E., Bobzin K. Thermal spraying and surfacing technologies for wear protection. *Surface and Coatings Technology*. 2004. Vol. 180-181. P. 1-8.

18. Davis J.R. Handbook of Thermal Spray Technology. Materials Park: ASM International, 2004. 338 p.

19. Fauchais P., Heberlein J., Boulos M. Thermal Spray Fundamentals. New York: Springer, 2014. 1566 p.

20. Lancaster J.F. The Physics of Welding. 2nd ed. Oxford: Pergamon Press, 1986. 340 p.

21. Messler R.W. Principles of Welding. New York: Wiley, 1999. 662 p.

22. Дудніков А.А., Келемеш А.О., Семчук Г.І., Єфремов С.Г. Забезпечення якості поверхні деталей при обробці тиском. Механізація та електрифікація сільського господарства. Глеваха: Вип. 98. Т. 2, 2013. 590 с.

23. Пастухов В.І. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Харків: Факт, 2021. 410 с.

24. Закон України «Про екологічну експертизу»: за станом на 9 лютого 1995р. Верховна Рада України. Офіц. вид. Київ: Парлам. вид-во, 1995. 36 с.

25. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного управління. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016.

26. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ: Мінрегіон України, 2013.

27. НПАОП 28.52-1.31-13. Правила охорони праці під час зварювання, наплавлення і різання металів. Київ, 2013.

28. ДСТУ EN ISO 15011-1:2022. Охорона здоров'я та безпека під час зварювання та споріднених процесів. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022.

29. Закон України Про охорону праці. Київ: Відомості Верховної Ради України, чинна редакція.

30. Шваб Л.І. Економіка підприємства. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Київ: Каравела. 2004, 568с.

31. Park C.S. Contemporary Engineering Economics. 6th ed. Pearson, 2015. 792 p.

