



УДК 621.791.92:621.224

RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY FOR REPAIR OF STEEL DISTRIBUTORS OF PUMPING UNITS OF AXIAL-PISTON HYDRAULIC MACHINES

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧА ТЕХНОЛОГІЯ РЕМОНТУ СТАЛЬНИХ РОЗПОДІЛЬНИКІВ
КАЧАЮЧИХ ВУЗЛІВ АКСІАЛЬНО-ПОРШНЕВИХ ГІДРОМАШИН

Melyantsov P.T. / Мельянцева П. Т.

s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0001-5937-4021

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, S. Yefremova, 25, 49600

Дніпровський державний аграрно-економічний університет,

Дніпро, С. Єфремова, 25, 49600

Losikov O. M. / Лосіков О.М.

art., teacher. / ст. викладач

ORCID 0009-0004-5523-7651

Sidorenko V. K. / Сидоренко В. К.

art., teacher. / ст. викладач

ORCID 0009-0005-7610-4433

Ukrainian State University of Science and Technology,

Dnipro, Lazaryana, 2, 49010

Український державний університет науки і технологій,

м. Дніпро, Лазаряна, 2, 49010

Анотація. У статті розглянуто проблему відновлення ресурсолімітуючих деталей спряжень качаючих вузлів аксіально-поршневих гідромашин гідростатичних трансмісій, зокрема сталевих розподільників. На підставі аналізу конструктивних особливостей і характеру зношування розподільників встановлено, що домінуючими видами зношення є гідроабразивне та ерозійне, які локалізуються переважно в зоні серповидних вікон і ущільнювальних поясів, а також прояви адгезійного зношування. Обґрунтовано доцільність застосування електроферромагнітного наплавлення як ефективного методу відновлення геометрії та фізико-механічних властивостей робочих поверхонь сталевих розподільників. Проведено кореляційний аналіз впливу хімічного складу порошкової суміші та технологічних параметрів процесу на твердість, зносостійкість і адгезійну міцність наплавленого шару. Встановлено, що вирішальний вплив на формування зносостійкої структури має вміст хрому, тоді як адгезійні властивості переважно визначаються концентрацією нікелю; інші легувальні елементи виконують модифікуючу та структуроутворюючу функції. Запропоновано оптимальний склад порошкової суміші та раціональні режими електроферромагнітного наплавлення, які забезпечують формування дрібнодисперсної карбідно-боридної структури з високою адгезією до основного металу. Експериментальними дослідженнями встановлено, що інтенсивність зношування відновленої поверхні зменшується до 60 % порівняно з новою деталлю, а ресурс відновленого розподільника становить не менше 90 % від ресурсу нового елемента. Розроблено та апробовано технологічний процес відновлення сталевих розподільників, який придатний для впровадження на спеціалізованих ремонтних підприємствах.

Ключові слова: аксіально-поршнева гідромашина, гідростатична трансмісія, качаючий вузол, сталевий розподільник, гідроабразивне зношування, електроферромагнітне наплавлення, порошкові матеріали, зносостійкість, адгезійна міцність, післяремонтна довговічність.



Вступ.

У сучасних мобільних машинах широкого застосування набули гідростатичні трансмісії, які використовуються як у вітчизняній, так і в зарубіжній техніці. Їх застосування зумовлене високими регулювальними можливостями та ефективною роботою в умовах змінних навантажень, що забезпечує підвищення технічного рівня сільськогосподарських, будівельно-дорожніх і спеціальних машин [1].

Залежно від призначення технічних систем, їх гідростатичні трансмісії можуть включати дві, три або більше аксіально-поршневих гідромашин, конструктивно дуже схожих між собою як у вітчизняних, так і в зарубіжних зразках. Аналіз конструктивних особливостей об'ємних гідромашин гідростатичних трансмісій (ГСТ-90, ГСТ-112) здійснювався на основі технічної документації Sauer-Danfoss [2], що зумовлено високим ступенем подібності гідроагрегатів даних марок. Основною складовою аксіально-поршневих гідромашин являється їх качаючий вузол, (рисунок 1).

Деталі спряжень качаючого вузла експлуатуються в умовах складних змінних навантажень, при яких номінальний тиск коливається в діапазоні 21–47 МПа, а швидкість обертання валів варіює від 750 до 4510 хв⁻¹. Постійна мінливість цих режимів призводить до циклічного навантаження та зміни температурного стану контактуючих пар тертя, що, в свою чергу, безпосередньо впливає на їх зносостійкість та експлуатаційний технічний стан.

Особливої уваги потребують деталі спряження «розподільник–приставне дно» (рисунок 1), які першими в процесі експлуатації зазнають змін структурних параметрів та безпосередньо визначають значні об'ємні втрати робочої рідини [3, 4].

Наведена робоча гіпотеза знаходить підтвердження в дослідженнях [5, 6], де встановлено, що на гідравлічні трансмісії припадає приблизно 25–30 % усіх відмов, зафіксованих у мобільних машинах, що підкреслює їх значний внесок у загальний рівень технічних несправностей.

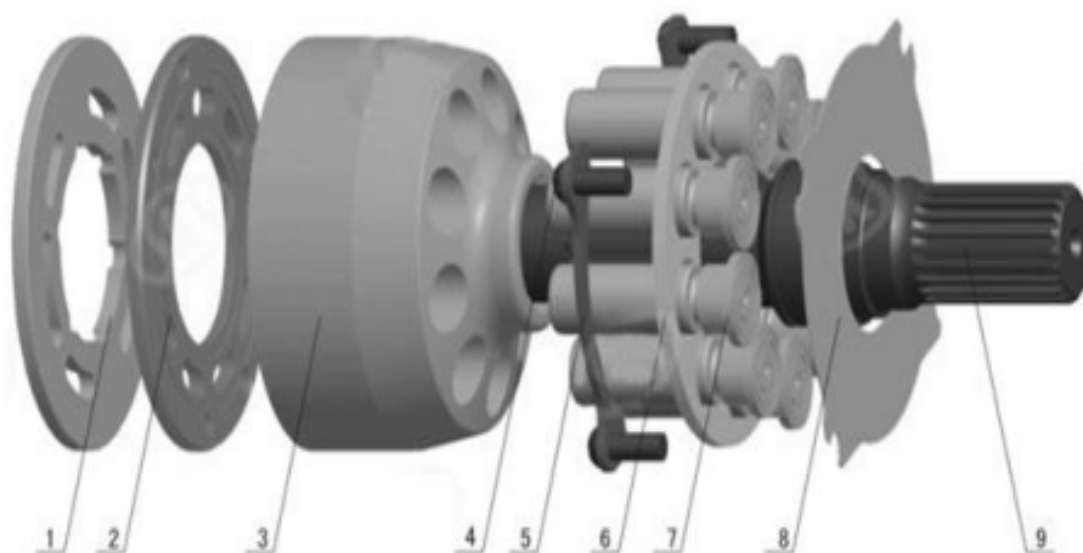


Рисунок 1 – Качаючий вузол насоса:

*1 – розподільник; 2 – приставне дно; 3 – блок циліндрів; 4 – болт кріплення;
5 – прижими; 6 – сепаратор; 7 – плунжер з гідростатичною опорою;
8 – упорна шайба; 9 – вал*

Джерело [2]

Детальний аналіз стану складових елементів і спряжень гідроприводу трансмісії ГСТ-90, проведений у роботі [7], показав, що за статистичними даними на качаючий вузол гідронасоса (КН) припадає 41,93 % відмов, причому на спряження «розподільник–приставне дно» – 18,76 %. Водночас на качаючий вузол гідромотора (КМ) припадає 24,98 % відмов, з яких 8,86 % припадає на спряження «розподільник–приставне дно».

Трансформація структурних характеристик технічного стану деталей з'єднань качаючого вузла гідравлічних машин спричиняє зміну розмірів у сполученнях, що веде до падіння тиску в напірній лінії гідравлічного приводу, зниження об'ємного та сукупного коефіцієнтів корисної дії (ККД) гідростатичної передачі [8].

Даний висновок знаходить своє підтвердження у роботі [1], де підкреслюється, що відмови, спричинені вичерпанням ресурсу, переважно виникають унаслідок значних об'ємних витоків робочого мастила, що є наслідком погіршення структурних характеристик технічного стану елементів та вузлів тертя, зокрема в насосних агрегатах гідравлічних машин.



Ремонтні заходи, для відновлення працездатного стану гідравлічних машин, традиційно здійснюються у спеціалізованих майстернях з їх технічного сервісу [9]. Такий підхід зумовлений багатокомпонентною будовою аксіально-поршневих гідравлічних агрегатів, наявністю виняткових точних з'єднань між елементами, а також недостатньою кількістю стандартизованих даних про допустимі межі структурних характеристик технічного стану деталей, які застосовуються в умовах сервісного підрозділу.

Вказана робоча гіпотеза також підтверджується у праці [3], де дослідники пропонують проводити вхідний контроль агрегатів на основі оцінки технічного стану компонентів їх качаючих вузлів за сумарними об'ємними втратами робочої рідини через дренажні канали. Результати таких контрольних заходів дозволяють отримати інтегральну оцінку технічного стану деталей і є найбільш показовими для агрегатів, у яких об'ємні втрати рідини перевищують $225 \text{ см}^3/\text{с}$, що в роботі [1] розглядається як гранично допустиме значення.

Відсутність обґрунтованих та унормованих показників структурних параметрів деталей спряжень на кількісному рівні ускладнює вибір методів їх регенерації з урахуванням умов роботи сервісних підрозділів.

У практиці більшості спеціалізованих ремонтних підприємств для відновлення геометрії деталей застосовується метод так званих «вільних ремонтних розмірів». Сутність цього підходу полягає у притиранні робочих поверхонь до повного усунення слідів зношування, тоді як компенсація змін у розмірному ланцюзі складального вузла здійснюється шляхом встановлення додаткових кільцевих прокладок під опорний підшипник задньої кришки гідроагрегату [9].

Втілення цієї методики вимагає найменших робочих зусиль. Проте, важливо зазначити, що в реальних умовах використання гідроагрегатів, відновлені вузли не витримують гарантійний ресурс. Крім того, серед усіх складових, які надходять на сервісну базу для ремонту, до тридцяти відсотків загальної кількості частин доводиться просто списувати на утилізацію.

Водночас даний спосіб являється ефективним для сталених розподільників, які мають не значні сліди гідроабразивного спрацювання. При цьому, його



практично не можливо реалізувати для деталей зі слідами адгезійного зношування (схоплювання між поверхневими шарами сталюого розподільника та латунного приставного дна), наявності пітингу (вибоїн мікроскопічного масштабу), що утворюються внаслідок руйнування поверхневого шару металу під дією циклічних гідродинамічних навантажень.

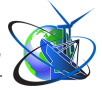
Такий стан справ у значній мірі пояснюється недостатньою інформацією щодо видів та характеру зношування сталюого розподільника. Усунення зазначених недоліків може бути досягнуто шляхом розроблення ефективних методів відновлення елементів спряження «розподільник–приставне дно», які забезпечують відтворення початкових геометричних розмірів деталей із одночасним збереженням фізико-механічних властивостей їх робочих поверхонь на рівні, що відповідає вимогам нормативно-технічної документації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Алгоритм вибору методів реновації комплектуючих базується на аналізі техніко-експлуатаційних параметрів. До таких факторів належать інтенсивність відмов, функціональна значущість деталей, фізико-хімічні властивості матеріалів, а також морфологія зносу робочих поверхонь. Важливим критерієм є рівень технологічного забезпечення ремонтного процесу.

У великогабаритних гідрооб'ємних трансмісіях елементи сполучення «розподільник – приставне дно» відповідають за розподіл потоку робочої оливи під номінальним тиском в діапазоні 21 - 47 МПа (згідно з конкретною будовою), функціонують в умовах реверсивних змін швидкості та обертових моментів, а також зазнають теплового навантаження, яке впливає на їхню працездатність. Наявність таких умов роботи обумовлює зміну функціонально-структурних характеристик деталей спряження, що призводить до суттєвих витоків робочої рідини [1, 7].

Грунтовний аналіз стану робочої поверхні розподільника та приставного дна, презентований у праці [10], продемонстрував, що домінуючим різновидом їхнього зношення є - гідроабразивне, а найбільше спрацювання поверхонь фіксується вздовж ліній, які формують розподільчі вікна, безпосередньо біля



розділювальних перегородок між ними.

У роботі [11] дослідники зосередилися на проблемі ерозійного зношування робочих поверхонь елементів, що виникає внаслідок інтенсивного протікання робочої рідини між секторами підвищеного та зниженого тиску. Переміщення рідини відбувається через спеціальні серповидні отвори, що спричиняє утворення ерозійних каналів. Водночас зазначається наявність на робочих поверхнях деталей ознак адгезійного зношення, яке проявляється, зокрема, у вигляді слідів латуні на сталій поверхні розподільника.

Наявність слідів гідроабразивного та ерозійного зношування, що утворюють суцільний замкнений обвід по всьому периметру поверхонь деталей спряження, а також прояви адгезійного зношення, суттєво ускладнює відновлювальні процедури, особливо для розподільника, виготовленого зі сталі ШХ15 (ГСТ-90) та сталі 50ХН (EATON 6423).

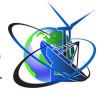
З огляду на зазначене виникає актуальна потреба у розробленні ефективної методики відновлення сталього розподільника, яка забезпечувала б максимальний рівень його відновлюваності.

Метою дослідження є - обґрунтування технологічних підходів до ремонту сталених розподільників аксіально-поршневих гідромашин типу ГСТ-90 методом електроферромагнітного наплавлення, що забезпечує відновлення геометрії та підвищення фізико-механічних властивостей поверхонь тертя до рівня або вище характеристик нових деталей.

Постановка задачі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

Обґрунтувати вибір способу відновлення розподільників гідромашин ГСТ-90, виходячи з їхньої конструкції, характеру зносу та балансу техніко-економічної ефективності. Виконати кореляційний аналіз для встановлення залежностей між складом порошкового матеріалу, режимами електроферромагнітного наплавлення та властивостями отриманого покриття. Здійснити порівняльну оцінку якісних показників (твердості, адгезії та зносостійкості) відновлених поверхонь відносно параметрів нових серійних



деталей. Сформувати комплексну технологію відновлення працездатності досліджуваних деталей.

Викладення основного матеріалу.

На підставі проведеного детального аналізу сучасних методів відновлення деталей торцевого розподілення потоку робочої рідини в качаючих вузлах аксіально-поршневих гідромашин, що застосовуються в гідростатичних трансмісіях (зокрема моделей ГСТ-90 та ГСТ-112), стає очевидним, що стальний розподільник, як основний об'єкт відновлення, має значну площу робочих поверхонь, які потребують ремонту. Зокрема, це стосується всієї замкненої кільцевої ділянки, що контактує з ущільнювальними пасками приставного дна. При цьому, сліди пітингу та ерозійного зношення призводять до суттєвого зменшення товщини матеріалу робочої поверхні, погіршення геометричної точності та зростання ймовірності протікання робочої рідини, що знижує ефективність роботи вузла (рисунок 2).

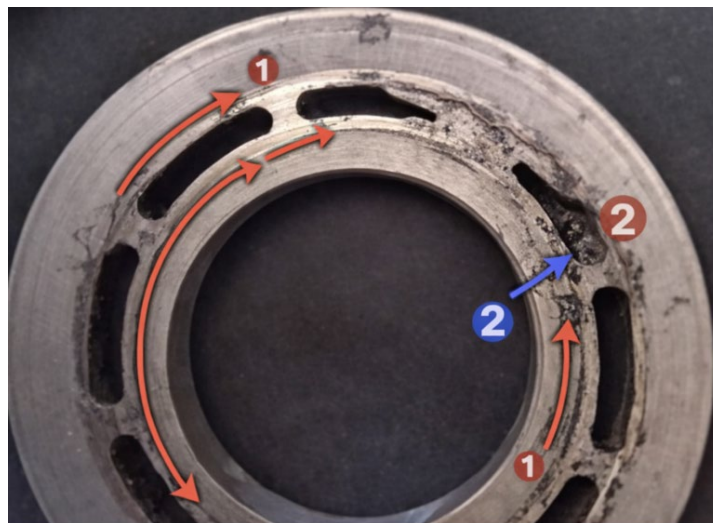
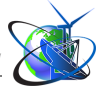


Рисунок 2 - Характерні поверхні зношення розподільника:

1- гідроабразивне зношення ущільнюючого пояску по зовнішньому і внутрішньому поясках; 2 – пітингове руйнування крамок серповидних вікон

Авторська розробка

Аналіз технічного стану розподільників показав практично повне (близьке до 100 %) гідроабразивне зношення їхніх робочих поверхонь. Основні дефекти у



вигляді гідроабразивних рисок і каналів локалізуються вздовж внутрішніх і зовнішніх контурів серпоподібних вікон та продовжуються через перемички між ними, формуючи на робочій поверхні замкнений контур (рисунк 2). Такий характер пошкоджень істотно погіршує здатність ущільнювального пояса забезпечувати чітке розділення потоків робочої рідини. Наявність гідроабразивних каналів сприяє інтенсивному перетіканню рідини з магістралі високого тиску в магістраль низького, що, у свою чергу, створює передумови для розвитку ерозійного зношення.

Зазначений характер зношування підтверджується результатами порівняльного аналізу профілограм робочих поверхонь розподільника у вихідному та зношеному станах (рисунк 3), який засвідчує істотну зміну мікрогеометрії поверхні, збільшення параметрів шорсткості та наявність характерних борозен і каналів, сформованих унаслідок дії гідроабразивного потоку.

Аналіз отриманих профілограф (рисунк 3) показує, що максимальне зношення поверхні деталі спостерігається по зовнішньому її поясу, який має більший радіус і відповідно швидкісний режим робочої рідини з абразивними частинками, які формують відповідні сліди гідроабразивного зношення.

Такий характер зношення поверхні розподільника формує конусний щілинний канал, через який здійснюються витoki оливи і відповідно об'ємні втрати рідини.

Крім того, на поверхні гідророзподільника спостерігаються сліди пітингу (вибоїни мікроскопічного масштабу) (рисунк 2), що утворюються внаслідок руйнування поверхневого шару металу під дією циклічних гідродинамічних навантажень, порушенням гідродинамічного змащування, наявністю хімічної корозії, яка активізується при наявності вологи або домішок у робочій рідині.

Виявлені структурні зміни робочої поверхні негативно впливають на технологічність відновлення деталей. Це стосується не лише притиральних операцій при глибокому зносі, а й використання електроіскрових методів відновлення сталевих деталей, що розглядалися в дослідженні [12].

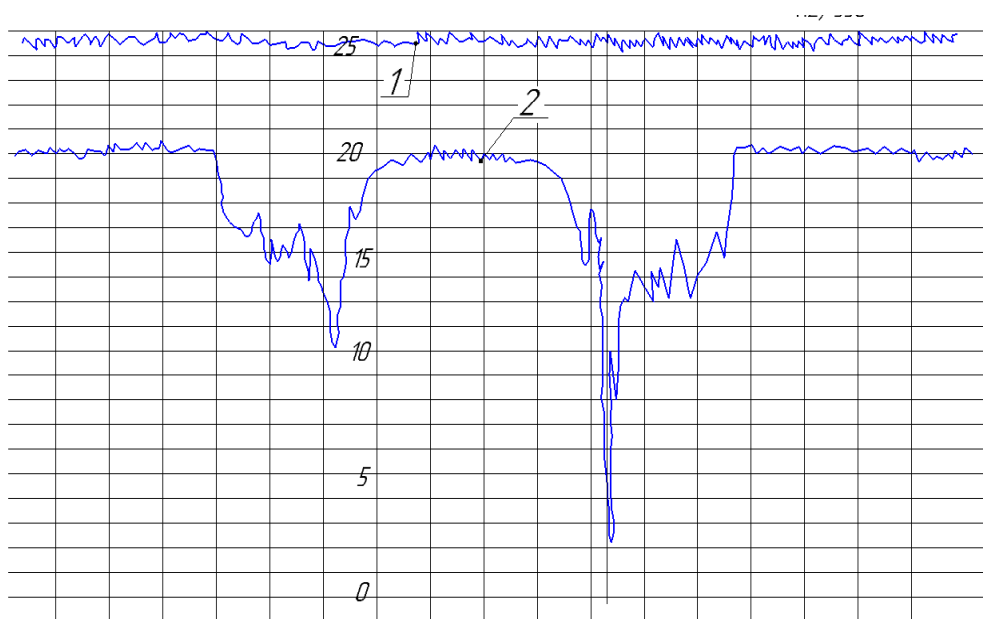
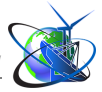


Рисунок 3 – Профілограми поверхонь розподільника :

1- профілограма не зношеної поверхні деталі; 2 – профілограма зношеної поверхні деталі

Авторська розробка

Труднощі впровадження електроіскрової обробки для реновації сталевих розподільників пов'язані з наявністю специфічних дефектів на їхніх робочих поверхнях. Зокрема, у 4–7% деталей виявлено адгезійне зношування зі значною площею ураження, а у 3–5% гідромашин, що надходять на сервіс, спостерігаються заглиблення пітингового характеру. Крім того, при використанні електроіскрового нарощування зношеної поверхні виникають складності в відновленні країв серповидних вікон, обумовлені значною трудомісткістю операції.

На основі комплексного аналізу конструктивно-технологічних чинників для відновлення деталей обґрунтовано застосування методу електроферомагнітного (ЕФМ) наплавлення. Дана технологія є особливо ефективною для виробів із феромагнітних матеріалів (зокрема тонкостінних елементів завтовшки до 300 мм), що експлуатуються в умовах інтенсивного абразивного та гідроабразивного впливу. Метод гарантує високу твердість і адгезійну міцність покриттів при збереженні геометричної точності деталей без термічних деформацій.



З метою обґрунтування оптимального складу порошкової суміші для електроферромагнітного наплавлення розподільників (сталь ШХ15) качаючих вузлів аксіально-поршневих гідромашин ГСТ-90, проведено кореляційний аналіз впливу основних легувальних елементів (Cr, B, C, Ni, Si, Mn) на показники мікротвердості, зносостійкості та адгезійної міцності наплавлених шарів (таблиця 1).

Таблиця 1 – Вхідні дані для кореляційного аналізу

Номер варіанту	Хімічний та відсотковий склад порошку						Фізико-механічні властивості		
	Cr (%)	B (%)	C (%)	Ni (%)	Si (%)	Mn (%)	Твердість (HV)	Зносостійкість, мм³/год	Адгезійна міцність, Мпа
1	10	0,4	0,20	3	0,5	0,8	410	6,2	160
2	12	0,6	0,25	4	0,6	1,0	450	5,8	170
3	14	0,8	0,30	5	0,8	1,2	480	5,2	180
4	16	1,0	0,35	6	1,0	1,4	520	4,9	185
5	18	1,2	0,40	7	1,2	1,6	560	4,4	190
6	20	1,4	0,45	8	1,4	1,8	600	4,1	200
7	22	1,6	0,50	9	1,6	2,0	630	3,8	210
8	24	1,8	0,55	10	1,8	2,2	670	3,5	220

Авторська розробка

З метою кількісної оцінки впливу основних легувальних елементів на формування експлуатаційних властивостей наплавленого шару було виконано кореляційний аналіз, результати якого подано у вигляді кореляційної матриці (рисунок 4).

Отримані дані дозволяють встановити ступінь взаємозв'язку між хімічним складом порошкової суміші та основними експлуатаційними характеристиками покриття, а також обґрунтувати раніше прийняті інтервали концентрацій компонентів.

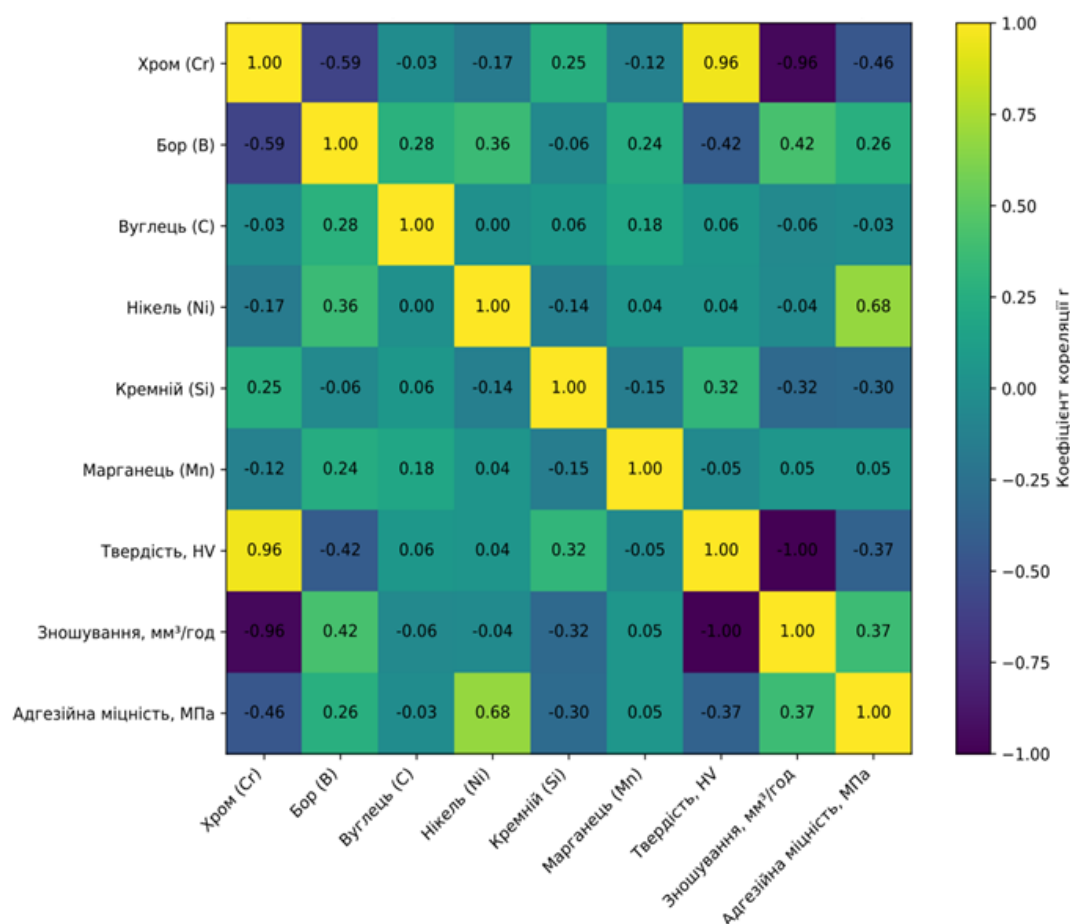


Рисунок 4 – Кореляційна матриця зв'язку впливу хімічних елементів на фізико-механічні властивості покриття

Авторська розробка

Встановлено, що вміст хрому (Cr) характеризується високим позитивним кореляційним зв'язком із твердістю наплавленого шару ($r = +0,96$) та високим негативним кореляційним зв'язком із показником зношування ($r = -0,96$), що свідчить про його визначальний вплив на формування зносостійкої структури покриття. Зазначене узгоджується з утворенням у наплавленому шарі карбідних фаз типу Cr_7C_3 та Cr_{23}C_6 , які забезпечують підвищений опір пластичній деформації та зношуванню. Водночас наявність помірного негативного кореляційного зв'язку між вмістом Cr та адгезійною міцністю ($r = -0,46$) обумовлює доцільність обмеження його концентрації верхньою межею рекомендованого інтервалу.

Нікель (Ni) виявляє найбільш виражений позитивний кореляційний зв'язок



з адгезійною міцністю покриття ($r = + 0,68$), що вказує на його суттєву роль у забезпеченні надійності зчеплення наплавленого шару з основним металом. Це пояснюється впливом Ni на підвищення пластичності та покращення структурно-теплової сумісності покриття з основою. Зазначене обґрунтовує включення нікелю до складу порошкової суміші в кількостях, достатніх для стабілізації адгезійних властивостей шару.

Кремній (Si) характеризується помірним позитивним кореляційним зв'язком із твердістю ($r = + 0,32$) та відповідним негативним кореляційним зв'язком із зношуванням ($r = - 0,32$), що свідчить про його допоміжний вплив на зміцнення структури покриття. Разом із тим, помірний негативний зв'язок між вмістом Si та адгезійною міцністю ($r = - 0,30$) зумовлює необхідність обмеження його концентрації з метою запобігання зниженню тріщиностійкості міжфазної зони.

Бор (B) у межах досліджуваного діапазону концентрацій виявляє помірний кореляційний зв'язок із твердістю ($r = - 0,42$) та зношуванням ($r = + 0,42$), що свідчить про неоднозначний характер його впливу на властивості наплавленого шару. Слабкий позитивний зв'язок бору з адгезійною міцністю ($r = + 0,26$) дозволяє розглядати його переважно як модифікуючу добавку, що впливає на формування структури та стабільність властивостей покриття.

Вуглець (C) і марганець (Mn) у межах досліджуваних концентрацій характеризуються відсутністю статистично значущого кореляційного зв'язку з твердістю, зносостійкістю та адгезійною міцністю покриття ($|r| \leq 0,18$). Отримані результати свідчать про їх переважно структуроутворювальну та технологічну функцію, спрямовану на стабілізацію процесу наплавлення та формування мікроструктури шару, без суттєвого прямого впливу на інтегральні фізико-механічні характеристики.

Таким чином, результати кореляційного аналізу підтверджують, що вирішальний вплив на формування твердості та зносостійкості наплавленого шару має хром, тоді як адгезійні властивості покриття в основному визначаються вмістом нікелю.



Інші легувальні елементи (Si, B, Mn, C) виконують переважно модифікуючу та структуроутворюючу функції. Отримані закономірності узгоджуються з обраним складом порошкової суміші та обґрунтовують прийняті інтервали концентрацій її компонентів.

На основі результатів експериментальних досліджень та проведеного кореляційного аналізу встановлено, що для забезпечення збалансованого комплексу експлуатаційних властивостей при відновленні розподільників аксіально-поршневих гідромашин (типу ГСТ-90) доцільним є застосування порошкової суміші такого складу: Cr = 18–20%, B = 1,2–1,4%, C = 0,4–0,45%,

Ni = 7–8%, Si = 1,2–1,4%, Mn = 1,6–1,8%. Зазначений склад забезпечує твердість наплавленого шару на рівні 600–630 HV, зносостійкість 3,8–4,2 мм³/год та адгезійну міцність до 200 МПа, що дозволяє забезпечити ресурс відновлених розподільників не менше 90% від ресурсу нового елемента.

З урахуванням різних пріоритетів експлуатаційних вимог до відновлених деталей (підвищена зносостійкість, максимальна адгезійна міцність, оброблюваність після наплавлення, корозійна стійкість тощо), на основі результатів кореляційного аналізу сформовано ряд рекомендованих варіантів складів порошкових сумішей, наведених у (таблиці 2).

Зазначені склади відрізняються співвідношенням легувальних елементів, що забезпечує можливість керованого формування структурно-фазового стану та експлуатаційних властивостей наплавленого шару залежно від умов роботи і технологічних вимог до відновлюваної деталі.

Запропоновані склади порошкових сумішей створюють підґрунтя для цілеспрямованого формування комплексу фізико-механічних властивостей наплавленого шару та узгоджуються з результатами кореляційного аналізу впливу легувальних елементів на основні характеристики покриття.

Отримання достовірної оцінки характеру та виду зношення сталю розподільника, виготовленого зі сталі ШХ15, дало можливість за технологічно-економічним критерієм на першому етапі досліджень визначитися зі способом відновлення зношеної поверхні - електроферромагнітне наплавлення.



Таблиця 2 – Рекомендовані склади порошкових сумішей за пріоритетом експлуатаційних властивостей

№ з/п	Пріоритет експлуатаційної властивості	Рекомендований склад, мас. %	Очікувані фізико-механічні властивості	Коментар / особливості застосування
1	Максимальна зносостійкість (підвищена твердість, мінімальний знос)	Cr 20–22; B 1,6–2,2; C 0,45–0,6; Ni 4–6; Si 0,8–1,2; Mn 1,4–1,8	HV 600–720; Знос $\approx$ 3,4–4,0 мм ³ /год; Адгезія $\approx$ 190–210 МПа	Формування карбідно-боридної структури; потребує контрольованого охолодження, можливі залишкові напруження
2	Максимальна адгезія та пластичність (ударна стійкість, відсутність тріщин)	Cr 14–17; B 0,8–1,2; C 0,3–0,45; Ni 9–12; Si 0,8–1,2; Mn 1,2–1,6	HV 480–620; Адгезія $\geq$ 180–220 МПа; Знос $\approx$ 4,5–5,0 мм ³ /год	Високий Ni забезпечує пластичність і міцне зчеплення з основою; рекомендовано для динамічних вузлів
3	Збалансований універсальний склад (оптимум твердість + адгезія)	Cr 17–19; B 1,0–1,4; C 0,35–0,45; Ni 6–8; Si 1,0–1,4; Mn 1,4–1,7	HV 560–640; Адгезія $\approx$ 185–205 МПа; Знос $\approx$ 4,0–4,4 мм ³ /год	Найкраще співвідношення властивостей; рекомендовано для ремонтів гідророзподільників і корпусних деталей
4	Підвищена корозійна стійкість (робота в агресивних середовищах)	Cr 20–24; Ni 8–10; Si 1,6–2,0; B 0,8–1,2; C 0,3–0,45; Mn 1,0–1,4	HV 560–700; Добра адгезія; Підвищена хімічна стійкість	Комбінація Cr + Ni + Si забезпечує захисні оксидні плівки та жаростійкість
5	Підвищена оброблюваність після наплавлення (точна механічна доводка, притирання)	Cr 14–16; B 0,8–1,1; C 0,25–0,35; Ni 6–8; Si 0,8–1,2; Mn 1,2–1,6	HV 480–560; Знос $\approx$ 4,8–5,2 мм ³ /год; Адгезія $\approx$ 175–190 МПа	Помірна твердість забезпечує легке шліфування; рекомендовано для точних спряжень

Авторська розробка

Принцип дії установки електроферромагнітного наплавлення пояснюється структурною схемою, наведеною на (рисунку 5).

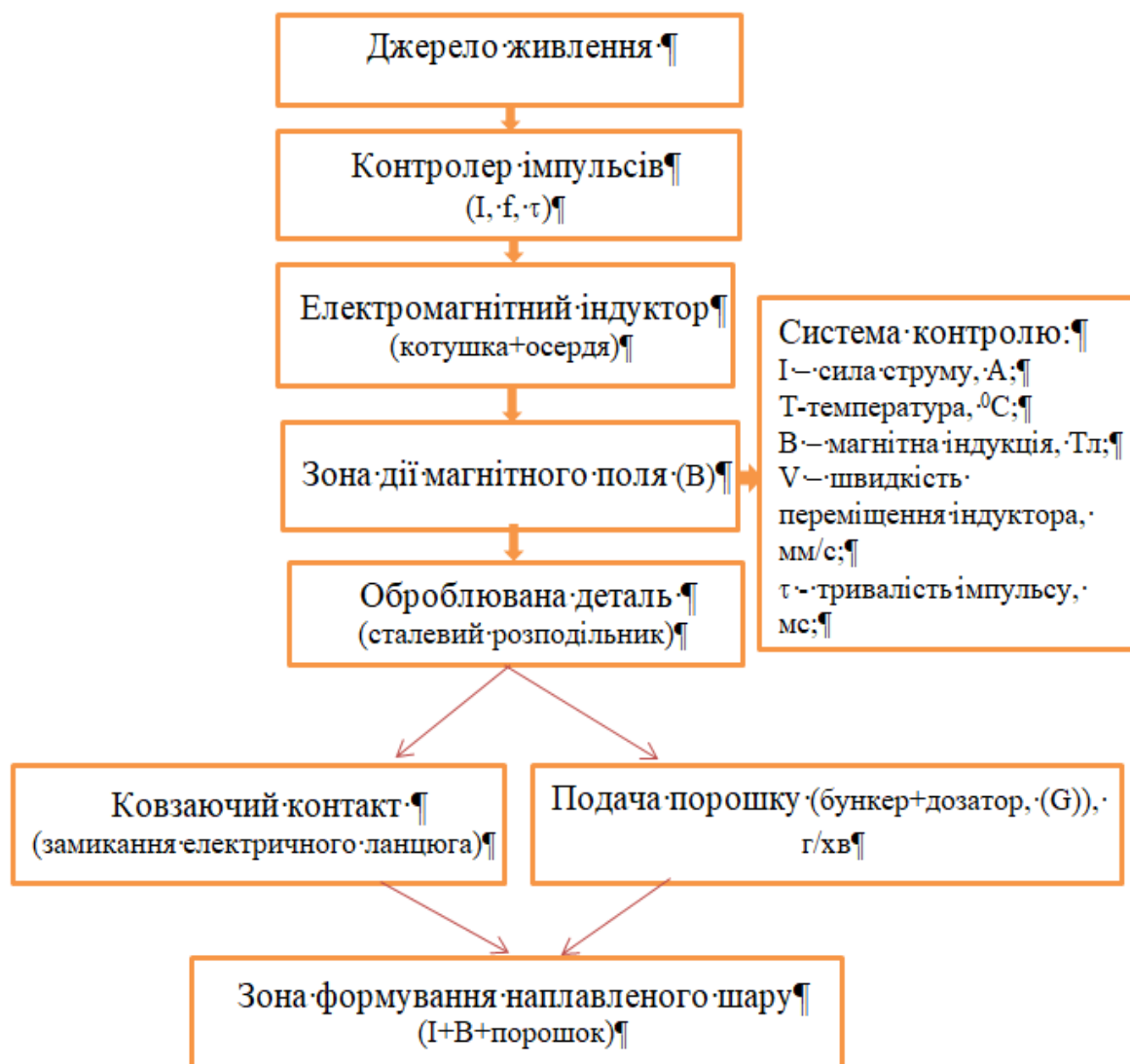
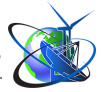


Рисунок 5 – Структурна схема установки електроферромагнітного наплавлення плоского сталевого розподільника

Авторська розробка

Установка складається з регульованого імпульсного джерела живлення, контролера імпульсів, електромагнітного індуктора, системи подачі ферромагнітного порошку, вузла підведення струму через ковзний контакт, оброблюваної деталі та системи контролю технологічних параметрів.

Електрична енергія від джерела живлення надходить до контролера імпульсів, який забезпечує формування заданих значень струму (I), частоти (f) та тривалості імпульсів (τ). Далі керований струм подається на електромагнітний індуктор, що створює у робочій зоні локалізоване магнітне поле з заданою величиною магнітної індукції (B). У зоні дії магнітного поля формується область



активної взаємодії між індуктором, порошковим матеріалом та поверхнею деталі.

Оброблювана деталь встановлюється у робочій позиції та підключається до джерела живлення через ковзний контакт, який забезпечує замикання електричного кола під час процесу наплавлення. Феромагнітний порошок безперервно подається з бункера-дозатора у зону дії магнітного поля між індуктором і поверхнею деталі. Під впливом магнітного поля частинки порошку орієнтуються вздовж силових ліній індукції та утримуються в робочій зоні, формуючи стабілізований порошковий прошарок.

Під час проходження технологічного струму через систему «індуктор – порошковий прошарок – деталь» у зоні контакту відбувається інтенсивне тепловиділення. Унаслідок цього порошковий матеріал і тонкий поверхневий шар основи нагріваються до температур плавлення з утворенням локальної ванни розплаву. В умовах дії магнітного поля розплав стабілізується, а магнітогідродинамічні ефекти сприяють його перемішуванню та вирівнюванню температурного поля.

У зоні формування шару, де одночасно діють електричний струм (I), магнітне поле (B) та порошковий матеріал (G), відбувається формування наплавленого покриття. Після відведення джерела теплового впливу розплав кристалізується з утворенням суцільного шару, металургійно зв'язаного з основним матеріалом деталі.

Система контролю забезпечує моніторинг та регулювання основних технологічних параметрів процесу, зокрема струму (I), температури (T), магнітної індукції (B), швидкості переміщення індуктора (V) та товщини наплавленого шару. Узгоджений вибір цих параметрів дозволяє керувати тепловим циклом наплавлення, забезпечувати стабільність процесу та формувати покриття із заданими геометричними та фізико-механічними властивостями.

Відновленню підлягає плоский сталевий розподільник круглої форми діаметром близько 128 мм і товщиною приблизно 8 мм, робоча поверхня якого



містить серповидні вікна та перемички між ними. У процесі експлуатації зношування спостерігається переважно на гострих кромках серповидних вікон, на поверхнях перемичок між вікнами, можливі сліди пітингового зношення та спостерігається інтенсивний адгезійний знос, що проявляється у вигляді схоплювання поверхонь і наволакування латуні на сталь, що призводить до порушення геометрії та працездатності деталі.

В зв'язку з цим, перед наплавленням деталей піддають попередній механічній обробці з метою відновлення площинності робочої поверхні до 0,05 мм та видалення слідів зношення глибиною до 0,05 мм. Це забезпечує стабільні умови формування наплавленого шару та однакову теплову взаємодію по всій поверхні.

Після підготовки, деталь установлюють у спеціальну технологічну оправку, виготовлену з міді - матеріалу, що не змочується сталевим розплавом і характеризується високою теплопровідністю. Форма оправки виконана таким чином, що її виступи щільно входять у серповидні вікна деталі, забезпечуючи точне формування геометрії крайок під час наплавлення та запобігаючи витіканню розплаву в порожнини вікон.

Деталь розміщують у горизонтальній площині та приводять в обертальний рух з регульованою кутовою швидкістю. Електромагнітний індуктор розташовується над робочою поверхнею деталі та здійснює кероване радіальне переміщення - від внутрішнього краю робочої поверхні до зовнішнього. При цьому, в робочій зоні створюється локалізоване магнітне поле з заданою магнітною індукцією. Феромагнітний порошок безперервно подається з бункера-дозатора в зону дії магнітного поля між індуктором і поверхнею деталі.

Регулювання струму, магнітної індукції, швидкості обертання деталі, швидкості радіального переміщення індуктора та витрати порошку дозволяє керувати тепловим циклом процесу і забезпечувати формування покриття із заданою товщиною, структурою та фізико-механічними властивостями при мінімальному тепловому впливі на основу.



Параметри процесу підбиралися за принципом енергетичного балансу та забезпечення мінімального градієнта температури у зоні термічного впливу. Критеріями оптимальності прийнято: відсутність перегріву сталеві основи (≤ 820 °C); стабільне формування шару завтовшки 0,8–1,2 мм; мінімальна пористість ($< 2\%$); рівномірність розподілу частинок карбідів у металевій матриці.

Для оцінювання впливу основних технологічних факторів проведено багатофакторне експериментальне дослідження з варіюванням струму наплавлення, магнітної індукції, швидкості переміщення індуктора та витрати порошку в робочих діапазонах. Вибір інтервалів зміни параметрів здійснювали з урахуванням технологічних обмежень процесу та вимог до якості наплавленого шару. Основні результати експериментів наводяться в (таблиці 3).

Таблиця 3 - Режими електроферромагнітного наплавлення

№ з/п	Струм, А	Магнітна індукція, Тл	Швидкість переміщення індуктора, мм/с	Витрата порошку, г/хв	Товщина шару, мм	Твердість, HV	Адгезія, МПа	Зносостійкість, мм ³ /год
1	130	0,20	2,5	35	0,8	510	170	5,0
2	140	0,25	2,0	40	1,0	560	190	4,4
3	150	0,30	1,8	42	1,1	590	205	4,1
4	160	0,35	1,5	45	1,2	620	215	3,8
5	170	0,40	1,3	48	1,3	610	210	4,0
6	180	0,45	1,0	50	1,5	580	195	4,3

Авторська розробка

Аналіз отриманих даних показав, що зі збільшенням струму наплавлення до 160–170 А спостерігається підвищення твердості шару до 620 HV завдяки повнішому розплавленню порошкових частинок і утворенню дрібнозернистої евтектичної структури. Зростання магнітної індукції понад 0,35 Тл забезпечує краще утримання розплаву в зоні дії індуктора, але при перевищенні 0,45 Тл з'являється ризик перегріву та зростання пористості. Надмірне зменшення швидкості переміщення індуктора ($< 1,3$ мм/с) призводить до локального перегріву та втрати адгезії через термічні напруження.



На підставі сукупності експериментальних результатів, як раціональні прийнято такі параметри процесу: струм $I = 160 \pm 10$ А, магнітна індукція $B = 0,32\text{--}0,36$ Тл, швидкість переміщення індуктора $v = 1,5\text{--}1,8$ мм/с, витрата порошку $G \approx 42 \pm 3$ г/хв, що забезпечує формування шару завтовшки 1,0–1,2 мм з твердістю 580–620 HV та адгезійною міцністю не менше 210 МПа за умови пористості менш ніж 2 %.

Для повного оцінювання працездатності спряження «розподільник – приставне дно» підготовлювались зразки із відновлених деталей для лабораторно-стендових досліджень фізико-механічних властивостей їхніх поверхонь на основі деталей, що надходили на ремонтні підприємства.

Зношена поверхня розподільника відновлювалась з застосуванням такої технології: мийна операція – очистка (видалення жирових плівок); дефектація – перевірка площинності поверхні і величин ерозійних та гідроабразивних каналів та глибини раковин при пітингу; відновлення деталі – електроферромагнітне наплавлення порошком; механічна обробка – фрезерування (формування на бокових поверхнях серповидних вікон гострої кромки), чорнове плоске шліфування (забезпечення площинності робочої поверхні та видалення поверхневого наплавленого шару), чистове плоске шліфування (покращення показників площинності поверхні розподільника та підвищення класу чистоти поверхні), механізоване притирання: чорнове (розмір абразиву пасти 15-30 мкм), чистове (розмір алмазного абразиву 3-5 мкм); очисна операція (усунення ефекту шаржирування).

З відновлених розподільників виготовлялись «експериментальні» зразки, для проведення випробувань на визначення фізико-механічних властивостей отриманих відновлених поверхонь. Дослідження проводились за відомими методиками для визначення фізико-механічних властивостей [13]. Результати лабораторних досліджень наводяться в (таблиця 4).

Проведений аналіз результатів, наведених в (таблиці 4) показує, що сталь ШХ15 після термообробки (нова деталь) має типову структуру: 90–95 % мартенситу, залишковий аустеніт ≤ 8 %, рівномірний карбідний розподіл - що



забезпечує високу твердість і міцність, але середню пластичність та корозійну стійкість.

Таблиця 4 – Механічні та корозійні властивості нового розподільника (сталь ШХ15) та відновленого ЕФМ-наплавленням

Властивість	Нова деталь (сталь ШХ15, термооброблена)	Деталь відновлена (ЕФМ-наплавлення, легований порошок)
Межа міцності на розтяг, σ_v , МПа	700–850	800–1000 (Ni- та В-укріплення, дрібнодисперсні карбіди/бориди)
Твердість по Брінеллю, НВ	200–240 (≈ 230 HV)	540–600 (≈ 580 – 620 HV) - істотне підвищення твердості
Відносне подовження, δ , %	8–14	4–8 (зменшення пластичності через карбідно-боридний шар)
Корозійна стійкість	Помірна (вимагає мастила або покриття)	Підвищена (Ni, Cr, Al у складі порошку формують пасивний шар)

Авторська розробка

Електроферромагнітне (ЕФМ) наплавлення порошком Ni–Cr–B–Si формує зміцнений шар з високою часткою евтектик Ni–B і Ni–Si, карбідів Cr_7C_3 та боридів Fe–B, що забезпечує значне зростання твердості та підвищення межі текучості.

Наявність електроферромагнітного поля викликає магнітогідродинамічні потоки в рідкому металі, які інтенсифікують перемішування розплаву, сприяють вирівнюванню температурного поля та зменшенню хімічної неоднорідності. У результаті кристалізації формується дрібнодисперсна структура з рівномірним розподілом карбідних і боридних фаз, що знижує ймовірність утворення дефектів, таких як пори та тріщини.

Результати порівняльної оцінки лінійної швидкості зношування нової деталі та відновленої електроферромагнітною наплавкою визначалися за допомогою стандартного абразивно-гідродинамічного тесту, який імітує умови роботи качаючого вузла (тиск 25–45 МПа, швидкість до 3500 хв^{-1}), наведені в (таблиці 5).

**Таблиця 5 - Порівняльна оцінка показників зношування**

Властивість	Нова деталь (сталь ШХ15)	Відновлена деталь (сталь ШХ15, ЕФМ наплавка, легований порошок)
Інтенсивність зношування, мм ³ /год	6,0–6,5	3,8–4,2
Адгезійна міцність, МПа	62	200
Зміна геометрії після тесту, мкм	15–20	7–10
Тривалість ресурсу, % від нового	100	≥90

Авторська розробка

Аналіз отриманих результатів показав, що адгезійна міцність відновленого шару зростає на 30 %, що є одним із ключових факторів у процесі відновлення деталей. Цей показник характеризує міцність з'єднання наплавленого шару з підложкою деталі, запобігаючи його відшаруванню та забезпечуючи довговічність експлуатації спряжених вузлів. Підвищена адгезія також сприяє стабільності фізико-механічних властивостей відновленої поверхні, що має особливе значення при застосуванні електроферромагнітного наплавлення. Висока адгезійна міцність шару (≈ 200 МПа) зменшує інтенсивність руйнувань робочих поверхонь під дією циклічних гідродинамічних навантажень, що сприяє підвищенню ресурсу деталей.

Інтенсивність зношування відновленої деталі зменшилася майже на 60 % у порівнянні з новою деталлю, що обумовлено формуванням дрібнодисперсної структури під час кристалізації металу з рівномірним розподілом карбідних і боридних фаз. Така структура підвищує твердість поверхневого шару і зменшує питому втрату матеріалу при терті, що вказує на покращення зносостійкості.

Мінімальні геометричні зміни деталей (зокрема, висоти робочих поверхонь) свідчать про забезпечення стабільної роботи аксіально-поршневих гідромашин.

Металургійний зв'язок наплавленого шару з основою деталі пояснюється інтенсивним перемішуванням розплаву, викликаним електроферромагнітним полем, яке створює магнітогідродинамічні потоки в рідкому металі. Це сприяє однорідності структури, зменшенню концентраційної неоднорідності та підвищенню надійності відновленого шару.



Це підтверджується і показником тривалості ресурсу відновленої деталі, який забезпечує ≥ 90 % ресурс від нової деталі, що відповідає вимогам для сервісних підприємств по показникам післяремонтної довговічності відремонтованих об'ємних гідромашин.

З метою отримання достовірної оцінки післяремонтної довговічності відновленого розподільника проводяться стендові випробування аксіально-поршневих гідромашин відповідно до методик, рекомендованих у роботі [14].

Розподільник, відновлений електроферомагнітним наплавленням, працює в парі тертя з приставним дном (рисунок 1), яке формує спряження, що розподіляє потік робочої рідини для магістралей основного контуру гідравлічної трансмісії і від його технічного стану суттєво залежить ефективність її роботи.

З врахуванням умов роботи деталей даного спряження (механічні - наявності зусилля притискання пружиною; гідравлічні – тиск рідини, в'язкість; температурні – теплова деформація; експлуатаційні – тривалість та циклічність навантаження та ін.) в процесі припрацювання визначалися максимальні передзадирні навантаження $P_{м.п.}$, при яких спостерігалися різкі зростання температури, моменту і коефіцієнта тертя, а також оптимальні навантаження $P_{оп.}$, яким відповідає мінімальний коефіцієнт тертя f_{min} . Результати наводяться в (таблиці 6).

**Таблиця 6 - Результати випробувань на припрацювання для пари тертя
«розподільник-приставне дно»**

Показник	«Еталонна» пара тертя	«Експериментальна» пара тертя
Максимальне передзадирне навантаження, $P_{м.п.}$, МПа	23,0	29,0
Оптимальне навантаження, $P_{оп.}$, МПа	16,0	23,0
Коефіцієнт тертя	0,013	0,010

Авторська розробка

На (рисунку 6) в вигляді гістограм представлені середні значення максимальних передзадирних, оптимальних навантажень для «еталонних» та



«експериментальних» пар тертя, у яких стальний розподільник відновлювався електроферромагнітним наплавленням за режимом (струм $I = 160 \pm 10$ А, магнітна індукція $B = 0,32\text{--}0,36$ Тл, швидкість переміщення індуктора $v = 1,5\text{--}1,8$ мм/с, витрата порошку $\approx 42 \pm 3$ г/хв.) з застосуванням легованого порошку наступного складу (Cr=18–20%, B=1,2–1.4%, C=0,4–0,45%, Ni=7–8%, Si=1,2–1,4%, Mn=1,6–1,8%).

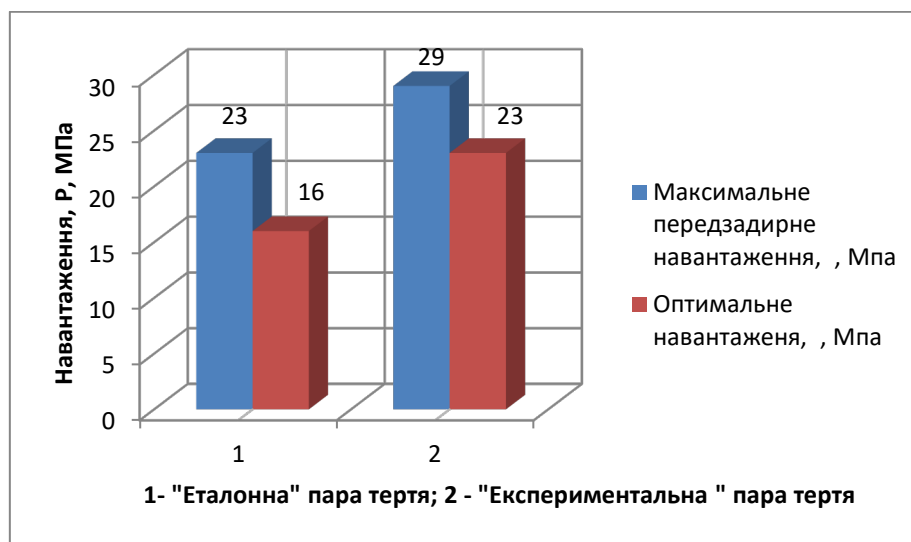


Рисунок 6 - Середні значення максимальних передзадирних, оптимальних навантажень для «еталонних» та «експериментальних» пар тертя

Авторська розробка

Аналіз гістограм наведених на (рисунку 6) показав, що «експериментальна пара тертя» має кращі показники для передзадирних навантажень на 26% в порівнянні з «еталонною» парою тертя. Здатність «експериментальної» пари тертя витримувати більші контактні напруження перед виникненням задирів пояснюється комбінацією зміцненої дисперсної мікроструктури, підвищеної твердості та міцної адгезії відновленого шару. Це також підтверджується і показником оптимальних навантажень, який в 1,4 рази більший в порівнянні з «еталонною» парою тертя.

Значення мінімальних коефіцієнтів тертя для «еталонних» та «експериментальних» пар тертя, що відповідають оптимальному навантаженню представлені на (рисунку 7).

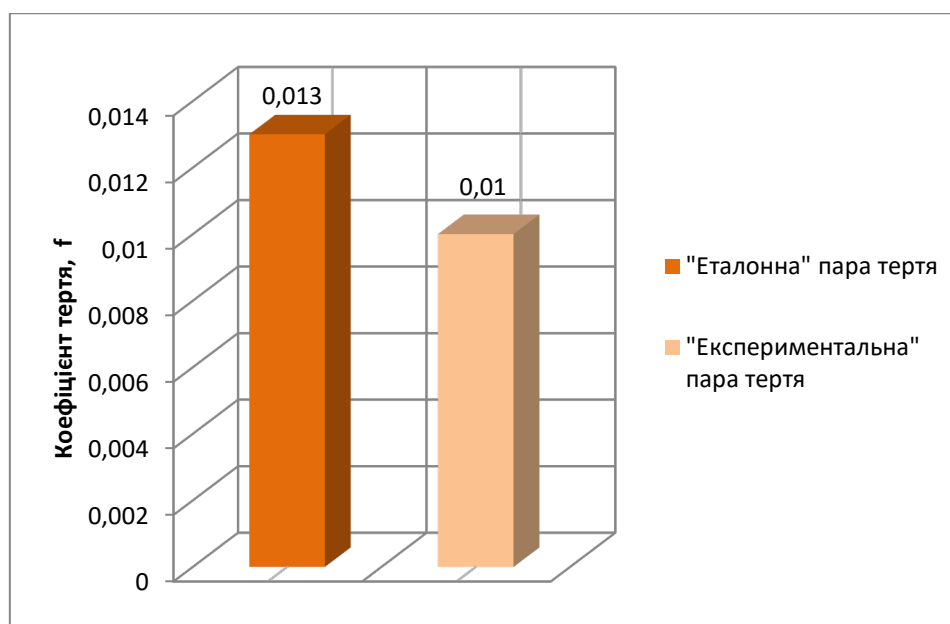


Рисунок 7 - Значення мінімальних коефіцієнтів тертя для «еталонних» та «експериментальних» пар тертя

Авторська розробка

Аналіз гістограм наведених на (рисунку 7) показав, що для «експериментальної» пари тертя у якій розподільник відновлено електроферромагнітним наплавленням з застосуванням легованого порошку, коефіцієнт тертя в 1,3 рази менше в порівнянні з «еталонною» парою. Коефіцієнт тертя зменшується за рахунок поєднання підвищеної твердості, наявності дисперсних зміцнених фаз, однорідності та стабільності відновленого шару, що знижує механічне зачеплення мікронерівностей і обмежує локальні деформації матеріалу під час контакту.

На основі обґрунтованого способу відновлення розподільника розроблено технологічний процес його відновлення. План операцій відновлення розподільника качаючого вузла аксіально-поршневої гідромашини наведено в (таблиці 7).

Реалізація технологічного процесу передбачає, перед виконанням електроферромагнітного наплавлення, установлення в серповидні вікна розподільника спеціальної мідної технологічної оправки. Її застосування забезпечує точне формування геометрії кромek серповидних прорізів у процесі наплавлення та запобігає витіканню розплавленого металу в порожнини вікон.

**Таблиця 7 – План операцій відновлення приставного дна**

Номер	Найменування операції	Вміст операції
05	Мийна	Очистити деталь для видалення жирових плівок.
10	Дефектувальна	Виявити деталі, з порушенням площинності 0,10 мм та глибиною раковин та каналів більше 0,05 мм, для відновлення їх до номінального розміру.
15	Чорнове плоске шліфування	Провести обробку робочої поверхні деталі для відновлення площинності робочої поверхні до 0,05 мм.; Видалити сліди зношення глибиною 0,05 мм.
20	Електроферромагнітне наплавлення	Наплавити зношену поверхню легованим порошком товщиною до 1,2 мм.
25	Фрезерна	Фрезерувати внутрішні поверхні бокової поверхні серповидних вікон для формування гострої кромки в відновленому шарі поверхні.
30	Чорнове плоске шліфування	Провести обробку відновленої поверхні деталі, забезпечивши площинність робочої поверхні до 0,005 мм. та паралельність поверхонь деталі 0,01 мм.
35	Чистове плоске шліфування	Провести обробку робочої поверхні деталі забезпечивши площинність робочої поверхні до 0,003 мм. при паралельності поверхонь деталі 0,01 мм. і витримавши висоту 8-0,065 мм.
40	Чорнове притирання	Притерти робочу поверхню механізованим притиранням пастою з розміром абразиву 15-30 мкм) до висоти 8-0,060 мм, забезпечивши клас чистоти Ra = 0,22 мкм.
45	Чистове притирання	Притерти робочу поверхню механізованим притиранням пастою з розміром алмазного абразиву 3-5 мкм до висоти 8-0,058 мм, забезпечивши клас чистоти Ra = 0,10 мкм.
50	Очистка	Видалити абразив притиральних паст з робочої поверхні деталі утриманням їх в розчині гасу на протязі $\geq 3,0$ год.
55	Контрольна	Контроль розмірів деталі згідно технічних вимог.

Авторська розробка

Висновки.

Отримані результати дослідження дають можливість зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що основними причинами зниження технічного ресурсу спряження «розподільник – приставне дно» аксіально-поршневих гідромашин є гідроабразивне, ерозійне та адгезійне зношування робочих поверхонь сталюого розподільника, що призводить до зростання об'ємних втрат робочої рідини та зниження коефіцієнта корисної дії гідростатичної трансмісії.



2. На основі аналізу конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів обґрунтовано доцільність застосування електроферромагнітного наплавлення, як ефективного способу відновлення сталей розподільників аксіально-поршневих гідромашин, що забезпечує мінімальний тепловий вплив на основу, високу адгезію наплавленого шару та відсутність помітних термічних деформацій.

3. Кореляційний аналіз показав, що визначальний вплив на твердість і зносостійкість наплавленого шару має вміст хрому, тоді як нікель є основним елементом, що забезпечує підвищення адгезійної міцності та тріщиностійкості покриття. Кремній і бор виконують переважно модифікуючу та структуроутворюючу функції, а вуглець і марганець у дослідженому діапазоні концентрацій відіграють допоміжну роль, стабілізуючи структуру та технологічність процесу наплавлення.

4. Встановлено оптимальний склад порошкової суміші ($\text{Cr} = 18\text{--}20\%$, $\text{B} = 1,2\text{--}1,4\%$, $\text{C} = 0,4\text{--}0,45\%$, $\text{Ni} = 7\text{--}8\%$, $\text{Si} = 1,2\text{--}1,4\%$, $\text{Mn} = 1,6\text{--}1,8\%$), який забезпечує формування дрібнодисперсної карбідно-боридної структури з рівномірним розподілом зміцнювальних фаз та збалансованим комплексом експлуатаційних властивостей.

5. Визначено раціональні режими електроферромагнітного наплавлення ($I = 160 \pm 10 \text{ A}$, $B = 0,32\text{--}0,36 \text{ Тл}$, $v = 1,5\text{--}1,8 \text{ мм/с}$, $G \approx 42 \pm 3 \text{ г/хв}$), за яких формується шар товщиною $1,0\text{--}1,2 \text{ мм}$ з твердістю $580\text{--}620 \text{ HV}$, адгезійною міцністю не менше 210 МПа та пористістю менш ніж 2% .

6. Експериментальні дослідження показали, що інтенсивність зношування відновленого розподільника зменшується майже на 60% порівняно з новою деталлю, а максимальні передзадирні та оптимальні навантаження у парі тертя «розподільник – приставне дно» зростають відповідно на 26% та в $1,4$ рази, при одночасному зниженні коефіцієнта тертя приблизно в $1,3$ рази.

7. Відновлений електроферромагнітним наплавленням сталевий розподільник забезпечує ресурс роботи не менше 90% від ресурсу нової деталі при збереженні стабільності геометричних параметрів і підвищенні



зносостійкості спряження, що підтверджує технологічну та економічну доцільність впровадження запропонованого процесу на спеціалізованих ремонтних підприємствах.

8. Розроблений технологічний процес відновлення сталюого розподільника є технологічно та економічно доцільним для впровадження на спеціалізованих ремонтних підприємствах і дозволяє суттєво підвищити коефіцієнт відновлюваності ресурсолімітуючих деталей аксіально-поршневих гідромашин.

Література.

1. Melyantsov, P. T., (2024). Analytical studies of the influence of total volume losses of the working fluid on the performance of the hydraulic drive of the transmission of a mobile machine. In O. Kuzmin, O. Romanyuk, S. Minieiev (Eds.), *Intellectual capital is the foundation of innovative development: Innovative technology, Computer science, Security systems, Transport development, Physics and mathematics, Agriculture*, (16-47). Monographic series «European Science». - Karlsruhe, Germany, Book 28. Part 3.

2. Parts Manual Series 90 100 cc Axial Piston Pump (Sauer-Danfoss) [Електронний ресурс] : детальні креслення, вибух-схеми, специфікація деталей розбірки. - PV Global, 2012. - Режим доступу: https://www.pv-global.com/manuals/series90_pump.pdf (дата звернення: 12.10.2025).

3. Мельянцов П. Т. Вхідний контроль технічного стану аксіально-поршневих гідромашин в технологічному процесі їх ремонту / П. Т. Мельянцов, О. М. Лосіков, В. К. Сидоренко // with the Proceedings of the 7 th International Scientific and Practical Conference «Scientific Trends and Trends in the Context of Globalization». - Umeå, Kingdom of Sweden, 2024. №44 (197). S. 467-477.

4. Мельянцов П. Т. Шляхи підвищення післяремонтної довговічності ресурсолімітуючих спряжень аксіально-поршневих гідромашин / П. Т. Мельянцов, О. М. Лосіков, В. К. Сидоренко // The XV International Scientific and Practical Conference "Innovative technologies in the field of human services" – Stockholm: Sweden, 2024. S. 211-215.



5. Мельянцов П. Т. Опыт ремонта гидропривода ГСТ-90 на ремонтных предприятиях [Текст] / П. Т. Мельянцов, Б. Г. Харченко, И. Г. Голубев. – М.: Госагропром СССР. АгроНИИТЭИИТО, 1989. 42 с.

6. Черейский П. М. Параметры технического состояния плунжерной пары гидропривода / П. М. Черейский, П. Т. Мельянцов // Техника в сельском хозяйстве. – 1990. №2. С.46-49.

7. Мельянцов П. Т. Substitution of controlling structural parameters of the technical condition of parts of the pluggage pair of axial-piston hydraulic machines for repair production conditions // Intellectual capital is the foundation of innovative development: Innovative technology, Computer science, Security systems, Physics and mathematics : монографія. – Кн. 38. Ч. 2. – Karlsruhe : ScientificWorld-NetAkhatAV, 2025. – С. 6–47. – ISBN 978-3-98924-083-4. – DOI: 10.30890/2709-2313.2025-38-02-007.

8. Черейский П. М. Влияние износа на работу гидропривода трансмиссии / П. М. Черейский, П. Т. Мельянцов // Техника в сельском хозяйстве. – 1988. №3. С. 63–64.

9. Мельянцов П. Т., Лосіков О. М., Сидоренко В. К. Технологія ремонту ресурсолімітуючих деталей спряжень качаючих вузлів аксіально-поршневих гідромашин // Modern engineering and innovative technologies. – 2025. – Вип. 38, ч. 1. – С. 15–37. – ISSN 2567-5273. – DOI: 10.30890/2567-5273.2025-38-01-022. – Режим доступу: <http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit38-01-022>.

10 Meliantsov P.T. Control of the technical condition of hydraulic transmission units of mobile machines on the basis of monitoring the level of cleanliness of the working fluid / P. T.Melyantsov, I. M. Dobryanskyi, O. M. Losikov, V. K. Sidorenko // The International Scientific Periodical Journal "SWorldJournal" № 24, (2024), 62 – 76. <https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj24-00-001> DOI: 10.30888/2663-5712.2024-24-00-001.

11. Мельянцов П. Т. Характер та вид спрацювання деталей спряжень качаючих вузлів аксіально-поршневих гідромашин / П.Т. Мельянцов, В. Р.



Плескач // Zbiór raportów naukowych «Nauka I Utworzenie XXI Stulecia: Teoria, Praktyka, Innowacje» – Opole: «Diamond trading tour», 2013. S. 67-70.

12. Земсков А. М. Поиск рациональных технологических режимов электроискровой обработки поршней и золотников объемного гидропривода ГСТ-112 / П. А. Ионов, А. В. Столяров, А. М. Земсков // - М.: Труды ГОСНИТИ. Т.116, 2013. С. 66-70.

13. Технології відновлення і зміцнення деталей електрообладнання з використанням композиційних матеріалів : монографія / М. М. Заблудський [та ін.]. - К. : НУБіП України, 2022. 268 с.

14. Мельянцов П. Т. Підвищення якості припрацювання деталей спряжень об'ємних гідромашин удосконаленням технології їх обкатки після ремонту / П. Т. Мельянцов, В. А. Задорожній, // Zbiór artykułów naukowych recenzowanych. Konferencji Międzynarodowej Naukowo- Praktycznej «Inżynieria i technologia. Osiągnięcia naukowe, rozwój, propozycje na rok 2017" – Zakopane: «Diamond trading tour», 2017. S 27-33.

Abstract. The article considers the problem of restoring resource-limiting parts of the couplings of the pumping units of axial-piston hydraulic machines of hydrostatic transmissions, in particular steel distributors. Based on the analysis of the design features and the nature of wear of distributors, it was established that the dominant types of wear are hydroabrasive and erosive, which are localized mainly in the area of six-shaped windows and sealing belts, as well as manifestations of adhesive wear. The feasibility of using electroferromagnetic surfacing as an effective method of restoring the geometry and physical and mechanical properties of the working surfaces of a steel distributor is substantiated. A correlation analysis of the influence of the chemical composition of the powder mixture and technological parameters of the process on the hardness, wear resistance and adhesion strength of the surfacing layer is carried out. It was established that the chromium content has a decisive influence on the formation of a wear-resistant structure, while the adhesive properties are mainly determined by the concentration of nickel; other alloying elements perform modifying and structure-forming functions. The optimal composition of the powder mixture and rational modes of electroferromagnetic surfacing are proposed, which ensure the formation of a finely dispersed carbide-boride structure with high adhesion to the base metal. Experimental studies have established that the wear intensity of the restored surface is reduced to 60% compared to a new part, and the service life of the restored distributor is not less than 90% of the service life of a new element. A technological process for restoring a steel distributor has been developed and tested, which is suitable for implementation at specialized repair enterprises.

Keywords: axial-piston hydraulic machine, hydrostatic transmission, pumping unit, steel distributor, hydroabrasive wear, electroferromagnetic surfacing, powder materials, wear resistance, adhesion strength, post-repair durability.

Стаття відправлена: 17.02.2026 р.

© Мельянцов П. Т.