



УДК 621.65:621.793.7:620.178

SCIENTIFIC SUBSTANTIATION OF A RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY FOR RESTORATION OF STEEL PISTONS OF AXIAL- PISTON HYDRAULIC MACHINES

НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ СТАЛЕВИХ ПОРШНІВ АКсіАЛЬНО-ПОРШНЕВИХ ГІДРАВЛІЧНИХ МАШИН

Melyantsov P.T. / Мельянцов 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 зниження ресурсу качаючих вузлів аксіально-поршневих гідромашин, що зумовлена інтенсивним зношуванням прецизійної пари тертя «поршень – втулка блоку». У процесі експлуатації на робочих поверхнях поршнів виникають гідроабразивне та корозійно-механічне зношування, а також пітингові пошкодження, що призводить до збільшення зазору в спряженні, зростання внутрішніх витоків робочої рідини та зниження енергетичної ефективності гідромашин. Метою роботи є розробка ресурсозберігаючої технології відновлення сталевих поршнів качаючих вузлів аксіально-поршневих гідромашин із підвищеними трибологічними характеристиками. На основі аналізу існуючих методів ремонту деталей обґрунтовано доцільність застосування високошвидкісного газополуменевого напилення. Визначено раціональний склад порошкової композиції WC-Co-Cr та встановлено оптимальні параметри процесу формування покриття, що забезпечують високу твердість, щільність і адгезійну міцність напиленого шару. Експериментальні трибологічні дослідження показали, що застосування покриття WC-Co-Cr забезпечує підвищення максимального передзадирного навантаження до 44,5 МПа, зниження коефіцієнта тертя до 0,009 та зменшення інтенсивності зношування майже у 2,3 рази порівняно з еталонною парою тертя. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої технології відновлення та її доцільність для підвищення ресурсу і надійності роботи аксіально-поршневих гідромашин.

Ключові слова: аксіально-поршнева гідромашина; поршень; зношування; відновлення деталей; високошвидкісне газополуменеве напилення; покриття WC-Co-Cr; трибологічні властивості; ресурсозбереження.

Вступ.

Ефективне функціонування гідротрансмисій самохідної техніки зазвичай



забезпечується аксіально-поршневыми гідромашинами. Робочий цикл об'ємних гідромашин реалізується через рух поршневої групи всередині блоку циліндрів. Завдяки зміні положення похилої шайби (люльки) змінюється амплітуда ходу поршнів, що дозволяє регулювати об'єм енергоносія, який транспортується до магістралі високого тиску, формуючи необхідну продуктивність насоса [1].

Продуктивність аксіально-поршневої гідромашини визначається не лише кутом нахилу регулювальної люльки. Важливим чинником є фактичний стан прецизійної пари «поршень - втулка блоку». У процесі експлуатації геометричні параметри деталей даного спряження змінюються, що призводить до збільшення конструктивного зазору, зростання внутрішніх витоків робочої рідини та зниження об'ємного ККД гідромашини.

Згідно з результатами дефектовки об'ємних гідромашин, представленими у дослідженні [2], зношення прецизійної пари «поршень - втулка блоку» є причиною виходу з ладу приблизно 12% агрегатів. Детальніший розгляд структури несправностей качаючих вузлів гідроагрегатів свідчить про те, що на гідравлічні насоси припадає 7,34% таких випадків, тоді як для гідромоторів цей показник становить 4,32%. Це підтверджує значний вплив зношення робочих поверхонь деталей зазначеного спряження на загальний ресурс трансмісії.

За конструктивними особливостями на сферичній поверхні поршня завальцьовується п'ята, яка виконує функції гідростатичного підшипника в процесі роботи качаючого вузла гідроагрегату, що представляє собою поршень з п'ятою як одну деталь. В зв'язку з цим, технічний стан поршня і його вибраковка будуть залежати не тільки від технічного стану робочих поверхонь самого поршня, а також і від технічного стану його п'яти.

Статистична оцінка технічного стану п'яти поршня у аксіально-поршневих гідромашин ГСТ-90, що потрапили до сервісного центру наводиться в роботі [3]. Її аналіз показує, що в качаючому вузлі аксіально-поршневого гідронасоса спостерігається близько - 10,25% несправностей, які припадають на зношування з'єднання «п'ята поршня-опора» і 3,10% на руйнування завальцьовань п'ят поршня. В качаючому вузлі аксіально-поршневого гідромотора на зношування



з'єднання «п'ята поршня-похила шайба» припадає - 6,41% і відповідно руйнування завальцювань п'ят поршня (плунжера) - 2,90%.

Є явним, що не відповідність технічного стану п'яти поршня номінальним значенням і відсутність можливості її відновлення обумовлює вибравку поршня з п'ятою і проведення їх заміни на нові деталі, що значно збільшує собівартість ремонту гідромашин.

Поглиблений аналіз геометричних параметрів спряження «втулка блоку - поршень» представлено у роботі [4]. Автори зазначають, що зношування деталей поршневої пари качаючого вузла має нерівномірний характер. Це зумовлено дією перекидного моменту на п'яті поршня, який спричиняє кутове зміщення (перекіс) поршня відносно осі втулки блоку циліндра. Така зміна положення поршня призводить до подвійного негативного ефекту: по-перше, зростають об'ємні витоки енергоносія; по-друге, через ексцентричне розташування поршня збільшується зона фактичного контакту поверхонь. Останнє провокує перехід до режимів граничного або сухого тертя, що суттєво впливає на підвищення механічних втрат в гідромашинах.

Відновлення експлуатаційних характеристик об'ємного гідروобладнання зазвичай відбувається на базі спеціалізованих ремонтних центрів. Це обумовлено потребою у специфічному технологічному оснащенні та інструментарії для виконання складних операцій [5].

Оскільки конструкція таких агрегатів включає прецизійну пару «поршень-втулка блоку», автори дослідження [6] наполягають на впровадженні обов'язкової стадії передремонтного діагностування. Зокрема, пропонується оцінювати фактичне спрацювання спряжень качаючого вузла через вимірювання сумарного об'єму дренажних витоків. Такий підхід дозволяє точно визначити ступінь зношення внутрішніх вузлів, проте його впровадження вимагає залучення додаткових інженерних та організаційних ресурсів.

На більшості сервісних підприємствах кількісна оцінка технічного стану деталей прецизійної пари «поршень-втулка блоку» здійснюється проведенням інструментального вимірювання їх геометричних розмірів, та за результатами



дефектації дається заключення про подальше використання. Поршня зі значним зношенням або наявністю слідів корозії вибраковуюються [2].

Вибраковка поршнів також здійснюється із-за зростання люфту в з'єднанні п'ят з їх сферичною головкою, значних зношень кільцевої опори п'яти та наявності слідів механічних пошкоджень на її поверхнях.

Застосування вище наведених методів контролю технічного стану поршня з п'ятою, показує, що в процесі ремонту проходить вибраковка поршнів, які не відпрацювали свій ресурс із-за стану п'яти, а також досягли значного зношення по його робочій (циліндричній) поверхні, що обумовлює їх заміну на нові деталі і відповідно зростання ціни сервісних робіт.

Ефективність відновлення об'ємних гідроагрегатів значною мірою лімітується фактичним зношенням прецизійної пари «поршень - втулка блоку». Як зазначається у дослідженні [7], зношення поверхонь деталей цього спряження виступає ключовим фактором, що провокує зростання як об'ємних витоків, так і механічного опору в качаючих вузлах. Саме стан цих деталей визначає складність ремонту та підсумкові енергетичні характеристики відновлених гідромашин.

У роботі [8] дослідники пропонують відновлювати робочі поверхні поршнів шляхом електроіскрового наплавлення. Такий підхід дозволяє досягти необхідних експлуатаційних параметрів зміцненого шару. Однак практична реалізація цієї методики стикається з серйозними перешкодами через нерівномірний характер спрацювання поршня. Спроби компенсувати такий профіль зносу стандартними засобами електроіскрової обробки є технологічно складними та призводять до надмірних фінансових витрат, що робить процес економічно невиправданим.

Подібна ситуація значною мірою спричинена дефіцитом даних про специфіку та морфологію спрацювання сталевих поршнів. Вирішення цієї проблеми вбачається у створенні прогресивних методик реновації спряжень «поршень - втулка блоку». Такі технології мають гарантувати не лише повернення деталей до вихідних геометричних параметрів, а й стабілізацію



експлуатаційних характеристик їх робочих зон на рівні, передбаченому стандартами якості та галузевими нормативами.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Складна кінематика поршня, що поєднує осьове зворотно-поступальне переміщення та обертання всередині втулки (обумовлене його з'єднанням із п'ятою), є ключовим фактором трансформації технічного стану їх робочих поверхонь (Рисунок 1).

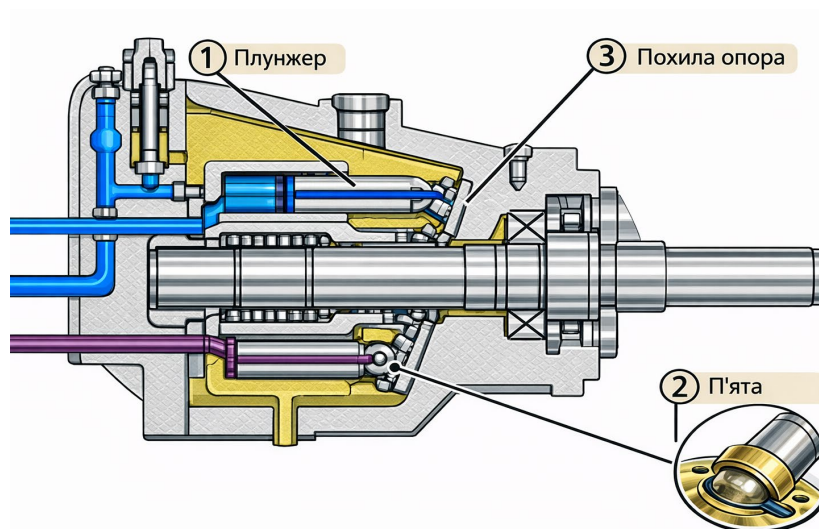


Рисунок 1 – Загальний вид качаючого вузла гідромотора з деталізацією елементів поршневої пари

Джерело: [9]

Через взаємодію п'яти (2) з похилою опорою (3) (Рисунок 1), на поршень (плунжер) діє значна радіальна складова сили, яка притискає його до стінки втулки. Це призводить до виникнення контактних напружень нерівномірного розподілу по довжині поршня. З'єднання «поршень – п'ята» працює за принципом сферичного шарніра, що передає осьове зусилля на похилу опору. П'ята функціонує як гідростатичний підшипник, де критично важливою є стабільність мастильної плівки (мікропорції оливи під кільцевою опорою п'яти). Найменша деградація сферичної поверхні або шорсткості опори п'яти призводить до її «перекосу», прориву мастильного шару та переходу до режиму



граничного і потім сухого тертя. Конструктивна специфіка качаючого вузла вимагає від робочих поверхонь не лише високої твердості, а й стабільності коефіцієнта тертя в умовах складного просторового руху. Будь-яке порушення структурної цілісності цих поверхонь запускає ланцюгову реакцію: ріст температури → зниження в'язкості оливи → інтенсифікація зносу → падіння загального ККД системи.

Подальше зношення зазначеного спряження призводить до зростання механічних та об'ємних втрат енергії [5, 7].

Специфічні режими функціонування пари «поршень – втулка блоку» та наявність абразивних домішок у робочій рідині спричиняють інтенсивне гідроабразивне зношення поверхонь [10, 11].

В роботі [12] автори рекомендують застосовувати для відновлення поршня, зі слідами абразивного зношення, електроіскрове наплавлення. При цьому, поршня у яких люфт в з'єднанні з п'ятою перевищує технічні вимоги вони рекомендують вибраковувати.

Низька ефективність даного методу відновлення пояснюється складністю його використання при наявності на робочих поверхнях поршня слідів корозії та раковин характерних для пітингу.

З огляду на вищезазначене, розробка прогресивної технології реновації сталевих поршнів качаючого вузла аксіально-поршневих гідромашин до вихідних параметрів набуває особливої науково-практичної ваги.

Мета дослідження полягає в оптимізації використання ресурсного потенціалу сталевих поршнів у качаючих вузлах гідроагрегатів за рахунок розробки та впровадження ефективної технології їх відновлення, що дозволить суттєво подовжити термін експлуатації деталей після ремонту та забезпечити їхню надійну роботу в складі аксіально-поршневих машин.

Постановка задачі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: обґрунтувати вибір способу відновлення поршнів гідромашин ГСТ-90 з урахуванням їх конструктивних особливостей, характеру зношування та техніко-



економічної доцільності застосування технології ремонту. Провести кореляційний аналіз з метою встановлення взаємозв'язків між складом порошкового матеріалу, параметрами високошвидкісного газополуменевого напилення та властивостями сформованого покриття. Виконати порівняльну оцінку фізико-механічних характеристик відновлених поверхонь відносно параметрів нових серійних деталей. На основі отриманих результатів розробити комплексну технологію відновлення працездатності досліджуваних деталей.

Викладення основного матеріалу.

Огляд сучасних підходів до реновації деталей пари «поршень - втулка блоку» свідчить про значні технологічні складності при використанні традиційних методів нанесення металу [13].

Ситуація погіршується нерівномірною зміною геометрії робочих зон (Рисунок 2), що робить стандартні відновлювальні операції важко здійсненними та вимагає пошуку альтернативних інженерних рішень.

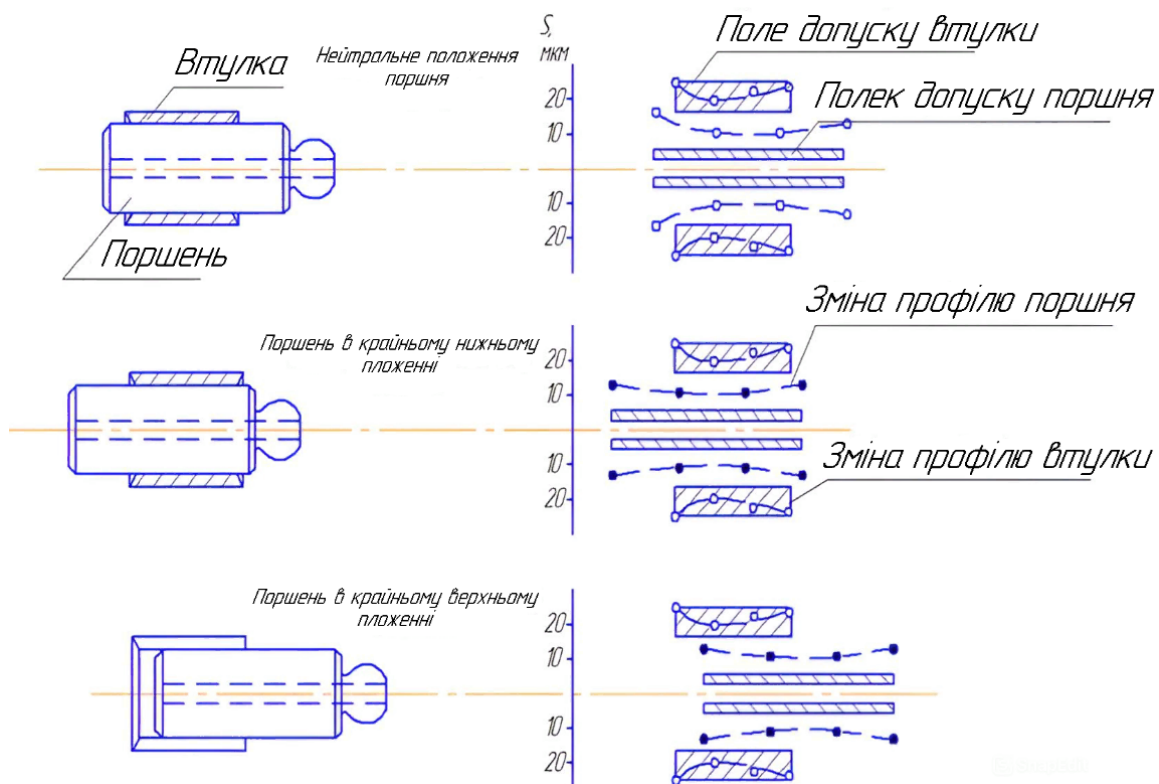


Рисунок 2 - Характер зношення деталей спряження «втулка блока – поршень»

Авторська розробка



Специфічна морфологія зношування деталей даного спряження є наслідком поєднання осьових та ротаційних рухів поршня. Додатковим деструктивним чинником виступає перекидна сила, що генерується під час ковзання п'яти поршня по похилій шайбі. Експериментальні дані свідчать, що найбільші зміни геометрії поршня спостерігаються у другому та третьому перерізах, де величина зносу сягає 4–8 мкм. Таке нерівномірне спрацювання зумовлене ексцентриситетом положення поршня відносно осі блока циліндрів під дією згаданого моменту.

Детальний аналіз виду зношення робочих поверхонь поршнів качаючих вузлів аксіально-поршневих гідромашин, які потрапляють до сервісного підприємства, показав, що крім слідів гідроабразивного зношення на його поверхні також спостерігаються сліди корозії та раковини, які підтверджують наявність пітингово зносу (Рисунок 3).



Рисунок 3 - Сліди корозії а) і пітингового зносу б) на робочій поверхні поршня (збільшення 1080х)

Авторська розробка

Поява слідів корозії на робочих поверхнях поршнів пояснюється експлуатацією аксіально-поршневих гідромашин на робочих рідинах, в яких знаходиться вода, а також їх зберіганням з порушеною герметичністю корпусів у приміщеннях, де відносна вологість повітря перевищує 60%. Корозія проникає на значну глибину робочої поверхні поршня, що не дозволяє реалізувати існуючі способи (електроіскрова наплавка) для їх відновлення, при поступанні таких



агрегатів до сервісних центрів. У 3-5% агрегатів, які поступають в ремонт, спостерігаються корозійні процеси деталей їх качаючих вузлів.

Поява слідів пітингового зносу на циліндричній поверхні поршня пояснюється постійним перебуванням його під дією циклічних навантажень високого тиску, що обумовлює у підповерхневих шарах металу накопичення мікронапружень, які призводять до зародження втомних мікротріщин. Коли мікротріщина виходить на поверхню, у неї під високим тиском потрапляє робоча рідина. Під час кожного циклу нагнітання рідина діє як «клин», розширюючи тріщину зсередини, що зрештою призводить до викришування мікрочастинки металу.

Водночас наявність перекидного моменту зумовлює ексцентричне положення поршня, що підсилює контактні напруження у зоні тертя, які перевищують границю витривалості металу, і призводить до граничного тертя. Відсутність стабільної мастильної плівки у зоні контакту прискорює деградацію поверхні та сприяє швидшому утворенню таких «вісп». Такі дефекти спостерігаються у 2-4% гідроагрегатів, що поступають до сервісного підприємства. Як правило, поршня з такими дефектами вибраковують із-за значної глибини раковин.

Детальний аналіз характеру та виду зношення робочої (циліндричної) поверхні поршня, показав, що для забезпечення якості її відновлення і суттєвого зменшення вартості ремонту гідроагрегатів потрібно розробити оптимальний метод відновлення зношеної поверхні у поршнів не тільки зі слідами гідроабразивного зношення, а також і слідами корозії та пітингу.

При розгляданні способу відновлення циліндричної поверхні поршня необхідно врахувати, що у поршня ще є сферична поверхня, на якій завальцьовується п'ята з технологічним зазором 0,15 мм. В процесі роботи гідромашини і безпосередньо поршневої пари її качаючого вузла в зоні завальцювання п'яти на сферичній робочій поверхні поршня виникає гідроабразивне зношення, яке представляє собою ризики різної глибини і профілю в зоні контакту робочих поверхонь (Рисунок 4).



Рисунок 4 - Макроструктура сферичної поверхні поршня зі слідами гідроабразивного зношення (збільшення 1080х)

Авторська розробка

Наявність гідроабразивного зношення деталей у зоні їх контакту приводить до зростання люфта в з'єднанні «сферична головка поршня – п'ята», що в умовах експлуатації обумовлює порушення центрування елементів вузла, появи перекосів під час руху поршня та збільшення ударних і змінних навантажень у контактній зоні. У результаті відбувається нерівномірний розподіл контактних напружень, погіршуються умови змащування, у зазор потрапляють абразивні тверді частинки робочої рідини, що додатково підсилює інтенсивність гідроабразивного зношення. Сукупність цих факторів спричиняє подальше прогресуюче руйнування контактних поверхонь, зростання вібрацій і зниження точності роботи вузла, що в кінцевому підсумку може призвести до передчасної втрати його працездатності.

Є явним, що для відновлення сферичної поверхні головки поршня першочергово необхідне видалення п'яти, щоб був доступ до зношеної поверхні деталі. Сферична головка поршня з'єднується з його циліндричною частиною через шийку і має незначне зношення, що створює певні складності при обґрунтуванні способу її відновлення.

Насамперед необхідно уникати перегріву сферичної поверхні через її малі розміри, забезпечувати добру адгезію нанесеного шару з поверхнею деталі та високу зносостійкість відновленої поверхні. Після відновлення поверхня підлягає механічній обробці з подальшим завальцюванням нової п'яти на поршень.



Із проведеного аналізу характеру та виду зношення робочих поверхонь поршня можна зробити висновок, що для відновлення його робочої (циліндричної) поверхні необхідно обґрунтувати спосіб, який би забезпечив значну товщину нарощування (до 1 мм) з мінімальним температурним впливом на поршень, високими показниками зносостійкості і адгезії.

Пріоритетним завданням при обґрунтуванні способу реновації поршня є аналіз технічних і техніко-економічних критеріїв, що дає змогу на початковій стадії досліджень детермінувати оптимальні методи його відновлення.

Відповідно до технічних умов виготовлення деталей зазначеного спряження, початковий зазор має знаходитися в межах 11-23 мкм, проте під час роботи механізму середнє значення зазору зростає до 24,48 мкм при середньоквадратичному відхиленні 10,14 мкм, тоді як максимальне значення зазору може досягати 48 мкм [12].

Збільшення зазору в прецизійному спряженні «поршень – втулка блока» викликає втрату герметичності гідравлічної пари, зниження об'ємного коефіцієнта корисної дії гідромашини та погіршення її експлуатаційних характеристик.

Поршень качаючого вузла виготовлений зі сталі ШХ15СГ з твердістю 52...56 HRC і має порожнисту конструкцію. Деталь складається з двох циліндричних елементів. Така конструкція обумовлює підвищені вимоги до вибору способу відновлення, оскільки застосування технологій, що супроводжуються значним тепловим впливом, може призвести до виникнення деформацій, зміни структури матеріалу.

З урахуванням умов роботи деталі та її конструктивних особливостей спосіб відновлення повинен відповідати таким основним вимогам: мінімальний тепловий вплив на основу деталі; висока адгезійна міцність покриття; висока твердість та зносостійкість відновленої поверхні; можливість нанесення рівномірного покриття невеликої товщини; забезпечення високої щільності та низької пористості покриття; можливість подальшої механічної обробки для отримання необхідної точності та шорсткості поверхні.



З метою вибору найбільш раціональної технології відновлення було проаналізовано найбільш поширені методи відновлення циліндричних поверхонь деталей машин (Таблиця 1).

Таблиця 1 - Порівняльний аналіз способів відновлення поршня

Спосіб відновлення	Переваги	Недоліки	Оцінка придатності для поршня
Гальванічне хромування	Висока твердість покриття (800–1000 HV), низький коефіцієнт тертя, добра корозійна стійкість	Невелика товщина покриття, мікротріщини, низька ударна міцність, екологічна небезпечність процесу	Обмежена придатність
Електродугове наплавлення	Висока товщина шару, висока міцність зчеплення	Значний тепловий вплив, можливі деформації, необхідність значної механічної обробки	Малопродатний для порожнистих деталей
Плазмове напилення	Можливість нанесення різних матеріалів, висока твердість покриття	Відносно висока пористість, низька адгезійна міцність порівняно з ВГН	Середня придатність
Електроіскрове наплавлення	Висока твердість поверхні, точне локальне відновлення, мінімальні деформації деталі	Обмежена товщина шару, низька продуктивність, потребує спеціального обладнання	Середня придатність, ефективно для поршнів з локальними зносами
Високошвидкісне газополуменеве напилення (ВГН)	Висока щільність покриття, низька пористість (<1–2%), висока адгезія, мінімальний тепловий вплив	Потребує спеціалізованого обладнання	Найбільш ефективний метод

Авторська розробка

Аналіз наведених способів показує, що найбільш раціональним методом відновлення циліндричної поверхні поршня є високошвидкісне газополуменеве напилення (ВГН).



Метод ВГН ґрунтується на використанні енергії високошвидкісного газового потоку, що утворюється при згорянні палива та кисню в камері згоряння. Порошковий матеріал вводиться в цей потік, нагрівається до пластичного стану та з великою швидкістю осаджується на поверхні деталі. Процес формування структури напиленого шару при ВГН є складним фізико-хімічним явищем, що базується на синергії теплової та кінетичної енергії.

Основними перевагами цього методу є: формування дуже щільного покриття з пористістю менше 1–2 %; висока адгезійна міцність покриття (до 70–80 МПа); висока твердість покриттів (900–1400 HV); низький тепловий вплив на основу деталі (150–200 °С); висока зносостійкість і корозійна стійкість покриття.

Завдяки цим властивостям покриття ВГН широко застосовуються для відновлення деталей гідравлічних машин, насосів, штоків гідроциліндрів та поршневих пар, що працюють в умовах інтенсивного тертя та гідроабразивного зношення.

Реалізація запропонованого методу реновації поршня передбачає вибір оптимальної порошкової суміші. Її склад має характеризуватися високою металургійною сумісністю з основою, належним рівнем адгезійної міцності, а також здатністю забезпечувати необхідні експлуатаційні параметри: зносостійкість та корозійну стійкість.

Для формування зносостійкого покриття на поверхні поршня можуть застосовуватися порошкові композиційні матеріали на основі карбідів. Найбільш поширеними є: WC–Co; WC–Co–Cr; Cr₃C₂–NiCr.

В відповідності до хімічного складу матеріалу деталі і умов її роботи на першому етапі досліджень рекомендується наступний склад відновлювального покриття - WC–Co–Cr.

Композиційний матеріал WC–Co–Cr складається з таких основних компонентів: Карбід вольфраму (WC) - забезпечує дуже високу твердість (до 1200–1400 HV) та стійкість до абразивного і гідроабразивного зношення; Кобальт (Co) - виконує функцію металевої зв'язуючої фази, підвищує пластичність покриття та покращує його адгезію до сталеві основи; Хром (Cr)



підвищує корозійну стійкість покриття та стабілізує структуру карбідної композиції.

У результаті формується композиційне покриття з високою твердістю, щільною структурою та високою зносостійкістю, яке ефективно протистоїть дії гідроабразивного середовища та забезпечує значне підвищення ресурсу роботи поршня качаючого вузла аксіально-поршневої гідромашини.

Для вибору оптимального складу порошкових сумішей, що застосовуються при відновленні циліндричної поверхні поршня качаючого вузла аксіально-поршневої гідромашини, було проведено кореляційний аналіз впливу основних компонентів порошкової композиції WC–Co–Cr на два ключові експлуатаційні показники покриття: твердість та зносостійкість (Таблиця 2).

Таблиця 2 - Коефіцієнти кореляції (r) між складом порошкової суміші WC–Co–Cr та властивостями покриття

№ з/п	Хімічний елемент	Кореляція з твердістю	Кореляція із зносостійкістю
1	W	+0,98	-0,97
2	C	+0,97	-0,96
3	Co	+0,85	-0,92
4	Cr	+0,91	-0,95

Авторська розробка

Аналіз отриманих результатів показує, що найбільший вплив на підвищення твердості покриття має вміст вольфраму ($r = + 0,98$), який входить до складу карбиду вольфраму (WC) – основної зміцнювальної фази композиційного матеріалу. Карбіди вольфраму характеризуються дуже високою твердістю (HV 1400...2000) та стійкістю до абразивного і гідроабразивного зношення. Наявність цих частинок у структурі покриття забезпечує формування високодисперсної карбідної фази, яка значно підвищує опір поверхні механічному руйнуванню.

Вуглець також демонструє високий позитивний кореляційний зв'язок із твердістю ($r = + 0,97$), оскільки бере участь у формуванні карбідних фаз WC, що



визначають основні механічні властивості покриття.

Кобальт ($r = + 0,85$) виконує роль металевої зв'язуючої матриці, у якій рівномірно розподіляються тверді карбідні частинки. Завдяки цьому підвищується пластичність і ударна в'язкість покриття, а також забезпечується висока адгезія до сталеві основи поршня. Наявність пластичної металевої матриці сприяє рівномірному розподілу навантажень між карбідними включеннями та запобігає їх крихкому руйнуванню.

Хром ($r = + 0,91$) позитивно впливає як на твердість, так і на зносостійкість покриття, оскільки сприяє утворенню додаткових карбідних фаз та підвищує корозійну стійкість матеріалу. Крім того, хром стабілізує структуру зв'язуючої фази та покращує стійкість покриття до дії агресивного робочого середовища.

Негативні значення коефіцієнтів кореляції між вмістом компонентів і показником зношування ($-0,92 \dots -0,97$) свідчать про те, що зі збільшенням їх масової частки інтенсивність зношування зменшується, тобто зносостійкість відновленої поверхні зростає.

Результати кореляційного аналізу підтверджують доцільність застосування порошкових композицій WC-Co-Cr для відновлення поршнів аксіально-поршневих гідромашин, оскільки поєднання твердих карбідних частинок WC та пластичної кобальтово-хромової матриці забезпечує формування щільного зносостійкого покриття з високими фізико-механічними властивостями.

Результати кореляційного аналізу впливу кількісного хімічного складу порошкової композиції WC-Co-Cr, що наноситься на поверхню поршня методом ВГН, на фізико-механічні властивості відновленої поверхні наведено в (Таблиці 3).

Аналіз результатів, наведених у (Таблиці 3), показує, що найбільш ефективним складом порошкової композиції для відновлення циліндричної поверхні поршня є варіант № 3, який має наступний хімічний склад: W – 86 %; C – 5,7 %; Co – 10 %; Cr – 3,0 %. Даний склад забезпечує оптимальне поєднання високої твердості та зносостійкості сформованого покриття.



Таблиця 3 – Показники фізико-механічних властивостей відновленої поверхні залежно від кількісного хімічного складу порошку WC–Co–Cr

Варіант	W (%)	C (%)	Co (%)	Cr (%)	Твердість, HV	Мікрозносостійкість ($F \cdot 10^{-12}$), мм ³ /Нм
1	84	5,5	8	2,5	1080	2,2
2	85	5,6	9	2,8	1120	2,0
3	86	5,7	10	3,0	1180	1,7
4	85	5,6	8,5	2,9	1100	2,1
5	86	5,7	9,5	3,2	1150	1,9

Авторська розробка

Для зазначеного варіанта спостерігається максимальне значення твердості (HV \approx 1180), що забезпечує підвищену стійкість поверхні до пластичної деформації та контактної втоми під час роботи поршня у sprzęженні «поршень – втулка блоку». Одночасно фіксується найменша інтенсивність мікрозношування ($1,7 \cdot 10^{-12}$ мм³/Нм), що свідчить про високі триботехнічні властивості та підвищену довговічність відновленої поверхні. Високі значення твердості пояснюються значною часткою карбиду вольфраму (WC), який є основною зміцнювальною фазою покриття.

Отримані результати свідчать, що варіант № 3 є найбільш оптимальним з точки зору комплексного підвищення твердості та зносостійкості відновленої поверхні поршня. Застосування порошкової композиції WC–Co–Cr зазначеного складу доцільне для відновлення поршнів аксіально-поршневих гідромашин, що працюють в умовах високих контактних навантажень, інтенсивного тертя та дії гідроабразивного середовища, оскільки забезпечує формування щільного зносостійкого покриття та значне підвищення ресурсу роботи деталі.

Для визначення впливу параметрів процесу ВГН на якість відновленої поверхні поршня було проведено кореляційний аналіз між основними технологічними параметрами напилення та фізико-механічними властивостями сформованого покриття. До аналізу включено параметри, що найбільшою мірою визначають структуру та експлуатаційні характеристики покриття: температура газового потоку, швидкість частинок порошку, витрата палива, відстань напилення та подача порошку (Таблиця 4).



Таблиця 4 - Кореляційна матриця взаємозв'язків параметрів ВГН та властивостей покриття

Параметр	Т потоку	V частинок	Подача порошку	Дистанція напилення	Твердість HV	Пористість %	Зносостійкість
Т потоку	1,00	+0,82	+0,61	-0,55	+0,78	-0,73	+0,74
V частинок	+0,82	1,00	+0,66	-0,58	+0,91	-0,88	+0,93
Подача порошку	+0,61	+0,66	1,00	-0,42	+0,54	-0,48	+0,59
Дистанція напилення	-0,55	-0,58	-0,42	1,00	-0,64	+0,71	-0,68
Твердість HV	+0,78	+0,91	+0,54	-0,64	1,00	-0,89	+0,94
Пористість %	-0,73	-0,88	-0,48	+0,71	-0,89	1,00	-0,92
Зносостійкість	+0,74	+0,93	+0,59	-0,68	+0,94	-0,92	1,00

Авторська розробка

Аналіз отриманої кореляційної матриці показує, що найбільший вплив на формування фізико-механічних властивостей покриття має швидкість частинок порошку у газовому потоці. Вона демонструє дуже сильний позитивний кореляційний зв'язок з твердістю покриття ($r = + 0,91$) та зносостійкістю ($r = + 0,93$), а також сильний негативний зв'язок з пористістю ($r = - 0,88$). Це пояснюється тим, що при високій швидкості частинки порошку інтенсивно деформуються під час удару об поверхню деталі, формуючи щільну ламелярну структуру покриття з мінімальною кількістю пор.

Температура газового потоку також істотно впливає на властивості покриття. Вона має позитивний кореляційний зв'язок з твердістю ($r = + 0,78$) і зносостійкістю ($r = + 0,74$) та негативний з пористістю ($r = - 0,73$). Це пов'язано з тим, що підвищення температури забезпечує достатній ступінь нагрівання частинок порошку, що сприяє їх пластичній деформації та формуванню щільного шару покриття. Водночас надмірне підвищення температури може призвести до часткового окиснення або вигорання легуючих елементів.

Подача порошку має помірний позитивний кореляційний зв'язок з твердістю ($r = + 0,54$) і зносостійкістю ($r = + 0,59$), що пояснюється збільшенням кількості частинок, які беруть участь у формуванні покриття. Проте надмірна подача порошку може призводити до неповного проплавлення частинок і



зростання пористості.

Відстань наплення демонструє негативний вплив на твердість ($r = -0,64$) та зносостійкість ($r = -0,68$) і позитивний зв'язок з пористістю ($r = +0,71$). Це пояснюється тим, що при збільшенні дистанції частинки порошку частково охолоджуються і втрачають швидкість перед ударом об поверхню деталі, що знижує ступінь їх пластичної деформації та погіршує ущільнення покриття.

Важливою закономірністю є сильний негативний кореляційний зв'язок між пористістю покриття та його експлуатаційними властивостями. Пористість має коефіцієнт кореляції $r = -0,89$ з твердістю та $r = -0,92$ із зносостійкістю, що підтверджує необхідність формування максимально щільної структури покриття для забезпечення високих триботехнічних характеристик.

На основі узагальнення літературних даних та результатів кореляційного аналізу параметрів процесу наплення сформовано рекомендовані оптимальні режими ВГН (Таблиця 5).

Таблиця 5 - Оптимальні режими ВГН для відновлення поршня покриттям WC-Co-Cr

Параметр процесу	Позначення	Оптимальне значення	Робочий діапазон	Призначення параметра
Температура газового потоку	T	2700°C	2500–3000 °C	Забезпечує нагрів частинок порошку до пластичного стану
Швидкість частинок порошку	V	750 м/с	650–900 м/с	Формує щільну структуру покриття та високу адгезію
Дистанція наплення	L	200 мм	180–220 мм	Забезпечує оптимальний нагрів та швидкість частинок при осадженні
Подача порошку	G	35 г/хв	30–40 г/хв	Визначає інтенсивність формування шару покриття
Тиск кисню	Po ²	0,9 МПа	0,8–1,0 МПа	Впливає на температуру та швидкість газового потоку
Тиск палива (гас)	Pf	0,7 МПа	0,6–0,8 МПа	Забезпечує стабільність горіння та формування струменя

Авторська розробка



Аналіз наведених режимів показує, що ключовими параметрами процесу ВГН є температура газового потоку, швидкість частинок порошку та дистанція напилення. Саме ці параметри визначають ступінь пластичної деформації частинок WC–Co–Cr під час удару об поверхню деталі та формування щільної ламелярної структури покриття.

Оптимальна температура газового потоку (близько 2700 °C) забезпечує достатній нагрів частинок без їх повного плавлення, що є характерною особливістю ВГН-технології та дозволяє зберегти карбідну структуру WC. Висока швидкість частинок (приблизно 750 м/с) сприяє інтенсивному ущільненню шару та формуванню покриття з пористістю менше 1–2 %. При цьому, дистанція напилення близько 200 мм забезпечує оптимальний баланс між температурою та швидкістю частинок у момент їх контакту з поверхнею поршня.

Застосування зазначених режимів дозволяє отримати щільне покриття WC–Co–Cr з твердістю 1100–1200 HV, високою адгезійною міцністю (понад 70 МПа) та підвищеною зносостійкістю, що забезпечує значне збільшення ресурсу роботи відновленого поршня в умовах інтенсивного тертя та гідроабразивного зношення.

Одним із вагомих параметрів, який впливає на якість відновленого шару поршня являється значення швидкості подачі порошку. Оптимальне його значення становить - 750 м/с. Стабільне забезпечення максимальної швидкості частинок посилюється застосуванням сопла Лавалю (конвергентно-дивергентне сопло). У його звуженій частині газ досягає швидкості звуку, а у розширювальній частині потік стає надзвуковим. Сопло з оптимальними параметрами має наступні значення: кут розширення - 6-8°; довжина дивергентної частини – 150-200 мм; діаметр горла – 8-12 мм.

Для зниження процесів окислення металу в самому факелі на зрізі сопла встановлюється спеціальна насадка (коаксіальне кільце), яка подає аргон (захисний газ) навколо основного факела. Це створює «захисну завісу», яка відсікає атмосферний кисень від зони напилення на поршні.



При оптимальній швидкості аргону на зрізі 15–25 м/с, за яких він, як захисний газ, створює «ламінальний чохол» і не «збиває» основний струмінь, оптимальні витрати газу знаходяться в інтервалі 41-42 л/хв (для порошкової суміші WC-10Co-3Cr).

Для активного конструювання мікроструктури нанесеного матеріалу застосовується імпульсне електромагнітне поле (ІЕМП), яке дозволяє не просто фокусувати струмінь, а створювати «хвилі» тиску, які додатково ущільнюють кожен шар покриття в процесі його формування (ефект мікрокування). Для цього на зрізі сопла пальника встановлюють (зовнішній соленоїд), що забезпечує максимальне стиснення струменя на вильоті.

До однією із причин застосування ІЕМП слід віднести мінімізацію «тіньового ефекту», який з'являється при напиленні на циліндричні поверхні поршнів, коли через мікронерівності поверхні або кут падіння частинок утворюються «мертві зони», куди порошок не потрапляє або лягає «пухко».

З ІЕМП під дією сили Лоренца траєкторія частинок стає злегка спіралеподібною або сфокусованою. Це змушує частинки «залітати» за мікронерівності, заповнюючи пори, які раніше залишалися порожніми.

Водночас поле утримує частинки в вузькому паралельному пучку (колімує потік). Усі частинки вдаряються об криволінійну поверхню поршня максимально перпендикулярно, що виключає появу слабких «пухких» зон на бокових гранях.

Оптимальними параметрами електромагнітного впливу являються: Індукція магнітного поля (В) - 0,15–0,35 Тл. (це оптимальний діапазон для фокусування важких частинок вольфраму без надмірного відхилення траєкторії; Частота (для імпульсного поля) - 50–100 Гц (допомагає створювати ефект «вібраційного ущільнення» шару, що наноситься).

Технологічний цикл відновлення поршнів складався з декількох етапів: початкової дефектовки та абразивної обробки поверхні (шліфування на глибину 0,05–0,1 мм) задля ліквідації осередків корозії, пітингу та зносу. Наступним кроком було створення розвиненого мікрорельєфу поверхні шляхом дробоструминної активації, що забезпечувало високу адгезію майбутнього шару.



Перед безпосереднім нанесенням покриття деталі проходили стадію ультразвукового знежирення. Завершувався процес формуванням зміцнювального шару методом ВГН необхідної товщини з подальшим фінішним шліфуванням у заданий номінальний або ремонтний допуск.

Для проведення експериментальних досліджень з реальних деталей гідромашин - втулок циліндрового блоку (латунь ЛМцСКА-58-2-2-1-1) та поршнів (нові - сталь ШХ15СГ; відновлені – ВГН порошком WC–Co–Cr) було виготовлено серію модельних зразків. Оцінка працездатності трибоспряження «поршень - втулка» реалізовувалася за схемою «ролик–колодка» на універсальній машині тертя моделі 2070 СМТ-1. Умови випробувань максимально наближені до експлуатаційних: як мастильне середовище використовували гідравлічну оливу МГЕ-46В (ТУ 38.001.347-2000), що подавалася в зону контакту в режимі граничного тертя.

Програма триботехнічної атестації пар тертя була структурована за триетапним принципом:

1. Початкове притирання: виконувалося при сталій частоті обертання контрзразка (ролика) $n = 380 \text{ хв}^{-1}$ та питомому навантаженні на колодку $P = 0,1 \text{ МПа}$ протягом 40 хвилин.

2. Припрацювання: проводилося за аналогічної швидкості обертання ($n = 380 \text{ хв}^{-1}$) з поступовим ступінчастим зростанням навантаження ($P = 0,1 \text{ МПа}$). Під час цього етапу фіксували максимальне передзадирне навантаження ($P_{\text{м.п}}$), за якого спостерігалися перші ознаки заїдання поверхонь.

3. Оптимізація та зносні випробування: після досягнення пікових навантажень здійснювалося розвантаження вузла (крок $P = 0,1 \text{ МПа}$) з метою визначення робочого навантаження ($P_{\text{оп}}$), що відповідає мінімальному значенню коефіцієнта тертя (f_{min}).

Результати досліджуваних пар тертя при припрацюванні представлені у (Таблиці 6).



**Таблиця 6 – Результати випробувань на припрацювання для пар тертя
«поршень – втулка блоку»**

Пара тертя	Показник		
	$P_{м.п.}$, МПа	$P_{оп.}$, МПа	Коефіцієнт тертя, f_{min}
Еталонна пара: «поршень (сталь ШХ15СГ – втулка (латунь ЛМЦСКА-58-2-2-1-1)»	31,0	23,0	0,016
Пара: «поршень (ВГН + WC-10Co-3Cr + Ar) – втулка (латунь ЛМЦСКА-58-2-2-1-1)»	38,0	28,5	0,012
Пара: «поршень (ВГН + WC-10Co-3Cr + Ar + ІЕМП – втулка (латунь ЛМЦСКА-58-2-2-1-1)»	44,5	34,0	0,009

Авторська розробка

Порівняльні гістограми усереднених значень критичних ($P_{м.п.}$) та раціональних ($P_{оп.}$) навантажень для базових і дослідних трибосистем представлені на (Рисунку 5).

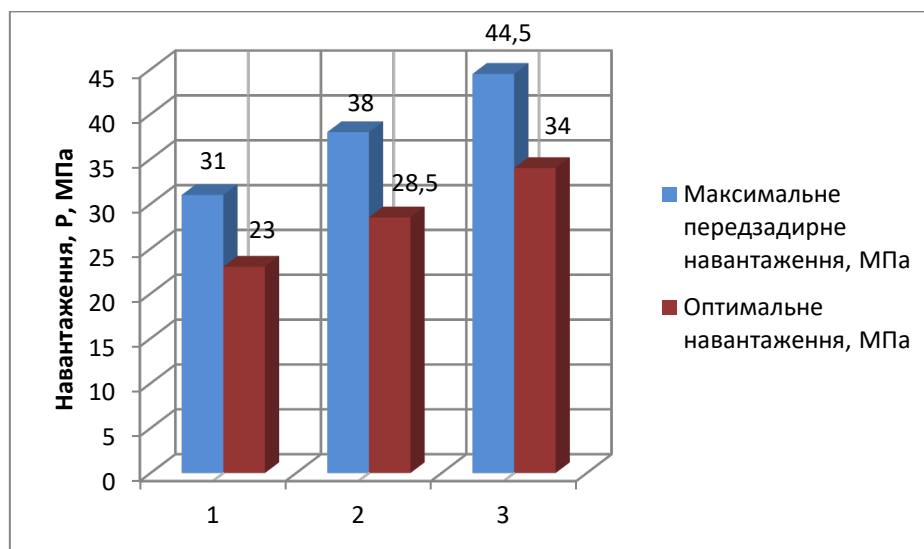


Рисунок 5 - Середні значення максимальних передзадирних і оптимальних навантажень для «еталонних» та «експериментальних» пар тертя:

1 – «еталонна» пара - «поршень (ШХ15СГ) - втулка (латунь ЛМЦСКА-58-2-2-1-1)»; **2** - «поршень (ВГН + WC-10Co-3Cr + Ar) - втулка (латунь ЛМЦСКА-58-2-2-1-1)»; **3** - «поршень (ВГН + WC-10Co-3Cr + Ar+ІЕМП) - втулка (латунь ЛМЦСКА-58-2-2-1-1)»

Авторська розробка



В експериментальних парах робоча поверхня сталевих поршнів була відновлена методом ВГН композиційним порошком WC-10Co-3Cr. Процес формування покриття супроводжувався накладанням ІМЄП та використанням аргонового захисту, а фінальна геометрія виробу досягалася прецизійним шліфуванням.

Аналіз отриманих результатів показав, що для еталонної пари тертя «поршень (сталь ШХ15СГ) – втулка (латунь ЛМцСКА-58-2-2-1-1)» оптимальне навантаження становить 23 МПа, а максимальне передзадирне навантаження – 31 МПа. Такі значення характеризують базову несучу здатність вузла тертя, яка визначається фізико-механічними властивостями матеріалів контактуючих поверхонь та умовами формування мастильної плівки.

Застосування ВГН композиційною сумішшю WC-10Co-3Cr у захисному середовищі аргону дозволило суттєво підвищити експлуатаційні характеристики пари тертя. Максимальне передзадирне навантаження для цієї пари зросло до 38 МПа, а оптимальне навантаження – до 28,5 МПа, що відповідно у 1,23 і 1,24 раза більше, ніж для еталонної пари.

Найбільш суттєве підвищення несучої здатності спостерігається для пари тертя, в якій відновлення поршня здійснювалось ВГН порошковою сумішшю WC-10Co-3Cr у середовищі Ar з додатковим впливом ІЕМП. У цьому випадку максимальне передзадирне навантаження досягає 44,5 МПа, а оптимальне навантаження становить 34 МПа, що відповідно у 1,44 та 1,48 раза перевищує показники еталонної пари.

Підвищення експлуатаційних характеристик пояснюється формуванням щільного карбідного покриття WC-10Co-3Cr, яке характеризується: високою твердістю та зносостійкістю; низькою пористістю; підвищеною адгезійною міцністю з основним матеріалом; дрібнодисперсною та більш однорідною структурою.

Додатковий вплив ІЕМП, під час формування покриття, сприяє орієнтації та ущільненню частинок у струмені напилення, покращенню умов їх пластичної деформації при ударі об поверхню деталі, а також зменшенню кількості оксидних включень у структурі покриття. У результаті формується більш



щільний та однорідний шар покриття, що забезпечує підвищення несучої здатності та зниження коефіцієнта тертя.

Отримані результати підтверджують, що відновлення поршнів методом ВГН композитним порошком WC-10Co-3Cr у середовищі аргону з додатковим впливом ІЕМП є ефективним технологічним рішенням, яке дозволяє суттєво підвищити трибологічні характеристики та експлуатаційну надійність вузлів тертя типу «поршень – втулка блоку» аксіально-поршневих гідромашин.

Дана робоча гіпотеза також підтверджується значенням коефіцієнтів тертя в досліджуваних парах при оптимальному навантаженні (Рисунок 6).

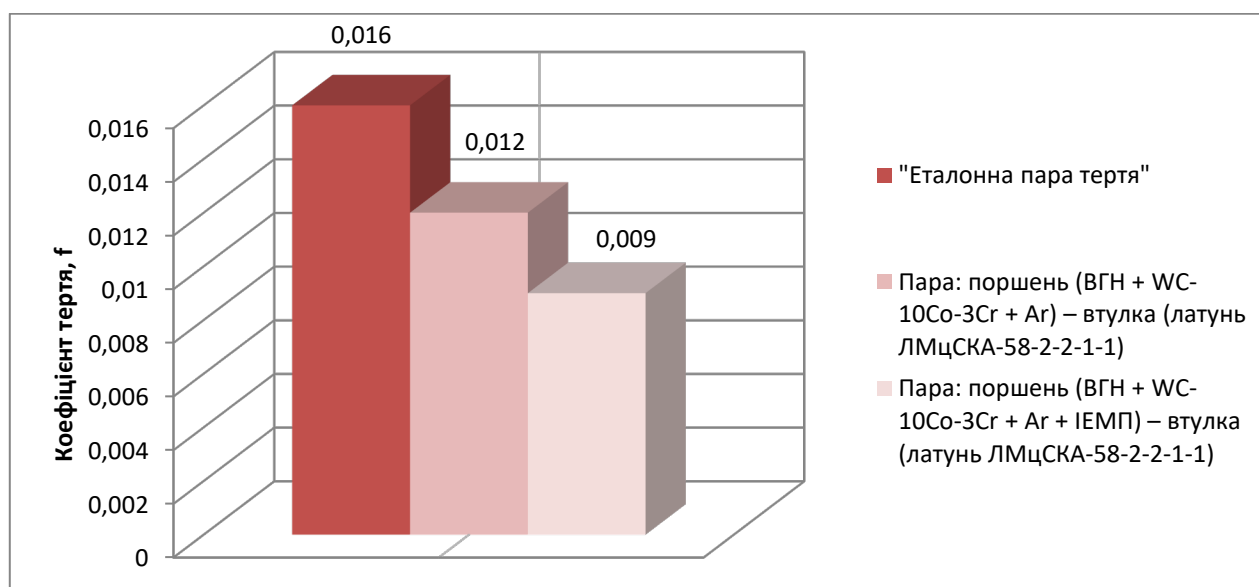


Рисунок 6 - Значення мінімальних коефіцієнтів тертя для «еталонних» та «експериментальних» пар тертя

Авторська розробка

Аналіз результатів показав, що для еталонної пари тертя «поршень (сталь ШХ15СГ) – втулка (латунь ЛМцСКА-58-2-2-1-1)» коефіцієнт тертя становить - 0,016. Це значення характеризує базові трибологічні властивості контактної пари та визначається фізико-механічними характеристиками матеріалів поверхонь тертя, а також умовами формування граничної мастильної плівки.

У разі застосування ВГН композитною сушкою WC-10Co-3Cr у захисному середовищі аргону коефіцієнт тертя зменшується до - 0,012, що приблизно у 1,33 рази менше порівняно з еталонною парою. Зниження коефіцієнта тертя



пояснюється формуванням зносостійкого карбідного покриття, яке характеризується підвищеною твердістю, більш рівномірною мікроструктурою та меншою шорсткістю контактної поверхні після припрацювання.

Найменше значення коефіцієнта тертя спостерігається для пари тертя, в якій відновлення поршня здійснювалось методом ВГН порошком WC-10Co-3Cr у середовищі Ar з додатковим впливом ІЕМП. У цьому випадку коефіцієнт тертя становить - 0,009, що приблизно у 1,78 рази менше порівняно з еталонною парою.

Зменшення коефіцієнта тертя у цьому випадку пов'язане з тим, що вплив ІЕМП під час формування покриття сприяє: більш впорядкованому руху та ущільненню частинок у струмені напилення; підвищенню щільності та однорідності сформованого покриття; зменшенню кількості оксидних включень і пор у структурі шару; формуванню більш стабільної граничної мастильної плівки в зоні контакту.

У результаті формується більш сприятливий режим тертя, що проявляється у зниженні опору ковзанню та підвищенні зносостійкості контактної пари.

Застосування ВГН композитним порошком WC-10Co-3Cr у захисному середовищі аргону, особливо з додатковим впливом ІЕМП, забезпечує істотне покращення трибологічних характеристик відновлених поршнів, що проявляється у значному зниженні коефіцієнта тертя та підвищенні ефективності роботи пари тертя «поршень – втулка».

Порівняльна оцінка інтенсивності зношування деталей для еталонних та експериментальних пар тертя наводиться на (Рисунку 7).

Порівняльний аналіз результатів трибологічних випробувань показує, що застосування покриття WC-10Co-3Cr, сформованого методом ВГН в захисному середовищі Ar, забезпечує суттєве зниження інтенсивності зношування поршня у парі тертя з латунною втулкою.

Інтенсивність зношування зменшується з $3,2 \cdot 10^{-12}$ мм³/Н·м для еталонної пари до $1,8 \cdot 10^{-12}$ мм³/Н·м, що відповідає зниженню приблизно у 1,8 рази.



Подальше покращення трибологічних характеристик спостерігається при застосуванні ІЕМП під час формування покриття. У цьому випадку інтенсивність зношування зменшується до $1,4 \cdot 10^{-12}$ мм³/Н·м, що майже у 2,3 рази менше порівняно з еталонною парою тертя.

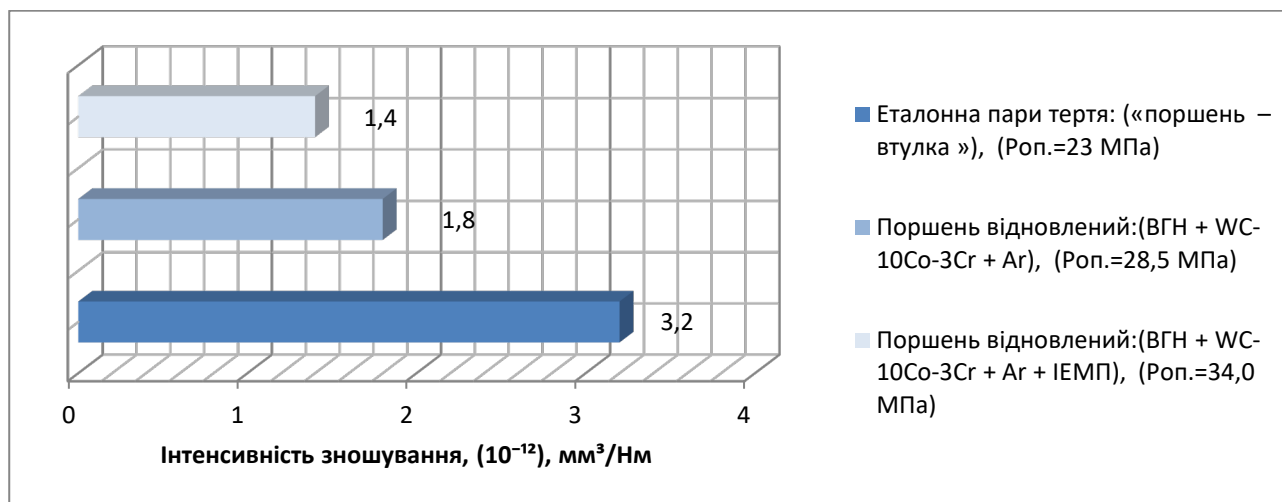


Рисунок 7 - Значення інтенсивності зношування за фактором зносу для «еталонних» та «експериментальних» пар тертя

Авторська розробка

Отриманий ефект пояснюється формуванням щільної карбідної структури покриття WC-10Co-3Cr з низькою пористістю, високою твердістю та підвищеною адгезійною міцністю до сталеві основи. Додатковий вплив ІЕМП сприяє ущільненню структури напиленого шару, зменшенню кількості мікродфектів та більш рівномірному розподілу карбідних фаз.

Результати тривалих зносних випробувань підтверджують, що відновлення поршнів методом ВГН композитним порошком WC-10Co-3Cr, в захисному середовищі Ar з використанням ІЕМП, дозволяє суттєво підвищити зносостійкість контактної пари та зменшити інтенсивність зношування у порівнянні з еталонною парою тертя.

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



Таблиця 7 – План операцій відновлення поршня

№	Найменування операції	Зміст операції (технічні параметри)	Обладнання / Матеріали
05	Мийна	Очищення від абразивних забруднень та мастильних плівок. Температура розчину 60-80°C.	Мийна установка тунельного або занурювального типу.
10	Дефектувальна	Візуальний та інструментальний контроль гідроабразивного зносу, корозії та пітингу. Сортування.	Контрольний стіл, мікрометри, лупи 10х.
15	Чорнове шліфування	Зняття зношеного шару (0,05–0,1 мм) для відновлення геометричної форми (усунення еліпсності).	Круглошліфувальний верстат 3М151.
20	Дробоструменева	Створення шорсткості Ra 6,3–12,5 мкм для активації поверхні. Тиск повітря 0,5–0,6 МПа.	Дробоструменева камера, сталевий дріб (0,5-1,0 мм).
25	Ультразвукова	Глибоке знежирення в лужному розчині з частотою 18-22 кГц. Видалення мікропилу з пор.	Ультразвукова ванна серії УЗВ.
30	Високошвидкісне напилення	Нанесення шару з припуском $\geq 0,5$ мм на сторону. Дистанція напилення 200-300 мм.	Установка GTV, Castolin, порошок WC-10Co-3Cr.
35	Чистове шліфування	Фінішна обробка до номінального розміру. Забезпечення шорсткості Ra 0,4–0,8 мкм.	Круглошліфувальний верстат, ельборові або алмазні круги.
40	Очистка (Витримка)	Видалення абразивного шламу з поверхні поршня шляхом експозиції в гасі (ДСТУ 18499) протягом $\geq 3,0$ год.	Спеціалізована ванна з сітчастим піддоном.
45	Контрольна	Перевірка діаметра, конусності, овальності та якості зчеплення покриття.	Мікрометричні скоби, профілометр, товщиномір.

Авторська розробка

Висновки.

Отримані результати дослідження дають можливість зробити наступні

ВИСНОВКИ:



1. Проведений аналіз технічного стану деталей качаючих вузлів аксіально-поршневих гідромашин показав, що основними причинами зниження їх ресурсу є гідроабразивне зношення, корозійні пошкодження та пітингове руйнування робочих поверхонь поршнів, що призводить до збільшення зазору у спряженні «поршень – втулка блоку» та погіршення енергетичних характеристик гідромашини.

2. Показано, що традиційні технології відновлення, зокрема гальванічне хромування та електроіскрове наплавлення, мають суттєві технологічні обмеження. Гальванічні покриття характеризуються малою товщиною, наявністю мікротріщин, низькою ударною міцністю та екологічною небезпечністю процесу. Електроіскрове наплавлення відзначається обмеженою товщиною шару та низькою продуктивністю, що ускладнює відновлення деталей зі значними площами зношування.

3. На основі техніко-економічного аналізу обґрунтовано доцільність застосування методу високошвидкісного газополуменевого напилення в захисному середовищі Ar для відновлення робочої циліндричної поверхні поршнів, що забезпечує формування щільного покриття з низькою пористістю (менше 1–2 %), високою адгезійною міцністю (до 70–80 МПа) та підвищеною твердістю.

4. Результати кореляційного аналізу показали, що найбільший вплив на твердість та зносостійкість покриття мають карбідоутворюючі елементи W та C, тоді як Co формує пластичну зв'язуючу матрицю, а Cr підвищує корозійну стійкість та стабілізує структуру покриття. Найбільш ефективним складом порошкової композиції визначено WC–Co–Cr із вмістом W – 86 %, C – 5,7 %, Co – 10 % та Cr – 3 %.

5. Встановлено, що ключовими параметрами процесу високошвидкісного газополуменевого напилення є швидкість частинок порошку, температура газового потоку та дистанція напилення. Оптимальні режими ($T \approx 2700$ °C, $V \approx 750$ м/с, $L \approx 200$ мм) забезпечують формування покриття з твердістю 1100–1200 HV та мінімальною пористістю.



6. Експериментальні трибологічні дослідження показали, що застосування покриття WC–10Co–3Cr, сформованого методом ВГН у середовищі аргону, підвищує максимальне передзадирне навантаження пари тертя «поршень – втулка» у 1,23 рази, знижує коефіцієнт тертя до 0,012 та інтенсивність зношення майже у 1,8 рази в порівнянні з еталонною парою.

7. Додаткове застосування імпульсного електромагнітного поля під час формування покриття високошвидкісним газополуменевим напиленням забезпечує подальше покращення структури шару, що проявляється у збільшенні передзадирного навантаження до 44,5 МПа, зменшенні коефіцієнта тертя до 0,009 та зниженні інтенсивності зношування майже у 2,3 рази порівняно з еталонною парою.

8. Розроблена ресурсозберігаюча технологія відновлення поршнів качаючих вузлів аксіально-поршневих гідромашин дозволяє суттєво підвищити трибологічні характеристики спряження «поршень – втулка», зменшити інтенсивність зношування та збільшити ресурс роботи відновлених деталей.

Література.

1. Melyantsov P. T. Ensuring the reliability of axial-piston units of hydraulic transmissions in the process of their repair by constructive measures // *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2024. Issue 32(1). P. 20–28. DOI: 10.30890/2567-5273.2024-32-00-086.

2. Мельянцов П. Т., Харченко Б. Г., Голубев И. Г. Опыт ремонта гидропривода ГСТ-90 на ремонтных предприятиях. Москва : Госагропром СССР, АгроНИИТЭИИТО, 1989. 42 с.

3. Melyantsov P. T. Substitution of controlling structural parameters of the technical condition of parts of the plunger 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* : monograph. Karlsruhe : ScientificWorld-NetAkhatAV, 2025. Book 38, Part 2. P. 6–47. DOI: 10.30890/2709-2313.2025-38-02-007.



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

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

6. Мельянцов П. Т., Даниленко Т. В., Стародуб О. А. Забезпечення якості ремонту аксіально-поршневих гідромашин впровадженням технології їх передремонтного діагностування // *Inżynieria i technologia. Współczesne problemy i perspektywy rozwoju* : матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Warszawa : Diamond trading tour, 2017. P. 44–49.

7. Мельянцов П. Т., Лосіков О. М., Сидоренко В. К. Шляхи підвищення післяремонтної довговічності ресурсолімітуючих спряжень аксіально-поршневих гідромашин // *Innovative Technologies in the Field of Human Services : Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference*. Stockholm, Sweden, 2024. P. 211–215.

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

9. Електронний каталог ОАО «Гідросила». URL: (дата звернення: 12.03.2026).

10. Meliantsov P. T., Losikov O. M., Sidorenko V. K. 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 // *SWorldJournal*. 2024. No. 24. P. 62–76. DOI: 10.30888/2663-5712.2024-24-00-001.

11. Мельянцов П. Т., Плєскач В. Р. Характер та вид спрацювання деталей спряжень качаючих вузлів аксіально-поршневих гідромашин // *Nauka i Utworzenie XXI Stulecia: Teoria, Praktyka, Innowacje*. Opole : Diamond trading tour,



2013. P. 67–70.

12. Столяров А. В., Ионов П. А., Земсков А. М. Восстановление гидростатических трансмиссий импортного производства (на примере Eaton 6423) // *Пермский аграрный вестник*. 2019. № 2(26). С. 34–42.

13. Мельянцов П. Т. Технологія відновлення втулок блоку качаючого вузла об'ємних аксіально-поршневих гідромашин // *InterConf+*. 2025. Вип. 57(248). С. 543–560. DOI: 10.51582/interconf.19-20.05.2025.056.

Abstract. *The article addresses the problem of reduced service life of pumping units of axial-piston hydraulic machines caused by intensive wear of the precision friction pair “piston – cylinder block bushing”. During operation, working surfaces of pistons are subjected to hydro-abrasive and corrosion-mechanical wear as well as pitting damage. These processes lead to an increase in the clearance of the friction pair, growth of internal leakage of the working fluid, and deterioration of the energy efficiency of hydraulic machines. The aim of the study is to develop a resource-saving technology for restoring steel pistons of pumping units of axial-piston hydraulic machines with improved tribological characteristics. Based on the analysis of existing repair technologies, the application of high-velocity gas-flame spraying was substantiated as an effective method for restoring worn surfaces. The rational composition of the WC–Co–Cr powder material was determined and optimal coating deposition parameters were established to ensure high hardness, density, and adhesion strength of the formed coating. Experimental tribological studies showed that the application of the WC–Co–Cr coating increases the maximum scuffing load up to 44.5 MPa, reduces the friction coefficient to 0.009, and decreases wear intensity by almost 2,3 times compared with the reference friction pair. The obtained results confirm the efficiency of the proposed restoration technology and its feasibility for increasing the service life and operational reliability of axial-piston hydraulic machine pistons.*

Keywords: *axial-piston hydraulic machine; piston; wear; parts restoration; high-velocity gas-flame spraying; WC–Co–Cr coating; tribological properties; resource saving.*

Стаття відправлена: 19.03.2026 р.

© Мельянцов П. Т.