

УДК 621.225:621.891

TRIBOLOGICAL ASPECTS OF ENHANCING TIGHTNESS AND WEAR RESISTANCE OF HYDRAULIC CYLINDER SEALING UNITS

ТРИБОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ УЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ ВУЗЛІВ ГІДРАВЛІЧНИХ ЦИЛІНДРІВ

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, str. S. Yefremova, 25, 49600**Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. С. Єфремова, 25, 49600***Losikov O. M. / Лосіков О. М.***senior lecturer / старший викладач*

ORCID 0009-0004-5523-7651

*Ukrainian State University of Science and Technology, str. Lazaryana, 2, 49010**Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010***Sidorenko V. K. / Сидоренко В. К.***senior lecturer / старший викладач*

ORCID 0009-0005-7610-4433

*Ukrainian State University of Science and Technology, str. Lazaryana, 2, 49010**Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010*

Анотація. У роботі досліджено трибологічні аспекти підвищення герметичності та зносостійкості ущільнювальних вузлів гідравлічних циліндрів. Проаналізовано причини втрати герметичності штокових ущільнень та ефективність існуючих технологій відновлення штоків. Проведено експериментальні дослідження різних способів реновації, зокрема із застосуванням плазмового наплавлення, поверхневого пластичного деформування та нанесення полімерного покриття. Встановлено, що комбінована технологія з використанням полімерного покриття забезпечує значне зниження витоків робочої рідини та підвищення зносостійкості спряження. Отримані результати дозволяють прогнозувати підвищення ресурсу гідроциліндрів та рекомендувати ефективні технологічні рішення для їх відновлення.

Ключові слова: гідравлічний циліндр, ущільнювальний вузол, герметичність, зносостійкість, трибологія, відновлення штока, полімерне покриття, плазмове наплавлення.

Abstract. The paper investigates the tribological aspects of improving the tightness and wear resistance of sealing units in hydraulic cylinders. The causes of sealing failure in rod sealing assemblies and the efficiency of existing rod restoration technologies are analyzed. Experimental studies of various renovation methods were carried out, including plasma surfacing, surface plastic deformation, and application of polymer coatings. It was established that the combined technology using a polymer coating provides a significant reduction in working fluid leakage and an increase in wear resistance of the contact pair. The obtained results make it possible to predict an increase in the service life of hydraulic cylinders and recommend effective technological solutions for their restoration.

Key words: hydraulic cylinder, sealing unit, tightness, wear resistance, tribology, rod restoration, polymer coating, plasma surfacing.

Вступ.

Роздільно-агрегатний принцип побудови гідравлічних систем тракторів

забезпечує підвищення їх технічного рівня та ефективну механізацію технологічних процесів у виробничих умовах. У таких системах значного поширення набули силові гідроциліндри двосторонньої дії. Завдяки відносно простій конструкції, у порівнянні з іншими елементами гідроприводу (зокрема гідронасосами та гідророзподільниками), гідроциліндри характеризуються вищими показниками надійності в процесі експлуатації.

Під час роботи гідравлічної системи тракторів гідроциліндри піддаються впливу неврівноважених навантажень, спричинених вібраційними процесами при переміщенні робочих органів або кузова причепа. Одночасно при висуванні штока виникають підвищені бічні навантаження, що перерозподіляються на елементи передньої кришки та поршня. У результаті таких експлуатаційних умов відбувається деградація параметрів технічного стану деталей, що насамперед проявляється у збільшенні об'ємних втрат робочої рідини через порушення зовнішньої герметичності спряження «шток – ущільнювач передньої кришки».

Справедливість припущень доводять результати досліджень [1], які свідчать, що у гідравлічних системах тракторів на частку несправностей гідроциліндрів припадає до 28% випадків.

Порушення герметичності у з'єднанні «шток – ущільнювач кришки» небезпечне не лише витоком оливи, а й проникненням абразиву всередину циліндра. Це стимулює інтенсивне зношування пари «корпус – поршень», через що збільшуються внутрішні перетікання рідини. Статистичні дані свідчать про домінуючу роль дефектів герметичності у структурі відмов гідроциліндрів, частка яких сягає 44% [2].

Даний аспект корелює з результатами досліджень в роботі [3], де встановлено, що максимальну ймовірність потреби у проведенні ремонтно-відновлювальних робіт ($P_p = 0,96...0,97$) має прецизійне спряження «шток - ущільнювальний вузол кришки».

Таким чином, відновлення працездатності гідроциліндра пов'язане насамперед із відновленням технічного стану спряження «шток – ущільнювач передньої кришки».

Для цього застосовуються різні ремонтні технології [4], що відрізняються за механізмами формування відновлюваних поверхонь, економічною ефективністю та післяремонтним ресурсом.

Проведений аналіз показує, що наявні методи не дозволяють у повній мірі реалізувати залишковий ресурс деталей, що зумовлює збільшення витрат на ремонт гідроциліндрів.

Мета роботи полягає в дослідженні трибологічних закономірностей роботи ущільнювальних вузлів гідравлічних циліндрів та обґрунтуванні ефективних технологічних рішень відновлення штоків, спрямованих на підвищення герметичності та зносостійкості в умовах циклічного навантаження, що забезпечують підвищення ресурсу та надійності гідроциліндрів.

Постановка задачі.

Реалізація мети передбачає виконання таких етапів: встановлення причин втрати працездатності та герметичності вузлів гідроциліндрів; порівняльний аналіз технологій відновлення штоків щодо забезпечення їхньої зносостійкості та герметичності.

Викладення основного матеріалу.

Оцінювання технічного стану ущільнювальних вузлів гідроциліндрів здійснювалось за результатами вхідного контролю під час їх надходження до ремонту. Обсяг дослідної вибірки становив 25 одиниць.

За результатами конструктивно-функціонального дослідження встановлено, що на зношення отвору передньої кришки під шток припадає 17,8% відмов і відповідно на шток гідроциліндра – 18,2%. Враховуючи те, що дані дефекти існують сумісно (взаємно пов'язані між собою як пара тертя) можна стверджувати, що даний дефект являється вагомим з точки зору втрати працездатності гідроциліндрів. Таким чином, під час проектування технологічного процесу відновлення гідроциліндрів першочергову увагу необхідно приділити розробці методів реновації таких ключових елементів, як шток та отвір передньої кришки.

За результатами експертного оцінювання сучасних методів реновації елементів штокового ущільнювального вузла, для дослідження обрано такі технологічні схеми відновлення зовнішніх поверхонь штоків: контрольний зразок (виготовлений за базовою заводською технологією); комбінований цикл, що включає точіння, плазмове наплавлення, шліфування та зміцнювальну обробку методами поверхневого пластичного деформування (ППД); а також варіант із нанесенням антифрикційного полімерного покриття ФБФ-74Д після плазмового наплавлення та шліфування.

Для проведення порівняльних досліджень відновлених штокових вузлів та кількісного оцінювання впливу обраних методів реновації на їхню експлуатаційну надійність використано експериментальний стенд, принципову схему якого наведено на (Рисунку 1).

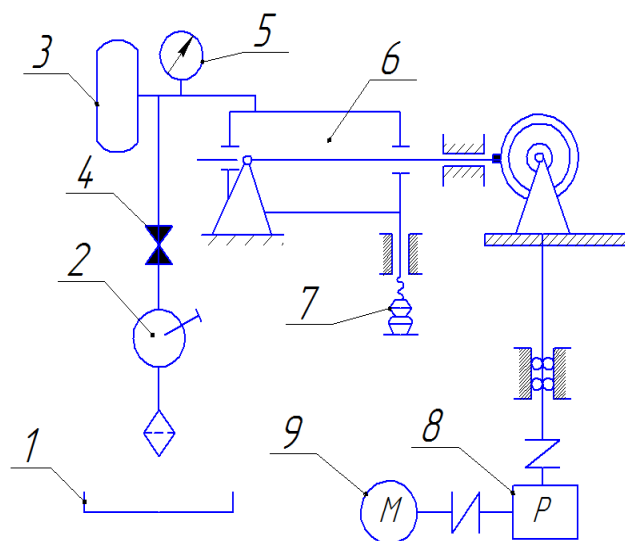


Рисунок 1 – Гідрокінематична схема стенда для випробування штокових ущільнювальних вузлів гідроциліндрів: 1 - гідробак; 2 - насос ручний високого тиску; 3 - гідроаккумулятор; 4 - кран з запобіжним клапаном; 5 - манометр; 6 – гідроциліндри, які випробовуються; 7 - навантажувальний пристрій; 8 - редуктор; 9 – електродвигун

Авторська розробка

Конструкція стенда включає раму, електроустаткування, вимірювальну апаратуру та механічний привід (редуктор 8), що забезпечує зворотно-

поступальний рух штоків, і навантажувальний пристрій 7 для бічного навантаження штока гідроциліндра. Гідравлічна система об'єднує бак 1, насос 2, акумулятор 3, запірно-запобіжний блок 4 та мережу трубопроводів.

Під час проведення випробувань здійснювався моніторинг наступних параметрів: об'ємних витоків робочої рідини по штоку (з дискретністю 1000 циклів), температурного режиму в зоні фрикційного контакту, сили тертя, а також напруження до моменту порушення герметичності. Геометричні параметри спряжень відповідали встановленим допускам, а показники твердості ущільнювальних елементів контролювалися згідно з ДСТУ ISO 48-4:2019 (ISO 48-4:2018, IDT) [5].

Критеріальним показником порушення герметичності штокового ущільнення прийнято досягнення гранично допустимого рівня витоків робочої рідини на одиницю площі поверхні штока за один подвійний хід, згідно з регламентом ISO 10100 [6]. Питомий об'єм винесеної робочої рідини за повний робочий цикл розраховували за залежністю:

$$V = \frac{V_n}{\pi \cdot D \cdot L \cdot n}, \quad (1)$$

де V_n - об'єм рідини, що виноситься за n подвійних ходів, см^3 ; D - діаметр поверхні, що ущільнюється, м; L - хід штока (довжина ковзання), м; n - число подвійних ходів (циклів).

Експериментальні дослідження припиняли після досягнення витокami робочої рідини встановленого граничного значення.

Динаміку збільшення витоків робочої рідини крізь штокові ущільнення в умовах відсутності гідравлічного тиску та дії ексцентричного (бічного) навантаження для різних технологічних схем реновації штоків наведено на (Рисунку 2).

Аналіз отриманих експериментальних даних свідчить, що застосування комбінованої технології відновлення штоків (плазмове наплавлення + полімерне покриття ФБФ-74Д) дозволяє знизити інтенсивність витоків робочої рідини у 1,7 раза порівняно з еталонною технологією та у 1,4 раза порівняно з методом ППД.

З огляду на динаміку накопичення об'ємних втрат, це забезпечує прогностичний приріст експлуатаційної довговічності спряження у 1,5–1,8 раза до моменту досягнення вузлом граничного стану.

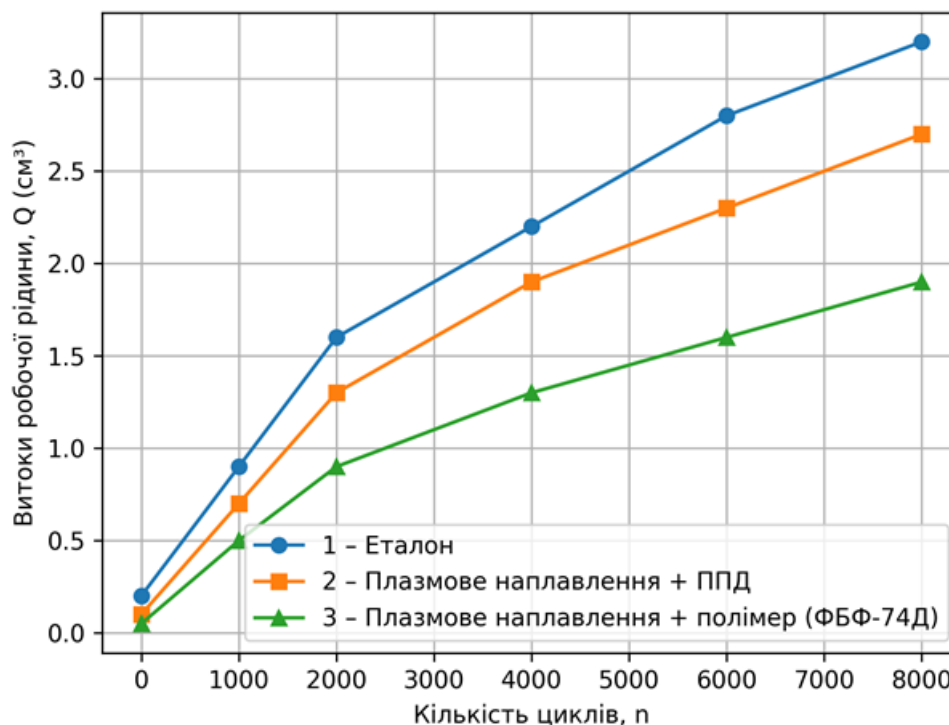


Рисунок 2 - Апроксимовані залежності об'ємних витоків робочої рідини крізь штокові ущільнення від напрацювання за різних технологічних схем реновації штоків

Авторська розробка

Висока ефективність полімерного покриття пояснюється його здатністю заповнювати мікронерівності наплавленого шару, що створює оптимальний мікрорельєф поверхні. Це покращує умови змащування та знижує коефіцієнт тертя в парі «шток – ущільнювач передньої кришки», мінімізуючи абразивний знос гумового елемента. Натомість у зразках, відновлених за допомогою ППД, попри зміцнення поверхневого шару, зберігається вища схильність до гідродинамічного винесення рідини через меншу демпфувальну здатність поверхні порівняно з еластичним полімерним шаром.

Порівняльний аналіз показників зносостійкості свідчить про значну перевагу запропонованих методів обробки над базовою технологією.

Встановлено, що інтенсивність зношування ($I \times 10^{-9}$) штока відновленого плазмовою наплавкою з послідуочим зміцненням ППД у 1,5 більша в порівнянні зі штоком еталонного зразка.

Найкращі результати продемонстрував метод нанесення полімерного покриття на шток після його відновлення плазмовим напиленням: інтенсивність зношування зменшилася у 2,5 раза порівняно з еталоном та у 1,7 раза менше відносно показників методу ППД. Таким чином, саме використання полімерного композиту забезпечує максимальний ресурсний потенціал штокового спраження в умовах інтенсивного тертя.

Висновки.

У роботі встановлено, що однією із основних причин втрати працездатності гідроциліндрів є порушення герметичності штокових ущільнювальних вузлів, спричинене інтенсивним зношуванням спраження «шток – ущільнювач передньої кришки». Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що застосування комбінованих технологій відновлення штоків суттєво впливає на підвищення їх експлуатаційних характеристик. Найбільш ефективною виявилась технологія, що поєднує плазмове наплавлення з нанесенням полімерного покриття, яка забезпечує зниження інтенсивності витоків робочої рідини до 1,7 раза та підвищення зносостійкості до 2,5 раза порівняно з базовими методами. Це дозволяє збільшити ресурс ущільнювального вузла у 1,5–1,8 раза. Отримані результати можуть бути використані при розробці та вдосконаленні технологій ремонту гідроциліндрів з метою підвищення їх надійності та довговічності.

Література.

1. Мельянцов П. Т., Ісаєнко В. Ю. Підвищення експлуатаційної надійності гідролічних насосів модифікації НШ-К застосуванням епіламних покриттів робочих поверхонь деталей // *Inżynieria i technologia. Osiągnięcia naukowe, rozwój, propozycje na rok 2016 : materiały Międzynarodowej konferencji naukowo-praktycznej*. Warszawa : Diamond Trading Tour, 2016. С. 22–28.

2. Мельянцов П. Т., Цикало С. А. Теоретичний аналіз забезпечення

герметичності та підвищення зносостійкості штокового ущільнювального вузла гідравлічних циліндрів // *Inżynieria i technologia. 2014. Osiągnięcia, projekty, hipotezy : zbiór raportów naukowych*. Warszawa : Diamond Trading Tour, 2014. С. 47–52.

3. Мельянцов П. Т. Кількісна оцінка ремонтної технологічності гідроциліндрів гідравлічних систем тракторів // *Technique and technology of the future : proceedings of the international conference*. 2025. С. 57–64. URL: <https://www.proconference.org/index.php/gec/article/view/gec41-00-040> (дата звернення: 22.03.2026). DOI: 10.30890/2709-1783.2025-41-00-040

4. Агрегаты гидроприводов сельскохозяйственной техники. Технические требования на капитальный ремонт : ТК 70.0001.018-85. Москва : ГосНИТИ, 1986. 151 с.

5. ДСТУ ISO 48-4:2019. Гума вулканізована чи термопластична. Визначення твердості. Частина 4. Метод визначення твердості методом дюрометра (твердість за Шором) (ISO 48-4:2018, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 15 с.

6. ISO 10100:2001. *Hydraulic fluid power — Cylinders — Acceptance tests*. Geneva: International Organization for Standardization, 2001.

Тези відправлені: 24.03.2026 р.

© Мельянцов П. Т