

ISSN 2414-3820

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

**КОНСТРУЮВАННЯ, ВИРОБНИЦТВО
ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ
МАШИН**

Загальнодержавний міжвідомчий
науково-технічний збірник

Випуск 55

Кропивницький • 2025

ISSN 2414-3820

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
Central Ukrainian National Technical University

**DESIGN, PRODUCTION
AND EXPLOITATION
OF AGRICULTURAL MACHINES**

National Interagency Scientific
and Technical Collection of Works

Issue 55

Kropyvnytskyi • 2025

Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. 2025. Вип. 55. 344

В збірнику викладені питання конструювання, розрахунку, удосконалення, створення і дослідження нових робочих органів сільськогосподарських машин, засобів механізації, електрифікації та автоматизації сільськогосподарського виробництва. Наведені результати досліджень в галузі технологій виробництва і експлуатації машин та забезпечення їх надійності і довговічності. Викладені практичні рекомендації по використанню результатів досліджень і дослідно-конструкторських розробок в сільськогосподарській і інших галузях машинобудування. Збірник розрахований на наукових та інженерно-технічних працівників науково-дослідних установ, ВНЗ, конструкторських організацій та промислових підприємств.

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 23 грудня 2025 року № 5

Редакційна колегія:

Черновол М.І., д.т.н., проф. – головний редактор;
Сало В.М., д.т.н., проф. – заст. головного редактора;
Амосов В.В., к.т.н., доц. – відповідальний секретар;
Алієв Е.Б., д.т.н., ст. докл.;
Алфьоров О.І., д.т.н., проф.;
Аулін В.В., д.т.н., проф.;
Васильковська К.В., к.т.н., доц.;
Васильковський О.М., к.т.н., проф.
Дідух В.Ф., д.т.н., проф.;
Кірчук Р.В., к.т.н., проф.;
Кириченко А.М., д.т.н., проф.;
Коваленко О.В., д.т.н., проф.;
Кропівний В.М., к.т.н., проф.;
Лещенко С.М., к.т.н., доц.;
Мацуй А.М., д.т.н., проф.;

Мелешко Є.В., д.т.н., проф.;
Мороз М.М., д.т.н., проф.;
Надикто В.Т., д.т.н., проф.;
Осадчий С.І., д.т.н., проф.;
Петренко Д.І., к.т.н., доц.;
Сайчук О.В., д.т.н., проф.;
Степаненко С.В., д.т.н., с.н.с.;
Харченко С.О., д.т.н., доц.;
Шепеленко І.В., д.т.н., проф.;
Anas M. Al-Oraiqat, D.Sc. (Королівство Саудівська Аравія);
Iurie Melnic, Ph.D., Associate Professor (Молдова);
Juozas Padgurskas, Dr., Professor;
Pošta Jozef, Ph.D., Professor (Чехія);
Predrag Dašić, Hon.D.Sc. (Serbia);
Andrii Yatskul, Ph.D., Associate Professor (Франція).

Адреса редакційної колегії: 25030, м. Кропивницький, проспект Університетський, 8,
Центральноукраїнський національний технічний університет, тел.: +380 (522) 390-581, +380 (522) 390-472, +380 (522) 55-10-49.

Офіційний сайт: <http://zbirniksgm.kntu.kr.ua>

Автори опублікованих матеріалів несуть відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей, а також за те, що матеріали не містять даних, які не підлягають відкритій публікації. Редакція може публікувати статті в порядку обговорення, не поділяючи точки зору автора.

Заснований у 1971 р.

Включений до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних наук (бюлетень ВАК №5 від 2010р., накази Міністерства освіти і науки України від 21 грудня 2015 року №1328, від 07 листопада 2018 року №1218, від 02 липня 2020 року № 886).

Категорія «Б»

Збірник наукових праць зберігається в загальнодержавній реферативній базі даних «*Україніка наукова*» Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського та представлений у міжнародних наукометричних базах даних *Index Copernicus, Word Cat, CrossRef, Open Ukrainian Citation Index, ResearchBib, Google Scholar*

Ідентифікатор медіа: **R30-03925** (рішення Національної ради України від 25.04.2024 р. № 1418).
2414-3820 (Print) 2664-9136 (e) DOI: 10.32515/2414-3820

ЗМІСТ

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

<i>К. В. Васильковська, М. М. Ковальов, О. М. Васильковський</i> Гідропонна установка для вирощування овочевих культур	9
---	---

<i>Volodymyr Sviatskyi</i> Monitoring, Risk Assessment and Safety Assurance in the Use of Pesticides in Agriculture	22
---	----

<i>М. Л. Заєць, А. М. Климчук</i> Оцінка продуктивності комбайна з використанням гібридної моделі та поверхонь відгуку	31
--	----

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

<i>Vitalii Mazhara, Anatolii Artiukhov, Maksym Hodunko, Kyryl Shcherbyna, Svitlana Tenenyka</i> Structural Design of Robotic Complexes	43
---	----

<i>О. Ф. Сіса, В. М. Боков, В. Я. Мірзак, Д. С. Тупаленко, О. С. Довжук</i> Технологія групового виготовлення квадратних зразків із ливарної високоміцної сталі 110Г13Л для фізико-механічних випробувань	50
---	----

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>Е. Б. Алієв, О. А. Черній</i> Аналітичне обґрунтування конструктивних і режимних параметрів спірального віброживильника для дозування поодинокого насіння соняшнику	63
---	----

<i>Г. В. Теслюк, О. В. Золотовська, О. М. Кобець, А. І. Ковцун</i> Моделювання аеродинамічних процесів очищення зернової маси в повітряному потопі	80
--	----

<i>К. В. Васильковська, О. Г. Андрейченко, В. О. Малаховська</i> Вибір сошника для просапної сівалки	91
---	----

<i>С. П. Степаненко, А. Я. Кузьмич, В. О. Швидя, В. А. Мельник, В. В. Тіманов</i> Теоретичне обґрунтування поділу зернового матеріалу на конічному решеті	97
--	----

<i>Д. І. Петренко, С. М. Леценко, Д. С. Неделський, І. О. Біліценко</i> Математична модель роботи пневмогравітаційного сепаратора зернових сумішей	112
--	-----

<i>Д. Ю. Артеменко, П. Г. Лузан, О. Р. Лузан, В. П. Ковбаса</i> Обґрунтування конструкції комбінованого наральника сошника просапної сівалки	121
--	-----

С. В. Попов, О. В. Канівець

Розширення сфери застосування різців із надтвердих матеріалів у механоскладальних цехах машинобудівних заводів та на дільницях підприємств сервісу 134

О.В. Горбенко, Г.О. Лапенко, Т.Г. Лапенко

Метрологічне та технологічне забезпечення відповідності параметрів поверхневого шару при відновленні деталей машин 140

О.Д. Онопрієнко, Е.Б. Алієв, В.Б. Говоруха

Фізико-математична модель щільної випадкової упаковки насіння олійних культур 148

Volodymyr Sviatskyi

Methodology for ensuring occupational safety and health based on the assessment and management of occupational risks 163

С.М. Мельник

Розробка конструкції засобу лабораторного визначення олійної/зернової домішки 173

О.С. Гіззатуллін, О.В. Шаповал

Визначення закономірностей змінення температури паливоподачі двигуна Д-21 на базі Arduino Uno R3 179

В.М. Сало, Б.Г. Вовнянко, С.М. Лещенко

Підвищення функціональної універсальності зернових сівалок 185

І.Є. Цизь, В.Ф. Дідух, С.М. Хомич, Р.А. Хлопецький

Дослідження продуктивності пневмомеханічного засобу для добування сапропелю 192

Б. В. Ступак, С. В. Яхін

Технічне рішення та результати випробувань мобільної лінії за щадною пофракційною технологією підготовки «Сильного насіння» 201

І.В. Шепеленко, А.М. Красота, В.І. Гуцул, М.В. Красота

Теоретичний розрахунок та дослідження напруженого стану антифрикційного покриття, нанесеного на робочу поверхню кулачка розподільного валу 214

С.М. Лещенко, В.М. Сало, Д.І. Петренко, В.А. Мельніченко

Аналітичне обґрунтування основних параметрів комбінованого чизельного глибокорозпушувача 225

О.Р. Лузан, Д.Ю. Артеменко, П.Г. Лузан, Р.В. Кісільов

Теоретичний аналіз роботи сошника прямої сівби з адаптивними вертикальними дисками 238

<i>О.В. Нестеренко, Д.В. Апостолов, В.В. Амосов, В.Ю. Боровик</i> Напрямки вдосконалення технічних засобів для міжрядного обробітку просапних культур	250
<i>В.І. Ветохін, Т.Ю. Рижкова, О.А. Ребенок, В.О. Заславець, А.О. Коренівський, В.В. Амосов</i> Розробка модульного ґрунтового міні-каналу для дослідження ротаційних знарядь: особливості конструкції	257
<i>О.В. Іванкова, О.В. Горбенко, Г.О. Лапенко, М.В. Чумак</i> Підвищення довговічності шестеренних насосів шляхом відновлення втулок методами пластичного деформування	273
<i>Є.М. Кобан, О.М. Васильковський, О.В. Нестеренко</i> Обґрунтування конструкційної схеми пневматичного зернового сепаратора.....	287

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

<i>Р.М. Минайленко, П.С. Усік, Л.І. Поліщук</i> Аналіз методів протидії ботнет в системах IoT	298
<i>В.А. Резніченко, А.Я. Ключ</i> Алгоритми фільтрації контенту в комп'ютерних системах: аналіз ефективності, виклики впровадження та перспективи розвитку	309
<i>І.А. Лисенко, Р.М. Минайленко</i> Дослідження сучасних методів аналізу даних з використанням квантових алгоритмів	314
<i>Р.М. Минайленко, О.К. Коноплицька-Слободенюк, І.А. Лисенко</i> Технології розподілених об'єктів в інформаційних системах	323
Інформація про авторів	332

CONTENT

AGROENGINEERING

<i>Kateryna Vasytkovska, Mykola Kovalov, Oleksii Vasytkovskyi</i> Hydroponic System for Growing Vegetable Crops	9
--	---

<i>Volodymyr Sviatskyi</i> Monitoring, Risk Assessment and Safety Assurance in the Use of Pesticides in Agriculture	22
---	----

<i>Maksym Zayets, Anatoliy Klymchuk</i> Influence of parameters of disc coulters on the transmission capacity of cutting crop residues in the system of zero tillage	31
--	----

APPLIED MECHANICS

<i>Vitalii Mazhara, Anatolii Artiukhov, Maksym Hodunko, Kyryl Shcherbyna, Svitlana Tenenyka</i> Structural Design of Robotic Complexes	43
---	----

<i>Oleh Sisa, Victor Bokov, Volodymyr Mirzak, Denys Tupalenko, Olexandr Dovzhuk</i> Technology of Group Production of Square Samples from High-Strength Casting Steel 110G13L for Physical and Mechanical Tests	50
---	----

INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING

<i>Elchyn Aliiev, Olexandr Chernii</i> Analytical Justification of the Design and Operating Parameters of a Spiral Vibrating Feeder for Dosing Single Sunflower Seeds	63
---	----

<i>Hennadii Tesliuk, Olena Zolotovska, Oleksandr Kobets, Andrii Kovcun</i> Modeling of aerodynamic processes in the cleaning of grain mass in an airflow	80
---	----

<i>Kateryna Vasytkovska, Olha Andreichenko, Valentyna Malakhovska</i> Choosing a Coulter for a Row Crop Seeder	91
---	----

<i>Serhii Stepanenko, Alviyan Kuzmych, Viktor Shvydyda, Vitaly Melnyk, Volodymyr Timanov</i> Theoretical Justification for the Separation of Grain Material on a Conical Sieve	97
---	----

<i>Dmytro Petrenko, Sergii Leshchenko, Dmytro Nedelsky, Ihor Bilitsenko</i> Mathematical Model the Operation of a Pneumogravity Separator for Grain Mixtures	112
---	-----

<i>Dmytro Artemenko, Petro Luzan, Olena Luzan, Viktor Kovbasa</i> Justification of the Design of a Combined Coulter of a Row-crop Seeder Opener	121
--	-----

<i>Stanislav Popov, Oleksandr Kanivets</i> Expanding the Scope of Application of Super Hard Cutters in Mechanical Assembly Shops of Machine-Building Plants and Service Enterprise Sections	134
---	-----

<i>Oleksandr Gorbenko, Hryhorii Lapenko, Taras Lapenko</i> Metrological and Technological Assurance of Surface-Layer Parameter Conformity in the Restoration of Machine Parts	140
<i>Oleg Onopriienko, Elchyn Aliiev, Volodymyr Hovorukha</i> Physico-mathematical Model of Dense Random Packing of Oilseed Seeds	148
<i>Volodymyr Sviatskyi</i> Methodology for Ensuring Occupational Safety and Health Based on the Assessment and Management of Occupational Risks	163
<i>Stanislav Melnyk</i> Development of a Design of Device For a Laboratory Determination of Oil/Grain Impurities	173
<i>Oleksii Hizzatullin, Oleksandr Shapoval</i> Determining the Patterns of Changes in the Fuel Supply Temperature of the D-21 Engine Based on Arduino Uno R3	179
<i>Vasyl Salo, Bohdan Vovnianko, Serhii Leshchenko</i> Increasing the Functional Versatility of Grain Planters	185
<i>Igor Tsiz, Volodymyr Didukh, Serhii Khomych, Roman Khlopetscyi</i> Research the Productivity of a Pneumatic-mechanical Device for Extracting Sapropel	192
<i>Bohdan Stupak, Serhii Yakhin</i> Technical Solution and Test Results of the Mobile Seed-processing Line Based on the Gentle Fractional Technology “Strong Seed”	201
<i>Ihor Shepelenko, Artem Krasota, Vasiliy Gutsul, Mykhailo Krasota</i> Theoretical Calculation and Study of the Stress State of an Anti-friction Coating Applied to the Working Surface of a Camshaft Cam.....	214
<i>Sergii Leshchenko, Vasyl Salo, Dmytro Petrenko, Viktor Melnychenko</i> Analytical Substantiation of the Main Parameters of a Combined Chisel Deep Ripper.....	225
<i>Olena Luzan, Dmytro Artemenko, Petro Luzan, Ruslan Kisilov</i> Theoretical Analysis of the Operation of a Direct Seeding Coulter with Adaptive Vertical Discs	238
<i>Olexandr Nesterenko, Denys Apostolov, Volodymyr Amosov, Vadym Borovyk</i> Directions for Improving Technical Means for Inter-row Cultivation of Row Crops	250
<i>Volodymyr Vetokhin, Tetiana Ryzhkova, Oleksandr Rebenok, Vladyslav Zaslavets, Andrii Korenivskyi, Volodymyr Amosov</i> Development of a Modular Soil Mini-channel for Research of Rotary Tools: Design Features	257

<i>Olena Ivankova, Oleksandr Gorbenko, Taras Lapenko, Maryna Chumak</i> Enhancing the Durability of Gear Pumps by Restoring Bushings Using Plastic Deformation Methods	273
--	-----

<i>Yevhenii Koban, Oleksii Vasylovskyi, Olexandr Nesterenko</i> Justification of the Structural Scheme of a pneumatic Grain Separator	287
--	-----

COMPUTER SCIENCE

<i>Roman Minailenko, Pavlo Usik, Liudmyla Polishchuk</i> Analysis of botnet countermeasures in IoT systems	298
---	-----

<i>Vitalii Reznichenko, Anastasiia Kliui</i> Content Filtering Algorithms in Computer Systems: Analysis of Efficiency, Implementation Challenges, and Future Development Prospects.....	309
---	-----

<i>Iryna Lysenko, Roman Mynailenko</i> Exploring Contemporary Data Analysis Approaches Employing Quantum Algorithms	314
--	-----

<i>Roman Minailenko, Oksana Konopliiska-Slobodeniuk, Iryna Lysenko</i> Distributed object technologies in information systems	323
--	-----

Information about authors	332
---------------------------------	-----

УДК 621.77.01

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2025.55.273-286>

О.В. Іванкова, доц., канд. техн. наук, **О.В. Горбенко**, доц., канд. техн. наук,
Г.О. Лапенко, проф., канд. техн. наук, **М.В. Чумак**

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна e-mail:

olena.ivankova@pdau.edu.ua, oleksandr.gorbenko@pdau.edu.ua,

grygorii.lapenko@pdau.edu.ua

Підвищення довговічності шестеренних насосів шляхом відновлення втулок методами пластичного деформування

Стаття присвячена комплексному дослідженню процесів зношування та відновлення втулок шестеренних масляних насосів мобільної техніки з використанням технологій пластичного деформування. Розглянуто фактори, що впливають на довговічність гідроагрегатів, зокрема роль торцевих і радіальних зазорів у спряженнях «втулка – шестерня», які визначають внутрішні витоки робочої рідини та зумовлюють втрати об'ємної подачі. На основі аналізу дефектів та характеру зношування встановлено, що одними з найбільш ресурсно-обмежувальних деталей є втулки, які одночасно виконують функції підшипникової опори та ущільнювального елемента, працюють у режимах змінних навантажень і піддаються інтенсивному абразивному та гідроабразивному зносу.

гідронасос, втулка, зносостійкість, довговічність, технологія, пластичне деформування, осаджування, метрологічне забезпечення

Постановка проблеми. Ефективність використання автотракторної техніки напряму залежить від її надійності. Однією з ключових складових надійності є довговічність, що визначається здатністю машини або її вузлів зберігати працездатність упродовж встановленого ресурсу. Технічний ресурс кількісно визначається наробітком від початку експлуатації до досягнення граничного стану, коли подальше використання агрегату вимагає ремонту або заміни.

У автомобільній та сільськогосподарській техніці значну частину відмов спричиняє саме зношування деталей. За даними виробничої статистики, близько 80% елементів машин виходять з ладу внаслідок інтенсивного абразивного, гідроабразивного чи контактного зношування [1, 2]. Особливо це стосується деталей гідравлічних систем, що працюють у режимах знакозмінних та циклічних навантажень, зазнають значних коливань тиску та температури і працюють у умовах постійного тертя.

Одним із найбільш ресурсно-обмежувальних агрегатів є шестеренні насоси, які широко застосовуються як у сільськогосподарській, так і в автомобільній техніці. Критерієм граничного стану насосів вважається зниження коефіцієнта їх подачі на 20%. Згідно з технічними умовами, відмовою насоса є зменшення об'ємного коефіцієнта корисної дії (ККД) нижче 0,65. Для нового насоса значення об'ємного ККД становить близько 0,92, а для відновленого – 0,90 [3], що підтверджує доцільність ремонту і відновлення.

Підвищення довговічності гідравлічних агрегатів можливе за умови раціонального застосування ефективних ремонтних технологій. Використання

прогресивних методів відновлення деталей дозволяє: знизити кількість виробничих операцій у 4–6 разів у порівнянні з виготовленням нових деталей, зменшити витрати матеріалів у 20–30 разів, забезпечити собівартість ремонту на рівні 60–80% від вартості нової деталі [6, 8].

Незважаючи на це, технічна література свідчить, що середній ресурс нових шестеренних насосів часто у два та більше разів нижчий за середній доремонтний ресурс базових машин, що свідчить про недостатню стійкість окремих конструктивних елементів до зношування. Особливо інтенсивно зношуються втулки шестеренних насосів, які працюють в спряженні з торцями шестерень, виконують функцію підшипникової опори та одночасно ущільнювального елемента.

Для таких деталей недостатньо відновити лише геометричні параметри. Потрібно забезпечити ще й зміцнення поверхневого шару, підвищення його твердості, втомної та зносостійкої стійкості. Саме тому актуальним є пошук технологій, здатних комплексно вирішувати двоєдине завдання: відновлення розмірів і зміцнення поверхні.

Методи, що базуються на пластичному деформуванні металів, показують високу ефективність при відновленні деталей, схильних до інтенсивного зношування. У сфері технічного сервісу сформовано низку технологічних рішень, які дозволяють цілеспрямовано змінювати структуру та властивості поверхневого шару. Для деталей шестеренних насосів, і насамперед їх втулок, актуальним є дослідження можливостей осаджування та роздачі, що забезпечують необхідну геометрію, підвищену твердість і ресурс.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У наукових джерелах представлено значну кількість робіт, що ґрунтуються на результатах теоретичних та експериментальних досліджень, а також враховують практичний досвід експлуатації автотранспортної й сільськогосподарської техніки. У центрі уваги дослідників залишаються питання підвищення надійності та довговічності машин, зокрема агрегатів гідравлічних систем. Окремим напрямом є дослідження шляхів забезпечення післяремонтного ресурсу шестеренних насосів, що активно розглядається у працях сучасних авторів [7, 9].

У низці досліджень встановлено, що досягнення високої міцності й достатньої пластичності матеріалу деталей можливе за умови коректного врахування їх напружено-деформованого стану, зокрема впливу внутрішніх залишкових напружень. Це підтверджує актуальність вивчення структурних перетворень поверхневих шарів під дією навантажень, властивих умовам роботи насосів у гідросистемах автомобільної техніки.

Попри наявність значного наукового доробку щодо технологій обробки тиском, застосування пластичної деформації саме у ремонтному виробництві висвітлено недостатньо. Більшість робіт присвячено використанню зміцнювальних технологій у процесі виготовлення нових деталей, тоді як питання відновлення зношених елементів, забезпечення їх взаємозамінності та відповідності нормативним допускам потребують подальших досліджень.

Ефективне впровадження зміцнювальних технологій у технічному сервісі потребує наявності ґрунтовної експериментальної бази, включаючи результати експлуатаційних випробувань, що дозволяють оцінити витривалість відновлених деталей у реальних умовах роботи гідросистем [8].

Важливу роль у розвитку пластичної деформації відіграють трибофізичні фактори [5]. Триботехнічні властивості матеріалів, стан спряжень, характер навантажень та параметри тертя визначають закономірності деформації й впливають на вибір режимів обробки. Зокрема, параметри зношування у спряженнях «торець

шестерні – кришка» та «зуб шестерні – колодязь корпусу» формують відповідно торцеві та радіальні зазори, що безпосередньо впливають на об'ємні втрати робочої рідини і зниження подачі насоса. У роботах [6, 7] запропоновано конструктивні шляхи компенсації торцевого зазору, однак їх ефективність потребує підтвердження повномасштабними випробуваннями.

Дослідження закономірностей розвитку пластичної деформації для деталей із різними схемами навантаження дозволили розробити критерії оцінювання напружено-деформованого стану, що є важливим для деталей типу втулок. Значна кількість наукових робіт присвячена механізмам зміцнення поверхонь за рахунок пластичного деформування. Представники наукової школи професора А. А. Дуднікова встановили інтенсифікуючий вплив вібраційних коливань на процес деформації та параметри довговічності відновлених деталей [12, 13]. Розроблені технологічні процеси вібраційного зміцнення показали позитивні результати щодо підвищення зносостійкості.

Попри значний прогрес, найменш дослідженими залишаються питання характеру локальної деформації, механізму зародження й розвитку зміцнення, а також можливостей керування структурними змінами поверхневого шару з метою оптимізації відновлення деталей шестеренних насосів.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення післяремонтної довговічності шестеренних насосів автомобільної та сільськогосподарської техніки шляхом відновлення їх зношених втулок методами пластичного деформування, зокрема роздачі та осаджування, із забезпеченням метрологічного контролю та відповідності вимогам взаємозамінності.

Досягнення мети потребує вирішення комплексу наукових та прикладних завдань, серед яких:

1. Вивчити фактори, що визначають параметри довговічності (ресурс) шестеренних гідронасосів, і проаналізувати рівень ремонтної технологічності деталей, включаючи чутливість критичних розмірів до виробничих похибок та впливу експлуатаційних навантажень.

2. Дослідити характер і величину дефектів та зносів втулок шестеренних насосів, визначити основні причини втрати працездатності та встановити закономірності зміни геометричних параметрів у спряженнях.

3. Проаналізувати існуючі методи та способи відновлення зношених деталей гідросистем, виявити їх технологічні можливості, обмеження та ступінь забезпечення відновленої взаємозамінності.

4. Обґрунтувати режими пластичного деформування при відновленні втулок, експериментально дослідити параметри обробки та визначити умови, що забезпечують сталість геометричних характеристик і якісне формування поверхневого шару.

5. Дослідити вплив пластичного деформування на властивості матеріалу втулок.

6. Обґрунтувати доцільність застосування осаджування як ефективного способу відновлення торцевих поверхонь втулок, визначити раціональні параметри процесу та встановити їх вплив на післяремонтний ресурс насосів.

7. Розробити систему метрологічного забезпечення процесу відновлення втулок, яка включає: методики контролю геометричних параметрів після деформування; вибір засобів вимірювань та способів підвищення їх точності; оцінювання похибок вимірювання та відтворюваності результатів; підтвердження відповідності відновлених деталей вимогам взаємозамінності (поля допусків, допуски форми та розташування, параметри шорсткості).

Виклад основного матеріалу. Шестеренний насос є одним із найпоширеніших елементів гідравлічних систем автотранспортної та сільськогосподарської техніки. Його робота ґрунтується на перетворенні механічної енергії приводу на гідравлічну енергію потоку робочої рідини. Передача енергії здійснюється за рахунок створення тиску та організованого переміщення оливи до інших агрегатів гідросистеми [1, 2]. Стабільний потік без різких коливань тиску забезпечує надійну роботу механізмів, що залежать від гідравлічного живлення.

Шестеренні насоси мають як типові для гідросистем недоліки [3, 4], так і конструктивно зумовлені проблеми, пов'язані з роботою зубчастих спряжень. У процесі перекачування робочої рідини періодичне замикання простору між зубцями створює додаткові радіальні та динамічні навантаження на підшипникові вузли. Із часом це призводить до збільшення радіальних та торцевих зазорів, порушення ущільнення між торцями шестерень і кришками насоса, а також до зростання внутрішніх витоків робочої рідини. Таким чином, ресурс насоса визначається стабільністю геометричних параметрів його деталей, насамперед деталей спряжень.

Особливо важливу роль у роботі насоса відіграють втулки, які виконують функції торцевих ущільнень та одночасно слугують підшипниковими опорами для цапф шестерень. Якість їх виготовлення або відновлення безпосередньо впливає на об'ємний коефіцієнт корисної дії, стабільність подачі, рівень спрацювання та післяремонтний ресурс агрегату. Для таких деталей використовують алюмінієві ливарні антифрикційні сплави, зокрема АМО-3-7 згідно з ДСТУ ISO 209-1:2002 [2], що забезпечують необхідне поєднання міцності, теплопровідності та антифрикційності.

Втулки працюють у складних умовах: у спряженні зі сталевими шестернями; під дією знакозмінних та циклічних навантажень; у середовищі оливи з абразивними частинками; при значних перепадах температур.

Такі режими спричиняють виникнення внутрішніх термічних напружень і нерівномірне спрацювання робочих поверхонь [5]. Найхарактернішими дефектами є натирання, задири, риси та локальні вибоїни.

У межах дослідження проведено детальний аналіз характеру та величини зношування втулок шестеренних насосів. Комплекс робіт включав: вимірювання діаметрів, овальності та конусності внутрішніх та зовнішніх поверхонь; фіксацію змін торцевих поверхонь; фотографування зон інтенсивного спрацювання; оцінювання стану поверхневого шару відповідно до вимог метрологічного контролю [14].

Дефекти поверхні визначали шляхом зовнішнього огляду, із подальшою фіксацією характерних пошкоджень, що представлено на рисунку 1.

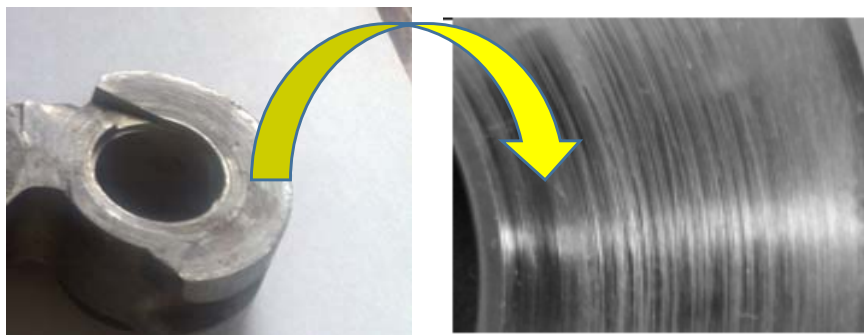


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд втулок із гідроабразивним спрацюванням торців

Джерело: розроблено авторами

Основними видами зношування втулок шестеренного насоса є:

- знос торцевої поверхні, що працює у спряженні з торцем шестерні;
- знос великої та малої циліндричних зовнішніх поверхонь у спряженні з корпусом насоса;
- знос внутрішньої циліндричної поверхні, по якій обертається цапфа шестерні;
- знос торцевої поверхні, що контактує з корпусом та ущільнювальною манжетною.

За результатами вимірювань виконано обробку експериментальних даних, визначено величини зносів та фактичні радіальні й торцеві зазори у спряженнях. Встановлено, що саме граничні зноси поверхонь та порушення регулювальних параметрів є основними причинами відмов шестеренних насосів. У більшості випадків домінує абразивний і гідроабразивний тип зношування, що призводить до збільшення внутрішніх витоків робочої рідини, падіння тиску та зменшення об'ємного коефіцієнта корисної дії.

На наступному етапі дослідження було встановлено функціональний зв'язок між величиною зазору у спряженні «торець втулки – торець шестерні» та тиском нагнітання робочої рідини. Цей взаємозв'язок є критично важливим, оскільки зміна зазору безпосередньо впливає на об'ємні витрати оливи та фактичну подачу насоса.

Експериментальні випробування проводили з використанням стенду КИ-4815М [14], що дозволило визначити фактичну подачу насоса та розрахувати об'ємний коефіцієнт подачі. Об'ємний коефіцієнт подачі характеризує співвідношення фактичної подачі до теоретичної та відображає частку робочої рідини, що реально переміщується насосом з урахуванням внутрішніх втрат [7].

Внутрішні витки виникають у таких зонах: зазори між вершинами зубців та корпусом; зазори між торцями шестерень і боковими кришками; мікротріщини та локальні канали зношування по лінії контакту зубців; торцевий зазор у спряженні «втулка – шестерня».

Для забезпечення об'ємного ККД, передбаченого технічними вимогами, необхідно мінімізувати торцеві витікання. Частково це досягається автоматичним притисканням бокових стінок корпусу до торців шестерень під дією робочого тиску.

У ході дослідження побудовано графік залежності величини торцевого зазору від тиску нагнітання робочої рідини, що наведено на рисунку 2. Графік демонструє зменшення зазору при підвищенні тиску, що пов'язано з еластичними деформаціями корпусу та гідравлічним притисканням торцевих поверхонь. Ці закономірності важливі для обґрунтування режимів пластичного деформування та вимог до відновленої точності геометрії втулок.

Отже, зі збільшенням тиску нагнітання в інтервалі 2,0–10 МПа торцевий зазор у спряженні «втулка – шестерня» зменшується з приблизно 4,7 до 2,55 мкм. Це свідчить про наявність еластичних деформацій корпусу насоса та гідравлічного притискання торцевих поверхонь, що необхідно враховувати під час оцінювання фактичного стану спряжень і формування вимог до точності їх відновлення.

У практиці технічного сервісу застосовують низку технологічних рішень для відновлення деталей гідросистем, зокрема втулок шестеренних насосів. Проведено аналіз сучасних методів усунення зношування, який охоплює механічні, наплавлювальні, електрофізичні та деформаційні технології (рис. 3).

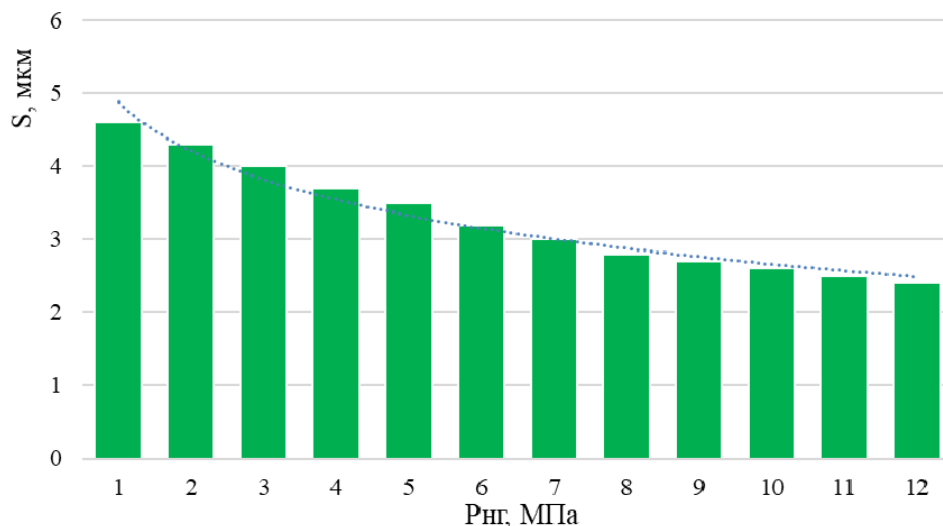


Рисунок 2 – Графік залежності зазору у з'єднанні торець втулки – торець шестерні від величини тиску нагнітання робочої рідини

Джерело: розроблено авторами

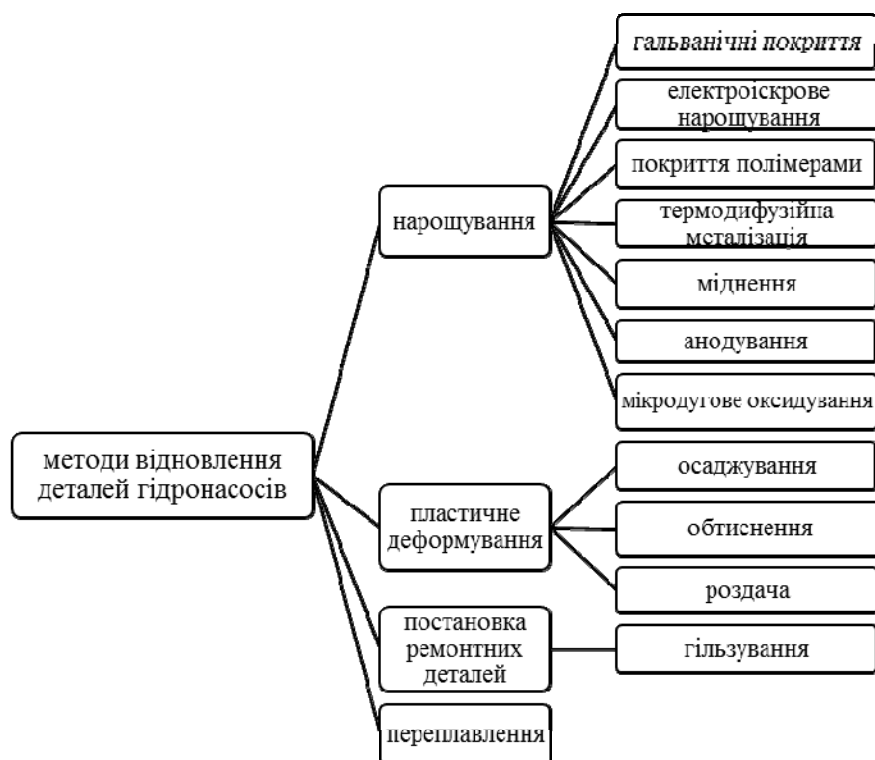


Рисунок 3 – Методи та способи відновлення деталей гідронасосів

Джерело: розроблено авторами

Серед досліджених методів особливо перспективними виявилися технології пластичного деформування, які поєднують відновлення геометричних параметрів з одночасним зміцненням поверхневого шару. Принцип їх дії базується на здатності металів до локального перерозподілу матеріалу під дією зовнішнього навантаження, що дозволяє відтворювати номінальні розміри та покращувати експлуатаційні властивості деталей.

Пластичне деформування може здійснюватися як у холодному, так і у гарячому

стані, залежно від властивостей матеріалу та вимог до інтенсивності зміцнення [8, 9]. У випадку втулок шестеренних насосів застосування цих методів дає змогу: зменшити глибину дефектного шару; підвищити твердість і зносостійкість робочих поверхонь; забезпечити стабільність розмірів після термічного та силового впливу; відновити точність у межах, необхідних для забезпечення взаємозамінності.

Таким чином, технології пластичного деформування є ефективним інструментом для підвищення ресурсу відновлених деталей гідросистем автотранспортної та тракторної техніки.

Суть процесу осаджування полягає в цілеспрямованому зменшенні висоти втулки шляхом локального пластичного деформування її торцевої поверхні. У результаті відбувається ущільнення матеріалу та компенсація зношеного шару, що дозволяє відновити необхідні геометричні параметри поверхні спряження. Втрата висоти деталі компенсується корекцією посадочних місць корпусу насоса або встановленням додаткової алюмінієвої шайби, що забезпечує дотримання регламентованого торцевого зазору.

Експериментальні дослідження процесу осаджування проводили із застосуванням розробленого спеціального пристосування, принципова схема якого наведена на рисунку 4. Конструкція пристосування забезпечує можливість рівномірної передачі навантаження та точного позиціонування втулки, що є необхідним для отримання стабільних метрологічних параметрів після відновлення.

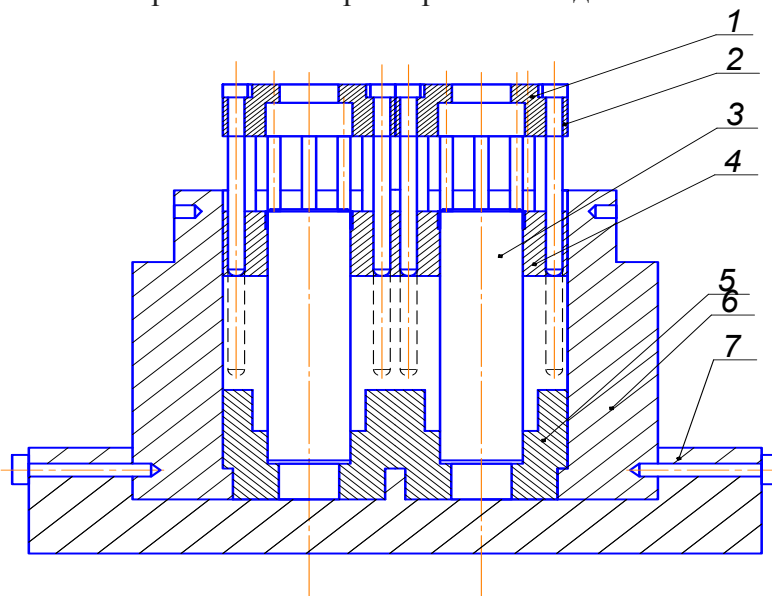


Рисунок 4 - Схема пристосування для відновлення втулок масляних насосів

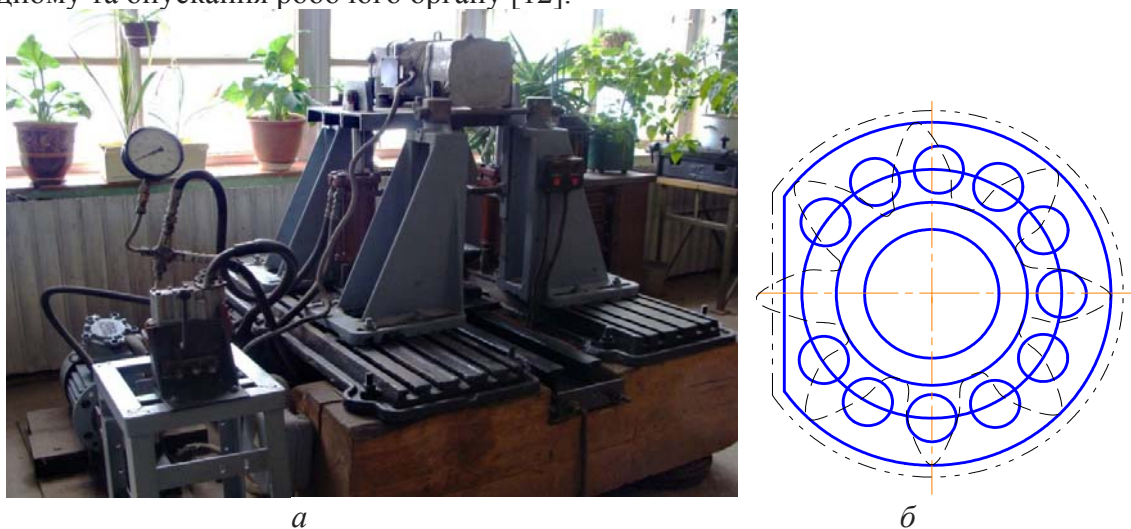
Джерело: розроблено авторами на підставі [12]

Пристрій складається з таких елементів:

- верхньої обойми (1), що забезпечує жорсткість та правильне центрування вузла;
- пуансона (2), який передає зусилля на торцеву поверхню втулки та формує зону пластичної деформації;
- вкладиша (3) для фіксації й орієнтації деталі;
- нижньої обойми (4) та підставки (5) для стабільного базування;
- матриці (6), що визначає геометрію деформування;
- основи (7), яка сприймає навантаження та забезпечує загальну жорсткість системи.

Таке конструктивне рішення дозволяє реалізувати контрольовану пластичну деформацію, забезпечити відновлення розмірів із необхідною точністю та досягти однорідності структури матеріалу в зоні обробки. Важливо, що застосування осаджування забезпечує формування зміцненого поверхневого шару, що позитивно впливає на подальшу зносостійкість і післяремонтну довговічність втулок.

Лабораторна установка для відновлення втулок методом пластичного деформування конструктивно складається з трьох основних вузлів (рис. 5): пристосування для осаджування втулок; жорсткої опорної основи; гідравлічної системи підйому та опускання робочого органу [12].



а – експериментальна деформаційна установка; б – схема деформування втулки

Рисунок 5 – Лабораторна установка для відновлення втулок методом пластичного деформування
Джерело: розроблено авторами

Станина установки разом із допоміжним обладнанням забезпечує необхідну просторову жорсткість, правильне розміщення та фіксацію вібраційного вузла, а також виконує функцію ізоляції установки від вібрацій приміщення. Це дозволяє мінімізувати коливання, що впливають на точність процесу осаджування, і забезпечує відтворюваність метрологічних параметрів відновлених деталей.

Приводом гідравлічної системи є електродвигун 2BP132M4Y25, який надає обертання гідронасосу НШ-50. Олива з масляного бака подається через розподільник Р-75 до гідроциліндрів ЦС-100, що переміщують робочу плиту. На плиті встановлені направляючі кутики, які забезпечують точне вертикальне переміщення та усувають перекоси під час навантаження.

На плиті також розміщується затискний пристрій, виконаний у вигляді трьохкулачкового патрона токарно-гвинторізного верстата, жорстко з'єднаного з плитою. Це дає змогу надійно фіксувати пуансони та забезпечує точне центрування осі деформування відносно втулки, що є критично важливим для рівномірності пластичної деформації. Гідроциліндри змонтовані в стійках, установлених на опорних плитах, які, у свою чергу, спираються на дерев'яні бруси. Гумові подушки виконують функцію амортизаторів, поглинаючи низькочастотні коливання та знижуючи вплив зовнішніх динамічних навантажень.

Матриця встановлена на опорній основі, що забезпечує високу жорсткість і точність базування деформованої деталі. Розташування усіх елементів установки розроблене таким чином, щоб гарантувати рівномірність навантаження, стабільність режимів деформування та контрольоване формування зміцненого поверхневого шару втулки.

При здійсненні пластичного деформування механічні властивості металу змінюються залежно від умов навантаження: температури, швидкості деформації, типу напруженого стану, геометрії деталі та стану її поверхневого шару. У цих умовах формуються специфічні структурні зміни, що визначають параметри зміцнення та подальшу експлуатаційну стійкість відновлених втулок.

Підвищення міцності металу в процесі деформації зумовлене низкою мікроструктурних механізмів. Зі зростанням ступеня деформації різко збільшується опір зсуву дислокацій, інтенсифікується блокуєтворення, викривляються площини ковзання та з'являються локальні «уламки» кристалічної решітки, пов'язані з поворотом окремих блоків структури [10, 11]. Сукупність цих процесів сприяє збільшенню твердості та межі міцності, формуючи зміцнений поверхневий шар, стійкий до зношування.

Алюмінієвий антифрикційний сплав АМО-7-3 (система Al–Cu–Sn), який використовується для виготовлення втулок насосів, характеризується схильністю до утворення тріщин під час холодної пластичної деформації [15]. Дослідження показали, що оптимальна температура для деформування з мінімальною твердістю та максимальною пластичністю матеріалу становить 450–500 С. З цієї причини перед осаджуванням втулки попередньо нагрівали, а пристосування для деформування підтримувалося в температурному режимі 100–120°C.

Деформування здійснювалось шляхом встановлення касети з пуансонами у торцеву частину втулки з боку спряження із шестернею. Після цього гідравлічна система опускала плиту, забезпечуючи рівномірне осаджування при тиску 430–450 МПа та тривалості процесу 2–3 с. Після деформування внутрішня поверхня втулки оброблялася дорном до ремонтного (номінального) розміру, а зовнішня поверхня проточувалася на токарно-гвинторізному верстаті 1К62. При цьому об'єм металу залишався незмінним, що підтверджує класичний принцип збереження матеріалу при деформаційних технологіях [13].

З метою стабілізації структури та підвищення механічних властивостей після осаджування проводили штучне старіння при температурі 180 С протягом 6 годин [15]. У процесі старіння перенасичений твердий розчин у системі Al–Cu розпадається, утворюючи дрібні рівномірно розподілені частинки (осад). Ці частинки блокують рух дислокацій, що призводить до підвищення твердості, міцності та корозійної стійкості матеріалу. При температурах, що перевищують 150 С, швидкість розпаду твердого розчину зростає, що забезпечує інтенсивніше формування зміцненої структури.

Для підтвердження ефективності відновлення проведено порівняльні випробування на зношування зразків, вирізаних із нових та відновлених втулок. Дослідження виконували на машині тертя МТ-1М, яка моделює роботу спряження «торець втулки – торець шестерні» масляного насоса. Перед і після випробувань зразки зважували, після чого визначали втрату маси внаслідок тертя.

Середня втрата маси зразка з нової втулки становила 0,173 г, тоді як зразка, вирізаного з відновленої втулки, – 0,126 г. Таким чином, зношування матеріалу нової втулки виявилось на 27,17% більшим порівняно з відновленою, що підтверджує формування ефективного зміцненого шару після пластичного деформування та старіння. Графічні залежності зміни величини зносу наведено на рисунку 6.

Стендові випробування масляних насосів із відновленими втулками проведено на установці КИ-4815М згідно з чинними методиками оцінювання технічного стану насосів та визначення їх подачі, об'ємного коефіцієнта корисної дії та рівня внутрішніх витоків [14]. Метою випробувань було експериментально підтвердити працездатність відновлених втулок у реальних умовах навантаження та порівняти їх поведінку з новими деталями.

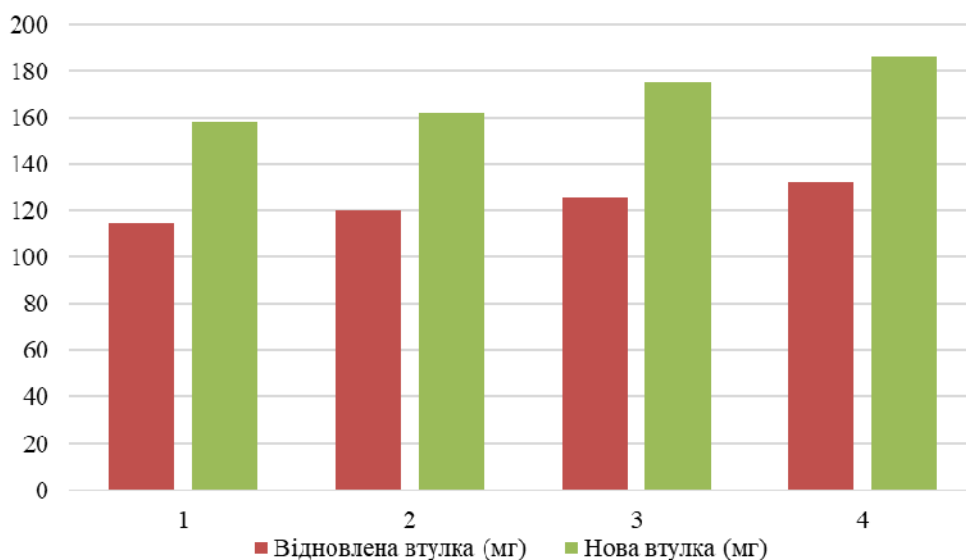


Рисунок 6 – Діаграма зносу відновлених та нових втулок

Джерело: розроблено авторами

У ході досліджень насос працював у встановленому діапазоні тисків нагнітання, а контрольні заміри проводили після певної кількості циклів. За результатами стендових тестів встановлено (табл. 1):

- фактична подача насоса з відновленими втулками зменшувалася значно повільніше, ніж у варіанті з новими втулками;
- об'ємний коефіцієнт подачі залишався у межах 0,88–0,90, що відповідає значенням для відремонтованих насосів згідно ТУ;
- зростання внутрішніх витоків у насосах з відновленими втулками було меншим на 15–20%, що свідчить про ефективне ущільнення торцевих спряжень;
- за результатами контрольного розбирання торцевий знос відновлених втулок був меншим на 20–30%, ніж у нових втулок, що узгоджується з даними, отриманими на машині тертя МТ-1М.

Таблиця 1 – Результати стендових випробувань

Показник	Насос з новими втулками	Насос з відновленими втулками
Втрата маси зразків, г	0,173	0,126
Інтенсивність зношування (відносна), %	100%	≈72,8%
Об'ємний коефіцієнт подачі (Кп)	0,85–0,88	0,88–0,90
Зростання внутрішніх витоків	Більше	На 15–20% менше
Торцевий знос після стендових випробувань	Вищий	На 20–30% нижчий

Джерело: розроблено авторами

Середня величина втрати маси зразків підтвердила закономірність: нові втулки – 0,173 г, відновлені втулки – 0,126 г, що свідчить про зниження інтенсивності зношування на 27,17%.

Таким чином, результати стендових випробувань повністю узгоджуються з лабораторними тестами на машині тертя. Відновлені методом пластичного деформування та штучного старіння втулки демонструють підвищену зносостійкість, кращу стабільність геометрії та забезпечують більш тривалий післяремонтний ресурс масляних насосів порівняно з новими деталями.

Система метрологічного забезпечення процесу відновлення втулок шестеренних насосів ґрунтується на комплексному підході до контролю геометричних параметрів, забезпеченні точності вимірювань, оцінюванні похибок та підтвердженні відповідності відновлених деталей вимогам взаємозамінності. Оскільки втулка виконує одночасно функції підшипникової опори та торцевого ущільнення, її геометрична точність, параметри шорсткості, стабільність структури матеріалу та робочі розміри безпосередньо визначають післяремонтний ресурс масляного насоса.

Основними параметрами, що підлягають метрологічному контролю, є внутрішній діаметр втулки, зовнішній діаметр, довжина, співвісність отвору відносно зовнішньої поверхні, площинність і перпендикулярність торців, а також параметри шорсткості. Відповідно до вимог взаємозамінності та загальних положень стандартизації, внутрішній діаметр відновленої втулки повинен відповідати полю допуску H7, що гарантує робочий зазор для цапфи шестерні в межах 10–40 мкм. Зовнішній діаметр втулки повинен забезпечувати натяг у корпусі насоса, що, залежно від типорозміру та матеріалу корпусу, досягається полями допусків s6...p6. Нормовані показники форми та розташування включають круглість і циліндричність отвору на рівні 0,01–0,02 мм, співвісність 0,02 мм та площинність торців не більше 0,01 мм. Параметри шорсткості після дорнування та чистової обробки повинні відповідати $Ra \leq 0,8$ –1,6 мкм для отвору та $Ra \leq 0,8$ –1,2 мкм для торцевих поверхонь.

Організація метрологічного контролю включала три етапи: дефектацію до відновлення, операційний контроль під час виконання технологічних операцій та приймальний контроль після відновлення. На етапі дефектації встановлювалися вихідні параметри зношування: фактичні значення діаметрів, торцевих і радіальних зазорів, характер дефектів поверхні та зміни форми спряжень. Операційний контроль виконувався після осаджування та після дорнування, що дозволяло своєчасно коригувати геометрію та запобігати накопиченню похибок. Приймальний контроль здійснювався після завершення всіх технологічних операцій та термічної обробки, включаючи перевірку поля допусків, параметрів форми, шорсткості та твердості, а також підтвердження взаємозамінності шляхом застосування проходних і непроходних калібрів GO/NO-GO.

Для вимірювань використовувались нутроміри та мікрометри з ціною поділки 1–2 мкм, індикаторні головки, висотоміри, калібри H7 для отворів та калібри натягу для посадок у корпусі. Шорсткість визначалася профілометром згідно ISO 4287/21920. Контроль твердості та рівномірності зміцнення здійснюється за допомогою мікротвердоміра HV 0.1/0.3.

Для забезпечення точності вимірювань встановлювалися однакові температурні умови (20 ± 2 °C) та витримка деталей перед вимірюваннями не менше 2 годин. Повторюваність результатів досягалась виконанням вимірювань у трьох перерізах отвору та у кількох точках по колу. Чистота поверхні, правильне базування та стабільність сили вимірювання є обов'язковими умовами.

Відповідність відновленої втулки вимогам взаємозамінності підтверджується сукупністю результатів вимірювань та стендовими випробуваннями масляного насоса. Об'ємний коефіцієнт подачі після встановлення відновлених втулок знаходиться в межах 0,88–0,90, а внутрішні витоки зменшуються на 15–20 % порівняно з насосами, оснащеними новими втулками. Результати випробувань на зношування підтвердили зменшення втрати маси зразків відновлених втулок на 27,17 %, що свідчить про підвищення зносостійкості та ефективність сформованого зміцненого шару.

Таким чином, запропонована система метрологічного забезпечення дозволяє забезпечити контрольоване формування геометрії та властивостей втулок після

осаджування, гарантує їх відповідність вимогам взаємозамінності та підтверджує підвищення експлуатаційної надійності масляних насосів зі встановленими відновленими деталями.

Висновки. У ході дослідження виконано комплекс наукових та експериментальних робіт, спрямованих на підвищення післяремонтної довговічності шестеренних масляних насосів шляхом удосконалення технології відновлення їх втулок. Отримані результати дозволяють сформулювати такі висновки.

1. Проаналізовано фактори, що визначають ресурс шестеренних гідронасосів. Встановлено, що критичний вплив на довговічність агрегату мають геометрична точність втулок, торцевий зазор у спряженні «втулка – шестерня», характер навантаження та рівень внутрішніх витоків робочої рідини. Показано, що навіть незначні зміни точнісних параметрів спряжень призводять до помітного зниження подачі насоса й об'ємного коефіцієнта корисної дії.

2. Досліджено характер і величину дефектів та зносів втулок. Встановлено закономірності зміни внутрішніх та зовнішніх діаметрів, деформації торцевих поверхонь, появи задирів та натирань. Підтверджено домінування абразивного та гідроабразивного типів зношування, що формують радіальні та торцеві зазори, які визначають втрати подачі й зниження ККД насоса.

3. Виконано аналіз сучасних методів відновлення деталей гідросистем. Виявлено, що значна частина традиційних технологій забезпечує лише відтворення геометричних параметрів, але не формує зміцнений поверхневий шар. Пластичне деформування визначено як один із найбільш перспективних методів, який забезпечує одночасне відновлення точності та підвищення зносостійкості, а також гарантує відтворюваність параметрів, необхідних для взаємозамінності.

4. Обґрунтовано режими пластичного деформування при відновленні втулок. Встановлено, що поєднання попереднього нагріву втулки до 450–500°C, осаджування при тиску 430–450 МПа та дорнування забезпечує стабільність розмірів, відсутність тріщин і формування однорідного поверхневого шару. Виявлено оптимальні умови, за яких після деформування втулка набуває необхідної точності за розмірами та параметрами форми.

5. Досліджено вплив пластичного деформування на властивості матеріалу. Встановлено, що процес осаджування інтенсифікує дислокаційні механізми зміцнення, сприяє блокуванню, викривленню площин ковзання та формуванню дрібнодисперсної структури. Це забезпечує зростання твердості та підвищення опору зношуванню. Штучне старіння при 180 °C протягом 6 годин додатково стабілізує структуру алюмінічного сплаву АМО-7-3 та підвищує його міцнісні характеристики.

6. Доведено ефективність осаджування як способу відновлення торцевих поверхонь втулок. Експериментальні стендові та лабораторні випробування засвідчили, що втулки, відновлені осаджуванням і наступним дорнуванням, демонструють підвищену зносостійкість: інтенсивність зношування знижується на 27,17 %, внутрішні витки – на 15–20 %, а об'ємний коефіцієнт подачі насоса стабілізується на рівні 0,88–0,90. Це підтверджує збільшення післяремонтного ресурсу насосів.

7. Розроблено систему метрологічного забезпечення процесу відновлення втулок. Запропоновано методики контролю геометричної точності після деформування, визначено засоби вимірювань, процедури забезпечення їх точності та методи оцінювання повторюваності й відтворюваності результатів. Обґрунтовано систему критеріїв, що забезпечує підтвердження відповідності відновлених втулок вимогам взаємозамінності, включаючи контроль полів допусків, відхилень форми і розташування, параметрів шорсткості та натягів у спряженнях.

Список літератури

1. Hujo L., Jablonický J., Borowski S., Kaszkowiak J., Michalides M. Measurement of flow characteristics of a gear hydraulic pump by simulating the operating load of the tractor's hydraulic system. *MATEC Web of Conferences*. 2021. Vol. 338. Art. 01010. DOI: 10.1051/mateconf/202133801010.
2. Основні несправності гідросистем : веб-сайт. URL: <https://promimpex.com.ua/osnovnyie-nespravnosti-gidrosistem.html> (дата звернення: 07.05.2025).
3. Технологічні особливості ремонту гідросистем тракторів. *AgroExpert* : щомісячний журнал : веб-сайт. URL: <https://agroexpert.ua/tekhnolohichni-osoblyvosti-remontu-hidrosystem-traktoriv/> (дата звернення: 10.05.2025).
4. Torrent M., Gamez-Montero PJ, Codina E. Model of the Floating Bearing Bushing Movement in an External Gear Pump and the Relation to Its Parameterization. *Energies*. 2021; 14(24):8553. DOI: 10.3390/en14248553.
5. Трибофізичні основи підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки технологіями триботехнічного відновлення : монографія / Аулін В. В. та ін. ; за ред. В. В. Ауліна. Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2016. 303 с.
6. Мельянцева П. Т., Лосіков О. М., Сидоренко В. К. Технологія ремонту ресурсолімітуючих деталей спряження качаючих вузлів аксіально-поршневих гідромашин. *Сучасна інженерія та інноваційні технології*. 2025. № 38-01. С. 15–37. DOI: 10.30890/2567-5273.2025-38-01-022.
7. Підвищення довговічності шестеренного насоса гідросистеми автотракторної техніки шляхом зниження зносів деталей, що утворюють радіальний зазор / Кулешков Ю. В. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. праць*. 2022. Вип. 5 (36), Ч. II. С. 86–96. DOI: 10.32515/2414-3820.2022.52.118-134.
8. Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування : монографія / О. В. Нахайчук та ін. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. 158 с.
9. Хітров І. О., Кононогов Ю. А. Відновлення деталей пластичним деформуванням та способи для його здійснення. *Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35 (74), № 1. С. 191–196.
10. Матвійчук В. А., Михалевич В. М. Розвиток процесів локального деформування. Теорія і практика обробки матеріалів тиском : монографія. Запоріжжя : АТ «Мотор Січ», 2016. С. 339–363.
11. Паніна В. В., Дідур В. В., Сірий І. С., Чорна Т. С. Зміцнення деталей за допомогою поверхнево-пластичної деформації. *Науковий вісник ТДАТУ*. Мелітополь, 2020. Вип. 10; Т. 2. С. 125–135. DOI: 10.31388/2220-8674-2020-2-13.
12. Спосіб відновлення та зміцнення сталевих втулок : пат. 59687 Україна: МПК(2006.01) C21D 1/06, B23P 6/00 / Іванкова О. В. №u201013245; заявл. 08.11.2010; опубл. 25.05.2011, Бюл. № 10/2011.
13. Ivankova O., Fedin V. Research on the restoration of gear pump parts by plastic deformation. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025. 12(43). P. 175–186. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.175-186](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.175-186)
14. В'юник О. В., Серий І. С., Смелов А. О. Програма та методика експериментальних досліджень зношування деталей шестеренних насосів. *Науковий вісник ТДАТУ*. Мелітополь, 2020. Вип. 10, Т. 2. С. 125–135. DOI: 10.31388/2220-8674-2020-2-11.
15. Старіння алюмінію: види та ефективність : веб-сайт. URL: <https://kcm.in.ua/starenie-vidy-i-effektivnost/> (дата звернення: 16.10.2025).

References

1. Hujo, L., Jablonický, J., Borowski, S., Kaszkowiak, J., & Michalides, M. (2021). Measurement of flow characteristics of a gear hydraulic pump by simulating the operating load of the tractor's hydraulic system. *MATEC Web of Conferences*, 338, 01010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133801010>
2. Osnovni nespravnosti hidrosystem. (2025). Retrieved from <https://promimpex.com.ua/osnovnyie-nespravnosti-gidrosistem.html>
3. Tekhnolohichni osoblyvosti remontu hidrosystem traktoriv. (2025). *AgroExpert*. Retrieved from <https://agroexpert.ua/tekhnolohichni-osoblyvosti-remontu-hidrosystem-traktoriv/>
4. Torrent, M., Gámez-Montero, P. J., & Codina, E. (2021). Model of the floating bearing bushing movement in an external gear pump and its parameterization. *Energies*, 14(24), 8553. <https://doi.org/10.3390/en14248553>
5. Aulin, V. V., et al. (2016). *Trybofizychni osnovy pidvyshchennia nadiinosti mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniky tekhnolohiiamy trybotechnichnoho vidnovlennia*. Lysenko V. F. [in Ukrainian]

6. Meliantsov, P. T., Losikov, O. M., & Sydorenko, V. K. (2025). Tekhnolohiia remontu resursolimituiuchykh detalei spriazhenia kachaiuchykh vuzliv ak-sialno-porshnevnykh hidromashyn. *Suchasna inzheneriia ta innovatsiini tekhnolohii*, (38-01), 15–37. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2025-38-01-022>
7. Kuleshkov, Yu. V., et al. (2022). Pidvyshchennia dovhovichnosti shesterennoho nasosa hidrosystemy avtotraktornoï tekhniki shliakhom znyzhennia znosiv detalei, shcho utvoriuiut radialnyi zazor. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 5(36/2), 86–96. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.118-134>
8. Nakhaychuk, O. V., et al. (2008). *Novi tekhnolohichni protsesy z vykorystanniam prohresyvnnykh metodiv plastychnoho deformuvannia*. UNIVERSUM-Vinnytsia. [in Ukrainian]
9. Khitrov, I. O., & Kononohov, Yu. A. (2024). Vidnovlennia detalei plastychnym deformuvanniam ta sposoby dlia yoho zdiisnennia. *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Taurida National University. Technical Sciences*, 35(74/1), 191–196. [in Ukrainian]
10. Matviichuk, V. A., & Mykhalevych, V. M. (2016). *Rozvytok protsesiv lokal'noho deformuvannia. Teoriia i praktyka obrobky materialiv tyskom*. Motor Sich. [in Ukrainian]
11. Panina, V. V., Didur, V. V., Siryi, I. S., & Chorna, T. S. (2020). Zmitsnennia detalei za dopomohoiu poverkhnevo-plastychnoyi deformatsii. *Scientific Bulletin of TSATU*, 10(2), 125–135. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-2-13>
12. Ivankova, O. V. (2011). Sposib vidnovlennia ta zmitsnennia stalevykh vtulok (Patent No. 59687). Ukrainian Intellectual Property Institute. [in Ukrainian]
13. Ivankova, O., & Fedin, V. (2025). Research on the restoration of gear pump parts by plastic deformation. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 12(43), 175–186. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.175-186](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.175-186)
14. V'iunyk, O. V., Sieryi, I. S., & Smielov, A. O. (2020). Prohrama ta metodyka eksperymentalnykh doslidzhen znoshuvannia detalei shesteren-nykh nasosiv. *Scientific Bulletin of TSATU*, 10(2), 125–135. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-2-11>
15. Starinnia aliuminii: vydy ta efektyvnist. (2025). URL: <https://kcm.in.ua/starenie-vidy-i-efektivnost/>

Olena Ivankova, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Gorbenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Taras Lapenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Maryna Chumak**, assistant of the department
Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Enhancing the Durability of Gear Pumps by Restoring Bushings Using Plastic Deformation Methods

The article presents a comprehensive study of the wear processes and restoration of bushings in gear-type oil pumps used in mobile machinery, employing plastic deformation technologies. The factors influencing the durability of hydraulic units are examined, with particular attention to axial and radial clearances in the “bushing–gear” pair, which determine internal leakage of the working fluid and cause losses in volumetric delivery. Analysis of defects and wear patterns revealed that one of the most resource-limiting components of gear pumps is the bushing, which simultaneously functions as a bearing support and a sealing element, operates under variable loads, and is subjected to intensive abrasive and hydro-abrasive wear.

The study summarizes existing methods for restoring worn hydraulic system components and substantiates the feasibility of applying plastic deformation technologies, which ensure both the recovery of geometric dimensions and the formation of a strengthened surface layer. Optimal upsetting and burnishing regimes for AMO-7-3 alloy bushings were experimentally determined, including required temperature conditions, deformation pressure, and process duration, ensuring crack-free deformation, dimensional stability, and the required accuracy of mating surfaces.

Laboratory and bench tests demonstrated significant advantages of the restored bushings: wear intensity decreased by 27 %, internal leakage reduced by 15–20 %, and the volumetric delivery coefficient of the pump remained stable at 0.88–0.90. The developed metrological support system for the restoration process, which includes methods for geometric control, error evaluation, and verification of compliance with interchangeability requirements, ensures the quality and reliability of repaired components. The obtained results can be effectively applied in technical service practices to extend the service life of hydraulic systems in mobile and agricultural machinery.

hydraulic pump, bushing, wear resistance, durability, technology, plastic deformation, deposition

Одержано (Received) 09.11.2025

Прорецензовано (Reviewed) 02.12.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2025