УДК 621.891:631.372:629.114/631.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.20

С. В. ЛЯШЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-3227-3738

А. О. КЕЛЕМЕШ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-9429-8570

О. А. БУРЛАКА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-2296-7234

В. В. ЛАВРЕНКО
старший викладач кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0001-6145-9224

ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГІЛЬЗ ГІДРОЦИЛІНДРІВ АВТОМОБІЛЬНО-ТРАКТОРНОЇ ТЕХНІКИ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ

На основі методів інженерії досягнуто покращення техніко-експлуатаційних характеристик гідроциліндрів автомобільно-тракторної техніки застосувавши комбіновану технологію термомеханічного зміцнення робочої поверхні гільзи гідроциліндра. Проведений аналіз традиційних технологій дозволив визначити їхні обмеження та обґрунтувати напрями вдосконалення. Запропонований процес поєднує нагрівання, деформуюче механічне накатування та температурний відпуск, для реалізації яких підібрано відповідне обладнання й інструмент. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність розроблених рішень: визначено температуру деформації ($T_{деф}$), ступінь деформації (λ) та температуру відпуску ($T_{відп}$) поверхні, розподіл твердості за товщиною стінки, а після обкатки – величину зносу.

Оптимальними режимами термомеханічного зміцнення слід приймати: температуру деформації 850–880 ºС, ступінь деформації 14–18 % та температуру відпуску 170–240 °С.

Запропонована технологія порівняно з промисловим виробництвом забезпечує:

– збереження твердості на рівні 42–50 HRC при більш ніж дворазовому підвищенні пластичності;

– збільшення глибини зміцненого шару в 1,25 рази, що дозволяє проводити ремонт за ремонтними розмірами;

– зниження напруженості поверхневого шару у 4–10 разів;

– підвищення стабільності механічних властивостей, підтверджене зменшенням коефіцієнтів варіації твердості у 1,6–1,7 рази та пластичності – у 1,8–2,3 рази.

Порівняльний аналіз показав суттєві переваги нової технології, зокрема зростання продуктивності обробки до 4 разів, зменшення витрат на інструмент утричі та загальне здешевлення процесу відновлення гільз гідроциліндрів. Встановлено, що застосування запропонованої технології забезпечує зміцнення поверхневого шару на глибину до 0,25 мм і досягнення шорсткості, наближеної до експлуатаційної.

Метою досліджень є підвищення довговічності та надійності гільз гідроциліндрів за рахунок застосування термомеханічного зміцнення, що сприятиме вдосконаленню процесів відновлення гідравлічних систем автомобільно-тракторної техніки.

Об'єкт дослідження: гільза гідроциліндра автомобільно-тракторної техніки, яка зазнає зношування в умовах експлуатації та підлягає відновленню з використанням технологій зміцнення.

Предмет дослідження: процеси термомеханічного зміцнення робочої поверхні гільзи гідроциліндра, що впливають на їх довговічність, надійність та ремонтопридатність.

© Ляшенко С. В., Келемеш А. О., Бурлака О. А., Лавренко В. В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Методи досліджень. Дослідження базувалися на використанні методів фізичного та математичного моделювання реального вузла тертя, а також методів математичної статистики при обробці та аналізі експериментальних даних, отриманих під час проведення лабораторних випробувань. Для вивчення змін структури та визначення глибини зміцненого шару використані металографічний метод та метод вимірювання твердості.

Адекватність математичної моделі та достовірність результатів досліджень підтверджується задовільною збіжністю даних, отриманих за теоретичних розрахунків, з результатами експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження проведено в лабораторних і виробничих умовах із використанням модельних зразків, методів планування експерименту та математичної статистики.

У результаті досліджень науково обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість удосконалення технології ремонту гільз гідроциліндрів автомобільно-тракторної техніки за рахунок застосування термомеханічного зміцнення їх робочої поверхні, що виготовляються із вуглецевих сталей, термомеханічним зміцненням робочої поверхні (порівняно з промисловим зразками).

Ключові слова: *техніко-експлуатаційні характеристики, гільза гідроциліндра, термомеханічне зміцнення, технологія, відновлення, автомобільно-тракторної техніки.*

S. V. LIASHENKO
PhD, Associate Professor,
Head of the Department of Agricultural Engineering
and Automobile Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-3227-3738

A. O. KELEMESH
PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Agricultural Engineering
and Automobile Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0001-9429-8570

O. A. BURLAKA
PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Agricultural Engineering
and Automobile Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-2296-7234

V. V. LAVRENKO
Senior Lecturer at the Department of Agricultural Engineering
and Automobile Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0001-6145-9224

IMPROVEMENT OF THE TECHNICAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF HYDRAULIC CYLINDER LINERS OF AUTOMOTIVE AND TRACTOR MACHINERY BY APPLYING THERMOMECHANICAL STRENGTHENING TO ENHANCE THEIR RESTORATION TECHNOLOGY

Based on engineering methods, the technical and operational characteristics of hydraulic cylinders of automotive and tractor equipment have been improved by applying a combined technology of thermomechanical hardening of the working surface of the hydraulic cylinder sleeve. The analysis of traditional technologies has allowed us to identify their limitations and substantiate areas of improvement. The proposed process combines heating, deforming mechanical rolling and temperature tempering, for the implementation of which appropriate equipment and tools have been selected. Experimental studies have confirmed the effectiveness of the developed solutions: the deformation temperature (T_{def}), the degree of deformation (λ) and the tempering temperature ($T_{tempering}$) of the surface, the distribution of hardness along the wall thickness, and after running-in – the amount of wear.

The optimal thermomechanical hardening modes should be taken as: deformation temperature 850–880 ºC, deformation degree 14–18 % and tempering temperature 170–240 °C.

The proposed technology, compared to industrial production, provides:

– maintaining hardness at the level of 42–50 HRC with a more than twofold increase in plasticity;

– increasing the depth of the hardened layer by 1,25 times, which allows for repairs to repair dimensions;

– reducing the tension of the surface layer by 4–10 times;

– increasing the stability of mechanical properties, confirmed by reducing the coefficients of variation of hardness by 1,6–1,7 times and plasticity by 1,8–2,3 times.

A comparative analysis showed significant advantages of the new technology, in particular, increasing processing productivity by up to 4 times, reducing tool costs by three times, and reducing the overall cost of the process of restoring hydraulic cylinder liners. It was found that the use of the proposed technology provides hardening of the surface layer to a depth of up to 0,25 mm and achieving a roughness close to the operational one.

The purpose of the research is to increase the durability and reliability of hydraulic cylinder sleeves through the use of thermomechanical hardening, which will contribute to the improvement of the restoration processes of hydraulic systems of automobile and tractor equipment.

Object of research: hydraulic cylinder sleeve of automobile and tractor equipment, which is subject to wear in operating conditions and is subject to restoration using hardening technologies.

Subject of research: processes of thermomechanical hardening of the working surface of the hydraulic cylinder sleeve, which affect their durability, reliability and maintainability.

Research methods. The research was based on the use of methods of physical and mathematical modeling of a real friction unit, as well as methods of mathematical statistics in the processing and analysis of experimental data obtained during laboratory tests. To study changes in the structure and determine the depth of the hardened layer, the metallographic method and the hardness measurement method were used.

The adequacy of the mathematical model and the reliability of the research results are confirmed by the satisfactory convergence of the data obtained by theoretical calculations with the results of experimental studies.

Experimental studies were conducted in laboratory and production conditions using model samples, experimental planning methods and mathematical statistics.

As a result of the research, the possibility of improving the repair technology of hydraulic cylinder sleeves of automobile and tractor equipment through the use of thermomechanical strengthening of their working surface, made of carbon steels, by thermomechanical strengthening of the working surface (compared to industrial samples) was scientifically substantiated and experimentally confirmed.

Key words: *technical and operational characteristics, hydraulic cylinder sleeve, thermomechanical strengthening, technology, restoration, automobile and tractor equipment.*

Постановка проблеми

На сьогоднішній день реальний ресурс експлуатованих та відремонтованих гідроциліндрів автомобільно-тракторної техніки, є нижчим від встановленого чинним ДСТУ 3315-96 та ДСТУ 3317-96 на 30 %. Однією з причин цього є те, що існуючі способи ремонту гільз гідроциліндрів та відновлення їхньої робочої поверхні не забезпечують виконання всіх вимог, які висуваються до цієї деталі. Крім того, досвід ремонтного виробництва показує, що у переважній більшості випадків під час надходження гідроциліндра на капітальний ремонт гільзи гідроциліндрів вибраковуються через зношення робочої поверхні, що становить не більше 1 % від початкової маси деталі. При цьому ремонтопридатність зазначених деталей є досить низькою, а спосіб їх відновлення до ремонтного розміру або конструктивно не передбачений, або ж у багатьох випадках є недоцільним як з експлуатаційної, так і з економічної точки зору.

Відомо, що будь-який технологічний процес ремонту чи відновлення деталі (агрегату) передбачає не лише відновлення порушених у процесі експлуатації параметрів, а й, головним чином, стримування тих руйнівних процесів, які закономірно відбуваються у вузлах та його елементах [1]. Тому за сучасних умов, за наявності достатньої кількості способів відновлення деталей, актуальним завданням є пошук нових ефективних технологій зміцнення гільз гідроциліндрів. Таким технологічним процесом, на нашу думку, є поєднання в єдиному технологічному циклі термічного та механічного зміцнювального впливу на робочу поверхню стальних гільз циліндрів, тобто застосування високотемпературного термомеханічного зміцнення.

Таким чином, актуальність теми зумовлена, з одного боку, необхідністю впровадження нових технологій ремонту, що дають змогу підвищити ресурс і ремонтопридатність деталей автомобільно-тракторної техніки та ймовірною практичною значущістю переваг термомеханічного зміцнення робочої поверхні гільз гідроциліндрів, а з іншого боку – недостатнім обсягом науково-технічної інформації щодо впливу цього виду зміцнення на ефективність ремонтних процесів для деталей, виготовлених із вуглецевих сталей.

Наявність такої інформації дає змогу науково обґрунтувати параметри термомеханічного зміцнення гільз гідравлічних циліндрів автомобільно-тракторної техніки.

Крім того, наші дослідження можливо інтегрувати в загальну стратегію гармонійного розвитку сільського господарства в Україні, що направлена на модернізацію аграрного сектору: розвиток переробки, інновації, цифровізація та обмін знаннями [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз результатів досліджень показав, що поверхневе пластичне деформування (ППД) є одним із найбільш ефективних методів підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей в умовах граничного тертя [3]. Даний метод ґрунтується на використанні пластичних властивостей матеріалу та забезпечує усунення мікродефектів,

підвищення твердості, зносо- й корозійної стійкості, а також втомної міцності поверхні. Експериментальні дослідження показали, що застосування ППД знижує інтенсивність зношування у 1,5–2 рази, а мікротвердість поверхневого шару зростає на 18–27 % при товщині зміцненого шару 0,05–0,5 мм.

Важливою перевагою є можливість використання ППД як заключної технологічної операції як у серійному виробництві, так і в умовах ремонту. Разом з тим, ефективність процесу значною мірою залежить від точності попередньої обробки заготовки та параметрів інструмента, що деформує.

На нашу думку, можливо удосконалити технологію ремонту застосувавши термомеханічне зміцнення робочої поверхні гільз гідроциліндрів із вуглецевих сталей з метою підвищення ресурсу та покращення техніко-експлуатаційних характеристик. Встановлено, що визначальними технологічними параметрами цього процесу є температура деформації ($T_{деф}$), ступінь деформації (λ) та температура відпуску ($T_{відп}$), які істотно впливають на механічні й експлуатаційні властивості деталей.

Під час експлуатації гідроциліндрів робоча поверхня гільз піддається впливу робочої рідини та сил тертя поршня, що спричиняє гідроабразивне та абразивне зношення унаслідок неякісного очищення оливи або руйнування матеріалу гільзи, поршня та манжет. Деформації штока можуть призводити до зміщення поршня, неспіввісності та руйнування робочої поверхні, що зумовлює порушення герметичності та зниження працездатності гідроциліндра. Збільшення об'єму робочої порожнини гідроциліндра підвищує витрату оливи та знижує ККД [4]. Експлуатація гідроциліндрів під великими навантаженнями призводить до зміни геометричних розмірів корпусу, що зумовлює втрату герметичності ущільнень та зниження працездатності. Основними дефектами є зношення внутрішнього отвору гільзи, поверхонь штока і поршня, задири та риски (рис. 1), а також пошкодження різьбових з'єднань.

Дрібні дефекти усувають притиранням, значне зношення – механічною обробкою з подальшим хонінгуванням або шліфуванням.

Ремонт гідроциліндрів поділяють на поточний (заміна ущільнень, перевірка штока та гільзи, хромування штока) та капітальний (заміна гумово-технічних виробів, ремонт або заміна штока, хонінгування гільзи, ремонт поршня, направляючої та кріплень, заміна гільзи). Після ремонту обов'язковим є стендові випробування для контролю герметичності та працездатності пар тертя.

Рис. 1. Фото гідроабразивного та абразивного зношування внутрішньої поверхні гільзи гідроциліндра

Дослідження [5] показали, що зміцнення гільз гідроциліндрів методом ППД із нанесенням антифрикційного покриття є більш ефективним, ніж фосфатування, направлене хонінгування або алмазне вібровигладжування. Обробка гільз цим методом підвищує ресурс деталей у 1,9–2,6 рази, прискорює припрацювання пари «гільза – поршень» до 2 разів, знижує коефіцієнт тертя до 30 % та підвищує зносостійкість робочої поверхні у 1,8–5,0 разів.

Суттєвим недоліком цього методу є мала товщина антифрикційного шару (до 5 мкм), що в умовах абразивного зношування виявляється недостатньою і, як наслідок, може спричинити інші види зносу, знижуючи ресурс гільзи.

Дослідження [6] показали, що для більшості гільз гідроциліндрів застосовують загартування вуглецевих сталей високочастотними струмами (СВЧ), що дозволяє отримати мартенситну структуру робочої поверхні та підвищити її твердість до 40–50 HRC. Глибина загартованого шару становить 1,0–1,8 мм, що забезпечує можливість перешліфовки гільз гідроциліндрів під ремонтні розміри та підвищує ресурс деталей. Однак для більшості гільз гідроциліндрів ремонт із застосовуванням загартування вуглецевих сталей високочастотними струмами не передбачений, що зумовлює низьку ремонтопридатність. Загартування СВЧ може спричиняти короблення, утворення тріщин та неоднорідність структури, тому для кожного хімічного складу вуглецевих сталей підбирають оптимальні режими нагріву та охолодження.

Методи зміцнення та відновлення робочої поверхні гільз гідроциліндрів, як традиційні, так і альтернативні, покликані усувати дефекти, що виникають під час експлуатації, і, залежно від призначення та хімічного складу матеріалу, забезпечувати деталям властивості, які гарантують необхідний ресурс їх роботи. Проте, згідно з даними джерел [7], фактичний ресурс гідроциліндрів до капітального ремонту (включаючи застосування цих методів зміцнення та ремонту) у реальних умовах експлуатації значно поступається нормативним показникам. Тому розробка нових технологій зміцнення робочої поверхні гільзи гідроциліндра, спрямованих на підвищення їх ремонтопридатності, є об'єктивно необхідною і визначає актуальність даної теми.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є підвищення довговічності та надійності гільз гідроциліндрів за рахунок застосування термомеханічного зміцнення, що сприятиме вдосконаленню процесів відновлення гідравлічних систем автомобільно-тракторної техніки.

Завдання досліджень:

– провести аналіз науково-технічної літератури щодо оцінки ресурсу гільз гідроциліндрів, методів їх зміцнення та відновлення робочої поверхні;

– обґрунтувати можливість підвищення якості гільз гідроциліндрів із вуглецевих сталей шляхом термомеханічного зміцнення та визначити найбільш значущі технологічні фактори, що впливають на механічні й експлуатаційні характеристики деталей;

– проаналізувати зміни механічних властивостей (твердості та пластичності) поверхневого шару матеріалу після зміцнення та оцінити вплив оптимальних технологічних параметрів і властивостей зміцненої робочої поверхні на ресурс і ремонтопридатність гільзи гідроциліндра.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для проведення експерименту була використана частина технологічного процесу, що застосовується при виготовленні кілець кулькових підшипників [8]. Відповідно до експериментальної частини цієї роботи було задіяно наступне технологічне обладнання:

1) прямоточна газова піч – для нагрівання гільз гідроциліндрів до температури деформації;
2) вертикально-розточувальний верстат 2Е78П (рис. 2, *а*);
3) пристосування для центрування гільз гідроциліндрів на станині верстату (рис. 2, *б*);
4) пірометр – для визначення температури гільз гідроциліндрів у процесі нагрівання та перед деформуванням (точність вимірювання приладу ±10 °С);
5) ванна для гартування з водою та спеціальні захвати для гартування гільз гідроциліндрів;
6) муфельна лабораторна піч МП-2У – для відпуску гільз гідроциліндрів.

а б

Рис. 2. Технологічне обладнання: а) вертикально-розточувальний верстат 2Е78П; б) пристосування для центрування гільз гідроциліндрів на станині верстату

У якості дослідних зразків використовували заготовки у вигляді напівкілець вирізаних із гільзи гідроциліндра до і після проведення технологічного процесу термомеханічного зміцнення по внутрішньому діаметру.

Розміри заготовок були обумовлені технологічним оснащенням машини тертя МІ–1М (машина Амслера), що застосовується. Крім того, попередньо було проведено незначне переналагодження робочих органів та органів управління МІ–1М (машина Амслера) стосовно умов експерименту (відрегульовано органи управління для можливості створення зусилля деформації 4–7 кН).

Гільзу, що підлягала відновленню спочатку проточували під ремонтний розмір а перед деформуванням нагрівали протягом 8–10 хв у прямоточній газовій печі до інтервалу температур, зазначеного в табл. 1. Температура реєструвалася пірометром.

Рис. 3. Заготовки вирізані із стандартних гільз гідроциліндрів і розточених на ремонтний розмір (зразки справа) та вирізані із гільз гідроциліндрів відновлених за технологією термомеханічного зміцнення (зразки зліва)

Таблиця 1

Умови проведення експериментального термомеханічного зміцнення

Режимні параметри	Центральний композиційно ортогональний план (ЦКОП) другого порядку				
	рівні			Зіркові крапки	
	нижній	нульовий	верхній	–*d*	+*d*
Температура нагрівання, ºС	850–860	890–900	930–940	835–845	945–955
Температура деформації, ºС	830	870	910	815	925
Температура відпуску, ºС	50 (без відпуску)	200	350	без відпуску	400
Ступінь деформації, %	9	15	21	7	23

Інтервал часу між нагріванням у печі та деформацією з використанням вертикально-розточувального верстату 2Е78П, із встановленням на нього спеціальної головки із кульковим деформатором, становив 4–7 с (час, необхідний для витягування гільзи гідроциліндра з печі, установки її у пристосування для центрування гільз гідроциліндрів на станині верстату (рис. 2, *б*) та приведення в рух робочих органів верстату 2Е78П).

Температура гільзи гідроциліндра при деформуванні відповідала температурам, заданим умовами повного факторного експерименту і центрального ортогонального композиційного плану (ЦКОП) другого порядку (табл. 1). Зусилля деформації становило 5–6 кН.

Після цього гільза гідроциліндра гартувалася у воді. Інтервал часу між деформуванням гільзи гідроциліндра та переміщенням її у гартувальну ванну становив 5–10 с, що було необхідно для швидкого фіксування деформованого стану аустеніту та максимального переходу його в мартенсит, а також виключення можливості початку та (або) розвитку рекристалізаційних процесів.

З метою зменшення залишкових напружень після загартування та визначення оптимальних властивостей спеціальних вуглецевих сталей для гільзи циліндрів при використанні термомеханічного зміцнення, з гільзою протягом 60 хв проводили низькотемпературний відпуск у муфельній печі МП-2У. Температури відпуску наведено у табл. 1.

До необхідної чистоти внутрішньої поверхні гільзи гідроциліндрів доводилися за допомогою чистового шліфування (на внутрішньо шліфувальному верстаті) та хонінгування на промислових режимах. Шліфування було технологічно необхідне для надання необхідного розміру внутрішньої робочої поверхні (поверхні гільзи гідроциліндра які досліджуються та випробовуються).

В результаті експериментального термомеханічного зміцнення матеріалу за вище вказаною технологією вдалося забезпечити цілісність циліндричних гільз гідроциліндрів та їх геометричну форму.

Ступінь деформації гільз гідроциліндрів оцінювалася за величиною зміни внутрішнього діаметра:

$$\lambda = \frac{d_к - d_н}{d_н} \cdot 100\ \%, \qquad (1)$$

де $d_н$ – значення внутрішнього діаметра гільзи гідроциліндра до деформації, мм; $d_к$ – значення внутрішнього діаметра гільзи гідроциліндра після деформації, мм, мм.

Потім зі зміцнених циліндричних деталей на фрезерному верстаті вирізалися колодочки за розмірами, необхідними для установки на машину тертя.

Дослідження зносостійкості зміцненої поверхні виконували відповідно до вимог ДСТУ 2823–94. Документ регламентує оцінювання зносостійкості відновлених деталей рухомих спряжень шляхом випробувань зразків матеріалів і покриттів на спеціальних установках [9].

Отримані результати належать до порівняльних експрес-випробувань, що передбачають визначення співвідношення величини зношування відновленої та еталонної поверхонь за однакових умов, наближених до реальних, з використанням абразивно-масляної суспензії.

Експерименти проводилися у варіанті випробування відновленої поверхні за уніфікованими конструктивними параметрами та кінематичними характеристиками відповідно до нормативних документів і паспорта машини тертя.

Методика дослідження механічних якостей відновленої внутрішньої поверхні гільзи гідроциліндра методом термомеханічного зміцнення.

Для проведення дослідження використовувались наступні прилади:

1) прилад для вимірювання твердості HRC по Роквелу по ДСТУ 3870-99 моделі ТК-2М (рис. 4);
2) наконечник алмазний виду НК по ДСТУ 9378-93.

Встановлено, що характер розподілу об’єму матеріалу в зоні напливу визначається його механічними властивостями, насамперед здатністю деформуватися без руйнування. Метод базується на припущенні, що досліджуване середовище є ізотропним пружно-пластичним тілом, а зона пластичної деформації навколо відбитку індентора пропорційна показнику пластичності.

Рис. 4. Прилад для вимірювання твердості HRC по Роквелу

Співвідношення t/d (глибина відбитку до його діаметра) розглядається як характеристика пластичності, чутлива до змін структури матеріалу (див. рис. 5).

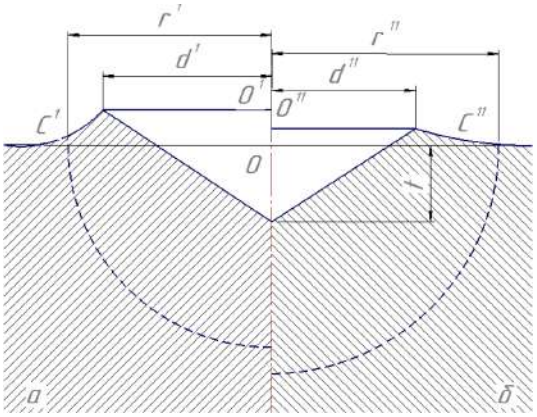

Рис. 5. Розповсюдження деформації і профіль відбитка при втисненні конічного індентора в метал з низькою (*а*) і високою (*б*) пластичністю

Особливістю підходу є визначення пластичності на основі двох незалежних параметрів (t і d), що знижує вплив твердості матеріалу та підвищує точність результатів. Це співвідношення може слугувати допоміжним інструментом для вивчення структурних змін у сплавах після термічної та термомеханічної обробки.

Параметр t/d є характеристикою, чутливою до змін у структурі сплаву, і може використовуватися як допоміжний інструмент для вивчення структурних перетворень, що відбуваються у сплавах під впливом термічної та термомеханічної обробок.

Як характеристику пластичності нами прийнято відносне подовження п'ятикратного розривного зразка, що відповідає моменту завершення деформування при максимальному зусиллі розтягу і визначається за формулою:

$$\delta_в = \frac{l_в - l_o}{l_o} \cdot 100\,\%, \tag{2}$$

де: $\delta_в$ – відносне подовження, що відповідає закінченню деформування зразка при максимальному зусиллі розтягу $P_{мах}$, %; $l_в$ – довжина розрахункової частини розривного зразка після завершення деформування при максимальному зусиллі розтягу, мм; l_o – початкова розрахункова довжина зразка до навантаження, мм.

Методика дослідження зносостійкості зміцненої поверхні. Для досліджень застосовували:

1. Машину тертя МІ–1М (Амслера). З метою випробування зразків і контрзразків нестандартних геометричних розмірів установка була модернізована: окремі вузли підняли над базовою плитою на різну висоту (рис. 6). При цьому всі експлуатаційні параметри машини та вимоги до проведення випробувань залишалися відповідними нормативам.

Рис. 6. Машина тертя МІ – 1М (машина Амслера)

2. Аналітичні ваги типу АДВ-200М (2 кл), що дозволяють зважувати з похибкою не більше 0,0001 г (рис. 7).

Рис. 7. Аналітичні ваги типу АДВ-200М

3. Зразки і контрзразки, виготовлені відповідно до креслень, приведених на рис. 3. Контрзразки виготовлені за єдиною технологією з однієї заготівки. Матеріал контрзразків – сталь 45 по ДСТУ 7809:2015, термооброблена до твердості 45–50 HRC.

4. Змащувальний матеріал – МГЕ-46В ДСТУ МГЕ-46В ISO VG – мінеральна гідравлічна олива для високонавантажених систем. Абразивний матеріал – продукти зношування матеріалу зразка.

5. Промивальні рідини – бензин (ДСТУ 7687:2015) і ацетон (ДСТУ 7259:2012).

Схема випробувань на зносостійкість приведена на рис. 8.

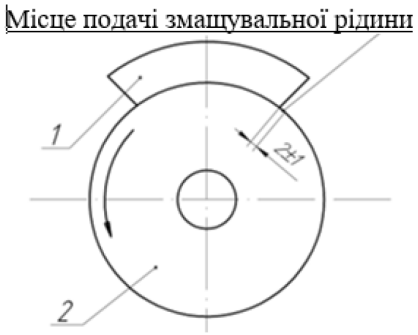

Рис. 8. Схема випробувань: 1 – зразок; 2 – контрзразок

Алгоритм проведення випробувань зносостійкості.

1. Встановлення зразка та контрзразка відповідно до схеми (рис. 8).
2. Постійна подача змащувальної рідини МГЕ-46В на контрзразок.
3. Приведення контрзразка в обертання; припрацювання поверхонь на шляху тертя 12–15 м до встановлення основного навантаження.
4. Навантаження зразка за допомогою системи МІ-1М відповідно 4–7 кН; проведення випробувань на шляху тертя 320 м (чотири періоди).
5. Визначення концентрації абразиву за величиною зношування протягом одного періоду.
6. Фіксація тривалості періоду електронним секундоміром.
7. Після кожного періоду: розвантаження системи, зняття зразків, промивання у спеціальних рідинах.
8. Огляд контрзразка (візуальний та за допомогою штангенциркуля) і зважування досліджуваного зразка.
9. Визначення загальної втрати маси (Δg) та середнього арифметичного значення втрати маси за період випробувань (Δg_{cp}).

В результаті дослідження механічних властивостей поверхневого шару вуглецевих сталей, підданих термомеханічному зміцненню, та обробки експериментальних даних згідно з методиками, були отримані такі значення твердості та параметра пластичності (див. діаграму на рис. 9).

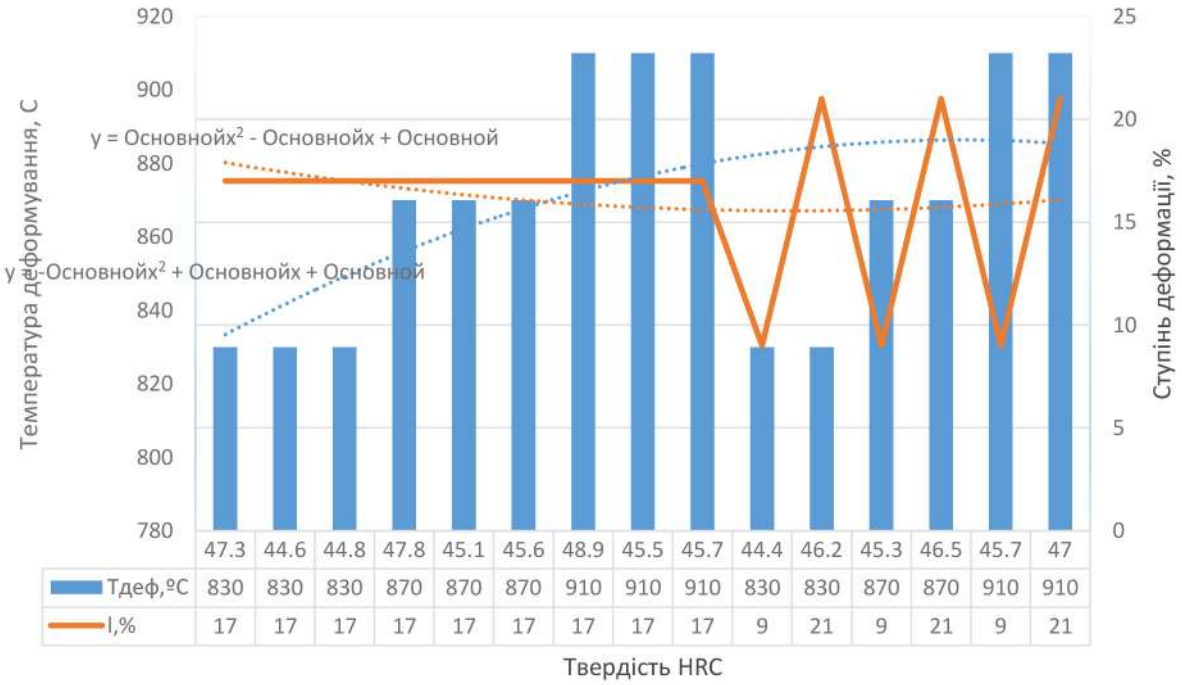

Рис. 9. Діаграма залежності твердості термомеханічно зміцненої внутрішньої поверхні гільзи гідроциліндра від температури деформації та ступеня деформації

Результати досліджень механічних властивостей поверхневого шару гільзи гідроциліндра виготовленої із вуглецевої сталі, підданої термомеханічному зміцненню, свідчать, що оптимальна твердість поверхні зразків (див. рис. 9 перетин ліній тренду) за температури 860–870 °С, та ступеню деформації в межах 16–18 % становить 45,6–46,5 HRC. Цей діапазон відповідає технічним умовам на виготовлення гільз гідроциліндрів, де нормативне значення твердості поверхневого шару становить 45 ± 3 HRC.

При порівнянні різних варіантів температур нагрівання термомеханічного зміцнення встановлено, що при приблизно однаковій твердості, яка знаходиться в межах одного порядку (45,6–46,5 HRC), спостерігається суттєве підвищення параметра пластичності. Так, значення параметра пластичності *t*/*d* для термомеханічно зміцнених зразків досягає 0,28–0,36, що у 2,0–3,6 рази перевищує показники зразків промислових гільз гідроциліндрів, де t/d становить 0,10–0,14.

Таке підвищення пластичності є наслідком оптимізації мікроструктури поверхневого шару при термомеханічному зміцненні. Процес включає попереднє нагрівання до температури 860–870 °С, наступне формування напливу та швидке охолодження у воді або маслі з швидкістю 50–100 °С/с, що забезпечує формування дрібнозернистої структури мартенситу з рівномірним розподілом вторинного цементиту. Внаслідок цього досягається поєднання високої твердості поверхні та підвищеної пластичності, що забезпечує збільшення зносостійкості та довговічності гільз гідроциліндрів у реальних експлуатаційних умовах.

Розрахункові значення загальної втрати маси $\sum\Delta g$ (г) були отримані з використанням інтегрованого пакета математичного моделювання MATLAB (версія 6.0) [10]. Масиви даних, отримані в результаті розрахунків, надали можливість проаналізувати значення загальної втрати маси зразків $\sum\Delta g$ за всіх можливих поєднань технологічних параметрів термомеханічного зміцнення та випробувальних навантажень. Це дозволило використати розрахункові дані для побудови необхідних графічних залежностей див. рис. 10.

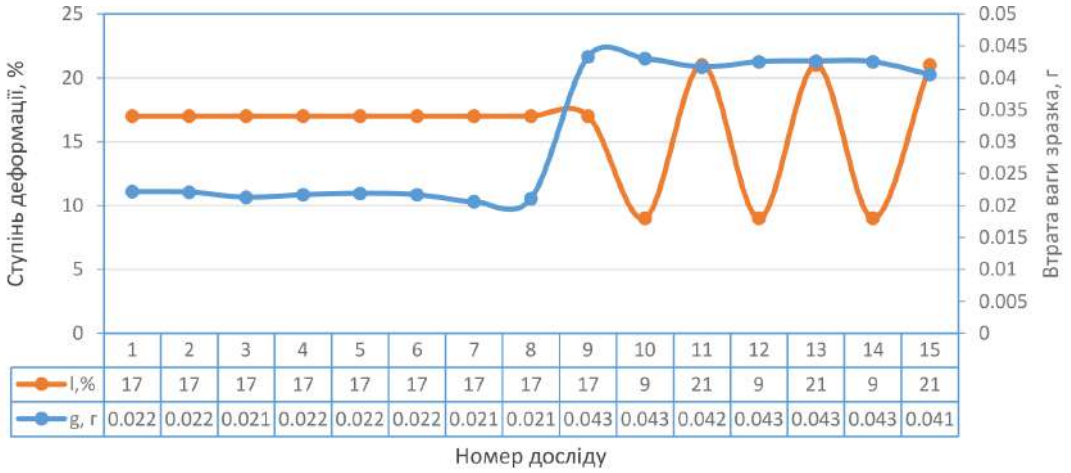

Рис. 10. Графіки зміни загальної втрати маси термомеханічно зміцненої внутрішньої поверхні гільзи гідроциліндра та ступеня деформації

Аналіз графіків (рис. 10) свідчить, що за однакових випробувальних навантажень найбільші значення загальної втрати маси $\sum\Delta g$ спостерігаються у зразків із промислових гільз, заводського виготовлення. Мінімальні значення $\sum\Delta g$ відповідають режиму термомеханічного зміцнення: температура деформації $T_{деф}$ = 870 ºС (рис. 10), ступінь деформації λ = 17 % (рис. 10), за температури відпуску $T_{відп}$ = 200 °С.

Слід відзначити, що мінімальні втрати маси $\sum\Delta g$ спостерігаються майже за всіх режимів термомеханічного зміцнення, які відповідають навантаженню *Рмі* = 450 Н (що в реальних умовах експлуатації відповідає тиску поршня на дзеркало гільзи гідроциліндра приблизно 1,0–1,5 МПа). Для зразків із промислових гільз гідроциліндрів максимальна зносостійкість спостерігається за випробувального навантаження *Рмі* = 500Н (≈1,2–1,8 МПа). Проте навіть за цієї величини навантаження на внутрішню поверхню гільзи гідроциліндра зміцненої за технологією термомеханічного зміцнення витримує вищі на 12–22 %.

Беручи до уваги дані графіків (рис. 10), що значення загальної втрати маси $\sum\Delta g$ = 0,021 г для зразків із гільз зміцнених термомеханічно були отримані експериментально на машині тертя та враховуючи значення ступеня деформації λ = 17 % (див рис. 10 точка перетину графіків), при випробувальному навантаженні *Рмі* = 450 Н встановлено, що вище згадані параметри режиму термомеханічного зміцнення відповідають температурі деформації $T_{деф}$ = 870 °С, за температури відпуску $T_{відп}$ = 200 °С.

Таким чином, запропонована технологія відновлення дозволяє удосконалювати технологічний процес покращення техніко-експлуатаційних характеристик гільз гідроциліндрів автомобільно-тракторної техніки шляхом термомеханічного зміцненням робочої поверхні (порівняно з промисловим зразками):

– поліпшити ремонтопридатність деталі за рахунок збільшення глибини зміцненого шару матеріалу до 2,5 мм, що дозволить використовувати відновлення гільз гідроциліндрів методом ремонтних розмірів;

– збільшити зносостійкість внутрішньої поверхні гільзи гідроциліндра на 18–22 %.

Запропонована технологія пройшла експериментальне лабораторне апробування та дозволить отримати річний економічний ефект від підвищення ресурсу та ремонтопридатності гільз гідроциліндрів при їх термомеханічному зміцненні порівняно з промисловим варіантом технології виготовлення.

Отримані результати науково обґрунтовані, статистично значущі, рекомендуються як базові дані при розробці та впровадженні технологій зміцнення в умовах сільськогосподарського виробництва. Крім того, за рахунок підвищення ремонтопридатності та середнього ресурсу гільз гідроциліндрів, реальним є зменшення витрати запасних частин, що дозволить знизити сумарні витрати на проведення їх відновлення та зменшити високий рівень попиту на запасні частини.

Висновки

Науково обґрунтовано та експериментально підтверджено доцільність удосконалення технології ремонту гільз гідроциліндрів автомобільно-тракторної техніки шляхом термомеханічного зміцнення робочої поверхні гільз із вуглецевих сталей, що підвищує їх ресурс та ремонтопридатність. Визначено ключові технологічні параметри процесу: температуру деформації, ступінь деформації та температуру відпустки.

Оптимальними режимами термомеханічного зміцнення встановлено: температуру деформації 850–880 ºС, ступінь деформації 14–18 % та температуру відпуску 170–240 °С.

Запропонована технологія порівняно з промисловим виробництвом забезпечує:

– збереження твердості на рівні 42–50 HRC при більш ніж дворазовому підвищенні пластичності;

– збільшення глибини зміцненого шару в 1,25 рази, що дозволяє проводити ремонт за ремонтними розмірами;

– зниження напруженості поверхневого шару у 4–10 разів;

– підвищення стабільності механічних властивостей, підтверджене зменшенням коефіцієнтів варіації твердості у 1,6–1,7 рази та пластичності – у 1,8–2,3 рази.

Список використаної літератури

1. Автухов А. К., Мартиненко О. Д., Тіхонов О. В., Бантковський В. А. Сервісна інженерія. Технічний сервіс в АПВ та ремонт машин [Електронний ресурс] : курс лекцій. Харків : ДБТУ, 2022. 135 с. – URL: https://www.scribd.com/document/834898753/Servisna-inzheneriya-22 (дата звернення 15.09.2025).

2. Про схвалення Стратегії розвитку сільського господарства та сільських територій в Україні на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025–2027 роках : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.11.2024 № 1163-р. *Офіційний вісник України*. 2024 р. № 108, стаття 6884, код акта 128839/2024.

3. Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V. A., Beygelzimer Y., Blank V. D., Botta W. J., Zhu X. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances. *Materials Research Letters*. 2022. 10(4). P. 163–256. https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2029779

4. Kumar P., Park S., Zhang Y. A review of hydraulic cylinder faults, diagnostics, and prognostics. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2024. Vol. 11. P. 1637–1661. https://doi.org/10.1007/s40684-024-00639-3

5. Радик Д. Л., Купецький О.В. Технологічні аспекти динамічних методів поверхнево-пластичного деформування. Актуальні задачі сучасних технологій : матеріали XII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Тернопіль, 6–7 груд. 2023 р. Тернопіль, 2023. С. 58–59.

6. Devoino O. G., Vegera I. I., Zaleski V. G. About the Efficiency of Using Modern Technologies for the Formation of Hardened Coatings from Self-Fluxing Alloys in Combination of Gas Thermal Spraying and High-Frequency Current Melting. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2025. Vol. 61. P. 427–440. https://doi.org/10.3103/S1068375525700401

7. Shanbhag V. V., Meyer T. J. J., Caspers L. W., Schlanbusch R. Failure Monitoring and Predictive Maintenance of Hydraulic Cylinder – State-of-the-Art Review. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2021. Vol. 26, no. 6. P. 3087–3103. https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3053173

8. Wang H., Zhou Z. Research on the manufacturing of deep-groove ball bearing inner rings via the cold rolling of tube material. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 130. P. 739–753. https://doi.org/10.1007/s00170-023-12760-9

9. Savulyak V. I., Shylina O. P. Methods and means of researching the composition, structure and properties of materials. Educational manual : [Electronic resource]. Vinnytsia : VNTU, 2025. 64 p. – URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2025/Savulyak_2025_64.pdf (дата звернення 15.09.2025).

10. Півторак Д. О., Лазарєв Ю. Ф., Лакоза С. Л. Комп'ютерне моделювання процесів і систем. Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 207 с. – URL: https://ela.kpi.ua/bitstreams/34a6e9ea-face-4e38-9e73-d98a367b302f/download (дата звернення 15.09.2025).

References

1. Avtukhov, A., Martynenko, O., Tikhonov, O., Bantkovsky, V. (2022). Service engineering. Technical service in automatic transmission and machine repair [Electronic resource]: course of lectures. Kharkiv : DBTU, 135. – URL: https://www.scribd.com/document/834898753/Servisna-inzheneriya-22 (access date 15.09.2025).

2. On approval of the Strategy for the Development of Agriculture and Rural Areas in Ukraine for the period until 2030 and approval of the operational plan of measures for its implementation in 2025-2027. (2024) (Ukraine). Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 15.11.2024, No. 1163-r. *Official Gazette of Ukraine*. No. 108, article 6884, act code 128839/2024.

3. Edalati, K., Bachmaier, A., Beloshenko, V., Beygelzimer, Y., Blank, V., Botta, W., Zhu, X. (2022). Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances. *Materials Research Letters*. 10(4), 163–256. https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2029779

4. Kumar, P., Park, S., Zhang, Y. (2024). A review of hydraulic cylinder faults, diagnostics, and prognostics. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. Vol. 11, 1637–1661. https://doi.org/10.1007/s40684-024-00639-3

5. Radik, D., Kupetsky, O. (2023). Technological aspects of dynamic methods of surface-plastic deformation. Actual Problems of Modern Technologies: materials of the XII International Scientific and Practical Conference, Ternopil, December 6–7, 2023. Ternopil, 58–59.

6. Devoino, O., Vegera, I., Zaleski, V. (2025). About the Efficiency of Using Modern Technologies for the Formation of Hardened Coatings from Self-Fluxing Alloys in Combination of Gas Thermal Spraying and High-Frequency Current Melting. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. Vol. 61, 427–440. https://doi.org/10.3103/S1068375525700401

7. Shanbhag, V., Meyer, T., Caspers, L., Schlanbusch, R. (2021). Failure Monitoring and Predictive Maintenance of Hydraulic Cylinder – State-of-the-Art Review. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. Vol. 26, no. 6, 3087–3103. https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3053173

8. Wang, H., Zhou, Z. (2024). Research on the manufacturing of deep-groove ball bearing inner rings via the cold rolling of tube material. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 130, 739–753. https://doi.org/10.1007/s00170-023-12760-9

9. Savulyak, V., Shylina, O. (2025). Methods and means of researching the composition, structure and properties of materials. Educational manual: [Electronic resource]. Vinnytsia : VNTU, 64. – URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2025/Savulyak_2025_64.pdf (access date 15.09.2025).

10. Pivtorak, D., Lazarev, Yu., Lakoza, S. (2021). Computer modeling of processes and systems. Workshop [Electronic resource]: training manual. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 207. – URL: https://ela.kpi.ua/bitstreams/34a6e9ea-face-4e38-9e73-d98a367b302f/download (access date 15.09.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025