

УДК 378:614:355.02(477)
DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.3\(501\).10](https://doi.org/10.15589/znп2025.3(501).10)

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR THE RESTORATION OF AGRICULTURAL MACHINERY PARTS MADE OF HARD-ALLOY STEELS

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ ІЗ ТВЕРДОСПЛАВНИХ СТАЛЕЙ

Mykola V. Rohanin
dyzaynkonstruktor@gmail.com
ORCID: 0009-0002-9230-9015

Oleksandr O. Honcharenko
alex-goncharenko@i.ua
ORCID: 0000-0002-4325-2705

М. В. Роганін,
аспірант
О. О. Гончаренко,
канд. техн. наук, доцент

Poltava State Agrarian University, Poltava

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава

Abstract. The relevance of this study is determined by the need to improve the reliability and durability of the machine and tractor fleet in agricultural production, where significant economic losses are caused by the intensive wear of parts made of hard-alloy steels. Traditional repair approaches do not restore the initial operational properties of the material, which justifies the need to apply advanced technologies with predictable strength and wear-resistance characteristics. The *aim of the study* is to provide scientific justification and develop technological solutions that ensure effective restoration and extended service life of agricultural machinery parts made of hard-alloy steels, taking into account operating conditions and durability requirements.

The *research methodology* is based on analytical generalization, comparative analysis, and a systematic approach. Structural analysis methods were used to evaluate the properties of hard-alloy steels, elements of functional-cost analysis were applied to assess the feasibility of technological solutions, and methods of induction and deduction were employed to form generalized conclusions on the effectiveness of modern restoration technologies. Modeling methods were also applied to identify the relationship between material properties and operating conditions.

The *results* of the study revealed that the main factors of wear are the abrasive action of soil particles, dynamic loads, and the impact of agrochemicals and climatic fluctuations. It was found that the properties of hard-alloy steels, such as hardness, heat resistance, susceptibility to brittle fracture, and corrosion, determine the choice of restoration technologies. The study examined the potential of surfacing, plasma and detonation spraying, laser alloying, and chemical-thermal treatment, demonstrating their effectiveness in restoring geometry and extending the service life of parts.

The *scientific novelty* lies in the systematization of factors influencing the wear of hard-alloy steel parts and in proving the significance of combining material properties with technological capabilities. The feasibility of combined application of technologies was substantiated, ensuring increased resistance to abrasive, impact, and corrosive wear. An approach to the selection of technological solutions was developed based on a comprehensive assessment of operating conditions.

The *practical significance* of the study lies in reducing repair and maintenance costs by extending the service life of working components of the machine and tractor fleet. Recommendations are proposed for the rational selection of technologies depending on the nature of loads and the operating environment, which makes it possible to increase the efficiency of the technical service system and ensure the stability of agricultural production.

Key words: abrasive wear; plasma spraying; laser alloying; chemical-thermal treatment; technical maintenance of the machine and tractor fleet; corrosion; durability of parts; restoration of parts.

Анотація. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення надійності та довговічності машинно-тракторного парку в аграрному виробництві, де значні економічні втрати спричинено інтенсивним зношуванням деталей із твердосплавних сталей. Традиційні ремонтні підходи не забезпечують відновлення початкових експлуатаційних властивостей матеріалу, що обґрунтовує потребу в застосуванні сучасних технологій із прогнозованими характеристиками міцності та зносостійкості.

Мета дослідження полягає в науковому обґрунтуванні та розробленні технологічних рішень, здатних забезпечити ефективне відновлення та підвищення ресурсу деталей сільськогосподарської техніки з твердосплавних сталей з урахуванням умов експлуатації та вимог до довговічності.

Методика дослідження ґрунтується на аналітичному узагальненні, порівняльному аналізі та системному підході. Застосовано методи структурного аналізу для оцінювання властивостей твердосплавних сталей, елементи функціонально-вартісного аналізу для визначення доцільності технологічних рішень, а також методи індукції й дедукції для формування узагальнених висновків щодо ефективності сучасних технологій відновлення. У дослідженні застосовано також метод моделювання для виявлення взаємозв'язку між властивостями матеріалу та умовами експлуатації.

Результати дослідження дали змогу встановити, що основними чинниками зношування є абразивна дія ґрунтових частинок, динамічні навантаження, а також вплив агрохімікатів і кліматичних коливань. Виявлено, що властивості твердосплавних сталей – твердість, теплостійкість, схильність до крихкого руйнування та корозії – визначають вибір технологій відновлення. Досліджено можливості застосування наплавлення, плазмового та детонаційного напилення, лазерного легування й хіміко-термічної обробки, що доводить їхню ефективність у відновленні геометрії та підвищенні довговічності деталей.

Наукова новизна полягає в систематизації чинників, що впливають на знос деталей із твердосплавних сталей, та у доведенні значення поєднання властивостей матеріалу з технологічними можливостями. Обґрунтовано доцільність комбінованого застосування технологій, що забезпечує підвищену стійкість до абразивного, ударного та корозійного зношування. Сформовано підхід до вибору технологічних рішень на основі комплексної оцінки експлуатаційних умов.

Практична значущість дослідження полягає в зниженні витрат на ремонт і технічне обслуговування завдяки подовженню строку служби робочих органів машинно-тракторного парку. Запропоновано рекомендації щодо раціонального вибору технологій залежно від характеру навантажень і середовища експлуатації, що дає змогу підвищити ефективність системи технічного сервісу та забезпечити стабільність аграрного виробництва.

Ключові слова: абразивне зношування; плазмове напилення; лазерне легування; хіміко-термічна обробка; технічний сервіс машинно-тракторного парку; корозія; довговічності деталей; відновлення деталей.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проблема відновлення деталей сільськогосподарської техніки з твердосплавних сталей є важливою як у науковому, так і в практичному вимірах. Інтенсивна експлуатація машинно-тракторного парку в умовах абразивного зношування ґрунтовими частинками, дії агрохімікатів та високих механічних навантажень призводить до швидкої втрати працездатності деталей, що зумовлює значні фінансові витрати на їхню заміну та підвищує ризик зупинок у пікові періоди сільськогосподарських робіт. Традиційні ремонтні методи не завжди забезпечують відновлення початкових властивостей матеріалу, тому виникає потреба в застосуванні сучасних технологій, які б гарантували підвищення зносостійкості й подовження строку служби вузлів та агрегатів. Наукове значення проблеми полягає в розробленні нових підходів до відновлення й зміцнення твердосплавних сталей із застосуванням методів наплавлення, напилення, лазерної та хіміко-термічної обробки. Практична цінність полягає в зниженні витрат на технічне обслуговування, забезпеченні стабільної роботи техніки та підвищенні ефективності аграрного виробництва.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз сучасних досліджень щодо розробки технологій відновлення деталей сільськогосподарської техніки з твердосплавних сталей дає змогу виокремити чотири взаємопов'язані напрями. Перший напрям охоплює матеріалознавчі та поверхнево-технологічні засади підвищення зносостійкості. У роботі Ю. Ван

(Y. Wang), Д. Лі (D. Li), К. Ніє (C. Nie) та співавторів систематизовано механізми абразивного зношування основних вузлів агротехніки та окреслено підходи до вибору твердосплавних матеріалів і покриттів [1]. М. Денисенко (M. Denisenko), О. Дев'ятко (O. Deviatko), Р. Яковенко (R. Yakovenko) та Н. Канівець (N. Kanivets) дослідили композитні порошкові матеріали із самогостривальним ефектом, здатні забезпечувати довготривале збереження функціональної здатності робочих органів [2]. А. Ставінський (A. Stavinskiy), Л. Вахоніна (L. Vakhonina), В. Мартиненко (V. Martynenko) та співавтори довели ефективність поверхневого зміцнення робочих органів за допомогою наплавлення й напилення, що значно підвищує стійкість деталей до абразивного середовища [3]. О. Коростін (O. Korostin) у своїй праці показав можливості оптимізації процесів відновлення із застосуванням алгоритмів штучного інтелекту, які дають змогу скоротити витрати ресурсів і підвищити точність ухвалення рішень [4]. Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно зосередити на створенні нових композиційних систем із керованою мікроструктурою та інтеграції цифрових інструментів для прогнозування їхнього ресурсу.

Другий напрям стосується впливу експлуатаційних середовищ на вибір матеріалів та технологій відновлення. М. Павловський (M. Pavlovskiy) показав, що використання біодизельних палив у дизельних двигунах змінює умови роботи деталей та вимагає адаптації матеріалів і методів їхнього відновлення [5]. В. П. де Соуза (V. P. de Souza), В. да Сілва Лабіапарі (W. da Silva Labiapari) та В. Д. Ф. К. Лінс

(V. D. F. C. Lins) підтвердили ефективність корозійно-стійких сталей у вузлах, що зазнають комбінованого корозійно-ерозійного впливу, зокрема в зернопереробному секторі [6]. Б. Арамідє (B. Aramide), С. Пітіяна (S. Pityana), Р. Садіку (R. Sadiku) та співавтори систематизували сучасні методи модифікації поверхні, які дають змогу значно підвищити зносостійкість робочих органів [7]. Й. Тан (Y. Tang), М. Чен (M. Chen), Й. Лін (Y. Lin) та співавтори розробили 3D-методи для оцінки стану сталевих конструкцій, що можуть бути застосовані для діагностики деталей до та після відновлення [8]. Надалі дослідження варто зосередити на вивченні взаємодії нових матеріалів із біопаливними та агресивними середовищами, а також на цифровій діагностиці процесів деградації.

Третій напрям пов'язано з технологіями контролю та організаційно-виробничими аспектами відновлення. К. Маравеас (C. Maraveas) та Т. Бартзанас (T. Bartzanas) дослідили сенсорні системи структурного моніторингу, що сприяють виявленню дефектів та прогнозуванню довговічності конструкцій. Це може бути застосовано й для агромашин [9]. О. Труханська (O. Trukhanska) та О. Остапенко (O. Ostapenko) обґрунтували доцільність централізованої організації ремонтних процесів, що забезпечує ефективність та зниження витрат [10]. Н. Шекхар Саманта (N. Shekhar Samanta), П. П. Дас (P. P. Das), С. Дхара (S. Dhara) та М. К. Пуркаїт (M. K. Purkait) проаналізували можливості повторного використання цінних металів зі шлаків металургії, що відкриває нові шляхи формування матеріалів для відновлювальних технологій [11]. Е. Мортазавіан (E. Mortazavian), З. Ван (Z. Wang) та Х. Тенг (H. Teng) показали приклад відновлення рейкових голівок методом підводного дугового зварювання, який може бути адаптований для агродеталей із високими вимогами до точності та зносостійкості [12]. Подальші дослідження в цьому напрямі варто спрямувати на створення цифрових моделей для моніторингу стану деталей і стандартизацію організаційних підходів до ремонтних центрів.

Четвертий напрям охоплює мікроструктурні, корозійні та логістичні стратегії у відновленні. А. Т. Хоанг (A. T. Hoang), М. Табатабаєї (M. Tabatabaei) та М. Агбашло (M. Aghbashlo) узагальнили дані щодо впливу біодизеля на корозію металів, наголошуючи на необхідності додаткового захисту деталей паливних систем [13]. М. Бембенек (M. Bembenek), П. Присяжнюк (P. Pruszyzhnyuk), Т. Шихаб (T. Shihab) та співавтори довели, що наплавні системи на основі Fe-Mo-B-C створюють високоміцні фази з підвищеною зносостійкістю [14]. Н. Шоу (N. Shaw), Р. С. Барак (R. S. Barak), Р. Е. Кемпбелл (R. E. Campbell) та співавтори підкреслили значення правильної організації постачання ресурсів для успішного функціонування відновних систем, проводячи аналогії з відновленням екосистем [15]. Цей напрям потребує подальших

досліджень для оптимізації зносостійких наплавних систем, розроблення захисних покриттів від корозії в біопаливних середовищах і вдосконалення логістичних механізмів постачання витратних матеріалів.

Попри значні напрацювання у сфері дослідження зношування й відновлення деталей сільськогосподарської техніки, нерозв'язаними залишаються низка аспектів проблеми. Недостатньо досліджено вплив комплексних експлуатаційних чинників на динаміку зношування твердосплавних сталей, обмежено вивчено їхні матеріалознавчі властивості у зв'язку з вибором конкретних технологій відновлення, а також відсутні системні підходи до оцінки ефективності сучасних методів зміцнення в реальних виробничих умовах. Нерозв'язаними залишаються питання інтеграції цих технологій у практику через економічні, організаційні та кадрові виклики, що стримує широке впровадження інновацій у ремонтно-обслуговувальну систему аграрного сектору.

Запропоноване дослідження має на меті заповнити виявлені прогалини через системний аналіз чинників експлуатації, узагальнення властивостей твердосплавних сталей та обґрунтування раціонального вибору технологій відновлення залежно від умов роботи деталей. Застосування аналітичних і моделювальних підходів дає змогу комплексно оцінити ефективність методів наплавлення, напilenня й лазерного легування, а розроблені рекомендації сприятимуть зниженню витрат на ремонт і підвищенню довговічності машинно-тракторного парку.

МЕТА І ЗАВДАННЯ СТАТТІ

Мета статті – науково обґрунтувати та розробити технологічні рішення для ефективного відновлення деталей сільськогосподарської техніки з твердосплавних сталей з урахуванням умов їхньої експлуатації та вимог до довговічності.

Завдання статті:

1. Дослідити умови експлуатації деталей сільськогосподарських машин та властивості твердосплавних сталей, що визначають інтенсивність зношування та вибір технологій відновлення.
2. Проаналізувати сучасні підходи до відновлення деталей та оцінити їхню ефективність на виробництві.
3. Виокремити основні виклики впровадження технологій відновлення та сформулювати рекомендації щодо підвищення ефективності технічного обслуговування й ремонту.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

У дослідженні поєднано аналітичне узагальнення, системний підхід та порівняльний аналіз, що дало змогу комплексно оцінити властивості твердосплавних сталей та ефективність сучасних технологій їхнього відновлення. Застосовано елементи структурного аналізу для оцінки чинників

експлуатаційного зносу, а також моделювання для встановлення взаємозв'язку між матеріалознавчими характеристиками й умовами роботи деталей.

Об'єкт дослідження – процес зношування й відновлення деталей сільськогосподарської техніки з твердосплавних сталей.

Предмет дослідження – закономірності впливу експлуатаційних умов і матеріалознавчих властивостей твердосплавних сталей на вибір і результативність технологій відновлення та зміцнення поверхонь деталей.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Вивчення експлуатаційних умов деталей сільськогосподарських машин є необхідним для розуміння механізмів їхнього зношування та визначення чинників, які найбільше впливають на довговічність. В умовах сучасного аграрного виробництва деталі працюють під дією комплексних навантажень, що поєднують абразивний вплив ґрунтових частинок, динамічні коливання та агресивний вплив агрохімікатів. Особливості ґрунтів, кліматичні чинники, інтенсивність експлуатації та рівень технічного обслуговування істотно змінюють характер зносу, роблять його нерівномірним і складним для прогнозування. Зважаючи на це визначення основних причин втрати працездатності деталей є важливим етапом у розробленні технологій відновлення (табл. 1).

Практичний аналіз чинників дає змогу простежити їхній взаємозв'язок і кумулятивний ефект під час експлуатації сільськогосподарської техніки. Абразивний вплив ґрунтових частинок є найпоширенішою причиною зносу, адже в польових умовах інтенсивність тертя безпосередньо залежить від механічного складу ґрунту: на піщаних ґрунтах лемеші плугів втрачають до 30 % маси вже за один сезон, тоді як на чорноземах цей показник значно нижчий [1]. Водночас динамічні навантаження створюють умови для втомного руйнування матеріалу: типовим прикладом є ламання зубців шестерень у трансмісіях тракторів,

що працюють із навісними агрегатами на нерівному рельєфі.

Важливим чинником є агресивне середовище агрохімікатів: сошники для внесення мінеральних добрив часто втрачають геометрію через поєднання корозії та механічного зносу, що зумовлює необхідність їхнього відновлення або заміни вже після 1–2 сезонів використання. Кліматичні умови також відіграють важливу роль, зокрема під час міжсезонного зберігання техніки: підвищена вологість у поєднанні з відсутністю належного змащування спричиняє корозійне ураження підшипників, що ускладнює запуск машин навесні.

У сучасних умовах господарювання знос деталей сільськогосподарських машин зумовлений комплексною дією зовнішніх і внутрішніх чинників, вплив яких часто посилюється низьким рівнем технічного обслуговування. Наприклад, несвочасна заміна мастильних матеріалів у підшипниках або неправильне регулювання механізмів призводять до різкого скорочення їхнього ресурсу. Усвідомлення впливу цих чинників дає змогу не лише правильно визначати напрями ремонтно-відновлювальних робіт, але й обґрунтувати доцільність застосування тих чи інших технологій, наприклад, вибору між плазмовим напиленням, лазерним легуванням чи традиційним наплавленням, залежно від конкретних умов експлуатації.

Властивості твердосплавних сталей визначають ефективність та доцільність застосування певних технологій відновлення й зміцнення поверхонь деталей сільськогосподарської техніки. Ці матеріали поєднують високу твердість, зносостійкість і здатність витримувати значні механічні навантаження, що робить їх незамінними для виготовлення робочих органів, які безпосередньо контактують із ґрунтом або агрохімікатами. Водночас поєднання високої твердості з відносною крихкістю зумовлює складність обробки та потребує ретельного підбору технологій відновлення. Такі властивості, як теплостійкість, здатність до легування та опір корозії, істотно

Таблиця 1. Основні чинники, що визначають інтенсивність зношування деталей сільськогосподарських машин

Чинник	Характер впливу	Типові наслідки	Приклад прояву на практиці
Абразивний вплив ґрунту	Механічне руйнування поверхні під дією частинок ґрунту та каміння	Утворення борозен, подряпин, локальних вибоїн	Зношування лемешів плугів і культиваторних лап
Механічні навантаження	Динамічні удари, вібрації, змінні навантаження	Втомне руйнування, мікротріщини, викришування поверхні	Зношування зубців шестерень у трансмісії
Агрохімікати та добрива	Корозійний вплив на металеві поверхні	Корозійно-механічний знос, прискорене руйнування	Деградація сошників машин для внесення добрив
Кліматичні умови	Зміни вологості, температури, сезонність робіт	Посилення корозійних процесів, термічне розширення	Зношування підшипників та вузлів у період зберігання
Недостатнє технічне обслуговування	Порушення режимів змащування, несвочасний ремонт	Прискорене спрацювання поверхонь тертя	Вихід з ладу підшипників кочення та ковзання

Джерело: сформовано автором на основі [1; 3, с. 21–25; 5, с. 44–46; 6, с. 5607–5610; 7, с. 85–87].

Таблиця 2. Властивості твердосплавних сталей та їхній вплив на вибір технологій відновлення

Властивість	Характеристика	Вплив на вибір технології	Приклади застосування
Висока твердість (HRC 55–65)	Забезпечує стійкість до абразивного зносу	Потребує застосування зносостійких покриттів або зміцнювальних шарів	Наплавлення робочих поверхонь культиваторних лап
Висока теплостійкість	Здатність зберігати міцність у разі високих температур	Дає змогу застосовувати лазерне легування та плазмове напилення	Зміцнення дисків борін для роботи на важких ґрунтах
Крихкість під час ударних навантажень	Схильність до утворення тріщин і сколів	Вимагає локалізованого зміцнення без надлишкової термічної дії	Локальне лазерне легування різальних кромок
Схильність до корозії	Взаємодія з агрохімікатами та вологим середовищем	Необхідність застосування корозійностійких покриттів	Плазмове напилення на сошниках машин для внесення добрив
Висока зносостійкість після легування	Можливість модифікації структури шляхом легування	Застосування наплавлення легованими порошками	Відновлення плужних лемешів легованими шарами

Джерело: сформовано автором на основі [2; 6, с. 5615–5618; 7, с. 90–93; 13, с. 2930–2935; 14].

впливають на вибір методів зміцнення – від наплавлення порошковими дротами до плазмового чи лазерного напилення (табл. 2).

Властивості твердосплавних сталей безпосередньо визначають вибір технологій їхнього відновлення та зміцнення. Висока міцність підвищує стійкість до абразивного зносу, проте ускладнює механічну обробку, тому найефективнішими є наплавлення порошковими матеріалами й комбіновані покриття. Теплостійкість дає змогу застосовувати плазмове чи детонаційне напилення, що формує міцний шар із високою адгезією, придатний для роботи в складних ґрунтових умовах. Крихкість матеріалу зумовлює потребу в локальних методах зміцнення; найефективнішим із них є лазерне легування, яке мінімізує ризик тріщиноутворення. Схильність до корозії, характерна для деталей, які взаємодіють із добривами, компенсується захисними композиційними шарами з підвищеною хімічною стійкістю [14]. Структурна модифікація шляхом легування дає змогу ефективно використовувати спеціалізовані порошкові наплавні матеріали, що поєднують зносостійкість із підвищеною в'язкістю. Такий підхід у сучасних умовах дає змогу одночасно продовжити строк служби деталей і знизити витрати на ремонт у сільському господарстві.

Сучасні технології відновлення деталей із твердосплавних сталей орієнтовані на поєднання високої зносостійкості з мінімізацією деформацій та відновленням початкової геометрії. В аграрному секторі для ремонту активно застосовують методи наплавлення, напилення, лазерної та хіміко-термічної обробки.

Кожен із цих підходів має власні переваги, проте ефективність залежить від конкретних умов експлуатації та економічних можливостей підприємства. Наплавлення – це формування товстого шару з визначеними властивостями, тоді як напилення формує тонкі захисні шари з високою адгезією. Лазерні технології сприяють локальному зміцненню ділянки без значних теплових впливів, а хіміко-термічна обробка спрямована на підвищення корозійної стійкості й твердості поверхні (табл. 3).

Ефективність кожної технології визначається навантаженнями та функціональним призначенням деталі. Наплавлення порошковими матеріалами широко застосовується у відновленні плужних лемешів чи лап культиваторів, де потрібна товста робоча поверхня з підвищеною зносостійкістю. Цей метод дає змогу поєднувати базову міцність сталі з новим зміцненим шаром, що значно подовжує строк служби деталей навіть на абразивних ґрунтах. Плазмове та детонаційне напилення є особливо цінними для відновлення елементів, які зазнають комбінованого впливу – одночасно абразивного й корозійного. Так, диски борін чи сошники для внесення добрив отримують рівномірне покриття з високою адгезією, що підвищує їхню стійкість у середовищі з агрохімікатами та вологою.

Лазерні методи вирізняються високою точністю й локальністю дії: вони дають змогу відновлювати різальні кромки ножів чи зубці шестерень без значного нагріву основного металу, що зберігає геометрію й мінімізує ризик деформацій. Це особливо важливо

Таблиця 3. Сучасні технологічні підходи до відновлення твердосплавних сталей

Технологія	Основні переваги	Приклади застосування
Наплавлення порошковими матеріалами	Формування товстого зносостійкого шару з можливістю легування	Відновлення лемешів плугів і лап культиваторів
Плазмове та детонаційне напилення	Висока адгезія, рівномірність шару, можливість нанесення композиційних матеріалів	Захист дисків борін та сошників від комбінованого зносу
Лазерне легування та наплавлення	Локальне зміцнення без деформацій, точне відновлення геометрії	Зміцнення різальних кромок та зубців шестерень
Хіміко-термічна обробка (азотування, цементация)	Підвищення твердості та корозійної стійкості, довготривалий ефект	Обробка сошників та деталей, що контактують з агрохімікатами

Джерело: сформовано автором на основі [2; 10, с. 92–94; 12, с. 3320–3325; 14; 3, с. 26–29].

для деталей із високими вимогами до точності зчеплення або різання. Хіміко-термічна обробка, зокрема азотування, дає змогу сформувати тонкий захисний шар із високою твердістю та корозійною стійкістю, що гарантує тривалу роботу деталей у контакті з агресивними добривами. На виробництві це зменшує частоту замін і гарантує стабільність роботи техніки в критичні періоди польових робіт.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Упровадження технологій відновлення деталей сільськогосподарської техніки з твердосплавних сталей у виробництво постає перед низкою викликів, що підтверджується сучасними дослідженнями. Економічні обмеження насамперед зумовлені високою вартістю обладнання для лазерного та плазмового напилення й легованих порошкових матеріалів, що робить їх недоступними для дрібних ремонтних підприємств і фермерських господарств [2]. Організаційні труднощі полягають у необхідності створення спеціалізованих ремонтних баз із системами моніторингу та контролю мікроклімату, що вимагає значних інвестицій і обмежує їхнє впровадження для господарств, орієнтованих на традиційні технології ремонту [10, с. 92–94]. Важливим чинником залишається кадровий дефіцит: робота з лазерними й плазмовими комплексами потребує високої кваліфікації персоналу, тоді як підготовка спеціалістів є тривалою і витратною [14]. Ситуацію ускладнює низький рівень стандартизації та нормативного регулювання, який гальмує уніфікацію процесів і стримує впровадження нових технологій [3, с. 26–29; 11, с. 9010–9015]. Логістичні виклики полягають у нестабільному постачанні необхідних порошків, залежності від імпортного обладнання та коливаннях цін на витратні матеріали [6, с. 5615–5618; 15, с. S280–S282]. Крім того, зберігається й психологічний спротив: більшість користувачів схильні обирати традиційні методи ремонту чи заміну деталей, сприймаючи інноваційні технології як економічно ризиковані [4]. Сукупність цих чинників знижує ефективність сучасних відновлювальних рішень, тому потрібні комплексні підходи до подолання викликів та інтеграції інновацій у практику. Це передбачає поєднання технологічних, організаційних та кадрових рішень. Оптимізація вибору методів має ґрунтуватися на аналізі реальних умов експлуатації: для ґрунтообробних органів доцільним є напавлення легованими порошками, тоді як для деталей з високими вимогами до точності – лазерне легування або плазмове напилення. Важливим є впровадження комбінованих технологій, які дають змогу поєднувати зносостійкі та корозійностійкі властивості покриттів, забезпечуючи універсальний захист робочих поверхонь.

Практичний ефект визначається переважно організацією процесу технічного обслуговування: систематичний контроль стану деталей із застосуванням сучасних методів діагностики, своєчасне планування ремонтних робіт і регламентне відновлення окремих вузлів знижують ризик аварійних зупинок техніки. Удосконалення виробничої інфраструктури передбачає оснащення ремонтних підприємств сучасним обладнанням і створення умов для стабільних технологічних режимів. Не менш значущим є кадровий аспект: підготовка та перепідготовка фахівців із використанням симуляційних програм і навчальних полігонів дає змогу формувати компетентність у роботі з високотехнологічними методами відновлення. Ефективність упровадження зростає, якщо інновації інтегрувати в систему стандартизації та розробити національні методичні рекомендації, які уніфікують ремонтні процеси й знизять ризики технологічних відхилень. Завдяки цим крокам можна скоротити витрати на експлуатацію машинно-тракторного парку, а також підвищити його довговічність і надійність в умовах інтенсивного сільськогосподарського виробництва.

ВИСНОВКИ

Дослідження показало, що відновлення деталей сільськогосподарської техніки з твердосплавних сталей є комплексною проблемою, яка охоплює матеріалознавчі, технологічні та організаційні аспекти. Основні чинники зносу: абразивна дія ґрунту, динамічні навантаження, вплив агрохімікатів, кліматичні коливання та недостатній рівень обслуговування, що спричиняють швидку втрату працездатності. Показано, що високі міцність і теплостійкість твердосплавних сталей поєднуються з крихкістю та схильністю до корозії, що потребує застосування спеціалізованих технологій відновлення.

Ефективність сучасних методів – напавлення, плазмового й детонаційного напилення, лазерного легування та хіміко-термічної обробки – залежить від умов експлуатації та типу зносу. Правильний вибір методу сприяє продовженню строку служби деталей. Широке впровадження цих технологій обмежують висока вартість обладнання й матеріалів, складність організації виробництва, дефіцит кадрів і низький рівень стандартизації.

Рекомендації спрямовані на раціональний підбір технологій залежно від функціонального призначення деталей, розвитку комбінованих методів відновлення, удосконалення системи діагностики й планового обслуговування, а також удосконалення підготовки фахівців і нормативної бази. Перспективи подальших досліджень полягають у створенні моделей прогнозування довговічності, розробленні нових композиційних матеріалів та інтеграції відновлювальних технологій у комплексні системи технічного сервісу.

REFERENCES

- [1] Wang, Y., Li, D., Nie, C., Gong, P., Yang, J., Hu, Z., & Ma, M. (2023). Research progress on the wear resistance of key components in agricultural machinery. *Materials*, 16(24), 7646. <https://doi.org/10.3390/ma16247646>
- [2] Denisenko, M., Deviatko, O., Yakovenko, R., & Kanivets, N. (2025). Composite powder materials and coatings with self-sharpening effect for strengthening, restoring, and manufacturing parts and working bodies of agricultural machinery. In V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, & G. Oborskyi (Eds.), *Advanced Manufacturing Processes V. I. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_35
- [3] Rybalko, I. M., Tikhonov, O. V., Zakharov, A. V., & Honcharenko, O. O. (2022). Modyfikuvannya renovatsiynykh pokryttiv dlia pidvyshchennia znosostiikosti kultyvatornykh lap [Modification of renovation coatings to improve the wear resistance of cultivator tines]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kherson National Technical University*, (4). <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.4.4> [in Ukrainian].
- [4] Saichuk, O., Borovyk, O., Priliepo, N., Basova, Y., Honcharenko, O., & Zakharov, A. (2024). Development and improvement of roll casting technologies for universal beam mills. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(1[80]), 25–35.
- [5] Tikhonov, O., Rybalko, I., Honcharenko, O., & Ivchenko, R. (2024). Rozrobka tekhnolohii vidnovlennia khvostovoi chastyny korpusu rizia dorozhnoi frezy [Development of a technology for restoring the tail section of the road milling cutter body]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, Construction, Road and Reclamation Machines*, (103), 64–70. [in Ukrainian].
- [6] de Souza, V. P., da Silva Labiapari, W., & Lins, V. D. F. C. (2024). Stainless steels as a solution for corrosion and erosion problems involving grains in agribusiness sector applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 5605–5621. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.203>
- [7] Aramide, B., Pityana, S., Sadiku, R., Jamiru, T., & Popoola, P. (2021). Improving the durability of tillage tools through surface modification – a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116, 83–98. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07487-4>
- [8] Tang, Y., Chen, M., Lin, Y., Huang, X., Huang, K., He, Y., & Li, L. (2020). Vision-based three-dimensional reconstruction and monitoring of large-scale steel tubular structures. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1236021. <https://doi.org/10.1155/2020/1236021>
- [9] Maraveas, C., & Bartzanas, T. (2021). Sensors for structural health monitoring of agricultural structures. *Sensors*, 21(1), 314. <https://doi.org/10.3390/s21010314>
- [10] Skoblo, T. S., Sidashenko, O. I., Tikhonov, O. V., Honcharenko, O. O., Martynenko, O. D., Romaniuk, S. P., & Rybalko, I. M. (2019). Zastosuvannya nanotekhnolohii v mashynobuduvanni [Application of nanotechnologies in mechanical engineering]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho lisovoho ta transportnoho kompleksiv – Technical Service of the Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes*, (15), 19–30. [in Ukrainian]
- [11] Shekhar Samanta, N., Das, P. P., Dhara, S., & Purkait, M. K. (2023). An overview of precious metal recovery from steel industry slag: Recovery strategy and utilization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(23), 9006–9031. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00604>
- [12] Mortazavian, E., Wang, Z., & Teng, H. (2020). Repair of light rail track through restoration of the worn part of the railhead using submerged arc welding process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, 3315–3332. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05208-x>
- [13] Hoang, A. T., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2020). A review of the effect of biodiesel on the corrosion behavior of metals/alloys in diesel engines. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(23), 2923–2943. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1623346>
- [14] Bembenek, M., Prysyazhnyuk, P., Shihab, T., Machnik, R., Ivanov, O., & Ropyak, L. (2022). Microstructure and wear characterization of the Fe-Mo-BC-based hardfacing alloys deposited by flux-cored arc welding. *Materials*, 15(14), 5074. <https://doi.org/10.3390/ma15145074>
- [15] Shaw, N., Barak, R. S., Campbell, R. E., Kirmer, A., Pedrini, S., Dixon, K., & Frischie, S. (2020). Seed use in the field: Delivering seeds for restoration success. *Restoration Ecology*, 28(S1), S276–S285. <https://doi.org/10.1111/rec.13210>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Wang, Y., Li, D., Nie, C., Gong, P., Yang, J., Hu, Z., & Ma, M. (2023). Research progress on the wear resistance of key components in agricultural machinery. *Materials*, 16(24), 7646. <https://doi.org/10.3390/ma16247646>
- [2] Denisenko, M., Deviatko, O., Yakovenko, R., & Kanivets, N. (2025). Composite powder materials and coatings with self-sharpening effect for strengthening, restoring, and manufacturing parts and working bodies of agricultural machinery. In V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, & G. Oborskyi (Eds.), *Advanced Manufacturing Processes VI. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_35
- [3] Рибалко, І. М., Тіхонов, О. В., Захаров, А. В., & Гончаренко, О. О. (2022). Модифікування реноваційних покриттів для підвищення зносостійкості культиваторних лап. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, (4). <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.4.4>
- [4] Saichuk, O., Borovyk, O., Priliepo, N., Basova, Y., Honcharenko, O., & Zakharov, A. (2024). Development and improvement of roll casting technologies for universal beam mills. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(1[80]), 25–35.
- [5] Тіхонов, О., Рибалко, І., Гончаренко, О., & Івченко, Р. (2024). Розробка технології відновлення хвостової частини корпусу різця дорожньої фрези. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*, (103), 64–70.

- [6] de Souza, V. P., da Silva Labiapari, W., & Lins, V. D. F. C. (2024). Stainless steels as a solution for corrosion and erosion problems involving grains in agribusiness sector applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 5605–5621. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.203>
- [7] Aramide, B., Pityana, S., Sadiku, R., Jamiru, T., & Popoola, P. (2021). Improving the durability of tillage tools through surface modification – a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116, 83–98. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07487-4>
- [8] Tang, Y., Chen, M., Lin, Y., Huang, X., Huang, K., He, Y., & Li, L. (2020). Vision-based three-dimensional reconstruction and monitoring of large-scale steel tubular structures. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1236021. <https://doi.org/10.1155/2020/1236021>
- [9] Maraveas, C., & Bartzanas, T. (2021). Sensors for structural health monitoring of agricultural structures. *Sensors*, 21(1), 314. <https://doi.org/10.3390/s21010314>
- [10] Скобло Т. С., Сідашенко О. І., Тіхонов О. В., Гончаренко О. О., Мартиненко О. Д., Романюк С. П., Рибалко І. М. Застосування нанотехнологій в машинобудуванні. *Технічний сервіс агропромислового лісового та транспортного комплексів*. 2019. Вип. 15. С. 19–30.
- [11] Shekhar Samanta, N., Das, P. P., Dhara, S., & Purkait, M. K. (2023). An overview of precious metal recovery from steel industry slag: Recovery strategy and utilization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(23), 9006–9031. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00604>
- [12] Mortazavian, E., Wang, Z., & Teng, H. (2020). Repair of light rail track through restoration of the worn part of the railhead using submerged arc welding process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, 3315–3332. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05208-x>
- [13] Hoang, A. T., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2020). A review of the effect of biodiesel on the corrosion behavior of metals/alloys in diesel engines. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(23), 2923–2943. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1623346>
- [14] Bembenek, M., Pryszyzhnyuk, P., Shihab, T., Machnik, R., Ivanov, O., & Ropyak, L. (2022). Microstructure and wear characterization of the Fe-Mo-BC-based hardfacing alloys deposited by flux-cored arc welding. *Materials*, 15(14), 5074. <https://doi.org/10.3390/ma15145074>
- [15] Shaw, N., Barak, R. S., Campbell, R. E., Kirmer, A., Pedrini, S., Dixon, K., & Frischie, S. (2020). Seed use in the field: Delivering seeds for restoration success. *Restoration Ecology*, 28(S1), S276–S285. <https://doi.org/10.1111/rec.13210>

© Роганін М. В., Гончаренко О. О.

Дата надходження статті до редакції: 18.08.2025

Дата затвердження статті до друку: 04.09.2025

Опубліковано: 24.11.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0