УДК 621.785:620.193:631.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.28

М. В. РОГАНІН
аспірант кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0002-9230-9015

О. О. ГОНЧАРЕНКО
кандидат технічних наук,
доцент кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-4325-2705

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНОСУ І ВІДНОВЛЕННЯ ТВЕРДОСПЛАВНИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ

Актуальність дослідження зумовлено необхідністю забезпечення довговічності та надійності деталей машин сільськогосподарського призначення, які працюють у складних умовах абразивного, корозійного та динамічного навантаження. Встановлено, що традиційні підходи до оцінювання ресурсу не враховують комбінованих механізмів руйнування та ефективності застосування відновлювальних технологій, що призводить до зростання експлуатаційних витрат і зниження продуктивності техніки.

Мета статті полягає у формуванні науково обґрунтованих підходів до прогнозування довговічності деталей машин аграрного призначення шляхом аналізу процесів зношування твердосплавних сталей та оцінювання впливу відновлювальних технологій на продовження їх ресурсу.

Методологія дослідження базується на системному аналізі експлуатаційних умов, що визначають характер деградації матеріалу, класифікації механізмів зношування, порівнянні ефективності сучасних технологій відновлення, а також побудові інтегрованої моделі прогнозування ресурсу деталей. Використано узагальнення експериментальних даних, результати аналізу ремонтних практик та елементи математичного моделювання з урахуванням багатофакторного впливу навантажень.

Результати дослідження полягають у виявленні закономірностей впливу абразивних, адгезійних, втомних і корозійних механізмів на втрату працездатності деталей. Доведено, що ізольовані механізми зносу майже не зустрічаються, а превалюють комбіновані сценарії, які прискорюють деградацію. Оцінено ефективність сучасних технологій відновлення (наплавлення, плазмове напилення, лазерне легування, хіміко-термічне оброблення), завдяки яким строк служби деталей може бути подовжено в 1,5–3 рази.

Висновки підтверджують, що використання інтегрованого підходу забезпечує можливість переходу від реактивних ремонтів до планово-попереджувальних, знижує аварійні простої та підвищує економічну ефективність сільськогосподарського виробництва. Виявлено обмеження, пов'язані з нестачею даних для валідації моделей, недостатньою стандартизацією методик та складністю інтеграції цифрових систем моніторингу.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням методів інтеграції сенсорного моніторингу в модельні схеми, створенням великих баз даних для алгоритмів машинного навчання, а також з економічним обґрунтуванням упровадження технологій прогнозування довговічності у виробничу практику.

Ключові слова: *абразивне зношування, комбіновані механізми руйнування, залишковий ресурс, відновлювальні технології, прогнозна модель технічний сервіс машинно-тракторного парку, корозія, довговічності деталей, відновлення деталей.*

M. V. ROHANIN
Postgraduate Student at the Department of Agricultural Engineering
and Road Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0002-9230-9015

O. O. HONCHARENKO
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Agricultural Engineering
and Road Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-4325-2705

© Роганін М. В., Гончаренко О. О., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

MODELING OF WEAR AND RESTORATION PROCESSES OF HARD-ALLOY STEELS FOR PREDICTING THE DURABILITY OF MACHINE PARTS

The relevance of this study is determined by the need to ensure the durability and reliability of agricultural machinery parts that operate under complex abrasive, corrosive, and dynamic loading conditions. It has been established that traditional approaches to service life assessment do not account for combined degradation mechanisms or the effectiveness of restoration technologies, which leads to higher operating costs and reduced equipment productivity.

The aim of the article is to develop scientifically justified approaches to predicting the durability of agricultural machinery parts by analyzing the wear processes of hard-alloy steels and assessing the impact of restoration technologies on extending their service life.

The research methodology is based on a systematic analysis of operating conditions that define material degradation, classification of wear mechanisms, comparison of the effectiveness of modern restoration technologies, and the development of an integrated model for predicting the service life of parts. The study incorporates the generalization of experimental data, analysis of repair practices, and elements of mathematical modeling that consider the multifactorial impact of loads.

The results revealed the patterns of influence of abrasive, adhesive, fatigue, and corrosive mechanisms on the loss of part functionality. It was proven that isolated wear mechanisms are rare, while combined scenarios prevail and accelerate degradation. The effectiveness of modern restoration technologies, including surfacing, plasma spraying, laser alloying, and chemical-thermal treatment, was assessed, demonstrating that the service life of parts can be extended by 1.5 to 3 times.

The conclusions confirm that the integrated approach enables a shift from reactive repairs to preventive maintenance, reduces emergency downtime, and improves the economic efficiency of agricultural production. The study also identified limitations related to insufficient data for model validation, lack of standardized methodologies, and challenges in integrating digital monitoring systems.

Future research should focus on developing methods for integrating sensor monitoring into modeling schemes, creating large datasets for machine learning algorithms, and providing economic justification for the implementation of durability prediction technologies in industrial practice.

Key words: *abrasive wear, combined failure mechanisms, residual life, restoration technologies, predictive model, technical service of machine and tractor fleet, corrosion, durability of parts, restoration of parts.*

Постановка завдання

Моделювання процесів зносу і відновлення твердосплавних сталей є важливим завданням у контексті забезпечення надійності та довговічності деталей машин сільськогосподарського виробництва. Робочі елементи техніки в умовах інтенсивного механічного навантаження, абразивного і корозійного середовища зазнають прискореного руйнування, що призводить до втрати працездатності та зростання експлуатаційних витрат. Проблема ускладнюється високою вартістю виготовлення нових деталей та необхідністю підтримання стабільності роботи машинно-тракторного парку в умовах сезонних пікових навантажень.

Розроблення математичних моделей, що дозволяють описати механізми зношування та прогнозувати залишковий ресурс деталей, має прямий зв'язок із практичними завданнями підвищення ефективності експлуатації сільськогосподарської техніки. Такі підходи забезпечують можливість планування ремонтів, обґрунтування вибору оптимальних технологій відновлення та мінімізації простоїв обладнання. Водночас результати дослідження відкривають перспективи підвищення продуктивності та конкурентоспроможності аграрного виробництва завдяки раціональному використанню технічних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наукові праці, присвячені моделюванню процесів зносу і відновлення твердосплавних сталей для прогнозування довговічності деталей, узагальнюються в чотирьох напрямах. У першому напрямі увагу зосереджено на інтеграції ремонтних технологій і зменшенні екологічного навантаження. А. Атинян (A. Atynian), С. Братішко (S. Bratishko), С. Бутнік (S. Butnik) та співавтори [1] доводять ефективність застосування вуглепластикових композитів у ремонті мостових споруд, що може слугувати моделлю включення ремонтних сценаріїв у прогноз довговічності сталевих вузлів. О. О. Коростін [2] обґрунтовує підходи до зменшення вуглецевого сліду за тренування великих ML-моделей, що у сфері матеріалознавства означає доцільність створення енергоефективних алгоритмів прогнозування зносу. М. Павловський (M. Pavlovskyi) [3] аналізує вплив біодизельних палив на ефективність двигунів та зношування елементів, що опосередковано впливає на трибологічну поведінку сталей у транспортних системах. Подальші дослідження в цьому напрямі мають інтегрувати екологічні обмеження та реальні умови використання в цифрові двійники довговічності.

Другий напрям охоплює процесно-трибологічні аспекти. Зокрема, Х. Лі (X. Li), Ч. Чжай (C. Zhai), В. Хе (W. He) та співавтори [4] виявляють закономірності інтенсивності зносу за ВТА-свердління легованої сталі, що дозволяє моделювати перехід між механізмами абразивного та адгезійного зносу. К. Костик (K. Kostyk), І. Курич (I. Kuric), М. Сага (M. Saga) та співавтори [5] показують, що комбіноване магнітно-імпульсне та хіміко-термічне оброблення створює поверхневі шари з підвищеною твердістю і стійкістю до зношування. Л. Гао (L. Gao), С. Сюй (C. Xu), С. Ге (X. Ge) та співавтори [6] доводять значення дифузійного з'єднання порошкових та легованих сталей

для підвищення втомної довговічності, що актуально для моделювання інтерфейсних зон. Залежність трибологічних характеристик сталі Q355D від відношення кування показують Дж. Хуан (J. Huang), Дж. Сюй (J. Xu), С. Ву (X. Wu) та співавтори [7]. Л. Селвам (L. Selvam), В. Ганапаті (V. Ganapathy), П. Арумугам (P. Arumugam) та співавтори [8,17] зосереджують увагу на окиснювальній стабільності наплавлених шарів, що визначає їх зносостійкість у високотемпературних умовах. Подальші роботи у цьому напрямі мають бути націлені на створення універсальних моделей зносу з урахуванням історії деформації та впливу інтерфейсних структур.

Третій науковий напрям стосується інженерії поверхні, покриттів та відновлювальних технологій. Р. Бендікєне (R. Bendikiene), А. Чупліс (A. Ciuplys) та Л. Каваляускєне (L. Kavaliauskiene) [9] демонструють можливість повторного використання металевих відходів для створення високозносостійких покриттів, що узгоджується з принципами циркулярної економіки. С. Сонг (C. Song), С. Ху (S. Hu), Ц. Хан (Q. Han) та співавтори [10] демонструють переваги градієнтних наноструктурованих сталей, які забезпечують вищу зносостійкість за підвищених температур. Вплив постійного струму на твердість наплавлених покриттів виявляють М. Н. Муїгай (M. N. Muigai), Е. Т. Акінлабі (E. T. Akinlabi), Ф. М. Мвема (F. M. Mwema) [11]. Х. Є (H. Ye), А. Чен (A. Chen), С. Лю (S. Liu) і співавтори [12] доводять ефективність ультразвукового поверхневого обкочування в покращенні трибологічних властивостей алюмінієвої бронзи, а П. Хуан (P. Huang), Ю. Ван (Y. Wang), Дж. Лінь (J. Lin) та співавтори [13] підтверджують аналогічний ефект для підшипникових сталей. Надалі дослідження варто спрямувати на створення багатофакторних «карт відповідності» між енергією поверхневого оброблення та параметрами зносостійкості.

Четвертий напрям досліджень акцентовано на впливі експлуатаційних середовищ. Б. Ван (B. Wang), Ю. Го (Y. Guo), Ч. Чжан (Z. Zhang) та співавтори [14] аналізують кріогенний знос сплаву Invar 36 проти Si_3N_4, показуючи, що температура радикально змінює механізми тертя. Ф. Їнь (F. Yin), Ю. Ван (Y. Wang), Х. Цзі (H. Ji), Ч. Ма (Z. Ma), С. Ніє (S. Nie) [15, 16] доводять, що швидкість ковзання і наявність морської води суттєво змінюють трибологічну поведінку сталевих пар у контакті з SiC (silicon carbide). Це підтверджує необхідність багатофізичних моделей, що враховують трибокорозію і граничні умови експлуатації. Подальші дослідження доцільно зосередити на багатофізичних випробуваннях у кріогенних, морських та високотемпературних умовах для комплексної валідації прогнозних моделей.

Таким чином, наявні дослідження підтверджують потребу у створенні гібридних моделей довговічності твердосплавних сталей, що поєднують механістичні закони зносу, параметри мікроструктури, сценарії ремонту та експлуатаційні фактори середовища.

Попри значні досягнення у вивченні процесів зношування твердосплавних сталей, низка аспектів залишається не досить дослідженою. Наявні роботи переважно зосереджені на описі умов експлуатації та загальних факторів зношування, однак бракує систематизованого уявлення про їх комплексний вплив у реальних виробничих умовах. Обмеженою є також інформація щодо ефективності сучасних відновлювальних технологій у динамічному режимі роботи машин, адже більшість оцінок ґрунтується на лабораторних або фрагментарних польових дослідженнях. Відсутність уніфікованих методик та узгоджених моделей прогнозування довговічності ускладнює перенесення результатів у практику, що створює розрив між теоретичними розробками і потребами машинобудування та аграрного виробництва.

Запропоноване дослідження спрямовано на заповнення зазначених прогалин шляхом побудови інтегрованої моделі прогнозування довговічності, яка поєднує дані про умови експлуатації, чинники інтенсивності зношування та ефективність відновлювальних процесів. Залучення комплексного аналізу механізмів руйнування й оцінювання сучасних технологій відновлення дозволить сформувати більш достовірні та практично орієнтовані результати. Очікується, що така модель стане основою для переходу від загальних теоретичних підходів до прикладних інструментів планування технічного обслуговування, що сприятиме підвищенню надійності деталей і ефективності виробничих процесів.

Формулювання мети дослідження

Мета статті полягає в науковому обґрунтуванні підходів до прогнозування довговічності деталей машин сільськогосподарського призначення на основі аналізу процесів зносу і відновлення твердосплавних сталей.

Для досягнення мети передбачено виконання таких **завдань**:

1) схарактеризувати умови експлуатації та визначити ключові фактори, що впливають на інтенсивність зношування твердосплавних сталей і втрату працездатності деталей машин;

2) оцінити потенціал сучасних технологій відновлення та виявити проблеми, які стримують їх практичне застосування в прогнозуванні довговічності;

3) розробити інтегровану модель прогнозування довговічності деталей на основі поєднання даних про зношування та ефективність відновлювальних процесів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Умови експлуатації деталей машин істотно впливають на інтенсивність і характер зношування твердосплавних сталей. У сільськогосподарському виробництві вони працюють у складних середовищах, де поєднуються динамічні навантаження, абразивний вплив ґрунтових частинок, змінна вологість і агресивна дія добрив. Сукупність

цих чинників призводить до прискореного руйнування робочих поверхонь, утрати геометричної точності та зниження ефективності техніки. Для обґрунтованого прогнозування довговічності деталей важливо не лише врахувати матеріал і конструктивні особливості, а й чітко ідентифікувати експлуатаційні умови, що визначають механізми зношування (табл. 1).

Таблиця 1

Основні умови експлуатації деталей машин та їх вплив на знос твердосплавних сталей

Умова експлуатації	Характер впливу	Типові наслідки для деталей
Абразивна дія ґрунтових частинок	Механічне руйнування поверхневого шару	Інтенсивне стирання, поява мікрорельєфу
Змінні динамічні навантаження	Періодичне перевантаження матеріалу	Втомне руйнування, мікротріщини
Вологість і агрохімічні реагенти	Корозійно-механічне поєднання процесів	Прискорена деградація сплаву, корозійне зношування
Нестабільність температурного режиму	Термомеханічні напруження	Локальне відшаровування та зниження твердості

Джерело: сформовано на підставі [1, p. 220–222; 2, p. 45–47; 4; 5; 7, p. 935–938]

У практичній експлуатації сільськогосподарських машин поєднання зазначених умов формує складні механізми деградації твердосплавних сталей, що потребують комплексного аналізу. Абразивна дія мінеральних та органічних частинок ґрунту призводить до поступового руйнування мікроструктури поверхневих шарів, утворення борозен та мікроподряпин, які згодом трансформуються в концентратори напружень. Динамічні навантаження, що виникають під час роботи з неоднорідними й ущільненими ґрунтами, спричиняють циклічні коливання напружень у матеріалі, що сприяє розвитку втомних мікротріщин і локальних зон пластичної деформації. Корозійно-активне середовище, зумовлене дією добрив та підвищеної вологості, посилює ці процеси шляхом утворення електрохімічних елементів на поверхні деталі, прискорюючи руйнування структурних складників сплаву.

Термомеханічні впливи, які проявляються внаслідок різких змін температури під час роботи техніки, додатково стимулюють локальне відшаровування покриттів та зниження мікротвердості робочих поверхонь [4]. На практиці це означає, що лемеші плугів, диски борін та інші елементи ґрунтообробної техніки втрачають свою ефективність значно швидше, ніж передбачено нормативними строками служби. У результаті господарства стикаються з необхідністю частих ремонтів або заміни деталей, що підвищує витрати на технічне обслуговування та знижує продуктивність виробничих процесів. Водночас у разі застосування сучасних відновлювальних технологій, як-от наплавлення зносостійкими сплавами чи лазерне легування, стає можливим істотне зменшення негативного впливу перелічених факторів та подовження ресурсу деталей. Таким чином, системний облік умов експлуатації є ключовим чинником для створення достовірних моделей прогнозування довговічності твердосплавних сталей і практичної оптимізації технологій відновлення в сільськогосподарському машинобудуванні.

Зношування твердосплавних сталей у деталях машин відбувається не як ізольований процес, а як результат взаємодії кількох видів навантажень, що формують комбіновані механізми руйнування. У реальних умовах експлуатації абразивна дія, тертя ковзання, циклічні динамічні напруження та вплив агресивного середовища взаємно підсилюють один одного, спричиняючи прискорену втрату працездатності матеріалу. Розуміння механізмів формування різних видів зношування є ключовим для побудови адекватних моделей прогнозування довговічності (табл. 2).

Таблиця 2

Основні види зношування твердосплавних сталей та механізми їх формування

Вид зношування	Умови виникнення	Механізм формування	Практичні наслідки
Абразивне	Контакт із ґрунтовими частинками високої твердості	Вибивання мікрочастинок, подряпини, руйнування мікроструктури	Стирання робочих кромок, зменшення товщини шару
Адгезійне	Ковзання метал-метал за підвищених навантажень	Місцеве зварювання поверхонь, відрив частинок	Залипання, виривання матеріалу, збільшення шорсткості
Втомне	Циклічні динамічні навантаження	Накопичення пошкоджень, розвиток мікротріщин	Локальні руйнування, відколювання фрагментів
Корозійне	Волога, агрохімічні речовини, добрива	Електрохімічні реакції, руйнування фаз	Прискорена деградація поверхні, поява корозійних осередків
Комбіноване	Поєднання абразивного, втомного та корозійного впливу	Синергетична дія механічних і хімічних процесів	Швидка втрата працездатності, непередбачувані відмови

Джерело: сформовано на підставі [6; 7, p. 939–941; 8; 10; 11]

У реальних умовах експлуатації ізольовані види зношування трапляються рідко, тоді як переважає їх комплексна взаємодія, що зумовлює складний характер деградації твердосплавних сталей. Абразивне зношування, спричинене дією мінеральних включень ґрунту, є визначальним для робочих органів ґрунтообробної техніки. Воно проявляється у формуванні характерного хвилястого мікрорельєфу на поверхні лемешів плугів і різців

культиваторів, що призводить до втрати геометричної точності та зростання енергоспоживання машин. Адгезійне зношування, пов'язане з локальним схоплюванням контактних поверхонь, часто реєструється на вузлах тертя зернозбиральних комбайнів, де високі питомі тиски і недостатня мастильна плівка спричиняють виривання матеріалу й утворення задирок [5].

Втомне зношування, характерне для деталей, що працюють під дією змінних навантажень, проявляється на дисках борін і зубах роторних фрез. Тут унаслідок циклічного навантаження відбувається поступове накопичення мікропошкоджень, що трансформуються в тріщини й відколювання частин робочої поверхні. Корозійне зношування особливо інтенсивне у вологих середовищах, збагачених агрохімікатами: наприклад, сошники сівалок у разі контакту з добривами втрачають до 20–30 % ресурсу через локальні осередки корозії, які слугують ініціаторами руйнування. Комбіновані процеси найчастіше фіксуються в багатофункціональних машинах, де деталі піддаються одночасно абразивному стиранню, циклічним навантаженням та хімічному впливу.

Ці приклади свідчать, що правильне розмежування та аналіз механізмів зношування має не лише теоретичне, а й практичне значення. Відповідна діагностика дозволяє обґрунтувати вибір способів поверхневого зміцнення – від наплавлення карбідами до лазерного легування або плазмового напилення. Так, урахування механізмів комбінованого зношування є критично важливим для створення точних моделей прогнозування довговічності та забезпечення економічної доцільності у використанні відновлювальних технологій.

Відновлення твердосплавних сталей є одним із ключових напрямів подовження строку служби деталей машин, що працюють в умовах інтенсивного абразивного та корозійного зношування. Використання сучасних технологій дозволяє не лише компенсувати втрати матеріалу, але й підвищити зносостійкість робочих поверхонь шляхом зміни їхньої мікроструктури та фізико-механічних властивостей. Вибір технології залежить від характеру зношування, вимог до точності відновленої деталі та економічної доцільності у виробничих умовах (табл. 3).

Таблиця 3

Сучасні технології відновлення деталей із твердосплавних сталей та їх потенціал

Технологія	Принцип дії	Типові сфери застосування	Ефективність подовження ресурсу
Наплавлення зносостійкими сплавами	Нанесення шару металу з карбідними включеннями	Лемеші плугів, ножі культиваторів	Подовження ресурсу у 2–2,5 раза
Плазмове та газотермічне напилення	Осадження тонкого шару зносостійкого матеріалу	Диски борін, зуби роторних фрез	Підвищення стійкості до втоми на 40–60 %
Лазерне легування	Локальна зміна структури поверхневого шару	Сошники сівалок, ріжучі елементи	Зростання мікротвердості в 1,5–2 рази
Хіміко-термічне оброблення (борування, азотування)	Дифузійне насичення поверхні неметалевими елементами	Робочі органи машин для внесення добрив	Підвищення корозійної стійкості на 30–50 %

Джерело: сформовано на підставі [5; 8; 9, p. 1228–1230; 12; 13; 14, p. 150–153]

Зокрема, наплавлення порошковими дротами використовується в господарствах для відновлення лемешів і культиваторних лап, що дозволяє збільшити їх строк служби в середньому вдвічі та скоротити витрати на закупівлю нових деталей [5]. Плазмове напилення композиційних покриттів активно впроваджується в ремонті дискових борін, оскільки воно забезпечує високу адгезію та підвищує стійкість до комбінованого абразивно-втомного зношування [9, p. 1228–1230]. Лазерне легування знаходить застосування для деталей, де критичною є точність геометрії, адже воно дозволяє локально зміцнити поверхню без надлишкової деформації чи зміни розмірів [13]. Хіміко-термічне оброблення, особливо азотування, є ефективним для деталей, що працюють у контакті з агрохімікатами, наприклад, сошників машин для внесення мінеральних добрив [14, p. 150–153]. Практичний досвід підтверджує, що правильно вибрана технологія відновлення може не лише подовжити строк служби у 1,5–3 рази, але й підвищити надійність техніки, зменшити кількість аварійних зупинок та оптимізувати витрати на технічне обслуговування.

Методи прогнозування довговічності деталей машин на основі аналізу процесів зносу та відновлення твердосплавних сталей демонструють значний науковий потенціал, однак їх практичне впровадження у виробничих умовах стикається з низкою об'єктивних проблем. Найбільш істотним обмеженням є складність адекватного врахування змінності експлуатаційних умов [4]. Виробнича техніка працює в широкому діапазоні навантажень і середовищ, що змінюються навіть у межах одного робочого циклу, тоді як більшість моделей ґрунтуються на усереднених параметрах, що знижує точність прогнозів [10; 15].

Важливою проблемою є також недостатня стандартизація методів випробувань і вимірювань. У різних лабораторіях використовуються відмінні критерії оцінювання зносостійкості, що ускладнює порівняння результатів і створення універсальних моделей [6; 11]. Відсутність єдиної методичної бази призводить до фрагментарності даних та їх неповної придатності для промислових розрахунків.

Технічною перешкодою виступає обмежена можливість перенесення результатів лабораторних випробувань на реальні умови експлуатації. Багато моделей побудовані на основі даних стендових досліджень, де вплив

факторів є контрольованим і частково ізольованим. У виробничій практиці ж зношування формується під дією комбінаційних навантажень, що значно знижує адекватність таких моделей.

Не менш суттєвою є проблема оперативності збору та оброблення експлуатаційних даних. Для якісного прогнозування потрібен моніторинг стану деталей у режимі реального часу, проте сучасні системи сенсорного контролю ще не мають широкого розповсюдження в сільськогосподарському машинобудуванні через їх вартість і складність інтеграції [2, p. 46–48]. Це обмежує можливості практичного використання адаптивних моделей.

Організаційно-економічні чинники також відіграють вагому роль. Впровадження моделей прогнозування потребує додаткових витрат на обладнання, програмне забезпечення та підготовку персоналу, що не завжди є доцільним для підприємств із невеликим виробничим обсягом. Часто відсутні й стимули до застосування довгострокових стратегій технічного обслуговування, оскільки підприємства орієнтуються на мінімізацію короткострокових витрат [1, p. 220–222].

Ще одним бар'єром виступає обмежена інтеграція цифрових інструментів. Сучасні системи управління технічним станом машин рідко включають модулі прогнозування довговічності, тому навіть наявні математичні моделі залишаються у сфері наукових досліджень і не трансформуються в інженерні рішення [6]. Додатково слід відзначити низьку доступність великих масивів даних, необхідних для навчання і валідації сучасних моделей, зокрема тих, що ґрунтуються на методах машинного навчання.

Запропонована модель призначена для прогнозування довговічності деталей шляхом інтеграції експлуатаційних даних про зношування з оцінюванням ефективності відновлювальних процесів. Актуальність підходу полягає в необхідності врахування комбінованих механізмів руйнування та реальних відновних утручань, які змінюють як поточний стан пошкодження, так і параметри матеріалу. Відмінність від наявних рішень полягає в поєднанні фізично обґрунтованої кінетики зносу з даними сенсорного моніторингу та реєстру ремонтів, трактуванні відновлення як «неідеального» обслуговування з частковим поверненням ресурсу і корекцією матеріалознавчих параметрів, а також у вбудованій оцінці невизначеності прогнозу. Ядром є безрозмірна змінна пошкодження

$$D(t) \in [0,1] \tag{1}$$

з еволюцією під час роботи

$$D' = F(x(t), \theta), \tag{2}$$

де $x(t)$ – вектор навантажень і середовищних факторів, θ – ідентифіковані параметри.

Моменти відновлення τk описуються відображенням стану

$$D(\tau k+) = \varphi(D(\tau k-), uk, \psi) \tag{3}$$

та оновленням параметрів

$$\theta \leftarrow \Theta(\theta, uk),$$

де uk – вибрана технологія відновлення, ψ – її ефективність. Відмова фіксується за умов $D \geq D_{crit}$; прогнозований залишковий ресурс – момент досягнення порогу з урахуванням поточного стану, історії навантажень і виконаних відновлень, із формуванням довірчих інтервалів для прийняття рішень (рис. 1). Практичне функціонування схеми передбачає постійний прийом експлуатаційних даних від бортових сенсорів і періодичне завантаження сервісної інформації про фактичні відновлення. На етапі узгодження часових рядів модель відсіює некоректні ділянки та нормує навантаження до порівнюваних метрик. Алгоритм виділяє інформативні ознаки: рівні контактного тиску, швидкість ковзання, гранулометричні індикатори абразиву, циклічність навантажень, індекси корозійної активності середовища.

Декомпозиція дозволяє кількісно оцінити внесок окремих механізмів у приріст пошкодження, що забезпечує коректну калібровку функції F для конкретних умов роботи. Гібридна модель у режимі онлайн оцінює поточний стан $D(t)$, прогнозує час досягнення порогу працездатності й симулює альтернативні стратегії: зміну режимів експлуатації або застосування різних технологій відновлення. Події відновлення моделюються як часткове «омолодження» із двома ефектами: миттєвим зменшенням D та зміною параметрів матеріалу, що зумовлює інший нахил кривої зносу після сервісу. Байєсівська ідентифікація забезпечує адаптацію параметрів до індивідуальної історії деталі й формує довірчі інтервали для RUL, що важливо для планування обслуговування з урахуванням ризику. У виробничому застосуванні це дає можливість переходу від реактивних ремонтів до планово-попереджувальних, вибору економічно доцільної технології відновлення під конкретний профіль навантажень, скорочення аварійних простоїв і підвищення використання ресурсу деталей. Після кожного сервісу модель автоматично оновлюється за результатами виміряної товщини шару, мікротвердості та фактичної динаміки зносу, зменшуючи похибку наступних прогнозів і забезпечуючи стійку роботу в змінних умовах експлуатації.

Висновки

У дослідженні встановлено, що знос твердосплавних сталей у деталях машин формується під дією комплексу абразивних, адгезійних, втомних і корозійних механізмів, які найчастіше взаємодіють між собою, створюючи комбіновані сценарії деградації. Це зумовлює необхідність розглядати процес втрати ресурсу як багатофакторний

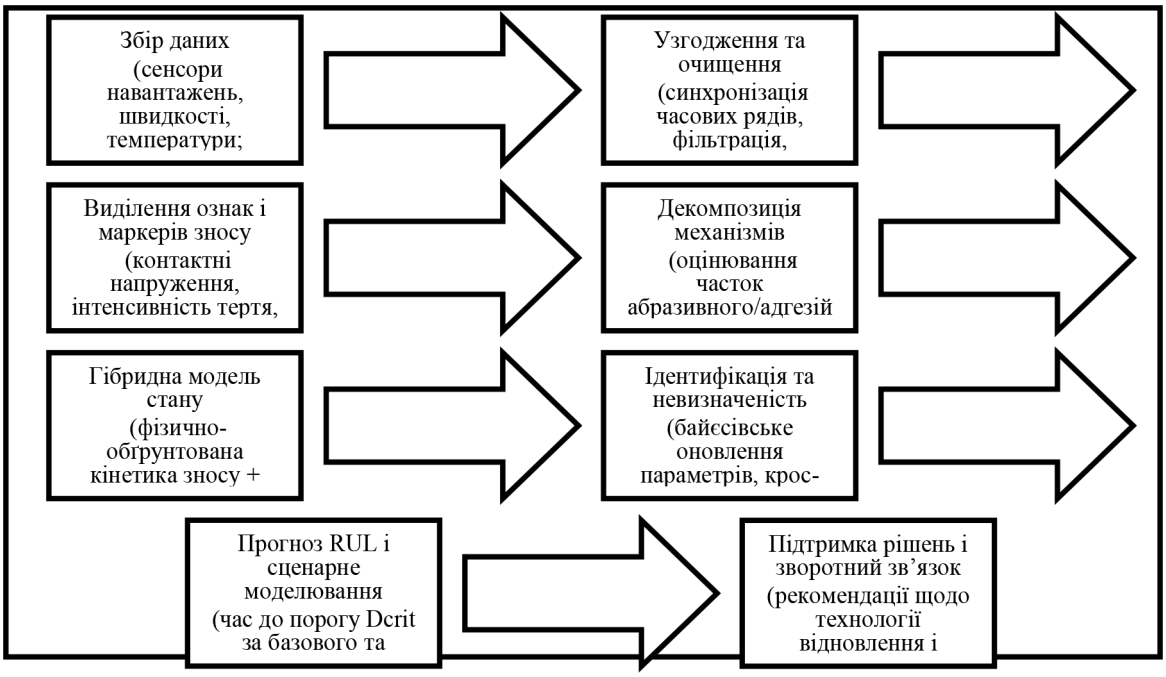

Рис. 1. Покрокова модель інтегрованого прогнозування довговічності

Джерело: авторська розробка

і динамічний, що прямо впливає на точність прогнозування довговічності. Систематизація експлуатаційних умов дала змогу визначити чинники, що найбільше прискорюють руйнування робочих поверхонь, та окреслити критичні межі їх впливу.

Виявлено низку проблем, які стримують практичне застосування методів прогнозування, а саме: невідповідність між результатами лабораторних випробувань і реальними умовами роботи, відсутність єдиних методик оцінювання зносостійкості, недостатній розвиток сенсорних систем для моніторингу стану деталей у реальному часі, а також обмежена інтеграція цифрових інструментів у системи технічного обслуговування. Додатковими бар'єрами є висока вартість упровадження моделей і недостатня готовність підприємств до використання довгострокових стратегій управління ресурсом.

Запропонована модель прогнозування довговічності відрізняється інтеграцією даних про поточне зношування з оцінюванням ефективності відновлювальних технологій, трактуючи ремонт як часткове відновлення ресурсу з корекцією параметрів матеріалу. Такий підхід дозволяє точніше оцінювати залишковий ресурс, ураховувати невизначеність прогнозів і формувати сценарії технічного обслуговування, що переводить практику від реактивних ремонтів до планово-попереджувальних.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні методик інтеграції сенсорного моніторингу в прогнозні моделі, створенні баз даних для алгоритмів машинного навчання, а також економічно обґрунтованих стратегій вибору відновлювальних технологій для різних типів деталей. Це дозволить сформувати більш універсальні та адаптивні підходи до управління технічним ресурсом і підвищити ефективність аграрного машинобудування.

Список використаної літератури

1. Atynian A., Bratishko S., Butnik S., Zhyhlo A., Buhaevskyi V. Use of carbon composites in repair of overpasses and bridges. *Věda a perspektivy*. 2024. № 8(39). P. 213–225. DOI: https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-8(39)-213-225.

2. Коростін О. О. Підходи до зменшення вуглецевого сліду в тренуванні великих ML-моделей. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 1. С. 40–51. DOI: https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1.5 (дата звернення: 08.03.2025).

3. Pavlovskyi M. The improvement of fuel efficiency and environmental characteristics of diesel engine by using biodiesel fuels. In: Boichenko S., Zaporozhets A., Yakovlieva A., Shkilniuk I. (eds.) *Modern technologies in energy and transport*. (*Studies in Systems, Decision and Control*; Vol. 510). Cham: Springer, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4

4. Li X., Zhai C., He W., Lu Y., Zhang B. Experimental investigation of tool wear and machining quality of BTA deep-hole drilling in low-carbon alloy steel SA-5083. *Materials*. 2023. Vol. 16, № 20. Article 6686. DOI: https://doi.org/10.3390/ma16206686

5. Kostyk K., Kuric I., Saga M., Kostyk V., Ivanov V., Kovalov V., Pavlenko I. Impact of magnetic-pulse and chemical-thermal treatment on alloyed steels' surface layer. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, № 1. Article 469. DOI: https://doi.org/10.3390/app12010469

6. Gao L., Xu C., Ge X., Hu Q., Wang X., Meng Y., Liu B. Study on microstructure and properties between alloy steel and powder steel via hot isostatic pressing diffusion bonding. *Materials Today Communications*. 2024. Vol. 41. Article 110390. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110390

7. Huang J., Xu J., Wu X., Wang C., Jin C., Ji X., Han T. Effects of different forging ratios on microstructure, mechanical properties and friction and wear behaviour of Q355D steel. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2025. Vol. 64, № 3. P. 927–942. DOI: https://doi.org/10.1080/00084433.2024.2398933

8. Selvam L., Ganapathy V., Arumugam P., Ramarathinam R. P., Ramdas P. V., Palanivel A., Rajendran V. A study of oxidation behaviour of hard-faced surface on steel using SMAW. *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 3192, № 1. Article 020065. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0241671

9. Bendikiene R., Ciuplys A., Kavaliauskiene L. Circular economy practice: from industrial metal waste to production of high wear resistant coatings. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 229. P. 1225–1232. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.068

10. Wang B., Guo Y., Zhang Z., Yi X., Wang D. Investigation of cryogenic friction and wear properties of Invar 36 alloy against Si3N4 ceramic balls. *Wear*. 2023. Vol. 518. Article 204648. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204648

11. Song C., Hu S., Han Q., Han X., Xie L., Zhuang W., Hua L. Ultrastrong gradient nanostructured CSS-42L bearing steel and its enhanced wear resistance at elevated temperature. *Surface and Coatings Technology*. 2023. Vol. 470. Article 129881. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129881

12. Muigai M. N., Akinlabi E. T., Mwema F. M. Influence of direct current (DC) on hardness of weld stainless steel coating–A model for mild steel repair. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 44. P. 1133–1135. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.230

13. Ye H., Chen A., Liu S., Zhang C., Gao Y., Li Q., Guo H. Effect of ultrasonic surface rolling process on the surface properties of QAl10-3-1.5 aluminum bronze alloy. *Surface and Coatings Technology*. 2022. Vol. 433. Article 128126. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128126

14. Huang P., Wang Y., Lin J., Cheng Y., Liu F., Qiu Q. Effect of ultrasonic rolling on surface integrity, machining accuracy, and tribological performance of bearing steels under different process schemes. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2023. Vol. 43. P. 143–157. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.03.003

15. Yin F., Wang Y., Ji H., Ma Z., Nie S. Impact of Sliding Speed on the Tribological Behaviors of Cermet and Steel Balls Sliding Against SiC Lubricated with Seawater. *Tribology Letters*. 2021. Vol. 69. Article 39. DOI: https://doi.org/10.1007/s11249-021-01413-1

16. Рибалко І М., Тіхонов О В., Захаров А В., Гончаренко О О. Модифікування реноваційних покриттів для підвищення зносостійкості культиваторних лап. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2022. № 4(83). С. 37–42. DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.4.4

17. Тіхонов О В., Рибалко І М., Гончаренко О О., Івченко Р. Розробка технології відновлення хвостової частини корпусу різця дорожньої фрези. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2024. № 103. С. 64–70. DOI: https://doi.org/10.32347/gbdmm.2024.103.0401

References

1. Atynian, A., Bratishko, S., Butnik, S., Zhyhlo, A., & Buhaevskyi, V. (2024). Use of carbon composites in repair of overpasses and bridges. *Věda a perspektivy*, 8(39), 213–225. https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-8(39)-213-225

2. Korostin, O. O. (2025). Pidkhody do zmenshennia vuhletsevoho slidu v trenuvanni velykykh ML-modelei [Approaches to reducing the carbon footprint in training large ML models]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriia: Tekhnichni nauky*, (1), 40–51. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1.5 (date of access: 08.03.2025) [in Ukrainian].

3. Pavlovskyi, M. (2024). The improvement of fuel efficiency and environmental characteristics of diesel engine by using biodiesel fuels. In S. Boichenko, A. Zaporozhets, A. Yakovlieva, & I. Shkilniuk (Eds.), *Modern technologies in energy and transport* (Studies in Systems, Decision and Control; Vol. 510). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4

4. Li, X., Zhai, C., He, W., Lu, Y., & Zhang, B. (2023). Experimental investigation of tool wear and machining quality of BTA deep-hole drilling in low-carbon alloy steel SA-5083. *Materials, 16*(20), Article 6686. https://doi.org/10.3390/ma16206686

5. Kostyk, K., Kuric, I., Saga, M., Kostyk, V., Ivanov, V., Kovalov, V., & Pavlenko, I. (2022). Impact of magnetic-pulse and chemical-thermal treatment on alloyed steels' surface layer. *Applied Sciences, 12*(1), Article 469. https://doi.org/10.3390/app12010469

6. Gao, L., Xu, C., Ge, X., Hu, Q., Wang, X., Meng, Y., & Liu, B. (2024). Study on microstructure and properties between alloy steel and powder steel via hot isostatic pressing diffusion bonding. *Materials Today Communications, 41*, Article 110390. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110390

7. Huang, J., Xu, J., Wu, X., Wang, C., Jin, C., Ji, X., & Han, T. (2025). Effects of different forging ratios on microstructure, mechanical properties and friction and wear behaviour of Q355D steel. *Canadian Metallurgical Quarterly, 64*(3), 927–942. https://doi.org/10.1080/00084433.2024.2398933

8. Selvam, L., Ganapathy, V., Arumugam, P., Ramarathinam, R. P., Ramdas, P. V., Palanivel, A., & Rajendran, V. (2024). A study of oxidation behaviour of hard-faced surface on steel using SMAW. *AIP Conference Proceedings, 3192*(1), Article 020065. https://doi.org/10.1063/5.0241671

9. Bendikiene, R., Ciuplys, A., & Kavaliauskiene, L. (2019). Circular economy practice: From industrial metal waste to production of high wear resistant coatings. *Journal of Cleaner Production, 229*, 1225–1232. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.068

10. Wang, B., Guo, Y., Zhang, Z., Yi, X., & Wang, D. (2023). Investigation of cryogenic friction and wear properties of Invar 36 alloy against Si3N4 ceramic balls. *Wear, 518*, Article 204648. https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204648

11. Song, C., Hu, S., Han, Q., Han, X., Xie, L., Zhuang, W., & Hua, L. (2023). Ultrastrong gradient nanostructured CSS-42L bearing steel and its enhanced wear resistance at elevated temperature. *Surface and Coatings Technology, 470*, Article 129881. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129881

12. Muigai, M. N., Akinlabi, E. T., & Mwema, F. M. (2021). Influence of direct current (DC) on hardness of weld stainless steel coating – A model for mild steel repair. *Materials Today: Proceedings, 44*, 1133–1135. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.230

13. Ye, H., Chen, A., Liu, S., Zhang, C., Gao, Y., Li, Q., & Guo, H. (2022). Effect of ultrasonic surface rolling process on the surface properties of QAl10-3-1.5 aluminum bronze alloy. *Surface and Coatings Technology, 433*, Article 128126. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128126

14. Huang, P., Wang, Y., Lin, J., Cheng, Y., Liu, F., & Qiu, Q. (2023). Effect of ultrasonic rolling on surface integrity, machining accuracy, and tribological performance of bearing steels under different process schemes. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 43*, 143–157. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.03.003

15. Yin, F., Wang, Y., Ji, H., Ma, Z., & Nie, S. (2021). Impact of sliding speed on the tribological behaviors of cermet and steel balls sliding against SiC lubricated with seawater. *Tribology Letters, 69*, Article 39. https://doi.org/10.1007/s11249-021-01413-1

16. Rybalko, I. M., Tikhonov, O. V., Zakharov, A. V., & Honcharenko, O. O. (2022). Modyfikuvannia renovatsiinykh pokryttiv dlia pidvyshchennia znosostiikosti kultyvatornykh lap [Modification of renovation coatings to increase the wear resistance of cultivator shares]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kherson National Technical University*, 4(83), 37–42. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.4.4 [in Ukrainian].

17. Tikhonov, O. V., Rybalko, I. M., Honcharenko, O. O., & Ivchenko, R. (2024). Rozrobka tekhnolohii vidnovlennia khvostovoi chastyny korpusu rittsia dorozhnoi frezy [Development of a technology for restoring the tail section of a road milling cutter body]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, Construction, Road and Reclamation Machines*, (103), 64–70. https://doi.org/10.32347/gbdmm.2024.103.0401 [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 30.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025