

Роганін М.В.

Полтавський державний аграрний університет

Гончаренко О.О.

Полтавський державний аграрний університет

ВИКОРИСТАННЯ 3D-СКАНУВАННЯ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ГЕОМЕТРІЇ ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ТВЕРДОСПЛАВНИХ СТАЛЕЙ

Актуальність дослідження зумовлено необхідністю підвищення надійності та довговічності машинно-тракторного парку в умовах інтенсивної експлуатації, що супроводжується абразивним зношуванням, динамічними навантаженнями і впливом агресивних середовищ. Навіть незначні відхилення від номінальних геометричних параметрів деталей із твердосплавних сталей спричиняють каскадні дефекти та передчасні відмови, тоді як традиційні методи контролю не забезпечують належної точності та оперативності. Обґрунтовано доцільність використання 3D-сканування як сучасного інструмента діагностики та відновлення, що відповідає тенденціям цифровізації виробництва і переходу до превентивних стратегій технічного обслуговування.

Мета статті полягає в науковому та практичному обґрунтуванні застосування технологій 3D-сканування для діагностики та відновлення геометрії зношених деталей із твердосплавних сталей з урахуванням особливостей сільськогосподарського машинобудування.

Методологія дослідження базується на застосуванні системного підходу і загальнонаукових методів аналізу та синтезу, що забезпечило комплексне вивчення проблеми. Використано методи порівняння, узагальнення та абстрагування для оцінки ефективності традиційних і цифрово інтегрованих технологій відновлення. Здійснено критичний огляд наукових джерел і узагальнено практичний досвід ремонтних підприємств, що дало змогу сформулювати рекомендації щодо впровадження 3D-сканування у виробничі процеси.

Результати дослідження отримано у вигляді доведення ефективності 3D-сканування як інструмента, здатного забезпечити високу точність діагностики та контроль відновлення деталей. Показано, що створення цифрових моделей поверхонь надає можливість формувати карти зношування, відтворювати початкову геометрію та інтегрувати результати в CAD/CAM-системи. Виявлено, що поєднання цифрових технологій із традиційними ремонтними процесами підвищує точність, індивідуалізацію та відтворюваність результатів, скорочуючи водночас матеріальні витрати.

Висновки сформульовано щодо доцільності застосування 3D-сканування як засобу підвищення точності діагностики, оптимізації ремонтно-відновлювальних процесів і зменшення витрат на технічне обслуговування. Виявлено проблеми впровадження, що пов'язані з високою вартістю обладнання, потребою у кваліфікованих кадрах, чутливістю до виробничих умов та складністю інтеграції в наявні технологічні маршрути.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням методів сканування в складних виробничих умовах, розробленням більш доступних портативних систем, оптимізацією алгоритмів обробки великих масивів даних і створенням інтегрованих цифрових платформ моніторингу, зорієнтованих на превентивні стратегії ремонту та підвищення ресурсу машинно-тракторного парку.

Ключові слова: машинно-тракторний парк, технічна діагностика, цифрові технології, ремонтно-відновлювальні процеси, превентивне обслуговування, технічний сервіс, корозія, довговічності деталей, відновлення деталей, 3D-сканування.

Постановка проблеми. Проблема діагностики та відновлення геометрії зношених деталей із твердосплавних сталей набуває актуальності в умовах інтенсивної експлуатації сільськогосподарської техніки. Постійний вплив абразивних частинок ґрунту, динамічні навантаження та агресивні середовища призводять до прискореного зносу робочих органів і вузлів машин, що знижує їхню продуктивність і надійність. Використання традиційних методів контролю зношення не завжди дає змогу своєчасно та точно оцінити втрату геометрії, що ускладнює прийняття рішень щодо доцільності відновлення чи заміни деталей. Технології 3D-сканування відкривають нові можливості для об'єктивного аналізу стану поверхонь і визначення ступеня зношування з високою точністю. Це створює умови для відтворення первинної геометрії деталей, підвищення ефективності ремонтно-відновлювальних процесів і зменшення витрат на технічне обслуговування. Наукове значення проблеми полягає в пошуку шляхів інтеграції сучасних цифрових технологій у практику технічної експлуатації, що сприятиме формуванню нових підходів до продовження строку служби машинно-тракторного парку. Практичний аспект визначається можливістю впровадження 3D-сканування як інструмента для підвищення точності ремонту та підвищення економічної ефективності аграрного виробництва. Таким чином, зазначена проблематика безпосередньо пов'язана з актуальними завданнями машинобудування та механізації сільськогосподарського виробництва, зорієнтованими на підвищення надійності й довговічності техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних досліджень використання 3D-сканування для діагностики та відновлення геометрії зношених деталей із твердосплавних сталей дає змогу виокремити чотири взаємопов'язані напрями. Перший напрям стосується відтворення реальної геометрії сталевих елементів і використання її для оцінювання залишкової міцності та довговічності. Так, Л. Ф. Сяо (L. F. Xiao), Дж. Х. Пен (J. X. Peng), Дж. Р. Чжан (J. R. Zhang) та співавтори показали, що відтворення фактичної геометрії корозійованих зразків сталі допомагає точніше оцінювати механічні властивості та довговічність у порівнянні з ідеалізованими моделями [1]. Водночас З. Лі (Z. Li), К. Чжан (Q. Zhang), Ф. Ши (F. Shi) та співавтори довели, що 3D-лазерне сканування забезпечує можливість ідентифікації дефектів, які є критичними для стійкості та витривалості сталевих конструкцій [2].

Натомість П. Трибала (P. Trybała), Й. Блаховський (J. Blachowski), Р. Блажей (R. Błażej) та співавтори підтвердили, що аналіз хмар точок дає змогу виявляти локальні пошкодження поверхонь, які безпосередньо впливають на процес зношування [3]. У своєму дослідженні Г. Цортзініс (G. Tzortzinis), К. Ай (C. Ai), С. Ф. Брена (S. F. Breña) та співавтори використали сканування для оцінювання залишкової несучої здатності корозійованих мостових балок, поєднуючи результати експериментів, числових моделей і аналітики [4]. Перспективним є створення уніфікованих підходів, що інтегруватимуть дані сканування в розрахункові моделі витривалості та стійкості твердосплавних сталей.

Другий напрям стосується вивчення впливу параметрів сканування та відновлювальних технологій на мікроструктуру і довговічність матеріалу. Так, Х. Чжао (X. Zhao), С. Дун (S. Dong), С. Янь (S. Yan) та співавтори виявили, що траєкторії сканування під час лазерного наплавлення визначають еволюцію мікроструктури сталі 24CrNiMo та її експлуатаційну стійкість [5]. У своїй праці Д. Сюй (D. Xu), Й. Ван (Y. Wang), С. Лю (X. Liu) та співавтори розробили методику визначення початкових геометричних недосконалостей сталевих елементів за результатами сканування, що має значення для прогнозування стійкості [6]. Науковці Г. Ван (G. Wang), Й. Ма (Y. Ma), Л. Ван (L. Wang), Дж. Чжан (J. Zhang) та інші, показали, що використання даних 3D-сканування дає змогу виконати залишковий втомний аналіз дрітків високої міцності після корозії [7]. Водночас П. Тьягі (P. Tyagi), Т. Гуле (T. Goulet), К. Різо (C. Riso) та співавтори довели, що хімічне полірування адитивно виготовлених сталевих компонентів зменшує шорсткість і покращує відтворення геометрії [8]. Подальші дослідження мають бути спрямовані на сумісний аналіз мікроструктурних і геометричних змін, зафіксованих у процесах відновлення твердосплавних деталей.

Третій напрям зосереджений на алгоритмічній обробці хмар точок і побудові цифрових двійників для контролю стану конструкцій і супроводу відновлення. Дослідники Л. Ян (L. Yang), Дж. С. Чен (J. C. Cheng), К. Ван (Q. Wang) розробили метод напівавтоматизованого формування BIM-моделей (Building Information Modeling) сталевих конструкцій на основі даних сканування [9]. Натомість А. Халім (A. Haleem), П. Гупта (P. Gupta), С. Бахл (S. Bahl) та співавтори виявили проблеми в процесі оцифрування складних корпусних деталей і запропонували шляхи мінімізації похибок

[10]. Науковці К. Рауш (C. Rausch), Р. Лу (R. Lu), С. Талебі (S. Talebi), К. Хаас (C. Haas) підтвердили, що створення цифрових двійників на основі сканування підвищує ефективність контролю у виробничих процесах [11]. Автори Х. Х. Хосамо (H. H. Hosamo), М. Х. Хосамо (M. H. Hosamo) у своїй роботі акцентували на ролі 3D-лазерного сканування як бази для цифрових двійників у технічному обслуговуванні мостів [12]. Перспективними є дослідження з інтеграції сканування з інтелектуальними системами керування для створення повноцінних цифрових двійників твердосплавних деталей.

Четвертий напрям пов'язаний із підвищенням точності вимірювань та стандартизацією протоколів сканування. Так, С. Вакар (S. Waqar), К. Го (K. Guo), Дж. Сунь (J. Sun) дослідили вплив попереднього підігріву та повторного сканування при селективному лазерному плавленні сталі 316L на залишкові напруження та геометричну стабільність [13]. Дослідники А. М. Маринюк (A. M. Mariniuc), Д. Кожокару (D. Cojocaru), М. М. Абаджіу (M. M. Abagiu) показали можливості машинного навчання в автоматизованій обробці 3D-даних для виявлення поверхневих дефектів [14]. У своєму дослідженні С. Аффатато (S. Affatato), А. Руджієро (A. Ruggiero), С. Логоццо (S. Logozzo) запропонували протокол відтворюваних вимірювань за допомогою 3D-сканерів для оцінки перенесення металевих частинок на біокомпоненти, що є релевантним і для сталевих поверхонь [15]. Важливим доповненням стали результати Т. С. Скобла (T. S. Skoblo), А. І. Сідашенка (A. I. Sidashenko), С. П. Романюка (S. P. Romanuk), А. А. Гончаренка (A. A. Goncharenko) та співавторів, які розкрили специфіку структуроутворення під час модифікації покриттів на виробках із дисперсійно-зміцнених сталей [16]. Подальші дослідження мають бути зорієнтовані на створення уніфікованих стандартів точності та процедур scan-to-repair, які враховуватимуть особливості твердосплавних сталей.

Таким чином, ці дослідження формують комплексне наукове підґрунтя для використання 3D-сканування в діагностиці та відновленні зношених деталей із твердосплавних сталей.

Попри наявні дослідження у сфері технічної діагностики та відновлення деталей машинно-тракторного парку, не вирішеною залишається низка важливих аспектів. Недостатньо вивченим є вплив точності геометричних параметрів на довговічність деталей із твердосплавних сталей у реальних умовах експлуатації. Обмеже-

ним є розуміння можливостей 3D-сканування як комплексного інструмента для діагностики та відновлення, особливо в контексті його інтеграції з традиційними ремонтними технологіями. Виявлено брак системних досліджень, що спрямовані на аналіз проблем впровадження 3D-сканування у виробничих умовах, зокрема щодо високої вартості обладнання, нестачі кадрів та організаційних бар'єрів.

Запропоноване дослідження спрямовано на заповнення цих прогалин шляхом обґрунтування ролі геометричної точності в забезпеченні працездатності деталей, характеристики потенціалу 3D-сканування як діагностичного та відновлювального інструмента, а також аналізу його синергії з традиційними методами ремонту. У запропонованому дослідженні сформульовано рекомендації щодо практичного застосування технології, що дає змогу подолати виявлені обмеження та створити підґрунтя для впровадження превентивних стратегій обслуговування машинно-тракторного парку, розширюючи як наукове, так і практичне розуміння проблеми.

Мета статті полягає в розкритті наукових і практичних засад застосування технологій 3D-сканування для діагностики та відновлення геометрії зношених деталей із твердосплавних сталей з урахуванням особливостей сільськогосподарського машинобудування.

Завдання статті:

1) обґрунтувати значення точності геометрії деталей із твердосплавних сталей для забезпечення їхньої працездатності та довговічності, а також схарактеризувати можливості 3D-сканування як інструмента діагностики та відновлення;

2) проаналізувати ефективність поєднання цифрових технологій контролю з традиційними ремонтно-відновлювальними процесами та виявити головні проблеми й обмеження їх впровадження у виробничих умовах;

3) сформулювати практичні рекомендації щодо інтеграції 3D-сканування в систему технічного обслуговування та ремонту машинно-тракторного парку з урахуванням перспектив цифровізації.

Виклад основного матеріалу. Збереження точності геометричних параметрів деталей із твердосплавних сталей є ключовим чинником забезпечення їхньої працездатності, оскільки навіть незначні відхилення у формах і розмірах призводять до нерівномірного розподілу навантажень, підвищення контактних напружень і при-

скореного розвитку дефектів. У сільськогосподарському машинобудуванні такі деталі працюють у жорстких умовах інтенсивного абразивного зношування та вібраційних навантажень, що робить їх чутливими до втрати первинної геометрії. Відновлення початкових параметрів дає змогу не лише продовжити строк служби, а й забезпечити стабільність технологічних процесів, пов'язаних із роботою машинно-тракторного парку (табл. 1).

Відхилення від номінальних геометричних параметрів у деталях із твердосплавних сталей спричиняють каскадні наслідки, які безпосередньо впливають на працездатність вузлів. Зміна діаметра робочих поверхонь порушує точність посадок, створюючи підвищене тертя та локальні перевантаження. Втрата кутової точності ріжучих кромок призводить до зниження енергоефективності процесу, посилюючи вібраційні навантаження та зношування суміжних елементів. Відхилення від площинності контактних поверхонь зумовлює нерівномірний розподіл сил, що проявляється в розвитку мікротріщин і появі локальних зон руйнування. Недотримання співвісності отворів негативно позначається на роботі підшипникових вузлів і спричиняє прискорене спрацювання валів і втулок [7]. Отже, точність геометрії постає базовою передумовою довговічності та безвідмовності машинно-тракторних агрегатів, а її збереження є одним із ключових завдань сучасного сільськогосподарського машинобудування.

3D-сканування поступово перетворюється на універсальний інструмент технічної діагностики та відновлення зношених деталей із твердосплавних сталей, адже воно дає змогу комплексно відтворити геометрію об'єкта без застосування трудомістких традиційних методів вимірювання. Суть підходу полягає у створенні цифрової копії поверхні з високою роздільною здатністю, що відкриває можливість як для детального аналізу

характеру зношування, так і для формування відновлювальних стратегій. Це забезпечує перехід від суб'єктивних візуальних оцінок до кількісного аналізу, який ґрунтується на об'єктивних даних і допомагає приймати виважені рішення щодо доцільності ремонту чи заміни деталей (табл. 2).

Можливості 3D-сканування виходять далеко за межі традиційного вимірювального контролю. Завдяки створенню високоточних цифрових моделей воно дає змогу отримувати повний спектр інформації про стан деталі: від глобальних відхилень геометрії до мікродефектів поверхні. В аграрній практиці це означає, що вже після першого циклу експлуатації можна зафіксувати карту зношування, визначити найбільш уразливі зони та оцінити ресурс залишкової працездатності. Сучасні портативні сканери дають змогу проводити діагностику безпосередньо у виробничих майстернях або навіть у польових умовах, що мінімізує прості техніки.

Ще однією вагомою перевагою є інтеграція цифрових моделей у CAD/CAM-системи. Це надає можливість будувати траєкторії для відновлювального наплавлення чи фрезерування з урахуванням фактичного стану деталі, а не за усередненими еталонними параметрами [12]. Таким чином, ремонт стає індивідуалізованим, а його якість – відтворюваною. У випадку ґрунтообробних знарядь, наприклад, плугів або лап культиваторів, це дає змогу не лише відновити початкову геометрію, а й оптимізувати її з урахуванням специфіки ґрунтів, на яких працює господарство.

Накопичення даних сканування створює цифрові бази, які можна використовувати для прогнозування характеру зношування в майбутньому та розроблення профілактичних стратегій технічного обслуговування. Це відповідає світовим трендам розвитку концепції «розумного» сервісу та переходу від реактивного до превентивного ремонту.

Таблиця 1

Вплив точності геометричних параметрів на працездатність деталей із твердосплавних сталей

Геометричний параметр	Відхилення від номіналу	Наслідки для працездатності	Методи контролю та відновлення
Діаметр робочих поверхонь	$\pm 0,2-0,5$ мм	Порушення посадки, підвищене тертя, передчасний знос	3D-сканування, відновлювальне наплавлення, шліфування
Кутові параметри ріжучих кромок	$1-3^\circ$	Зниження ефективності різання, зростання енергоспоживання	Лазерне сканування, корекція профілю, напайка пластин
Площинність контактних поверхонь	$0,05-0,1$ мм	Нерівномірний розподіл навантаження, локальні руйнування	3D-контроль, шліфування, локальне наплавлення
Співвісність отворів	$0,1-0,3$ мм	Порушення центрування, підвищений знос підшипників	Сканування, координатно-відновлювальні операції

Джерело: сформовано на основі [1, с. 129–136; 2; 6, с. 855–874; 7].

Таким чином, 3D-сканування постає не лише діагностичним засобом, а й центральним елементом цифровізації життєвого циклу машинно-тракторних деталей.

Інтеграція цифрових технологій у сферу ремонтно-відновлювальних робіт відкриває нові можливості для підвищення ефективності процесів, що традиційно базувалися на досвіді фахівців і візуальних методах оцінки. Поєднання тривимірного сканування, комп'ютерного моделювання та систем управління відновленням із класичними методами наплавлення, механічної обробки і термічного зміцнення забезпечує новий рівень точності та відтворюваності результатів. Такий підхід дає змогу мінімізувати похибки, скоротити тривалість ремонтного циклу та знизити витрати на технічне обслуговування. Водночас ключовим завданням постає гармонійне поєднання переваг цифрових технологій із перевіреними практиками відновлення, що визначає сучасні тенденції розвитку сільськогосподарського машинобудування (табл. 3).

У сучасних умовах господарства, що застосовують цифрово інтегровані технології, отримують можливість значно підвищити ефективність відновлення техніки. Так, поєднання 3D-сканування з процесами наплавлення допомагає не лише точно відтворювати геометрію деталей, а й оптимізувати витрати на матеріали, що особливо важливо за умов високих цін на твердосплавні порошки та електроди. Інтеграція CAD-моделювання в процеси механічної обробки дає змогу налаштовувати індивідуальні режими ремонту для кожної деталі, враховуючи її історію експлуатації та характер дефектів. Використання цифрового контролю якості в поєднанні з термічними методами обробки забезпечує стабільність механічних характеристик і довговічність відновлених елементів. Перспективним є створення баз даних сканувань, які надають можливість прогнозувати майбутні відмови та розробляти графіки превентивного обслуговування. Так, синергія цифрових технологій і традиційних ремонтних процесів

Таблиця 2

Можливості 3D-сканування в діагностиці та відновленні геометрії деталей

Напрямок застосування	Характеристика можливостей	Очікуваний результат	Приклади практичного використання
Геометрична діагностика	Вимірювання відхилень від номіналу з точністю до 0,01 мм	Виявлення прихованих дефектів і нерівномірного зносу	Оцінка стану ріжучих кромок культиваторних лап
Аналіз зони зношування	Формування карт зношування за кольоровими шкалами	Визначення локальних ділянок підвищених навантажень	Моніторинг зношення плугів після польових робіт
Відтворення 3D-моделі	Створення цифрового двійника деталі для подальшої обробки	Підготовка до відновлювального наплавлення або друку	Розробка індивідуальних ремонтних програм
Контроль відновлення	Порівняння відновленої деталі з еталонною моделлю	Забезпечення точності відновлених геометричних параметрів	Контроль якості після шліфування або наплавлення

Джерело: сформовано на основі [3; 4; 9; 11, с. 565–578; 12; 14].

Таблиця 3

Ефективність поєднання цифрових технологій контролю з традиційними методами ремонту

Компонент поєднання	Характеристика взаємодії	Результат для ремонтного процесу	Приклади застосування
3D-сканування + наплавлення	Використання цифрової моделі для формування траєкторій наплавлення	Висока точність відновлення, зменшення перевитрати матеріалів	Відновлення ріжучих кромок сошників і лап
CAD-моделювання + механічна обробка	Підготовка коригованої моделі з урахуванням фактичних відхилень	Індивідуалізація ремонту, підвищення ресурсу відновленої деталі	Шліфування та фрезерування дисків борін
Цифровий контроль якості + термообробка	Порівняння відновленої деталі з еталонною геометрією	Стабільність механічних властивостей, зменшення браку	Азотування та гартування відновлених осей
База даних сканувань + планування технічного обслуговування	Аналіз накопичених даних для прогнозування зношування	Перехід від реактивного до превентивного ремонту	Планування циклів відновлення культиваторних лап

Джерело: сформовано на основі [5; 8, с. 2895–2900; 10, с. 331–337; 13; 15].

формує нову модель технічної експлуатації, орієнтовану на точність, економічність і довгострокову надійність сільськогосподарської техніки.

Впровадження технологій 3D-сканування у виробничих умовах супроводжується низкою проблем та обмежень, що стримують їх широке застосування. Одним із ключових бар'єрів постає висока вартість обладнання та програмного забезпечення, що є особливо відчутним для невеликих ремонтних підприємств і фермерських господарств, де обмежені бюджети не дають змогу інвестувати в складні цифрові системи [10]. Не менш суттєвим обмеженням є потреба у кваліфікованих кадрах: для роботи зі сканерами та CAD/CAM-системами потрібні спеціалісти з відповідними компетентностями, тоді як більшість ремонтних майстерень зорієнтовані на традиційні методи [9; 12]. Додаткову складність становлять умови експлуатації обладнання, оскільки сканери є чутливими до забруднень, вібрацій і нестабільного освітлення, що знижує точність отриманих моделей у реальних цехових або польових умовах [3; 4]. Важливою проблемою залишається також інтеграція результатів сканування у виробничі процеси: для ефективного використання необхідним є узгодження з наявними технологічними маршрутами, що вимагає модернізації обладнання та адаптації програмного забезпечення [5]. Особливої уваги потребує питання збереження та обробки великих масивів даних, адже цифрові моделі деталей займають значні обсяги пам'яті та потребують надійної інфраструктури для зберігання і захисту інформації [14]. Окрім того, для аграрного сектору характерним є нерівномірний доступ до сучасних цифрових технологій у різних регіонах, що поглиблює цифрову нерівність і обмежує швидкість поширення інновацій.

Практичне застосування 3D-сканування в системі технічного обслуговування та ремонту машинно-тракторного парку доцільно будувати на поєднанні його діагностичних можливостей із наявними виробничими процесами. Насамперед сканування варто використовувати для регулярного контролю найбільш навантажених деталей, де точність геометрії критично визначає працездатність вузлів. Це дасть змогу своєчасно виявляти відхилення від номінальних параметрів і планувати ремонтні заходи на етапі, коли ще можна уникнути аварійних відмов. Оптимальним напрямом є інтеграція результатів сканування в CAD/CAM-системи, що забезпечує автоматизовану підготовку відновлювальних програм для наплавлення, фрезерування чи шліфування з урахуванням фактичного

стану деталі. Рекомендовано формувати цифрові бази сканованих моделей, які використовуватимуться не лише для контролю, а й для прогнозування характеру зношування та планування превентивного технічного обслуговування. Доцільним є поступове впровадження портативних сканерів у ремонтних майстернях і сервісних центрах, що дасть змогу проводити діагностику безпосередньо на місці експлуатації техніки. Особливу увагу варто приділити підготовці персоналу: ефективність використання 3D-сканування значною мірою залежить від здатності фахівців інтерпретувати результати та інтегрувати їх у ремонтні процедури. Таким чином, практична реалізація 3D-сканування в системі технічного обслуговування має бути спрямована на підвищення точності діагностики, індивідуалізацію відновлювальних робіт і створення основи для переходу від реактивного ремонту до превентивних стратегій управління життєвим циклом машинно-тракторного парку.

Висновки. У дослідженні встановлено, що збереження точності геометричних параметрів деталей із твердосплавних сталей є фундаментальною умовою їхньої працездатності та довговічності. Відхилення від номінальних значень формують каскадні дефекти, які прискорюють зношування та знижують надійність машинно-тракторних агрегатів. Це зумовлює необхідність застосування високоточних методів контролю, здатних забезпечити об'єктивну оцінку стану деталей у реальних виробничих умовах.

Доведено ефективність 3D-сканування як універсального інструмента діагностики та відновлення. Створення цифрових моделей поверхонь дає змогу комплексно аналізувати характер зношування, формувати карти дефектів, інтегрувати результати в CAD/CAM-системи та готувати індивідуалізовані програми відновлення. Це забезпечує підвищення точності ремонтних операцій, зменшення витрат на матеріали і подовження ресурсу відновлених деталей.

Водночас окреслено коло проблем, що обмежують широке впровадження технології, серед яких: висока вартість обладнання та програмного забезпечення; потреба в спеціалізованій підготовці персоналу; чутливість сканерів до виробничих умов; складність інтеграції в традиційні технологічні процеси; необхідність зберігання значних масивів цифрових даних. Для аграрного сектору додатковим викликом є цифрова нерівність між регіонами, що уповільнює поширення інновацій.

Рекомендовано впроваджувати 3D-сканування поетапно, починаючи з найбільш критичних дета-

лей, створювати цифрові бази для прогнозування зношування та планування превентивного технічного обслуговування, а також інтегрувати результати сканування в CAD/CAM-середовища для автоматизації ремонтно-відновлювальних процесів. Перспективи подальших досліджень пов'язані

з удосконаленням методів сканування у складних виробничих умовах, розробкою доступних портативних пристроїв, оптимізацією алгоритмів обробки великих масивів даних і створенням інтегрованих систем моніторингу стану деталей, зорієнтованих на превентивні стратегії ремонту.

Список літератури:

1. Xiao L. F., Peng J. X., Zhang J. R., Cai C. S. Mechanical properties of corroded high performance steel specimens based on 3D scanning. *Advanced Steel Construction*. 2019. Vol. 15, № 2. P. 129–136. DOI: <https://doi.org/10.18057/IJASC.2019.15.2.2>.
2. Li Z., Zhang Q., Shi F., Wang J., Pasternak H. Geometric properties of steel components with stability and fatigue risks using 3D-laser-scanning. *Buildings*. 2024. Vol. 14, № 1. Article 168. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14010168> (date of access: 08.09.2025).
3. Trybała P., Blachowski J., Błażej R., Zimroz R. Damage detection based on 3D point cloud data processing from laser scanning of conveyor belt surface. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 13, № 1. Article 55. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13010055> (date of access: 08.09.2025).
4. Tzortzinis G., Ai C., Breña S. F., Gerasimidis S. Using 3D laser scanning for estimating the capacity of corroded steel bridge girders: experiments, computations and analytical solutions. *Engineering Structures*. 2022. Vol. 265. Article 114407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114407> (date of access: 08.09.2025).
5. Zhao X., et al. The effect of different scanning strategies on microstructural evolution to 24CrNiMo alloy steel during direct laser deposition. *Materials Science and Engineering: A*. 2020. Vol. 771. Article 138557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138557> (date of access: 07.09.2025).
6. Xu D., Wang Y., Liu X., Chen B., Bu Y. A novel method and modelling technique for determining the initial geometric imperfection of steel members using 3D scanning. *Structures*. 2023. Vol. 49. P. 855–874. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.01.136> (date of access: 08.09.2025).
7. Wang G., Ma Y., Wang L., Zhang J. Experimental study and residual fatigue life assessment of corroded high-tensile steel wires using 3D scanning technology. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 124. Article 105335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105335> (date of access: 08.09.2025).
8. Tyagi P., Goulet T., Riso C., Garcia-Moreno F. Reducing surface roughness by chemical polishing of additively manufactured 3D printed 316 stainless steel components. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 100. P. 2895–2900. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2890-0> (date of access: 08.09.2025).
9. Yang L., Cheng J. C., Wang Q. Semi-automated generation of parametric BIM for steel structures based on terrestrial laser scanning data. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 112. Article 103037. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103037> (date of access: 08.09.2025).
10. Haleem A., Gupta P., Bahl S., Javaid M., Kumar L. 3D scanning of a carburetor body using COMET 3D scanner supported by COLIN 3D software: issues and solutions. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 39. P. 331–337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.427> (date of access: 08.09.2025).
11. Rausch C., Lu R., Talebi S., Haas C. Deploying 3D scanning based geometric digital twins during fabrication and assembly in offsite manufacturing. *International Journal of Construction Management*. 2023. Vol. 23, № 3. P. 565–578. DOI: <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1896942> (date of access: 08.09.2025).
12. Hosamo H. H., Hosamo M. H. Digital twin technology for bridge maintenance using 3D laser scanning: a review. *Advances in Civil Engineering*. 2022. Vol. 2022, № 1. Article 2194949. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/2194949> (date of access: 08.09.2025).
13. Waqar S., Guo K., Sun J. Evolution of residual stress behavior in selective laser melting (SLM) of 316L stainless steel through preheating and in-situ re-scanning techniques. *Optics & Laser Technology*. 2022. Vol. 149. Article 107806. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107806> (date of access: 08.09.2025).
14. Mariniuc A. M., Cojocaru D., Abagiu M. M. Building surface defect detection using machine learning and 3D scanning techniques in the construction domain. *Buildings*. 2024. Vol. 14, № 3. Article 669. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14030669> (date of access: 08.09.2025).
15. Affatato S., Ruggiero A., Logozzo S. Metal transfer evaluation on ceramic biocomponents: a protocol based on 3D scanners. *Measurement*. 2021. Vol. 173. Article 108574. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108574> (date of access: 08.09.2025).
16. Skoblo T. S., Sidashenko A. I., Romanyuk, S. P. Goncharenko, A. A., Omel'chenko L. V., Bantkovskii V. A. Specific features of structure formation in the course of modification of the coatings on products made of dispersion-hardened steels. *Materials Science*. 2020. Vol. 55, № 6. P. 884–891. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00383-4>

Rohanin M.V., Honcharenko O.O. APPLICATION OF 3D SCANNING FOR DIAGNOSTICS AND RESTORATION OF THE GEOMETRY OF WORN HARD-ALLOY STEEL PARTS

The relevance of this study is determined by the need to improve the reliability and durability of the machine and tractor fleet under conditions of intensive operation, which involve abrasive wear, dynamic loads, and exposure to aggressive environments. Even minor deviations from the nominal geometric parameters of hard alloy steel parts lead to cascading defects and premature failures, while traditional control methods do not provide sufficient accuracy or timeliness. The study substantiates the feasibility of using 3D scanning as a modern tool for diagnostics and restoration, consistent with current trends in production digitalization and the shift toward preventive maintenance strategies.

The purpose of the article is to provide scientific and practical justification for the use of 3D scanning technologies to diagnose and restore the geometry of worn hard alloy steel parts, taking into account the specifics of agricultural machinery manufacturing.

The research methodology is based on a systems approach and general scientific methods of analysis and synthesis, which enabled a comprehensive examination of the problem. Methods of comparison, generalization, and abstraction were applied to evaluate the effectiveness of traditional and digitally integrated restoration technologies. A critical review of scientific sources was conducted, and the practical experience of repair enterprises was summarized, which made it possible to develop recommendations for introducing 3D scanning into production processes.

The results of the study demonstrate the effectiveness of 3D scanning as a tool capable of providing high diagnostic accuracy and control of part restoration. It was shown that creating digital surface models makes it possible to generate wear maps, reconstruct the original geometry, and integrate the results into CAD/CAM systems. It was revealed that combining digital technologies with traditional repair processes enhances accuracy, customization, and reproducibility of outcomes, while at the same time reducing material costs.

The conclusions highlight the feasibility of applying 3D scanning to increase diagnostic accuracy, optimize repair and restoration processes, and reduce maintenance costs. Implementation challenges were identified, including high equipment costs, the need for qualified personnel, sensitivity to production conditions, and difficulties in integrating into existing technological routes.

Future research prospects are related to improving scanning methods under complex production conditions, developing more affordable portable systems, optimizing algorithms for processing large data sets, and creating integrated digital monitoring platforms focused on preventive repair strategies and extending the service life of the machine and tractor fleet.

Key words: machine and tractor fleet, technical diagnostics, digital technologies, repair and restoration processes, preventive maintenance, technical service, corrosion, durability of parts, restoration of parts, 3D scanning.

Дата надходження статті: 05.09.2025

Дата прийняття статті: 23.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025