

Фадєєв Андрій Валерійович, докторант кафедри Технології машинобудування та металорізальних верстатів, +38(067)570-58-10, fan17@gmail.com
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002

ЗВ'ЯЗОК ЦИФРОВІЗАЦІЇ З ВІДНОВЛЕННЯМ ДЕТАЛЕЙ У СУЧАСНОМУ МАШИНОБУДУВАННІ

***Анотація.** Машинобудування активно переходить до цифрових та автоматизованих підходів. Це пов'язано з необхідністю підвищення точності виробництва, скорочення часу ремонту та зменшення витрат матеріалів. Важливе місце в цьому процесі займає відновлення деталей, оскільки повна заміна зношених елементів не завжди є економічно доцільною. Під час експлуатації деталі зазнають знесення, деформацій, корозії, тріщин та інших пошкоджень. Для їх якісного відновлення потрібно точно визначити технічний стан, характер дефектів, їх розміри та вплив на подальшу роботу. Саме тому у ремонті дедалі частіше застосовують 3D-сканування, CAD/CAM/CAE-системи, комп'ютерне моделювання та цифровий контроль якості. Одним із перспективних інструментів є цифровий двійник – віртуальне представлення реального об'єкта, що дозволяє аналізувати його стан, відстежувати зміни та приймати технічні рішення. У процесі відновлення деталей цифровий двійник може об'єднувати інформацію про геометрію, зношення, результати дефектації, вибір технології ремонту та контроль після відновлення.*

Застосування цифрових двійників робить ремонт більш точним та обґрунтованим. Пошкоджена деталь сканується, створюється її цифрова модель, яка порівнюється з вихідною геометрією. Після цього визначаються зони зношування та вибирається раціональний спосіб відновлення.

Цифрові двійники дозволяють поєднати дефектацію, 3D-сканування, CAD/CAM/CAE-моделювання, вибір технології відновлення та контроль якості в єдиний процес. Це особливо важливо для складних і дорогих деталей, де помилка під час ремонту може вплинути на надійність усієї машини.

***Ключові слова:** цифрові двійники, відновлення, 3D-сканування, технології, контроль, дефектація, зношена деталь*

Fadieiev Andrii, doctoral student, Department of «Technology of Mechanical Engineering and Metal-Cutting Machine Tools», +38(067)570-58-10, fan17@gmail.com
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2 Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002

RELATIONSHIP BETWEEN DIGITALIZATION AND PARTS RECOVERY IN MODERN MECHANICAL ENGINEERING

***Abstract.** Mechanical engineering will actively move towards digital and automated approaches. This is due to the need to increase production accuracy, reduce repair time and reduce material consumption. An important place in this process is occupied by the restoration of parts, since the complete replacement of worn elements is not always economically feasible. During operation, parts are subject to wear, deformation, corrosion, cracks and other damage. For their high-quality restoration, it is necessary to accurately determine the technical condition, nature of defects, their size*

and impact on further work. That is why 3D scanning, CAD/CAM/CAE systems, computer modeling and digital quality control are increasingly used in repair. One of the promising tools is a digital twin – a virtual representation of a real object, which allows analyzing its condition, tracking changes and making technical decisions. In the process of restoring parts, a digital twin can combine information about geometry, wear, defect detection results, selection of repair technology and post-repair control. The use of digital twins makes repairs more accurate and justified. The damaged part is scanned, a digital model is created, which is compared with the original geometry. After that, wear zones are identified and a rational repair method is selected.

Digital twins allow you to combine defect detection, 3D scanning, CAD/CAM/CAE modeling, selection of repair technology and quality control into a single process. This is especially important for complex and expensive parts, where an error during repair can affect the reliability of the entire machine.

Keywords: *digital twins, restoration, 3D scanning, technology, control, defect detection, worn part*

Постановка проблеми. Сучасне машинобудування є галуззю, де цифрові технології відіграють важливу роль. Сьогодні велике значення мають не лише обладнання та інструмент, а й цифрові моделі, програмне управління, автоматизоване проектування, комп'ютерний аналіз та виробничі дані.

Цифровізація змінює сам підхід до роботи з виробом. Зношену деталь можна спочатку створити в цифровому середовищі, перевірити її форму, міцність та технологічність, а потім використовувати ці дані для обробки на верстатах з ЧПК та контролю якості. Це знижує кількість помилок та прискорює підготовку виробництва.

Особливо важливими є цифрові технології для деталей, які вже експлуатувалися та отримали знос або пошкодження. Їх відновлення вимагає точної інформації про стан поверхні, геометрію, розміри і дефекти. Тому сучасний ремонт все частіше пов'язаний із 3D-скануванням, CAD/CAM/CAE-системами та цифровими двійниками.

Таким чином, цифрові технології поєднують проектування, виробництво, відновлення та контроль якості. Вони дозволяють розглядати деталь як об'єкт життєвого циклу, стан якого можна відстежувати, аналізувати та обґрунтовано відновлювати.

Аналіз основних досліджень та публікацій. Одним з головних напрямків сучасного машинобудування при відновленні зношених деталей є використання цифрових моделей. Деталь спочатку створюється у віртуальному середовищі, де задаються її геометрія, матеріал, розміри, допуски та умови роботи. Потім ця

модель застосовується для підготовки технологічного процесу, розрахунків, програмування обладнання та контролю якості відновлених деталей.[7; 9]

Важливу роль грають CAD/CAM/CAE-системи. CAD використовують для створення моделей та креслень, CAM – для підготовки обробки на верстатах з ЧПК, а CAE – для інженерних розрахунків. Це дозволяє заздалегідь перевірити технічні рішення та зменшувати ймовірність помилок. [7; 8]

Однак, проблеми технологічного забезпечення процесів відновлення деталей потребують подальшого вдосконалення.

Мета дослідження. Розглянути зв'язок цифровізації та застосування цифрових двійників у відновленні деталей машин та визначити їх роль у сучасному машинобудуванні.

Викладення основного матеріалу. Однією з головних ознак сучасного машинобудування є застосування CAD/CAM/CAE-систем. Вони дозволяють працювати з деталлю у цифровому середовищі: проектувати деталь, аналізувати її параметри та готувати виготовлення чи обробку.

CAD-системи використовують для створення цифрової моделі деталі (рис.1). Задаються форма, розміри, отвори, пази, фаски, поверхні та інша конструкторська інформація. Така модель є основою для розрахунків, підготовки обробки та контролю якості. [7; 9]

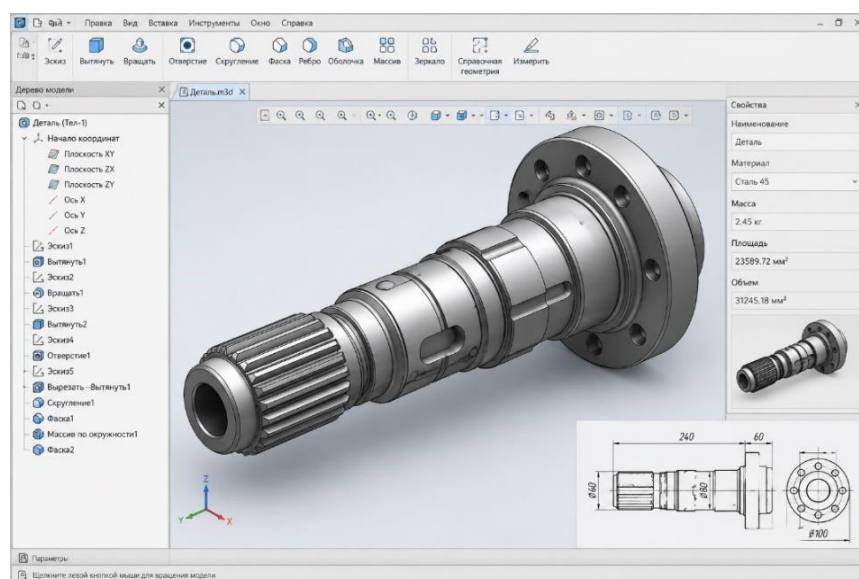


Рисунок 1 – Цифрова модель деталі в CAD-системі

САМ-системи використовують для підготовки технологічного процесу обробки (рис. 2) і застосовують після відновлення: наприклад, після напилення або адитивного нарощування, коли поверхню потрібно обробити до необхідного розміру і шорсткості. [8; 12]

САЕ-системи призначені для інженерного аналізу: оцінки міцності, напружень, деформацій, теплових процесів та впливу навантажень. При відновленні деталей це дозволяє перевірити, чи зможе відремонтована поверхня витримувати реальні умови експлуатації і чи стане вона слабким місцем конструкції. [7; 10]

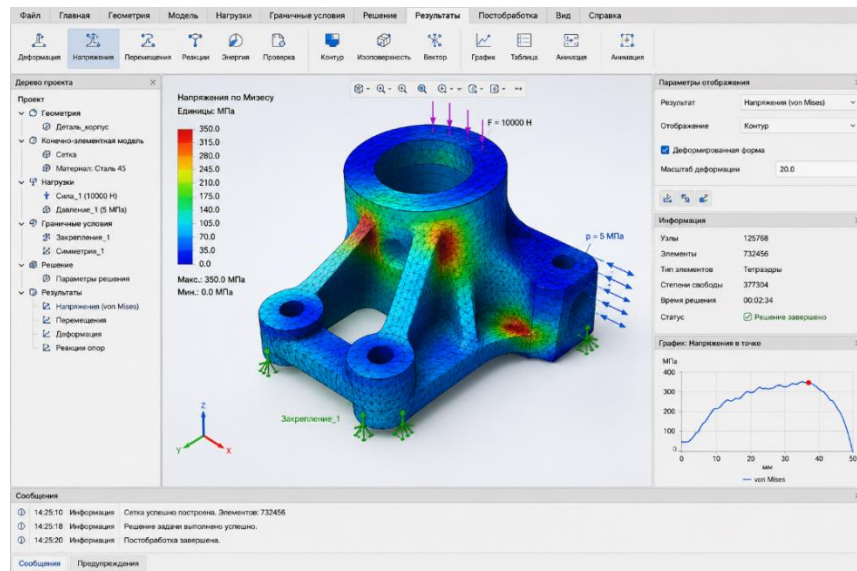


Рисунок 2 – Цифрова модель деталі в САМ-системі

CAD, CAM та CAE тісно пов'язані між собою. CAD створює цифрову модель, CAE перевіряє її поведінку під навантаженням, а CAM готує практичну обробку. Разом вони формують цифровий ланцюжок від проектування до виготовлення, контролю та ремонту, тому є важливою основою створення цифрового двійника деталі. [9; 11; 13]

Таким чином, CAD/CAM/CAE-технології забезпечують базу для цифровізації виробництва та відновлення деталей (таблиця 1). Вони дозволяють створити точну модель деталі, виконати розрахунки, підготувати обробку та

використовувати отримані дані для контролю якості. На основі цих даних можна формувати цифровий двійник, який допомагає відстежувати стан деталі, визначати зони зношування та вибирати раціональний спосіб відновлення.[7;8;9]

Таблиця 1 – Призначення CAD/CAM/CAE-систем у машинобудуванні

Система	Основне призначення	Значення відновлення деталей
CAD	Створення цифрової моделі деталі, збирання чи вузла	Дає еталонну геометрію, з якою можна порівнювати зношену чи відновлену деталь
CAM	Підготовка технологічного процесу обробки та керуючих програм для верстатів з ЧПК	Дозволяє розробити обробку деталі після наплавлення, напилення чи адитивного нарощування матеріалу
CAE	Інженерні розрахунки, аналіз міцності, навантажень, деформацій та температурних процесів	Допомагає оцінити працездатність деталі після відновлення та виявити можливі слабкі зони
САПР	Комплексна автоматизація проектування, розрахунків та підготовки виробництва	Об'єднує дані про конструкцію, розміри, матеріал і технологічні вимоги
Цифрова модель	Подання деталі в електронній формі	Служить основою для побудови цифрового двійника та аналізу стану деталі

CAD, CAM та CAE виконують різні функції, але разом утворюють єдину цифрову основу. CAD задає геометрію, CAM готує обробку, а CAE перевіряє надійність деталі. Ці дані можуть використовуватись для створення цифрового двійника та подальшого відновлення деталей машин.

Цифровізація важлива лише для відновлення деталей. Під час роботи деталі втрачають розміри, форму, якість поверхні та частину властивостей, тому перед відновленням потрібно точно визначити їхній фактичний стан.

Цифрові методи дозволяють оцінити деталь точніше: врахувати її геометрію, ушкодження та відхилення від вихідної форми (рис. 3).

Перед відновленням виконують дефектацію, тобто визначають дефекти, їх розміри, характер та вплив на подальшу роботу. Дані вимірювань, 3D-сканування та експлуатації можна поєднати в єдину інформаційну базу. [4] Особливо важливим є створення цифрової моделі зношеної деталі. Після сканування можна отримати її фактичну геометрію та визначити зони відновлення. Більш

розвиненою формою такої моделі є цифровий двійник, який поєднує геометрію, стан деталі, результати дефектації, дані про відновлення та подальший контроль. [1; 2]

Таким чином, цифрові дані дають змогу вибрати раціональний спосіб відновлення. Це дозволяє точніше оцінити стан деталі, обґрунтувати спосіб відновлення та проконтролювати результат, перетворюючи ремонт на частину цифрового управління життєвим циклом машин та обладнання. [1; 4; 6]

Деталі машин у процесі роботи зношуються під впливом навантажень, тертя, вібрацій, температури та робочого середовища. Це призводить до зміни розмірів, погіршення поверхні та зниження точності роботи механізму.

Основною причиною зносу часто є тертя у місцях контакту валів, втулок, зубів передач, напрямних та посадкових поверхонь. Воно викликає зняття матеріалу, зміну розмірів та порушення посадок. [4]



Рисунок 3 – Зв'язок реальної деталі з її цифровим двійником

Після виявлення дефектів визначають величину зношування деталі (рис. 4). Це допомагає зрозуміти відхилення від номінального розміру, можливість відновлення та вибрати спосіб ремонту [4].

Один із простих показників – діаметральне зношування. Він показує зміну діаметра деталі та застосовується для валів, осей, отворів, втулок та інших циліндричних поверхонь.

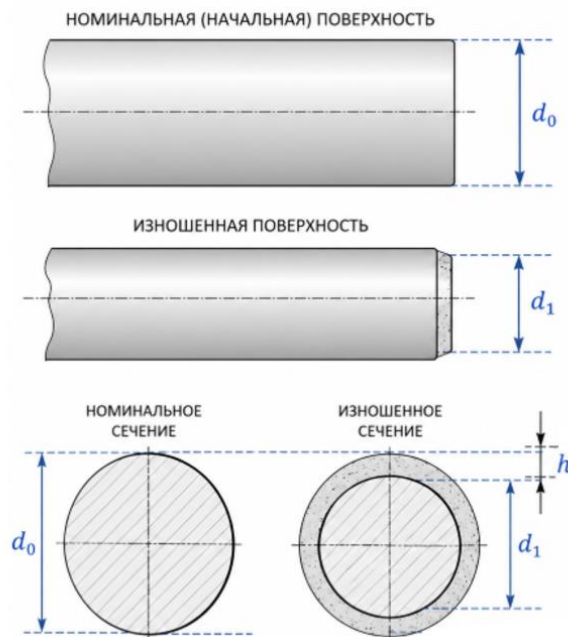


Рисунок 4 – Схема зносу циліндричної поверхні

Величину діаметрального зношування можна визначити за формулою:

$$\Delta d = d_0 - d_1$$

де Δd – величина діаметрального зношування, мм; d_0 – номінальний або початковий діаметр деталі, мм; d_1 – фактичний діаметр після зношування, мм.

Наприклад, якщо номінальний діаметр шийки валу становив 40 мм, а після експлуатації став 39,9 мм, то величина діаметрального зношування дорівнюватиме:

$$\Delta d = 40 - 39,9 = 0,1 \text{ мм.}$$

Це означає, що діаметр деталі зменшився на 0,1 мм. Однак для відновлення важливо враховувати не тільки загальну зміну діаметра, але й зношування на один бік поверхні. Для цього визначають радіальне зношування.

Радіальне зношування розраховують за такою формулою:

$$h = \frac{d_0 - d_1}{2}$$

де h – радіальне зношування, мм; d_0 – номінальний або початковий діаметр, мм; d_1 – фактичний діаметр після зношування, мм.

Якщо використати попередній приклад, то:

$$h = \frac{40 - 39,9}{2} - \frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ мм}$$

Тобто поверхня валу зносилася на 0,05 мм із кожного боку. Цей показник важливий при виборі товщини шару, що відновлюється: при напиленні потрібно враховувати не тільки величину зносу, але і припуск на подальшу механічну обробку.

У машинобудуванні застосовують традиційні та сучасні технології (табл. 2).

Таблиця 2 – Традиційні способи відновлення деталей машин

Спосіб відновлення	Суть методу	Де застосовується	Особливості
Механічна обробка під ремонтний розмір	Зняття пошкодженого шару та обробка до нового розміру	Вали, отвори, посадочні поверхні	Підходить при невеликому зносі
Наплавлення	Нанесення металевого шару на зношену поверхню	Вали, осі, робочі поверхні	Дозволяє відновити значне зношування, але дає тепловий вплив.
Напилення	Нанесення покриття на поверхню	Посадочні поверхні, деталі тертя	Менша теплова дія, можливість підвищення зносостійкості
Зварювання	Усунення тріщин, відколів, розривів	Корпусні деталі, локальні пошкодження	Потребує контролю деформацій та залишкової напруги
Втулювання	Встановлення ремонтної втулки у зношений отвір	Корпусні деталі, отвори під підшипники	Дозволяє відновити посадку без заміни всієї деталі
Відновлення посадок	Повернення потрібного зазору або натягу в з'єднанні	Вали, отвори, опори, підшипникові місця	Вимагає високої точності форми та розміру

Сучасні методи відновлення дозволяють точніше впливати на пошкоджену поверхню і не тільки повертати розміри, а й підвищувати зносостійкість, твердість та довговічність шару. [5]

Ці методи добре поєднуються з цифровим підходом: за даними 3D-сканування можна точно визначити зони зношування та спрямувати вплив саме на них. Це зменшує витрату матеріалу та підвищує точність ремонту.

Вибір способу відновлення залежить від матеріалу деталі, характеру дефекту, величини зношування, умов роботи, вимог до точності, вартості ремонту та очікуваного ресурсу. [4]

Цифровий підхід робить вибір технології більш обґрунтованим. Дані дефектації, 3D-сканування та цифрової моделі показують, де розташований знос, який обсяг матеріалу потрібно відновити та які поверхні вимагають обробки.

Адитивні та гібридні технології важливі для сучасного відновлення деталей. Адитивний підхід заснований на пошаровому додаванні матеріалу в потрібних зонах, що є особливо корисним для деталей складної форми.

Ці технології дозволяють локально відновлювати пошкоджені зони та використовувати дані цифрового аналізу для більш точного ремонту.

Цифровий двійник поєднує дефектацію, 3D-сканування, вибір технології відновлення та контроль якості. Це робить відновлення керованим процесом, що базується на фактичному стані деталі. [1; 2; 3]

Висновки. Цифрові двійники є перспективним інструментом сучасного машинобудування, особливо у відновленні деталей. Вони допомагають точніше оцінити стан виробу, визначити характер зношування та вибрати раціональний спосіб ремонту. У майбутньому вони зможуть як фіксувати стан деталі, так і пропонувати варіанти відновлення.

Відновлення деталей дозволяє продовжити термін служби машин та знизити витрати, але потребує попереднього аналізу пошкоджень, величини зносу та можливості подальшої експлуатації.

Цифровий двійник поєднує дані дефектації, 3D-сканування, CAD/CAM/CAE-моделювання та контролю якості. Завдяки цьому фахівець отримує цілісне уявлення про стан деталі, а не окремі виміри.

3D-сканування дозволяє порівняти фактичну геометрію зношеної деталі з еталонною САD-моделлю, визначити зони відхилень та ділянки, що потребують відновлення.

Таким чином, цифрові двійники пов'язують дефектацію, цифрове моделювання, вибір технології ремонту та контроль якості в єдину систему. Їхня головна перевага - перехід від ремонту «з досвіду» до ремонту на основі даних, що особливо важливо для складних та відповідальних деталей машин.

Після ремонту цифровий двійник може оновлюватися даними про геометрію, поверхню, контроль та умови експлуатації. Це дозволить прогнозувати ресурс та виявляти ознаки повторного зносу.

БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Титаренко В., Костецька С., Бабік К., Дворнік А., Юрко П. (2025). “Використання цифрових двійників для відновлення пошкоджених об’єктів елеваторних комплексів.” Наука та будівництво, 44(2). DOI:10.33644/2313-6679-2-2025-2 journal-ndibk.com.ua
2. Сулема Є. С. (2020). Методи, моделі та засоби обробки мультимодальних даних цифрових двійників (дисертація). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. ela.kpi.ua URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37251/1/Sulema_diss.pdf?utm_source=chatgpt.com
3. Мехович С. А. (2024). Вплив цифрових двійників і генеративного дизайну на інженерну діяльність. *Електронний журнал / кафедра електроенергетики та електроніки (ХПІ)*. URL: https://eee.khpi.edu.ua/article/view/323763/313891?utm_source=chatgpt.com
4. Спіфанова І. М. (2025). Вплив використання сучасних технологій на ефективність діяльності машинобудівних підприємств України. *Економіка та суспільство*. № 72. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-72-7>
5. Відновлення деталей методом плазмового наплення. URL: <https://promavtosvarka.kyiv.ua/plazmove-napylennya>
6. Використання портативних верстатів для ремонту і модернізації об’єктів важкого машинобудування / О. А. Пермяков, І. Е. Яковенко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали XX Міжнар. наук.-техн. конф., 01–03 верес. 2022 р. – Краматорськ-Тернопіль : ДДМА, 2022. С. 174–176.
7. Пермяков О. А. Реверсивний інжиніринг зношених деталей як альтернатива процесів їх відновлення / Пермяков О. А., Яковенко І. Е. // Нові технології в машинобудуванні : матеріали тридцять третьої всеукр. конф., 4–7 вересня 2023. Харків. Україна : зб. наук. праць / Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2023. С. 48–50. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/78929>
8. Попов О. В. (2022) Технологічний реінжиніринг промислових підприємств / Монографія / Пер.з англ.; Пер.з рос.: О. В. Попов. Видавництво Харків, вид. «Центр поліграфії» м. Харків, пр. Науки, 7. e-mail nauki007@gmail.com. тел. 702-13-88. 251 арк., укр.(11,4 авт. арк.)
9. Національна стратегія Індустрії 4.0, АППАУ. URL: <https://strategy.uifuture.org/kraina-zrozvinutoyu-cifrovoyu-ekonomikoyu.html>

10. Лобода П. П. (2023). Методи та програмні засоби обробки даних цифрового двійника нового безпечного конфайнменту ЧАЕС (кваліфікаційне дослідження). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. [ela.kpi.ua. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/63995/1/Loboda_dys.pdf?utm_source=chatgpt.com](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/63995/1/Loboda_dys.pdf?utm_source=chatgpt.com)
11. Філіппова М. В. (2024). Цифровий двійник виробництва: нові виклики та загрози. Збірник матеріалів конференції *Приладобудування: стан і перспективи*. КПІ. [ela.kpi.ua URL: https://ela.kpi.ua > bitstreams > download](https://ela.kpi.ua/bitstreams/download)
12. Перспективи розвитку реверсивного інжинірингу в машинобудівній галузі / І. Е. Яковенко [та ін.] // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Технології в машинобудуванні : зб. наук. пр.* = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: *Techniques in a machine industry : col. of sci. papers*. Харків : НТУ «ХПІ», 2025. № 1 (11). С. 89–97. URI: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/918099>
13. Дорошенко В. С. (2020). Передумови створення цифрового двійника. *PLIT: періодичний науковий журнал*. 42. 91–101. [plit-periodical.org.ua URL: http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001186856](http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001186856) [In Ukrainian]

REFERENCES:

1. Tytarenko V., Kostetska S., Babik K., Dvornik A., Yurko P. (2025). “Vykorystannia tsyfrovyykh dviinykiv dlia vidnovlennia poshkodzhenykh ob'ektiv elevatorynykh kompleksiv.” *Nauka ta budivnytstvo*, 44(2). DOI:10.33644/2313-6679-2-2025-2 journal-ndibk.com.ua
2. Sulema Ye. S. (2020). *Metody, modeli ta zasoby obrobky multymodalnykh danykh tsyfrovyykh dviinykiv (dysertatsiia)*. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho. [ela.kpi.ua URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37251/1/Sulema_diss.pdf?utm_source=chatgpt.com](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37251/1/Sulema_diss.pdf?utm_source=chatgpt.com)
3. Mekhovych S. A. (2024). Vplyv tsyfrovyykh dviinykiv i heneratyvnoho dyzainu na inzhenernu diialnist. *Elektronnyi zhurnal / kafedra elektroenerhetyky ta elektroniky (KhPI)*. URL: https://eee.khpi.edu.ua/article/view/323763/313891?utm_source=chatgpt.com
4. Filippova M. V. (2024). Tsyfrovyi dviinyk vyrobnytstva: novi vyklyky ta zahrozy. *Zbirnyk materialiv konferentsii Pryladobuduvannia: stan i perspektyvy*. KPI. [ela.kpi.ua URL: https://ela.kpi.ua > bitstreams > download](https://ela.kpi.ua/bitstreams/download)
5. Vidnovlennia detalei metodom plazmovoho napyleniia. URL: <https://promavtosvarka.kyiv.ua/plazmove-napyleniia>
6. Vykorystannia portatyvnykh verstativ dlia remontu i modernizatsii ob'ektiv vazhkoho mashynobuduvannia / O. A. Permiakov, I. E. Yakovenko // *Vazhke mashynobuduvannia. Problemy ta perspektyvy rozvytku : materialy XX Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 01–03 veres. 2022 r.* Kramatorsk-Ternopil : DDMA, 2022. S. 174–176.
7. Permiakov O. A. Reversyvnyi inzhynirnyh znoshenykh detalei yak alternatyva protsesiv yikh vidnovlennia / Permiakov O. A., Yakovenko I. E. // *Novi tekhnolohii v mashynobuduvanni : materialy trydtsiat treti vseukr. konf., 4–7 veresnia 2023*, Kharkiv, Ukraina : zb. nauk. prats / Natsionalnyi aerokosmichnyi universytet im. M. Ye. Zhukovskoho «KhAI». Kharkiv : Vydavnytstvo Ivanchenka I. S., 2023. S. 48–50. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/78929>
8. Popov O. V. (2022) *Tehnologichnij reinzhiniring promislivih pidpriemstv / Monografiya / Per.z angl.; Per.z ros.:* O.V. Popov. Vidavnytstvo Harkiv, vid. «Centr poligrafii» m. Harkiv, pr. Nauki, 7. e-mail nauki007@gmail.com. tel. 702-13-88. 251 ark., ukr.(11,4 avt. ark.)
9. Nacionalna strategiia Industriyi 4.0, APPAU. URL: <https://strategy.uifuture.org/kraina-zrovinutoyu-cifrovoyu-ekonomikoyu.html>
10. Loboda P. P. (2023). *Metody ta prohramni zasoby obrobky danykh tsyfrovoho dviinyka novoho bezpechnoho konfainmentu ChAES (kvalifikatsiine doslidzhennia)*. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho. [ela.kpi.ua. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/63995/1/Loboda_dys.pdf?utm_source=chatgpt.com](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/63995/1/Loboda_dys.pdf?utm_source=chatgpt.com)

11. Filippova M. V. (2024). Tsyfrovyi dviinyk vyrobnytstva: novi vyklyky ta zahrozy. Zbirnyk materialiv konferentsii Pryladobuduvannia: stan i perspektyvy. KPI. [ela.kpi.ua URL: https://ela.kpi.ua > bitstreams > download](https://ela.kpi.ua/bitstreams/download)
12. Perspektyvy rozvytku reversyvnogo inzhynirynhu v mashynobudivnii haluzi / I. E. Yakovenko [ta in.] // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Tekhnolohii v mashynobuduvanni : zb. nauk. pr.* = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry : col. of sci. papers. Kharkiv : NTU «KhPI», 2025. № 1 (11). S. 89–97. URI: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/91809>
13. Doroshenko V. S. (2020). Peredumovy stvorennia tsyvrovoho dviinyka. PLIT: periodychnyi naukovyi zhurnal. 42. 91–101. [plit-periodical.org.ua URL: http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001186856](http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001186856) [In Ukrainian]

Стаття надійшла до редакції: 08.04.2026; рецензування: 15.04.2026;

прийнята до публікації 21.04.2026. Автори прочитали і дали згоду рукопису.

The article was submitted on 08.04.2026; revised on 15.04.2026; and accepted for publication on 21.04.2026. The authors read and approved the final version of the manuscript.