

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*

Набока Олена Володимирівна, к.т.н., професор кафедри Технології машинобудування та металорізальних верстатів, +380(50)986-50-27, Olena.V.Naboka@khpi.edu.ua

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

РЕВЕРСНИЙ ІНЖИНІРИНГ ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ ТА СУЧАСНІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ПРОЦЕСИ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ

***Анотація.** Технічна та економічна доцільність відновлення зношених деталей зумовлена можливістю повторного їх використання. Процес відновлення деталей часто потребує, крім геометричних розмірів, частково змінювати деякі характеристики деталей: матеріали, фізико-механічні властивості, жорсткість поверхні, тощо. Сучасний розвиток інформаційних технологій у машинобудуванні надає альтернативу існуючим процесам відновлення деталей. Реверсивний інжиніринг – процес створення точної копії за існуючим зразком. Він прискорює та спрощує виробничі процеси за допомогою сучасних технічних рішень – 3D-сканерів та програмного забезпечення.*

Розглянуто можливості застосування сучасних технологій відновлення зношених деталей в умовах реверсивного інжинірингу, можливості їх вдосконалення шляхом аналізу фізичних засад, технологічних особливостей та обмежень кожного методу.

***Ключові слова:** реверсивний інжиніринг, відновлення, зношена деталь, технологічний процес.*

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*

Naboka Olena, Candidate of Technical Sciences, professor Department of «Technology of Mechanical Engineering and Metal-Cutting Machine Tools», +380(50)986-50-27, Olena.V.Naboka@khpi.edu.ua

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2 Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002*

REVERSE ENGINEERING OF WORN PARTS AND MODERN PROCESSES FOR THEIR RESTORATION

***Abstract.** The technical and economic feasibility of restoring worn parts is due to the possibility of their reuse. The process of restoring parts often requires, in addition to geometric dimensions, to partially change some characteristics of the parts: materials, physical and mechanical properties,*

surface hardness, etc. The modern development of information technologies in mechanical engineering provides an alternative to existing processes of restoring parts. Reverse engineering is the process of creating an exact copy based on an existing sample. It accelerates and simplifies production processes through modern technical solutions-3D scanners and specialized software.

The possibilities of applying modern technologies for restoring worn parts in reverse engineering conditions, the possibilities of their improvement by analyzing the physical principles, technological features and limitations of each method are considered.

Keywords: *reverse engineering, restoration, worn part, technological process.*

Постановка проблеми. Сучасний розвиток інформаційних технологій у машинобудуванні надає нові можливості та альтернативу існуючим підходам до проектування технологічних процесів відновлення деталей. Завдяки розвитку сучасних технологій та сучасного обладнання машинобудування отримало такий потужний інструмент, як зворотний інжиніринг.

Реверсивний інжиніринг – процес створення точної копії об'єкта за вже існуючим зразком. Зворотне проектування деталей потрібне, коли необхідне: відновлення зношених деталей, збереження інформації про об'єкти для їхнього подальшого ремонту чи відтворення.

Аналіз основних досліджень та публікацій. Реверсивний інжиніринг не може існувати без відповідних програмних та технічних засобів. У наш час існує величезна кількість різноманітного високоточного обладнання та програмних засобів для проведення вхідного, міжопераційного та вихідного контролю (Inspection) деталей на виробництві, а також для проведення зворотного моделювання (reverse engineering).

Одним із основних етапів зворотного моделювання є процес 3D-сканування існуючого виробу. 3D-сканування об'єктів – це процес перетворення фізичної форми реального об'єкта на цифровий вигляд. 3D-сканування об'єктів допомагає підготувати необхідну модель до 3D-друку, або використовувати цю модель для інжинірингу. На даний момент існують такі методи сканування: контактний метод та безконтактний метод. Кожен із методів має свої плюси і мінуси, і вимагає використання відповідного обладнання.

Проведені дослідження та публікації свідчать про те, що тема потребує подальшого вивчення та розвитку.

Мета дослідження. Мета дослідження полягає в аналізі та систематизації знань про сучасні енергоефективні технології обробки матеріалів (лазерну, електроерозійну, електрохімічну, світло-променеву та електроіскрову) для визначення їхніх фізичних основ, технологічних особливостей і можливостей оптимізації з метою підвищення ефективності промислового застосування.

Матеріали та методи. Теоретичну та практичну основу проведення досліджень склали наукові праці вчених з проблем технологічного та метрологічного забезпечення відновлення зношених деталей машин, а також системний аналіз енергоефективних технологій відновлення зношених деталей.

Викладення основного матеріалу. Реверс-інжиніринг прискорює та спрощує виробничі процеси. За допомогою сучасних високоточних технічних рішень – 3D-сканерів та програмного забезпечення – метод забезпечує кілька важливих переваг:

- швидкість – багаторазове прискорення вимірювань порівняно з класичним методом (від кількох днів за кілька годин чи хвилин);
- точність – сканування дозволяє уникнути накопиченої помилки при знятті розмірів;
- універсальність – відтворення геометрії будь-якої складності та виробу практично будь-яких габаритів;
- контроль при проектуванні – швидка та наочна перевірка відхилення геометрії виробу від 3D-моделі у спеціалізованих програмах.

Реверсивний інжиніринг не може існувати без відповідних програмних та технічних засобів. У наш час існує величезна кількість різноманітного високоточного обладнання та програмних засобів для проведення вхідного, міжопераційного та вихідного контролю (Inspection) деталей на виробництві, а також для проведення зворотного моделювання (reverse engineering). Одним із основних етапів зворотного моделювання є процес 3D-сканування існуючого виробу. 3D-сканування об'єктів – це процес перетворення фізичної форми реального об'єктів на цифровий вигляд. На даний момент існують такі методи

сканування: контактний метод та безконтактний метод. Кожен із методів має свої плюси і мінуси, і вимагає використання відповідного обладнання.

Можливість створення 3D-моделей виробів значно спрощує процес технологічного проектування та виготовлення деталі (рис. 1).

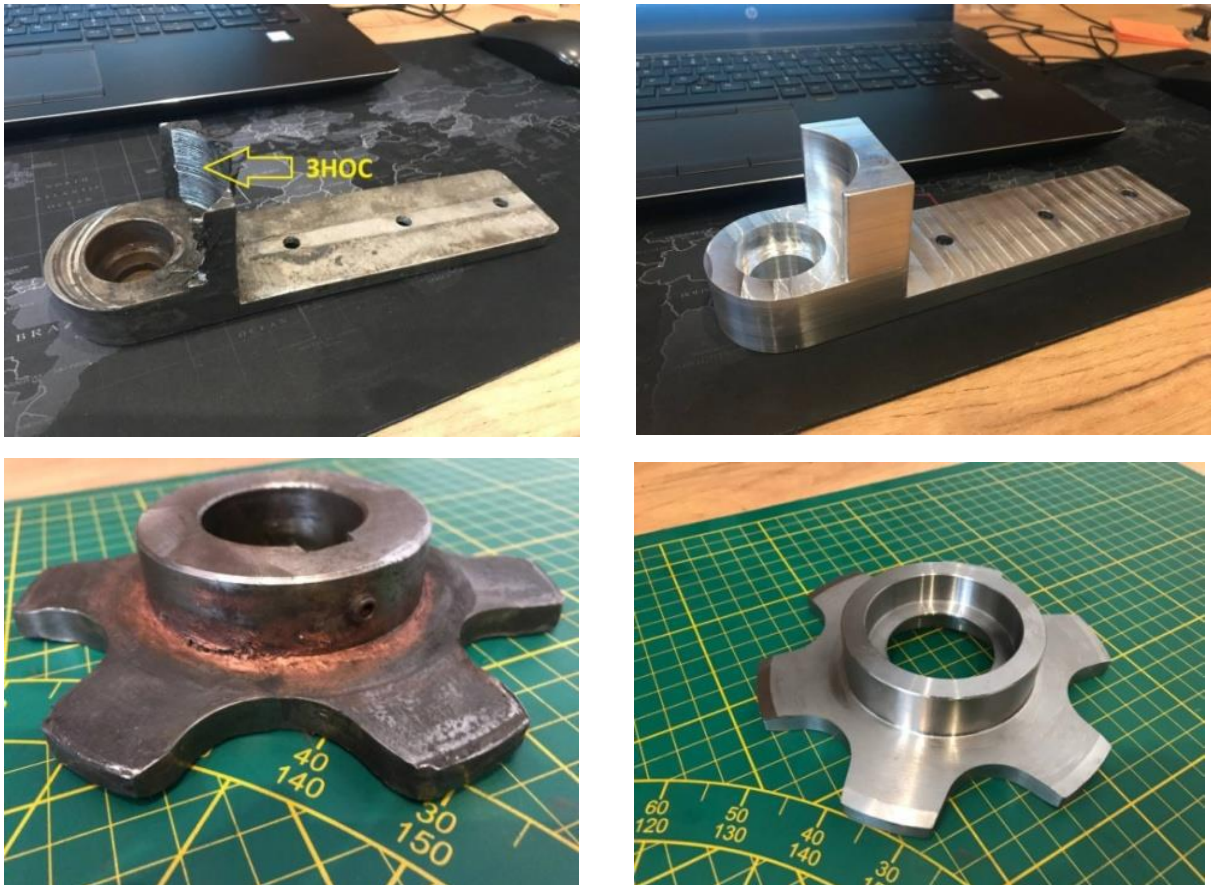


Рисунок 1 – Реверсивний інжиніринг – створення точної копії деталей за існуючим зразком

Сучасна практика відновлення деталей у машинобудуванні та, особливо, в аерокосмічній індустрії – це гібрид традиційних технологій та нового покоління адитивних і енергозберігаючих технологій: лазерна обробка, електроерозійна обробка, електрохімічна обробка, світлопроменева обробка, електроіскрова обробка та інші. Впровадження адитивних методів та енергозберігаючих технологій дає змогу скорочувати час простою, зменшувати потребу в запчастинах на складі і виконувати локальні ремонти/відновлення геометрії.

Оскільки проблема відновлення деталей має комплексний характер, для її вирішення можливе застосування системного підходу, який передбачає методологічну орієнтацію вивчення, засновану на розгляді об'єктів у вигляді систем.

Відомі технології відновлення газо-термічними способами. Але основними недоліками які стримують їх широке використання є:

- недостатня міцність зчеплення в результаті чого покриття можуть відшаруватись від основи;
- висока пористість, значні залишкові напруження;
- нестабільність властивостей на різних ділянках покриття, що призводить до утворення дефектів.

Проведений аналітичний огляд та дослідження показали, що довговічність авіаційних агрегатів, їх техніко-економічні показники багато в чому визначаються довговічністю нерухомих спряжень вал-підшипник. Тому підвищення довговічності підшипникових вузлів за рахунок зміцнення їх посадочних поверхонь, а також зміцнюючого відновлення є досить актуальною задачею.

Як показали проведені дослідження найбільш перспективним способом для відновлення та зміцнення посадочних місць під підшипники є електромеханічна та електроіскрова обробка, які дозволяють підвищити стійкість і проти фретингу, і проти абразивного спрацювання, і проти втомленості.

Відновлення деталей наведеними способами має ряд переваг: підвищується продуктивність, знижуються витрати електроенергії, відпадає потреба в матеріалах (електродах, флюсах, газах тощо), виключаються шкідливі викиди в довкілля.

Під електрофізичними та електрохімічними методами розмірної обробки розуміють сукупність електричних, електромагнітних й електрохімічних процесів і методів безпосереднього одночасного або в різних поєднаннях теплового, механічного чи хімічного впливу на тверде тіло для надання йому заданих форм і розмірів.

Існують і успішно розвиваються також комбіновані способи впливу на метал, при яких використовуються два і більше джерела енергії.

До основних переваг електрофізичних та електрохімічних методів розмірної обробки матеріалів можна віднести:

- 1) практичну незалежність продуктивності процесу обробки від твердості та в'язкості оброблюваного матеріалу;
- 2) можливість відтворення (копіювання) інструмента складної форми відразу по всій поверхні заготовки під час простого поступального руху інструмента;
- 3) можливість здійснення обробки практично без силового впливу на заготовку;
- 4) легкість автоматизації процесу обробки і можливість здійснення багатостадійного обслуговування.

Вибір оптимального методу обробки металів визначається виробничими вимогами і серійністю виробництва. Нова технологія обробки металу заснована на використанні нетрадиційних джерел енергії, які забезпечують його розмірне плавлення, випаровування або формоутворення.

Електроерозійні методи засновані на використанні явища електричної ерозії - спрямованого локального руйнування електропровідних матеріалів в результаті теплової дії імпульсних електричних розрядів між електродом-інструментом і електродом-заготовкою.

Вирішальна роль в процесі ерозійного руйнування матеріалів належить теплу що виділяються на поверхні електродів в місці локалізації розряду. Зв'язок стійкості матеріалів з величиною теплового потоку виражається через формулу:

$$P_1 = \frac{4}{\pi} \frac{h q_T [Q_{\phi} + c (t_{пл} - t_0)]}{c \lambda (t_{пл} - t_0)^2},$$

де c – теплоємність, Q_{ϕ} – теплота фазового переходу, $T_{пл}$ – температура плавлення, t_0 – початкова температура, h – товщина шару що видаляється, λ – теплопровідність.

Об'єм матеріалу який видаляється з електрода плавленням:

$$V_{пл} = \frac{Q - Q''}{c_p (t_{пл} - t_0) + \rho L}.$$

Де Q – підведена кількість тепла, Q'' – тепло яке підвели до тіла електроду.

Час за який нагрівається поверхня електроду:

$$\tau_{пл} = \frac{\pi c_p \lambda t_{пл}^2}{W_s} = \frac{\pi}{W_s^2} \Pi,$$

де W_s – енергія що передається в одиницю часу поверхні електроду, Π – критерій фазового переходу.

Умова випаровування вибухом матеріалу визначається за формулою:

$$W_s > \frac{4,64 q_n \rho \sqrt{a_1}}{V t_u},$$

де q_n – теплоємність парів металу, a_1 – коефіцієнт температурної провідності рідкого металу.

Теплота фазового перетворення визначається:

$$Q_{\phi} = m [L_{исп} + c_{пл} (t_{исп} - t_{пл})] + L_{пл},$$

де m – відношення долі металу що випаровується до усього видаленого металу, $c_{пл}$ – теплоємність рідкої фази, $L_{пл}$, $L_{исп}$ – скрита теплота яка відповідає плавленню та випаровуванню, $t_{исп}$ – температура випаровування.

Практичне застосування електроерозійної обробки можливе завдяки лише імпульсній подачі струму.

Формула енергії імпульсу має вигляд:

$$W_u = P_{cp} q t_u.$$

Середня потужність імпульсу має вигляд:

$$P_{cp} = U_{\delta m} I_{cp}.$$

Потужність залежить від характеру та сили струму:

$$I_{opt} = K \sqrt[4]{F_p^3},$$

де F_p – площа контакту електродів.

Електроерозійна обробка – сучасний метод виробництва.

Точність одержуваних розмірів і ступеня шорсткості дуже велика. При цьому важливо відзначити, що можна отримати високу точність форми, розмірів, шорсткості і інших показників.

Електроіскрова обробка є одним із видів електроерозійної обробки матеріалів, що базується на використанні електричних розрядів (іскор) для контрольованого видалення матеріалу з поверхні електропровідної заготовки. Цей метод належить до нетрадиційних технологій обробки і застосовується для створення складних геометричних форм, обробки високотвердих матеріалів і виготовлення деталей із високою точністю. Електроіскрова обробка характеризується відсутністю механічного контакту між інструментом і заготовкою, що усуває деформації та знос інструмента.

Електроіскрова обробка широко застосовується в аерокосмічній, автомобільній, медичній і інструментальній промисловості.

Електроіскрова обробка дозволяє досягти точності обробки в межах $\pm 0,005$ – $0,01$ мм, що робить її ідеальною для виготовлення деталей зі складною геометрією та жорсткими допусками. Це забезпечує високу якість поверхні (шорсткість Ra $0,1$ – $1,6$ мкм) і мінімізує потребу в додатковій фінішній обробці.

Електроіскрова обробка легко інтегрується в автоматизовані виробничі системи з числовим програмним керуванням.

Електроіскрова обробка не потребує попередньої механічної обробки заготовки, оскільки електричні розряди ефективно видаляють матеріал незалежно від початкового стану поверхні. Це скорочує підготовчий етап і загальний час виробництва.

Електрохімічна обробка використовує процеси електролізу, тобто хімічні перетворення на поверхні електродів в середовищі електроліту. Заготівля є анодом, а інструмент – катодом. В основі електрохімічної обробки лежить процес

анодного розчинення металу заготовки. У робочому середовищі – електроліті – молекули речовини розпадаються на електрично-заряджені частинки – іони, кожен з яких переносить один або кілька електричних зарядів, і без зовнішнього електричного поля іони в електроліті рухаються хаотично.

Електрохімічна обробка заснована на електрохімічному (анодному) розчиненні металів.

Управління процесом забезпечує розчинення анода і видалення з нього утворюються при цьому у вигляді плівок продуктів електрохімічної реакції – поверхневого шару оброблюваної деталі.

Змінювати форму, розмір, отримувати поверхню з малою шорсткістю дозволяє електрохімічна обробка металів на спеціальному обладнанні. Матеріал не піддається при цьому механічному впливу. Відбувається його розчинення в електролітичному складі під дією струму заданої величини.

ВИСНОВКИ.

1. Проведений аналіз сучасних технологій обробки матеріалів, таких як лазерна, електроерозійна, електрохімічна та електроіскрова обробка, засвідчує їхню унікальність і незамінність у високотехнологічних галузях промисловості. Кожна з цих технологій, спираючись на фундаментальні фізичні принципи, відкриває нові можливості для створення деталей складної геометрії, обробки надтвердих матеріалів і досягнення високої точності, що є критично важливим для аерокосмічної промисловості.

2. Перспективи розвитку цих технологій пов'язані з інтеграцією автоматизованих систем керування, застосуванням штучного інтелекту для оптимізації параметрів і розробкою нових матеріалів для електродів та діелектриків. Такі інновації дозволять не лише подолати наявні недоліки, але й розширити межі їхнього застосування, забезпечуючи прогрес відновлення високотехнологічних виробів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. 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>
2. Попов О.В. 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, 2022. 251 арк., укр.(11,4 авт.арк.)
3. 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/91809>
4. Титаренко В., Костецька С., Бабік К., Дворнік А., Юрко П. “Використання цифрових двійників для відновлення пошкоджених об’єктів елеваторних комплексів.” *Наука та будівництво*, 2025. № 44(2). DOI:10.33644/2313-6679-2-2025-2 journal-ndibk.com.ua
5. Лобода П. П. Методи та програмні засоби обробки даних цифрового двійника нового безпечного конфайнменту ЧАЕС (кваліфікаційне дослідження). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/63995/1/Loboda_dys.pdf?utm_source=chatgpt.com
6. Єпіфанова І. М. Вплив використання сучасних технологій на ефективність діяльності машинобудівних підприємств України. *Економіка та суспільство*, 2025. № 72. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-72-7>
7. Дорошенко В. С. Передумови створення цифрового двійника. *PLIT: періодичний науковий журнал*, 2020. № 42, 91–101. [plit-periodical.org.ua](http://jnas.nbuiv.gov.ua/article/UJRN-0001186856) URL: <http://jnas.nbuiv.gov.ua/article/UJRN-0001186856> [In Ukrainian]
8. NASA / Digital Thread (Arnold S.M. et al., 2024 технічний звіт). Концепція цифрової нитки (digital thread) як механізм зв’язування CAD/PLM/матеріалознавчих баз і локальної інформації про деградацію; важливий для просторово-часової прив’язки карт зносу. NASA Technical Reports Server URL: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20240012434/downloads/GELEADDigitalTransformation-Final.pdf?utm_source=chatgpt.com
9. Черненко В. С., Ківдрачук М. В., Дудка О. І. Променеві методи обробки: Навч. посібник. – Київ : Кондор, 2004. – 166 с
10. Ультразвукова обробка технологічної сировини полімерних композиційних матеріалів : навчальний посібник / О. П. Колосова та ін. Київ: КПІ імені Ігоря Сікорського, 2017. 188 с.
11. Калафатова Л. П. Мастильно охолоджуючі технологічні середовища як фактор підвищення ефективності процесів механічної обробки крихких конструкційних матеріалів. *Сучасні технології в машинобудуванні*, 2018. Вип. 13. С. 9–20.

REFERENCES:

1. Permiakov O. A. Reversyynyi inzhynirynh znoshenykh detalei yak alternatyva protsesiv yikh vidnovlennia / Permiakov O. A., Yakovenko I. E. // *Novi tekhnolohii v mashynobuduvanni : materialy trydtsiat tretoi 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>

2. Popov O.V. Tehnologichnij reinzhiniring promislovih pidpriyemstv / Monografiya / Per.z angl.; Per.z ros.: O.V. Popov. Vidavnistvo Harkiv, vid. «Centr poligrafii» m. Harkiv, pr. Nauki, 7, e-mail nauki007@gmail.com, tel. 702-13-88, 2022. 251 ark., ukr.(11,4 avt. ark.)
3. Perspektyvy rozvytku reversyvnogo inzhynirynhu v mashynobudivnii haluzi / I. E. Yakovenko [ta in.] // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: 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>
4. Tytarenko V., Kostetska S., Babik K., Dvornik A., Yurko P. “Vykorystannia tsyfrovyykh dviinykiv dlia vidnovlennia poskodzhenykh ob'ektiv elevatornykh kompleksiv.” Nauka ta budivnytstvo, 2025. № 44(2). DOI:10.33644/2313-6679-2-2025-2 journal-ndibk.com.ua
5. Loboda P. P. Metody ta prohramni zasoby obrobky danykh tsyfrovoho dviinyka novoho bezpechnoho konfainmentu ChAES (kvalifikatsiine doslidzhennia). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2023. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/63995/1/Loboda_dys.pdf?utm_source=chatgpt.com
6. Yepifanova I. M. Vplyv vykorystannia suchasnykh tekhnolohii na efektyvnist diialnosti mashynobudivnykh pidpriyemstv Ukrainy. Ekonomika ta suspilstvo, 2025. № 72. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-72-7>
7. Doroshenko V. S. Peredumovy stvorennia tsyfrovoho dviinyka. PLIT: periodychnyi naukovyi zhurnal, 2020. № 42. 91–101. [plit-periodical.org.ua](http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001186856) URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001186856> [In Ukrainian]
8. NASA / Digital Thread (Arnold S.M. et al., 2024 tekhnichnyi zvit). Kontseptsiiia tsyfrovoi nytky (digital thread) yak mekhanizm zviazuвання CAD/PLM/materialoznavchykh baz i lokalnoi informatsii pro dehradatsiiu; vazhlyvyi dlia prostoro-vasovoi pryviazky kart znosu. NASA Technical Reports Server URL: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20240012434/downloads/GELEADigitalTransformation-Final.pdf?utm_source=chatgpt.com
9. Chernenko V. S., Kivdrachuk M. V., Dudka O. I. Beam processing methods: Textbook. K. : Condor, 2004. 166 p.
10. Ultrasonic processing of technological raw materials of polymer composite materials: textbook / O.P. Kolosova et al. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017. 188 p.
11. Kalafatova L. P. Lubricating cooling technological media as a factor in increasing the efficiency of mechanical processing processes of brittle structural materials. *Modern technologies in mechanical engineering*, 2018. Issue 13. P. 9–20.

Стаття надійшла до редакції: 03.03.2026; рецензування: 19.03.2026;

прийнята до публікації 27.03.2026. Автори прочитали и дали згоду рукопису.

The article was submitted on 03.03.2026; revised on 19.03.2026; and accepted for publication on 27.03.2026. The authors read and approved the final version of the manuscript.