

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.

КОНЦЕПЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ТА РЕВЕРСИВНОГО РЕІНЖІНІРИНГУ

***Анотація.** У статті розглянуто концепцію технологічного забезпечення процесів відновлення деталей із застосуванням цифрових двійників та реверсивного реінжинірингу. Показано, що традиційні підходи до ремонту та відновлення не забезпечують необхідної точності та ефективності в умовах сучасних вимог до ресурсу та надійності виробів. Запропоновано поєднання технологій 3D-сканування, CAD/CAE/CAM-систем, цифрового моделювання та аналітичних методів для створення єдиного цифрового середовища відновлення. Основна увага приділена інтеграції цифрового двійника з процесом реверсивного реінжинірингу, що дає можливість формувати адаптивні технологічні маршрути ремонту деталей, прогнозувати залишковий ресурс та оцінювати працездатність виробів. Наукова новизна роботи полягає у розробленні концептуальної схеми технологічного забезпечення відновлення деталей, яка враховує індивідуальні умови експлуатації, зношування та конструктивні особливості виробу. Практична значущість дослідження полягає у скороченні термінів підготовки виробництва, зниженні собівартості ремонтних процесів та підвищенні точності відновлення геометрії деталей.*

***Ключові слова:** концепція, відновлення, цифрові двійники, поєднання технологій, надійність виробів, цифрове моделювання.*

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*

CONCEPT OF TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR PARTS' RESTORATION USING DIGITAL TWINS AND REVERSE REENGINEERING

***Abstract.** The article considers the concept of technological support for parts' restoration processes using digital twins and reverse reengineering. It is shown that traditional approaches to repair and restoration do not provide the necessary accuracy and efficiency in the conditions of modern requirements for the resource and reliability of products. A combination of 3D scanning technologies, CAD/CAE/CAM systems, digital modeling and analytical methods is proposed to create a single digital restoration environment. The main attention is paid to the integration of the digital twin with the reverse reengineering process, which makes it possible to form adaptive technological routes for the repair of parts, predict the residual resource and assess the performance of products. The scientific novelty of the work lies in the development of a conceptual scheme for the technological support of the restoration of parts, which takes into account individual operating conditions, wear and design features of the product. The practical significance of the study lies in reducing the time for*

preparing production, reducing the cost of repair processes and increasing the accuracy of restoring the geometry of parts.

Keywords: *concept, restoration, digital twins, combination of technologies, product reliability, digital modeling.*

Постановка проблеми. Доцільність відновлення деталей зумовлена можливістю повторного використання більшості деталей. Собівартість відновлення деталей звичайно не перевищує вартості нових тому, що витрати на матеріал нижчі, але у разі значного пошкодження деталі існуючі методи ремонту можуть не мати економічних переваг у порівнянні з виготовленням нової. Вибір раціонального способу відновлення зношених або пошкоджених деталей є актуальною проблемою сучасного машинобудівного виробництва тісно пов'язаною із досягненнями і рівнем розвитку інтегрованих та комп'ютерних технологій в машинобудуванні. Реверсивний інжиніринг або зворотне проектування як сучасний процес створення точної копії об'єкта за вже існуючим зразком дозволяє у більшості випадків ефективно вирішувати виробничі завдання відновлення пошкоджених деталей, в першу чергу він дозволяє суттєво скоротити час на виготовлення деталей на заміну зношених або втрачених, а за необхідністю дозволяє виробляти їх серійно. За весь період розвитку технології машинобудування як науки розроблено, впроваджено й описано загальні принципи та рекомендації, методологію й методики проектування технологічних процесів виготовлення та складання машин з урахуванням усього різноманіття типів виробництв, видів організації виробничих процесів, галузевої особливості тощо. Без відповідних програмних та технічних засобів реверсивний інжиніринг існувати не може. У теперішній час існує величезна кількість програмних засобів та різноманітного високоточного обладнання, що забезпечує проведення всіх видів контролю деталей на виробництві. Для цього потрібно вирішити наступні задачі: уточнити і доповнити структуру життєвого циклу виробу, в першу чергу для етапів, що забезпечують продовження термінів служби деталей на основі реверсивного інжинірингу; розробити загальну схему і структуру технологічного та інформаційного забезпечення при технологічній підготовці виробництва з відновлення зношених або пошкоджених деталей з використанням різних методів

адитивного та субтрактивного виробництва, що забезпечують його ефективність; на основі встановлення системних відмінностей між схемами технологічного процесу виготовлення і відновлення деталі запропонувати нові рішення з метрологічного забезпечення шляхом впровадження сучасних методів та засобів контрольних операцій.

Мета дослідження. На підставі системного аналізу та узагальнення досягнень технології машинобудування та ремонтного виробництва запропонувати концепцію технологічного забезпечення відновлення деталей при реверсивному інжинірингу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням технологічного забезпечення відновлення деталей при реверсивному інжинірингу присвячено досить велика кількість наукових публікацій як зарубіжних, так і вітчизняних авторів. У роботах вітчизняних авторів досліджено стан, динаміку та тенденції наданням послуг у галузі технічного обслуговування, ремонту та відновлення машин підприємств, що займаються [1-9]. Визначено характер та особливості відмов, що призводять до втрати здатності машини виконувати своє функціональне призначення. Виділено основні методи організації ремонтних робіт, які визначають принципи організації підприємства з ремонту та технічного обслуговування. Розглянуто особливості розвитку сфери технічного обслуговування та ремонту у різних економічних регіонах, у тому числі України. Проаналізовано статистичні дані функціонування підприємств технічного обслуговування та ремонту за останні 15 років, виявлено основні закономірності їх зміни, визначено основні фактори, що вплинули на цей процес. Встановлено, що основна частка виконуваних робіт припадає на промислове обладнання, транспортні засоби, будівельну та сільськогосподарську техніку.

У зарубіжних публікаціях досліджуються різні питання технологічного забезпечення процесів відновлення деталей [10-16]. Значну увагу приділено проблемам застосування лазерного наплавлення (powder laser cladding) для відновлення інструментальної оснастки (40НМ сталь) в авіаційному виробництві як альтернативу хромуванню. Практичний інтерес представляють уніфіковані

моделі активу (asset model) для створення цифрових двійників у задачах розумного відновлення та ремануфактурингу, описується структура цифрового двійника. Окрему увагу приділено питанням управління життєвим циклом продукту, що має принципове значення у виборі термінів та методів у процесах відновлення деталей, допомагає компаніям оптимізувати виробничі процеси, скоротити час виходу на ринок і підвищити якість продукції. Безумовне теоретичне і практичне значення для визначення напрямів дослідження мають питання впливу штучного інтелекту, великих баз даних, хмарних технологій, цифрових платформ та взагалі процесів діджиталізації на вибір технологій відновлення деталей. Документ NASA/технічний звіт з глибокою експериментальною оцінкою LP-DED для тонких мікроканалних елементів та gear-сценаріїв; охоплює моніторинг процесу, оптимізацію параметрів і приклади відновлення [15]. У дослідженні DED для відновлення/з'єднання різнорідних матеріалів (316L↔IN718) із використанням filler-матеріалу CoCrFeNi оцінено межі сумісності та мікроструктурні явища. Незважаючи на велику увагу дослідників різних країн до проблеми технологічного забезпечення процесів відновлення деталей, подальшої розробки потребують методологічні питання вибору методів та технологій, а також застосування цифрових двійників та реверсивного реінжинірингу у цих процесах.

Викладення основного матеріалу. Реверсивний реінжиніринг – це сукупність методів і процесів, спрямованих на відтворення конструкції, геометрії, матеріальних і функціональних властивостей існуючої (зазвичай вже виготовленої або зношеної) деталі чи вузла, коли початкової (проектної) документації немає або вона застаріла/неповна [1, 2]. Мета реверсивного реінжинірингу – отримати повноцінну цифрову модель (геометрію та властивості), на основі якої можна: відтворити деталь (виробництво, модернізація), провести аналіз (наприклад, міцнісний, температурний), розробити технологію відновлення (ремонт, наплавлення, адитив). Реверсивний інжиніринг (RE) у сфері відновлення деталей включає комплекс технологій, що дозволяють отримати цифрову копію виробу,

проаналізувати її та виготовити відновлений або модернізований аналог. Основні підходи можна поділити на три групи.

Група 1. 3D-сканування. Тут відомі такі методи, як лазерне сканування, структуроване світло, фотограмметрія. Їх застосування спрямовано на отримання хмар точок, що описують геометрію зношеної або пошкодженої деталі. Переваги цих методів полягають у швидкості збору даних, високій деталізації та можливості аналізу зносу. Обмеження стосуються складності сканування внутрішніх поверхонь, залежність від оптичних властивостей матеріалів.

Група 2. CAD-моделювання. Ця група методів вирішує задачі перетворення хмар точок у поверхневі або твердотільні моделі (SolidWorks, CATIA, NX). Вони дозволяють створювати параметричні моделі деталей для подальшого відновлення або модифікації. Їх задачі полягають у забезпеченні інтеграції з САМ/САЕ системами та оптимізації конструкції. Ці технології передбачають значні витрати часу на побудову складних поверхонь та для них характерний людський фактор при моделюванні.

Група 3. Цифрові двійники (Digital Twins). Методи: інтеграція 3D-моделей з даними датчиків, симуляцій та експлуатаційних характеристик. Ця група технологій застосовується для прогнозування зносу, оптимізації процесів ремонту, вибору оптимальної технології відновлення. Їх переваги у підвищенні точності прогнозування та можливості «віртуального тестування» до фактичного відновлення. Використання цих методів потребує великі масиви даних та для них характерна складність побудови мультифізичних моделей.

Попри технічній та економічній доцільності відновлення та значному прогресу їх використання, існуючі технології реверсивного інжинірингу та відновлення мають ряд проблем, які гальмують їх масове впровадження. По-перше, це проблеми точності: похибки при 3D-скануванні (особливо для відблискуючих або дрібних елементів), спотворення геометрії при переході від хмари точок до САД-моделі та неповне відтворення матеріальних властивостей у цифрових двійниках. По-друге, собівартість. Для технологій реверсійного інжинірингу характерні висока вартість промислових 3D-сканерів і програмного

забезпечення, значні енергетичні витрати при використанні адитивних методів ремонту та необхідність висококваліфікованих фахівців (CAD/CAE/AM). Потретьє, це проблеми ресурсу: надійність і довговічність відновлених деталей. У деяких випадках ресурс відновленої деталі не досягає ресурсу нової. Є проблеми з адгезією матеріалів при наплавленні чи адитивному відновленні. Недостатня стандартизація та відсутність уніфікованих методик випробувань.

Таким чином, систематизація підходів дозволяє чітко розмежувати інструменти реверсивного інжинірингу, а аналіз проблематики підкреслює необхідність підвищення точності цифрових моделей, зниження вартості технологій та стандартизацію процесів оцінки ресурсу відновлених деталей.

Традиційно процес відновлення деталей виглядав так: зношена деталь → вимірювання → креслення/модель → відновлювальні технології (наплавлення, напилення, механічна обробка) → контроль.

Запропонована концепція технологічного забезпечення процесів відновлення деталей із застосуванням цифрових двійників та реверсивного реінжинірингу з використанням цифрових двійників змінює цей підхід. Зношена деталь стає базою для побудови цифрового двійника – 3D-моделі з урахуванням фактичного зносу, дефектів, геометричних і фізико-механічних характеристик. Реверсивний реінжиніринг забезпечує відтворення не лише геометрії, а й функціональних параметрів (наприклад, розподілу навантажень, теплових впливів, вібрацій). Цифровий двійник інтегрується в CAD/CAM/CAE-системи та дозволяє симулювати роботу відновленої деталі ще до її фізичного виготовлення; підібрати оптимальну технологію відновлення (наплавлення, 3D-друк, гібридна обробка) та прогнозувати ресурс та надійність після ремонту.

Таким чином, процес стає цифрово-замкнутим циклом: *деталь–цифровий двійник–цифрова перевірка–відновлення–нова верифікація–експлуатація–корекція моделі*.

Визначимо основні положення цієї концепції. До ключових складових концепції слід віднести оцифрування (сканування), обробку даних (точкова хмара

– сітка-CAD), ідентифікацію матеріалу/стану, створення цифрового двійника і подальше рішення задач – від проєктування до виробництва/відновлення.

Концепція, що пропонується авторами технологічного забезпечення відновлення деталей – це інтегрований цикл, де цифровий двійник (DD) є центральним елементом, що зв'язує фізичну деталь, процес її діагностики і рішення про відновлення. Цифровий двійник зношеної деталі – не просто CAD-копія геометрії, а багаторівнева модель, що включає:

- *геометричний двійник (точна 3D-геометрія)*, фізичний/матеріальний шар (матеріальні властивості, гістограми твердості, мікроструктура), поведінковий шар (моделі напружень, теплові моделі, умови навантаження), історичні дані (цифровий паспорт: цикли навантажень, ремонти, експлуатаційні умови);

- *цифрову нитку (digital thread)* – автоматизований потік даних між сканером → CAD → CAE → CAM → MES/Підприємством: вся інформація від діагностики до кінцевої валідації зберігається, версіонується й використовується для ухвалення рішень;

- *інтелектуальне рішення про технологію відновлення* – система (експертна/машинне навчання + фізичні моделі), що на вході має цифровий двійник та критерії (витрати, ресурс, точність) і на виході дає оптимальний план ремонту (метод, параметри процесу, маршрут обробки);

- *гібридні технологічні ланцюги* – поєднання адитивних методів (лазерне наплавлення, DED) з традиційною мехобробкою і термообробкою для відновлення форми й властивостей;

- *контроль якості в цифровому полі* – симуляції (кількісний прогноз залишкового ресурсу), моделі похибок, план випробувань та автоматизовані інспекції після відновлення (3D-скан → порівняння з цифровим цільовим профілем).

Механізми застосування цифрових двійників — це технологічна архітектура, яка полягає у наступному (рис. 1) .

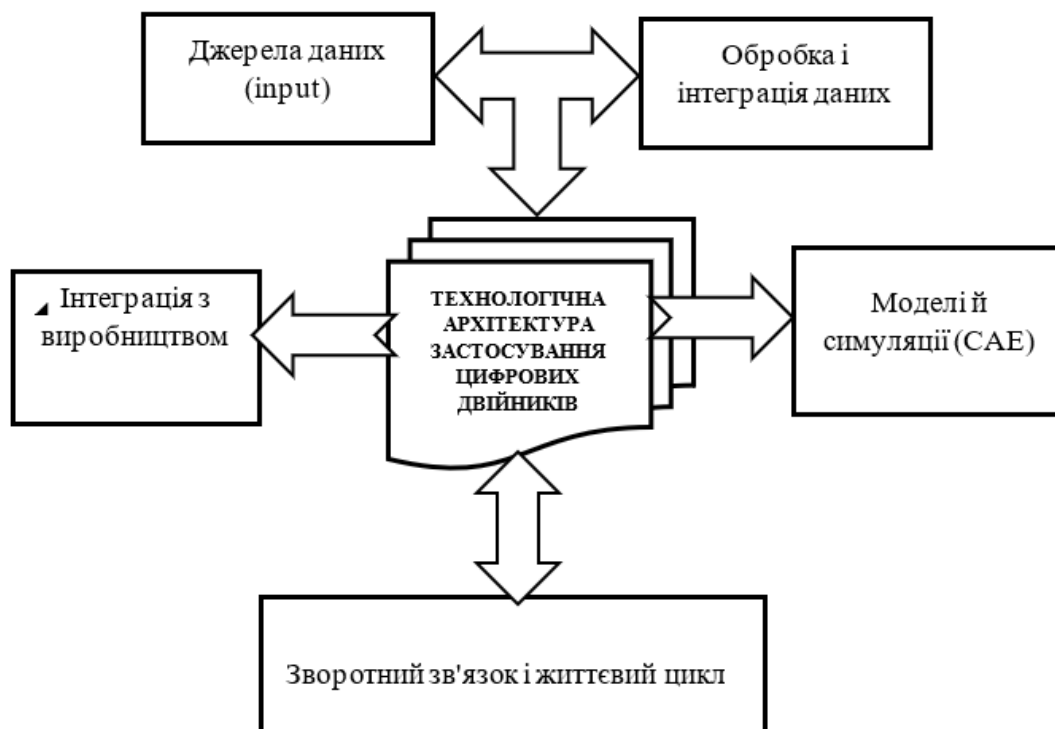


Рисунок 1 – Механізми застосування цифрових двійників. Узагальнено автором.

Розкриємо сутність цих механізмів.

1. Джерела даних (input):

- 3D-сканування поверхні (лазерні сканери, structured light, фотограмметрія);
- КТ / рентгенографія для внутрішніх дефектів;
- ультразвукове сканування (UT) для виявлення внутрішніх тріщин;
- СММ (координатні вимірювальні машини) – для критичних допусків;
- сенсори (температура, вібрація, strain gauges) при експлуатації – для онлайн-оновлення DD;
- хімічний аналіз (EDS, OES) / мікроструктурний аналіз для визначення матеріалу.

2. Обробка і інтеграція даних:

- побудова точкової хмари → фільтрація шуму → вирівнювання (registration) → реконструкція поверхні (mesh) → перетворення в параметричну CAD-модель (NURBS, B-rep);
- витягнення конструктивних особливостей (feature recognition) або створення параметричного шаблону;

- віднесення матеріальних даних до геометрії (map of hardness, корозія, товщина стінок).

3. Моделі й симуляції (CAE):

- статичний/динамічний аналіз навантажень, термодинамічні моделі, моделі втоми, моделювання процесів адитивного наплавлення (теплові / залишкові напруження);

- використання методів data-assimilation для калібрування моделей під фактичні NDT-дані (наприклад, Калманівські фільтри, баєсовські оновлення, physics-informed ML).

4. Інтеграція з виробництвом:

- CAM (план наплавлення / траєкторії інструменту) → CNC / DED машина → post-processing (механічна обробка, термообробка);

- MES/PLM для версіювання, управління матеріалами й цифрового паспорта.

5. Зворотний зв'язок і життєвий цикл:

- після відновлення – інспекція (3D-скан), порівняння з DD, внесення корекцій до процесів, оновлення цифрового паспорта.

Розглянемо як працює реверсивний реінжиніринг у покроковому робочому процесі.

Крок 1. Підготовка та діагностика:

- a) візуальний огляд, визначення ключових зон зносу/пошкодження;
- b) вибір методів NDT (УТ, рентген/КТ, магнітний контроль для феромагнітних деталей);
- c) вибір експлуатаційних даних (якщо є).

Крок 2. Оцифрування геометрії:

- a) виконати 3D-сканування (поверхня); для внутрішніх дефектів – КТ;
- b) зібрати точкову хмару; забезпечити достатню щільність і точність для критичних зон.

Крок 3. Обробка даних / реконструкція:

- a) видалення шуму, вирівнювання, сегментація зон (зона корозії, зона зносу);

b) побудова сітки (mesh), переклад у CAD (NURBS/B-rep), створення параметричної моделі.

Крок 4. Ідентифікація матеріалу і стану:

- a) хімічний аналіз, твердоміри, аналіз мікроструктури;
- b) оцінка властивостей (модуль пружності, межа текучості, залишкова міцність).

Крок 5. Аналіз і прийняття рішення:

- a) CAE – перевірити, чи можлива відновлювана геометрія забезпечить необхідний ресурс під заданими навантаженнями
- b) мультикритеріальний аналіз: витрати, час, ресурс, ризик і екологія.

Крок 6. Проектування ремонту:

- a) план покриття/наплавлення, товщина наплавлення, технологія (лазер, плазма, порошкова DED, холодне відновлення);
- b) розробка траєкторії, підготовка оснастки, фіксація деталі.

Крок 7. Виконання технологічного процесу: адитивна наплавка/напилення → механічна обробка до допусків → термообробка/відпал → поверхнєве зміцнення.

Крок 8. Контроль якості та валідація:

- a) 3D-інспекція (поверхня), NDT (внутрішні дефекти), механічні випробування зразків для підтвердження властивостей;
- b) порівняння факту з цифровим цільовим профілем.

Крок 9. Документування і оновлення цифрового паспорта: занесення в PLM/MES: всі параметри процесу, матеріали, звіти NDT, результати випробувань.

Розглянемо технології, які застосовуються для відновлення деталей.

Directed Energy Deposition (DED¹, лазерне/електронно-променеве наплавлення²) – точкові наплавки для металевих деталей; хороші для місцевих дефектів.[1]

¹ DED може означати прямий підвід енергії та матеріалу (Directed Energy Deposition) – технологію 3D-друку для створення або ремонту металевих деталей.

² Лазерне та електронно-променеве наплавлення – це процеси нанесення захисного або відновлювального шару на поверхню виробу, що використовують високоенергетичні промені для плавлення та переплавлення порошку або напиленого покриття. Лазерне наплавлення використовує лазерний промінь, а електронно-променеве – сфокусований потік високошвидкісних електронів у вакуумі. Обидва методи забезпечують високу точність,

Cold spray (холодне напилення) – для областей, де потрібна мінімальна термічна дія. [2]

Холодне напилення – це сукупність процесів нанесення покриттів, при яких частки матеріалу нагріваються до температури нижче точки плавлення, а потім розпилюються під дією зовнішньої сили, такої як газ, порошок, або електричний струм, і осідають на поверхні, утворюючи покриття. Основні принципи холодного напилення:

- низька температура: частинки матеріалу нагріваються лише до того, щоб пом'якшитись, а не до температури плавлення;

- кінетична енергія: основна енергія для формування покриття надходить від кінетичної енергії розпиленних частинок, які при зіткненні з поверхнею зварюються;

- відсутність фазових змін: на відміну від традиційного гарячого напилення, в холодному напиленні не відбувається розплавлення матеріалу та його перетворення в рідкий стан, що дозволяє зберігати початковий склад матеріалу;

- використання холодного напилення: відновлення деталей; холодне напилення використовується для відновлення зношених або пошкоджених деталей машин та механізмів; захист від корозії: нанесення антикорозійних покриттів для захисту металевих поверхонь від руйнування;

- збільшення зносостійкості: створення покриттів, які підвищують стійкість деталей до стирання та інших механічних навантажень;

- типи холодного напилення: газодинамічне напилення – застосування високошвидкісного потоку газу для розгону та доставки частинок до поверхні;

- плазмове напилення (з низькою потужністю): використання плазми для нагріву частинок до потрібної температури;

- електростатичне напилення: зарядження частинок та їх притягнення до поверхні завдяки електростатичним силам.

мінімальне нагрівання основи та покращені властивості покриття, але вимагають використання спеціалізованого обладнання.

WAAM / Wire-based AM — швидке наплавлення великих об'ємів металу. *WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)*, або адитивне виробництво з використанням дротяної дуги, це процес 3D-друку металом, при якому електрична дуга використовується для пошарового плавлення металевих дротів з метою створення тривимірних об'єктів. Ця технологія відноситься до сімейства процесів прямого енергетичного осадження (*DED*) і дозволяє створювати великі металеві деталі з високою швидкістю та низькими витратами, використовуючи роботизовані системи для точного управління процесом.

Опишемо як це працює.

1. Плавання дроту: роботизована рука подає металевий дріт до робочої зони.
2. Формування дуги: електрична дуга розплавляє дріт, утворюючи рідкий метал.
3. Пошарове осадження: розплавлений метал осідає на підкладці або попередньому шарі, поступово формуючи тривимірну структуру.
4. Контроль та захист: інертний газ використовується для запобігання окисленню та поліпшенню властивостей металу.
5. Створення об'єкта: процес повторюється, додаючи шар за шаром до отримання бажаної деталі або компонента.

Внаслідок цих операцій отримуються наступні основні характеристики.

Висока швидкість виробництва: *WAAM* має найвищу швидкість нанесення матеріалу серед процесів *DED*, що дозволяє швидко виготовляти великі конструкції.

Низька вартість матеріалів: використання металевих дротів як витратного матеріалу робить процес економічно вигіднішим.

Мінімізація відходів: технологія дозволяє робити деталі з високою точністю, наближеною до заданих форм, що скорочує втрати матеріалу.

Складність деталей: *WAAM* дозволяє створювати складні металеві деталі, які можуть бути недоступними традиційними методами.

Застосування: технологія знаходить застосування в аерокосмічній промисловості, будівництві (наприклад, 3D-друкарські мости) та виробництві великих металевих компонентів.

Адитивне виробництво з використанням дрютяної дуги – це ефективна технологія адитивного виробництва, що швидко розвивається, що поєднує в собі простоту традиційного зварювання з точністю автоматизованих систем для створення складних металевих виробів [3].

Плазмове та лазерне напилення – для зносостійких покриттів [4].

Плазмове та лазерне напилення – це сучасні технології нанесення зносостійких покриттів, що використовують енергію плазми або лазерного променя для розплавлення та нанесення матеріалу на поверхню деталі, формуючи щільний шар з високою твердістю та адгезією. Ці методи дозволяють ефективно відновлювати зношені деталі та надавати їм додатковий захист від корозії та зношування.

Плазмове напилення відрізняється тим, що низькотемпературна плазма розігріває матеріал (порошок або дріт) до високої температури, розплавлює його і прискорює до високої швидкості нанесення на поверхню деталі. Переваги цієї технології у тому, що вона формує щільний шар з мінімальною пористістю, забезпечує високу адгезію покриття до основи, дозволяє наносити покриття з різноманітних зносостійких матеріалів (метал, кераміка) та не деформує основний метал деталі.

Лазерне напилення (лазерне наплавлення) досягається завдяки тому, що лазерний промінь концентрує теплову енергію, яка дозволяє наносити тонкі, точні шари матеріалу. Переваги цієї технології у високій концентрації теплової потужності, що забезпечує мінімальну зону термічного впливу, можливість отримання тонких покриттів (від 0,1 мм до декількох міліметрів) та високій точності нанесення покриття.

Обидві технології широко застосовуються для відновлення зношених деталей (наприклад, відновлення клапанів, кулачків розподільчих валів; нанесення захисних покриттів (для захисту від корозії та механічного

зношування); покращення характеристик поверхонь (надання деталям підвищеної твердості та зносостійкості).

Гібридні підходи створюються внаслідок використання адитивних операцій разом з механічною обробкою (фінішна обробка до допусків) [5]. Адитивні операції – це процеси виготовлення об'єктів шляхом послідовного накладання шарів матеріалу, що ґрунтуються на цифровій моделі. Цей підхід, відомий як адитивне виробництво, протиставляється традиційним методам, які видаляють матеріал (субтрактивні) або формують його з більшого об'єму (формувальні).

Основні принципи адитивних операцій: пошарове створення (тривимірний об'єкт будується шар за шаром, додаючи матеріал за потребою); цифрова модель (процес керується цифровою тривимірною моделлю, що надає точні дані для принтера); спеціалізоване обладнання (для адитивних операцій використовуються тривимірні принтери, які перетворюють цифрову модель на фізичний об'єкт). Ключові переваги: гнучкість (можливість створювати складні форми та деталі з декількох матеріалів за один процес; доступність (тривимірні принтери стають швидшими, доступнішими та простішими у використанні); інноваційність (дозволяє швидко розробляти та виготовляти прототипи та готові вироби, перетворюючи цифрові дизайни на реальні об'єкти).

ВИСНОВКИ

1. У статті обґрунтовано концепцію технологічного забезпечення відновлення деталей, засновану на інтеграції цифрових двійників та реверсивного реінжинірингу, що забезпечує новий рівень якості й ефективності ремонтних процесів.

2. Використання цифрових двійників дозволяє прогнозувати працездатність виробів, визначати залишковий ресурс та формувати оптимальні технологічні маршрути відновлення.

3. Запропонований підхід сприяє зниженню витрат на ремонт на 20–30 % у порівнянні з традиційними методами та забезпечує підвищення точності геометричного відтворення деталей.

4. Реверсивний реінжиніринг у поєднанні з цифровим моделюванням створює передумови для розвитку адаптивних і гнучких виробничих систем у сфері відновлення деталей.

5. Перспективними напрямками подальших досліджень є автоматизація прийняття технологічних рішень із використанням штучного інтелекту та інтеграція розробленої концепції з сучасними системами управління життєвим циклом виробів (PLM).

БІБЛОГРАФІЧНИЙ 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. 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. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/91809>.

3. 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.

4. Системи параметрів стану робочих поверхонь і точності розмірів циліндричних загартованих зубчастих коліс очисного комбайну УКД200-500 нового покоління / В. В. Нежебовський, Р. А. Бережний, О. А. Пермяков, О. О. Ключко, С. В. Рябченко, О. В. Устиненко // Вісник Нац. техн. ун-ту «Харків. політехн. ін-т» : зб. наук. пр. Серія : Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser. : Techniques in a machine industry. Харків, 2022. № 2 (6). С. 7–15.

5. Сучасні методи обробки редукторів вугледобувних комбайнів / О. М. Ковальчук, В. В. Нежебовський, Р. А. Бережний, С. П. Біатов, О. А. Пермяков, О. О. Ключко, О. В. Устиненко, С. В. Рябченко // Інформатика, управління та штучний інтелект : тези 9-ї міжнар. наук.-техн. конф., Харків. Краматорськ, 11–13 трав. 2022 р. С. 57.

6. Відновлення деталей методом плазмового напилення. URL: <https://promavtosvarka.kyiv.ua/plazmove-napylennya>

7. Операнди і операції URL: <https://dev-club.in.ua/docs/c-language/chapter4/expressions/>

8. Мочурад Л. І., Осідач А. Б. Паралельний метод RANSAC для потокового оброблення даних сенсорів LiDAR. *Scientific Bulletin of UNFU*, 2024. 34(3), 110–116. <https://doi.org/10.36930/40340314>.

9. Дзюбик А. Р., Войтович А. А., Дзюбик Л. В. Оптимізація технології наплавлення зносостійких шарів на плоскі елементи конструкцій. Національний університет «Львівська політехніка». Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Вип. 50, 2016. С. 103. УДК 621.791.92 URL: <https://dev-club.in.ua/docs/c-language/chapter4/expressions/>

10. Piotr Koruba et al., Feasibility of laser cladding for tooling repair in aerospace manufacturing: an alternative to chrome plating (прийнято 2024, опубл. 2024/2025). ResearchGate .URL:

- https://www.researchgate.net/publication/387174887_Feasibility_of_laser_cladding_for_tooling_repair_in_aerospace_manufacturing_an_alternative_to_chrome_plating?utm_source=chatgpt.com
11. W. Sun et al., Current Implementation Status of Cold Spray Technology – review, 2022. PMC. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8966869/?utm_source=chatgpt.com
 12. J. Liang et al., Research on hybrid remanufacturing process chain of laser cladding + CNC machining + ultrasonic, 2024. ScienceDirect URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612523011647?utm_source=chatgpt.com
 13. A. Kafle et al., Advancements in Cold Spray Additive Manufacturing – Materials (MDPI), 2024. URL: Advancements in Cold Spray Additive Manufacturing: Process, Materials, Optimization, Applications, and Challenges.
 14. Fabrizia Caiazzo et al., Residual stress in laser-based directed energy deposition of aluminum alloy, 2024: simulation and validation – IJAMT (2022)/URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-07988-2?utm_source=chatgpt.com
 15. Paul Gradl / NASA — Development and experimental evaluation of Laser Powder Directed Energy Deposition (LP-DED) (дисертаційний/технічний звіт, 2024/2025)/URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589152925000481?utm_source=chatgpt.com
 16. R. Patel et al., Laser-directed energy deposition as a promising dissimilar joining technique: SS316L and IN718 case study (2025). URL: Laser-directed energy deposition as a promising dissimilar joining technique: A case study on SS316L and IN718 with CoCrFeNi-based fillers – ScienceDirect.
 17. Maintenance statistics and trends 2025. URL: <https://blog.infraspeak.com/maintenance-statistics-trends-challenges> (дата звернення: 24.04.2025)
 18. Industrial production statistics. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained> (дата звернення: 24.04.2025)

REFERENCIS:

1. Permiakov O. A. Reversyvnii inzhynirnyh 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 aerokosmichniy 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. Perspektyvy rozvytku reversyvnoho inzhynirnyhu 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>.
3. 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.
4. Systemy parametriv stanu robochykh poverkhon i tochnosti rozmiriv tsylindrychnykh zahartovanykh zubchastykh kolis ochysnoho kombainu UKD200-500 novoho pokolinnia / V. V. Nezhebovskiy, R. A. Berezhnyi, O. A. Permiakov, O. O. Klochko, S. V. Riabchenko, O. V. Ustynenko // Visnyk Nats. tekhn. un-tu «Kharkiv. politekn. in-t» : zb. nauk. pr. Serii : Tekhnolohii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser. : Techniques in a machine industry. Kharkiv, 2022. № 2 (6). S. 7–15.
5. Suchasni metody obrobky reduktoriv vuhledobuvnykh kombainiv / O. M. Kovalchuk, V. V. Nezhebovskiy, R. A. Berezhnyi, S. P. Biatov, O. A. Permiakov, O. O. Klochko, O. V. Ustynenko, S. V. Riabchenko // Informatyka, upravlinnia ta shtuchnyi intelekt : tezy 9-yi mizhnar. nauk.-tekhn. konf., Kharkiv, Kramatorsk, 11–13 trav. 2022 r. S. 57.

6. Vidnovlennia detalei metodom plazmovoho napylennia. URL: <https://promavtosvarka.kyiv.ua/plazmove-napylennya>.
7. Operandy i operatsii URL: <https://dev-club.in.ua/docs/c-language/chapter4/expressions/>
8. Mochurad, L. I., Osidach, A. B. Paralelnyi metod RANSAC dlia potokovoho obroblennia danykh sensoriv LiDAR. Scientific Bulletin of UNFU, 2024. № 34(3), 110–116. URL: <https://doi.org/10.36930/40340314>.
9. Dziubyk A. R., Voitovych A. A., Dziubyk L. V. Optymizatsiia tekhnolohii naplavlennia znosostiikykh shariv na ploski elementy konstruksii. Natsionalnyi universytet «Lvivska politekhnika». Avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni. Vyp. 50, 2016. S. 103 UDK 621.791.92. URL: <https://dev-club.in.ua/docs/c-language/chapter4/expressions/>
10. Piotr Koruba et al., Feasibility of laser cladding for tooling repair in aerospace manufacturing: an alternative to chrome plating (pryiniato 2024, opubl. 2024/2025). ResearchGate .URL: https://www.researchgate.net/publication/387174887_Feasibility_of_laser_cladding_for_tooling_repair_in_aerospace_manufacturing_an_alternative_to_chrome_plating?utm_source=chatgpt.com.
11. W. Sun et al., Current Implementation Status of Cold Spray Technology – review (2022). PMC. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8966869/?utm_source=chatgpt.com
12. J. Liang et al., Research on hybrid remanufacturing process chain of laser cladding + CNC machining + ultrasonic (2024). ScienceDirect URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612523011647?utm_source=chatgpt.com
13. A. Kafle et al., Advancements in Cold Spray Additive Manufacturing – Materials (MDPI), 2024. URL: Advancements in Cold Spray Additive Manufacturing: Process, Materials, Optimization, Applications, and Challenges
14. Fabrizia Caiazzo et al., Residual stress in laser-based directed energy deposition of aluminum alloy 2024: simulation and validation – IJAMT (2022). URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-07988-2?utm_source=chatgpt.com
15. Paul Gradl / NASA – Development and experimental evaluation of Laser Powder Directed Energy Deposition (LP-DED) (dysertatsiinyi/tekhnichnyi zvit, 2024/2025)/URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589152925000481?utm_source=chatgpt.com
16. R. Patel et al., Laser-directed energy deposition as a promising dissimilar joining technique: SS316L and IN718 case study, 2025. URL: Laser-directed energy deposition as a promising dissimilar joining technique: A case study on SS316L and IN718 with CoCrFeNi-based fillers – ScienceDirect.
17. Maintenance statistics and trends 2025/ URL: <https://blog.infraspeak.com/maintenance-statistics-trends-challenges> (data zvernennia: 24.04.2025).
18. Industrial production statistics/ URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained> (data zvernennia: 24.04.2025).

Стаття надійшла до редакції: 18.07.2025; рецензування: 28.07.2025;

прийнята до публікації 02.08.2025. Автори прочитали и дали згоду рукопису.

The article was submitted on 18.07.2025; revised on 28.07.2025; and accepted for publication on 02.08.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.