

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

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

***Анотація.** Сучасна практика відновлення у машинобудуванні та, особливо у аерокосмічній індустрії – це гібрид традиційних технологій та технологій нового покоління, адитивних і безтермічних методів. Розглянуто класифікацію, системний підхід до відновлення деталей машин, який передбачає комплексний аналіз для прийняття рішення про доцільність ремонту виробу, оптимального методу та забезпечення початкових геометричних і фізико-механічних властивостей при мінімальних витратах.*

***Ключові слова:** відновлення, інформація, підприємство, системний підхід, класифікація.*

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*

CLASSIFICATION AND SYSTEMATIC APPROACH TO THE RESTORATION OF MACHINERY PARTS

***Abstract.** Modern practice of restoration in mechanical engineering and, especially, in the aerospace industry is a hybrid of traditional and new generation technologies, additive and athermal methods. The classification, a systematic approach to the restoration of machine parts, which involves a comprehensive analysis for making a decision on the feasibility of repairing the product, the optimal method and ensuring the initial geometric and physical-mechanical properties at minimal cost.*

***Keywords:** restoration, information, enterprise, systems approach, classification.*

Постановка проблеми. Забезпечення сталого розвитку та успішного функціонування підприємств, в умовах сьогодення, залежить від ефективності прийняття рішень по системі та технологічному забезпеченні процесів відновлення деталей машин, створення комплексної методології та технології, які дозволять:

- відновити деталі та вузли, що втратили працездатність (знос, пошкодження, втома матеріалу);

- використовувати реверсивний інжиніринг (3D-сканування, цифрові двійники, CAD/CAE-системи) для точного відтворення геометрії та властивостей;
- розробити технології відновлення (наплавлення, адитивні технології, поверхневе зміцнення, комбіновані методи);
- забезпечити цифрово-аналітичний цикл: діагностика → оцифровка → проектування відновлення → вибір технології → контроль якості → прогноз ресурсу.

Аналіз основних досліджень та публікацій. Дослідженню проблеми відновлення деталей машин присвятили праці провідні науковці, такі як О. Пермяков, І. Яковенко, О. Набока, С. Мехович, В. Попов, Ю. Харламов, М. Зенкін, М. Молодик, І. Смирнов, Ю. Тимофєєв, А. Грабченко, В. Залога, М. Кундрак, М. Хорват, Ю. Внуков та інші. Проте, питання класифікації відновлюваних деталей, поверхонь, дефектів та умов їх роботи є недостатньо вирішеними і потребують подальшого розгляду та поглиблення, з урахуванням факторів та основних проблем, для прийняття відповідних, оптимальних рішень.

Мета дослідження. Є класифікація відновлюваних поверхонь, класифікація дефектів деталей машин та технологічна спадковість при відновленні.

Матеріали та методи. Поставлена проблема вирішується аналітичними та експериментальними методами на основі використання сучасних досягнень у технології машинобудування з урахуванням системного аналізу конструкторсько-технологічних вимог до відновлювальних деталей при реверсивному інжинірингу.

Викладення основного матеріалу.

Класифікація відновлюваних поверхонь

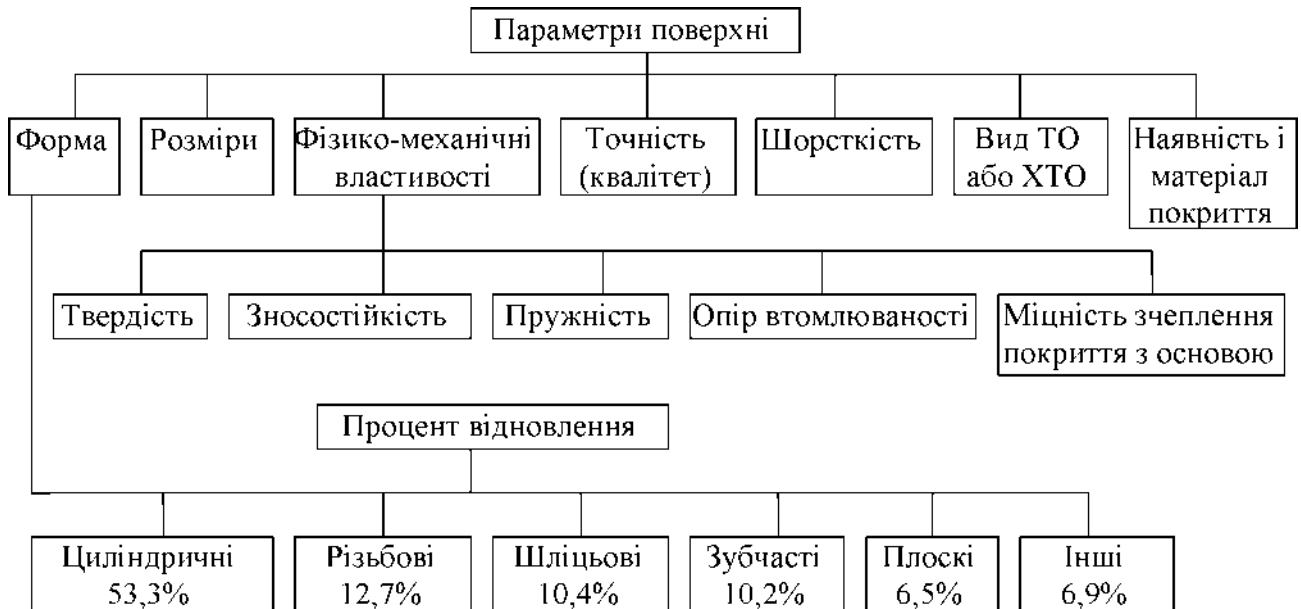
Поверхні деталей машин, що підлягають відновленню можна розділити на п'ять видів.

1. Виконавчі поверхні – призначені для виконання відновлення.
2. Основні поверхні – призначені для установки деталей у визначене положення у відповідності з конструкцією.
3. Допоміжні поверхні – слугують опорою для інших деталей і визначають їхнє положення в механізмі (ступені на валу, торцеві поверхні втулок, зубчастих

колiс i т.п.).

4. Технологiчнi поверхнi – призначенi для базування деталей при виготовленнi i вiдновленнi (центрувальнi поверхнi на валах).

5. Вiльнi поверхнi – з'єднують усi поверхнi в одне цiле i не стикаються з поверхнями iнших деталей (як правило, не обробляються).



Крім параметрів відновлюваних поверхонь на вибір способу відновлення впливають такі фактори як: тип спряження, вид тертя, відносне переміщення поверхонь у процесі експлуатації.

Класифікація дефектів ДМ

Класифікація дефектів дозволяє правильно вибрати технологічний процес відновлення, розраховувати трудові і матеріальні витрати, планувати виробництво.

Відповідно до ISO 9000:2015, дефект – це кожна окрема невідповідність продукції установленим вимогам.

Дефекти поділяють на усувні і неусувні. Якщо розглядати у відсотках, то 74,9 % відносяться до невідповідності розмірів, 19,5 % невідповідність форми, 4,9 % невідповідність шорсткості, 0,2 % фізико-хімічних властивостей і 0,5 % порушення цілісності (тріщини, обломи, розриви та ін.).

При виборі способу і технології відновлення велике значення також мають

розміри дефектів. Тут виділяють три групи:

I група – до 0,5 мм;

II група – 0,5 мм - 2 мм;

III група – понад 2 мм.

Імовірність появи дефектів кількісно оцінюється на підставі обробки статистичних даних і характеризується коефіцієнтом повторюваності дефектів $K_{n.d}$:

$$K_{n.d} = n_d / n_g ,$$

де n_d – кількість деталей з даним дефектом із загальної кількості продефектованих; n_g – загальна кількість продефектованих ремонтпридатних деталей.

Ремонтпридатні деталі характеризуються коефіцієнтом відновлення:

$$K_v = K_{z.v} \cdot K_z / (1 + K_{z.v}^m \cdot K_z^m),$$

де $K_{z.v}$ – коефіцієнт придатності деталей для відновлення; K_z – коефіцієнт виходу придатних деталей у процесі відновлення; m – кратність відновлення деталей.

Часто для розрахунку обсягів робіт, що виконуються при відновленні деталей, використовують коефіцієнт придатності деталей для відновлення $K_{z.v}$.

$$K_{z.v} = n_g / n_{def},$$

де n_g – кількість деталей даного найменування, що підлягають відновленню (ремонтпридатних); n_{def} – загальна кількість деталей даного найменування, що підлягають дефектації.

Системний підхід до відновлення деталей машин

В якості основних об'єктів проектування в галузі відновлення деталей виступають деталь і технологічний процес відновлення.

У силу того, що відновлення деталей носить комплексний характер, необхідний системний підхід.

Деталь як об'єкт проектування відповідає усім вимогам поняття системи, тобто має цілісність і складається з взаємозалежних частин. Цими частинами є опорні, поверхні тертя, закріплювальні, сполучні та інші поверхні, між якими існують визначені відношення.

Наприклад, співвідношення між шорсткістю і відхиленням форми циліндричності.

Деталь як система може поділятися на підсистеми і на структурні складові (елементи).

Кількість структурних складових залежить від типу і складності конструкції деталі, її службового призначення. Ієрархічну структуру деталі можна показати на прикладі ведучого вала шестерні. У даному випадку першочергове значення для визначення стану всієї системи мають поверхні, що спряжені.

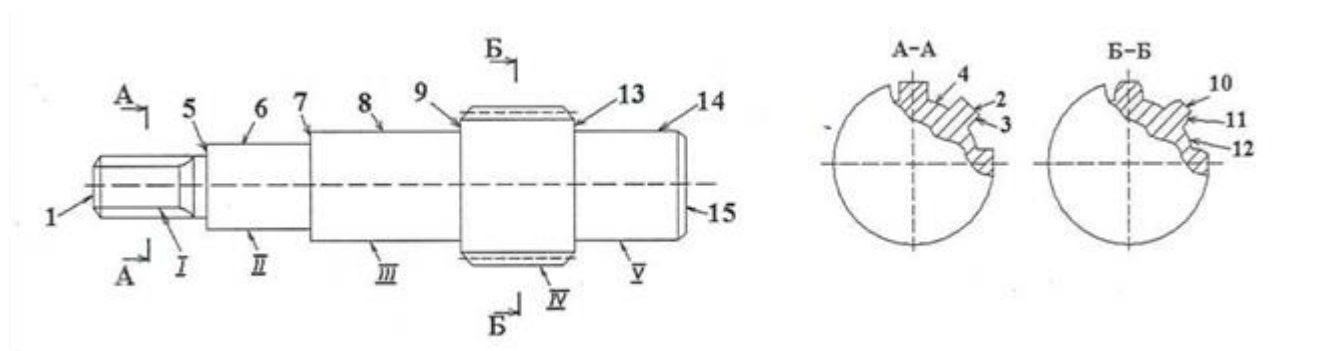


Рисунок 1 – Ієрархічна структура ведучого вала шестерні

Таблиця 1 – Ієрархічний рівень

Система	Деталь вал-шестерня				
Підсистема	I	II	III	IV	V
Елементи	Шліцьова частина вала	Частина деталі під сальник	Цапфа	Зубчата частина деталі	Цапфа
	Поверхні 1-4	Поверхні 5-6	Поверхні 7-8	Поверхні 9-13	Поверхні 14-15

Технічні умови на виготовлення деталі задають визначений зв'язок між різними поверхнями у виді допустимих відхилень у їхньому взаємному розташуванні. При цьому кількісною ознакою появи дефектів може бути тіснота кореляційного зв'язку між дефектами деталі.

Показником кореляційного зв'язку є вибірковий коефіцієнт парної кореляції. Для його визначення знаходять оцінки математичних очікувань розмірів поверхонь, що зношують

$$M(x_i) = \sum_{i=1}^N X_i / N$$

де N – величина партії обстежених деталей; x_i – розмір i -ї поверхні деталі.

Дисперсії розмірів поверхонь визначають із залежності:

$$D(x_i) = \sum_{i=1}^N x_i - M(x_i)^2 / N \quad ,$$

середньоквадратичне відхилення

$$\sigma(x_i) = \sqrt{D(x_i)} \quad .$$

Вибірковий коефіцієнт парної кореляції визначають із залежності:

$$\Gamma_{x_i x_j} = \frac{K_{x_i x_j}}{\sigma_{x_i} \sigma_{x_j}},$$

де $K_{x_i x_j} = \sum_{i=1}^N x_i - M(x_i) \cdot x_j - M(x_j) / (N - 1)$.

Таким чином, виявлення взаємозв'язків між дефектами на зношених деталях дозволяє правильно формувати маршрути їхнього відновлення. При наявності сильних кореляційних зв'язків між різними дефектами доцільно поєднувати їх у загальні технологічні маршрути.

Технологічний процес відновлення деталей представляє також комплекс взаємозалежних елементів, у якості яких виступають деталь, технологічні операції, режими, устаткування. У структурному відношенні технологічний процес відновлення деталі можна розглядати як сукупність способів усунення дефектів. При технологічному проектуванні намічаються чотири основних рівні:

1. рівень технологічного процесу;
2. рівень технологічного способу;
3. рівень операції;
4. рівень переходу.

Технологічна спадковість при відновленні деталей машин

Технологічна спадковість – це перехід властивостей відновлюваних деталей від операції до операції. На відміну від виготовлення деталей, при відновленні дане явище включає також, експлуатаційну спадковість, тобто переніс властивостей деталей, які отримуються в результаті впливу на них різних процесів при експлуатації, на властивості відновлених деталей.

Носієм спадкової інформації є матеріал деталі і її геометричні параметри.

Залишкові явища руйнівних процесів для більшості деталей усунути в період їхнього відновлення неможливо, тому вони впливають на якість окремих технологічних операцій і на залишкову якість відновлених деталей.

Наприклад, на поверхні зношеної деталі завжди присутній дефектний шар товщиною до 200 мкм, що містить різні дефекти кристалічної структури, що з'явилися в результаті фазових перетворень, утворення вторинних структур, рекристалізації, наклепу. Такий дефектний шар негативно впливає на втомлювану міцність відновлених деталей, тому що містить концентратори напружень, знижує міцність зчеплення покриттів з основним металом, погіршує показники якості поверхні і т.д.

Багато забруднень деталей машин, що володіють властивостями ПАВ, знижують поверхневу енергію матеріалу деталей, сприяють пластичному диспергуванню поверхні.

Положення ускладнюється ще тим, що на один і той самий технологічний процес відновлення надходять зношені деталі, що працюють у неоднакових умовах експлуатації, що мають різний наробіток та ін.

Таким чином у технологічному процесі відновлення повинні бути передбачені операції, що знижують експлуатаційну спадковість, такі як очищення забруднень, видалення корозії, усунення дефектного шару і т. п.

Великий вплив на якість відновлених деталей мають фінішні операції. Існують операції, що виконують роль своєрідних «бар'єрів» для спадковості. Це операції термічної або зміцнюючої обробки.

При відновленні деталей машин різними способами нанесення металу на поверхню виникає неоднорідність властивостей отриманих покриттів по товщині, що залежить від способу відновлення.

Так, наприклад, при газотермічному напилюванні глибина дефектного шару складає 0,02–1,0 мм, при наплавленні 0,2–2,4 мм, при електролітичному осадженні 0,02–0,05 мм, при заливанні рідкого металу 1,0–1,5 мм. Дефектний шар впливає на наступну механічну обробку і її похибки.

Для визначення впливу технологічної спадковості на зміну параметрів

деталі застосовують залежність:

$$R_B = a \cdot R_{\text{вих}}^b,$$

де R_B – значення параметра якості для остаточної операції; $R_{\text{вих}}^b$ – значення того ж параметра для вихідної операції; a та b – коефіцієнти технологічної спадковості, визначають на основі багатофакторного аналізу з одержанням рівнянь регресії.

Наприклад, при відновленні поршневих пальців тракторних двигунів способом гідротермічного оброблення, після шліфування в 30 % деталей з'являється брак – чорноти по зовнішній циліндричній поверхні пальців. Причиною дефекту є низька надійність попередньої операції – роздачі пальця. У результаті охолодження поршневих пальців прямим потоком після роздачі вони приймають корсетоподібну форму, і, як наслідок, утворюється нерівномірний припуск на шліфування.

У випадку застосування більш сучасного способу охолодження «спрейєрного» – області розподілу приростів зовнішнього діаметра поршневого пальця зміщується в бік збільшення приростів. У результаті чого надійність технологічного процесу відновлення збільшується.

Явище технологічної спадковості існує і для додаткових матеріалів, що застосовуються в процесі відновлення. Наприклад, вихідна структура і властивості металевих порошків, які використовуються для нанесення покриттів, в залежності від способу відновлення можуть успадковуватися на поверхні деталі або значно змінюватися. При нанесенні покриттів у температурному режимі $(0,4...0,9)T_{\text{пл}}$ порошкового матеріалу, електроімпульсним припіканням, параметри матеріалу зберігаються такими, якими вони були в найбільш сприятливих умовах виробництва порошку. У шарах же, отриманих розплавленням порошкоподібних матеріалів, властивості багатьох видів порошків зберігаються не цілком.

Висновки

1. У статті обґрунтовано концепцію технологічного забезпечення відновлення деталей, що забезпечує новий рівень якості й ефективності ремонтних процесів.

2. Запропонований підхід сприяє зниженню витрат на ремонт у порівнянні з традиційними методами та забезпечує підвищення точності геометричного відтворення деталей.

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

4. Запропоновано теоретичні засади технологічного забезпечення процесу відновлення зношеної деталі за рахунок персоніфікованого цифрового супроводу деталей.

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. 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>
3. Відновлення деталей методом плазмового напилення. URL: <https://promavtosvarka.kyiv.ua/plazmove-napylennya>
4. 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 103 УДК 621.791.92 URL: <https://dev-club.in.ua/docs/c-language/chapter4/expressions/>
5. 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.
6. 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
7. Національна стратегія Індустрії 4.0, АППАУ. URL: <https://strategy.uifuture.org/kraina-zrozinutoyu-cifrovoyu-ekonomikoju.html> (дата звернення: 12.01.2022).
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. Мехович С. А. Формирование региональных межотраслевых связей на основе концепции технологического реинжиниринга: монография / Мехович С. А. Харків : «Щедра садиба плюс». с. 352, прил. 7., укр.

10. [Електронний ресурс.] Джерело інформації: <http://upr-search.com.ua/44-promyshlennost-ukrainy-obshhij-vzglyad.html>

11. Demirkan H., Spohrer J. C., Welser J. J. Digital Innovation and Strategic Transformation. *IT Professional*, 2016. С. 14–18. URL: <https://doi.org/10.1109/МІТР.2016.115>.

REFERENCES:

1. Permiakov O. A. Reversywni 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 "KhPI". Kharkiv : Vydavnytstvo Ivanchenka I. S., 2023. S. 48–50. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/78929>*

2. Perspektyvy rozvytku reversywnoho 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>*

3. Vidnovlennia detalei metodom plazmovoho napyleniia. URL: <https://promavtosvarka.kyiv.ua/plazmove-napyleniia>

4. 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 pryladobuduvanni. Vyp. 50. 2016 103 UDK 621.791.92 URL: <https://dev-club.in.ua/docs/c-language/chapter4/expressions/>*

5. 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.*

6. 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

7. Nacionalna strategiia Industriyi 4.0, APPAU. URL: <https://strategy.uifuture.org/kraina-zrozvynutoyu-cifrovoyu-ekonomikoyu.html> (data zvernennya: 12.01.2022).

8. Popov O.V. (2022) *Tehnologichnij reinzhiniring promislovih 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. Mehovich S. A. Formirovanie regionalnyh mezhotraslevykh svyazej na osnove koncepcii tekhnologicheskogo reinzhiniringa: monografiya / Mehovich S. A. H: «Shedra sadiba plyus». s. 352, pril. 7., ukr.

10. [Elektronnij resurs.] Dzherelo informaciyi: <http://upr-search.com.ua/44-promyshlennost-ukrainy-obshhij-vzglyad.html>

11. Demirkan H., Spohrer J. C., Welser J. J. Digital Innovation and Strategic Transformation. *IT Professional*. 2016 С. 14–18. URL: <https://doi.org/10.1109/МІТР.2016.115>.

Стаття надійшла до редакції: 14.01.2026; рецензування: 25.01.2026; прийнята до публікації 05.02.2026. Автори прочитали і дали згоду рукопису.

The article was submitted on 14.01.2026; revised on 25.01.2026; and accepted for publication on 05.02.2026. The authors read and approved the final version of the manuscript.