УДК

А.В. Кологойда, О.О. Аксьонова
*Національний університет «Чернігівська політехніка», Чернігів, Україна*

# АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ВІДНОВЛЕННЯ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ МЕТОДАМИ 3D-ДРУКУ

*У роботі проаналізовано параметри відновлення компонентів систем транспортних засобів методами адитивного виробництва. Наукова новизна полягає у встановленні впливу анізотропії композитних філаментів на герметичність деталей під робочим навантаженням. Запропоновано використання математичної моделі прогнозування руйнівного навантаження залежно від орієнтації шарів для розрахунку стінок з урахуванням пористості. Пропонується визначати економічну доцільність та переваги 3D-друку через модель витрат та інтегральну модель, при перевищенні критичного часу простою техніки. В подальшому результати можуть бути використані для розробки мобільних комплексів оперативного ремонту транспортних засобів, створення цифрових каталогів запасних частин.*
***Ключові слова**: адитивні технології, 3D-друк, відновлення деталей, параметри друку, автомобільний транспорт, топологічна оптимізація.*

*The paper analyzes the parameters of the restoration of vehicle system components using additive manufacturing methods. The scientific novelty lies in establishing the influence of the anisotropy of composite filaments on the tightness of parts under working load. It is proposed to use a mathematical model for predicting the destructive load depending on the orientation of the layers for calculating walls taking into account porosity. It is proposed to determine the economic feasibility and benefits of 3D printing through a cost model and an integral model when the critical downtime of the equipment is exceeded. In the future, the results can be used to develop mobile complexes for rapid vehicle repair and create digital spare parts catalogs.*
***Key words**: additive technologies, 3D printing, part recovery, printing parameters, road transport, topological optimization.*

Сучасний розвиток автомобільного транспорту характеризується складністю конструкцій різних систем транспортних засобів, що працюють у режимах високих тисків та інтенсивних динамічних навантажень. Традиційний технічний сервіс передбачає відновлення працездатності таких вузлів шляхом заміни на нові оригінальні компоненти або використання класичних методів ремонту (наплавлення, механічна обробка). Проте глобальні логістичні виклики, дефіцит складських запасів для застарілих або ексклюзивних моделей автомобілів, а також висока вартість простою автопарку, створюють гостру потребу в альтернативних методах відновлення.

Адитивне виробництво (3D-друк) відкриває принципово нові можливості для оперативного відновлення функціональності компонентів різних систем автомобіля безпосередньо на місці експлуатації. Однак широке впровадження цієї технології стримується низкою невирішених науково-технічних суперечностей.

По-перше, анізотропна природа 3D-друкованих структур створює ризики втрати герметичності та непередбачуваного руйнування під дією високих тисків та інтенсивних динамічних навантажень.

По-друге, існуючі методики розрахунку міцності не враховують специфічну пористість та міжшарову адгезію композитних матеріалів.

Крім того, відсутній комплексний інструментарій, який би дозволяв фахівцю обґрунтувати вибір між купівлею нової деталі та її адитивним відновленням з урахуванням не лише собівартості, а й економічних показників життєвого циклу.

Таким чином, наукове обґрунтування параметрів адитивного відновлення, що поєднує фізико-механічну надійність та економічну доцільність, є актуальним завданням для розвитку науки в галузі автомобільного транспорту в умовах переходу до концепції Індустрії 4.0.

Аналіз сучасних наукових праць свідчить про стрімке зростання інтересу до адитивних технологій, проте дотепер питання їх безпосереднього впровадження у процеси технічного обслуговування транспортних засобів залишалося поза межами системного наукового розгляду. Більшість існуючих досліджень фокусуються на загальних властивостях матеріалів, тоді як технологічна інтеграція 3D-друку в цикли відновлення компонентів систем та розробка відповідних протоколів є практично невисвітленими. Це створює необхідність переходу від теоретичного

вивчення методу до формування науково обґрунтованих технологічних карт відновлення деталей безпосередньо в умовах сучасних підприємств.

Дослідження таких вчених, як Кушнірчук А.С., Ткачук В.П., Харжевський В.О. (проводять дослідження міцнісних характеристик деталей, отриманих за допомогою FDM друку із ABS 7 та COPET пластику, та описано конструкцію установки для дослідження на зносостійкість тіл, отриманих FDM друком) [1,2]. У роботах Ian Gibson [3] детально описано загальні принципи адитивного виробництва, проте питання відновлення компонентів систем транспортних засобів, які мають певне навантаження, залишається дискусійним. Проблема анізотропії властивостей 3D-друкованих виробів широко висвітлена в працях S. H. Ahn та ін. [4] та Armando Ramalho, Dino Freitas, Henrique Almeida та ін. [5], J.M. Chacón [6], де автори вказують на суттєву різницю в міцності матеріалу в повздовжньому та поперечному напрямках нанесення шарів.

Що стосується економічного аспекту, то праці T. Holmström та J. Partanen обґрунтовують перехід до «цифрових складів» (Digital Warehousing), доводячи перевагу локального виробництва над глобальними логістичними ланцюгами. Водночас у вітчизняній та світовій практиці недостатньо представлені комплексні математичні моделі, які б інтегрували технічний параметр анізотропної міцності з динамічними показниками логістичних втрат. Більшість існуючих підходів розглядає або суто інженерну, або суто економічну сторону, залишаючи без уваги створення єдиного інструменту, такого як модель Integrated Fuel Economy.

На відміну від односторонніх підходів, нами запропоновано аналітичний підхід, що базується на встановленні функціональної залежності між геометричними параметрами друку та здатністю деталі протистояти високим навантаженням і на стадії проєктування оцінити експлуатаційну надійність відновлювальної деталі. Математичним вираженням цього зв'язку виступає модель визначення граничного тиску руйнування $P_{max}$.

$$P_{\text{макс}} = f(\sigma_{material}, \alpha, \rho, k_{layer})$$

де:

$\sigma_{material}$ – межа міцності матеріалу;

α – кут орієнтації шарів відносно вектора головних напружень;

ρ – щільність заповнення;

$k_{layer}$ – коефіцієнт адгезії між шарами.

Ця модель дозволяє адаптувати технологію під конкретні умови та робочі навантаження на відновлені компоненти систем транспортних засобів шляхом варіювання параметрів укладання філаменту. Ми розраховуємо таку орієнтацію деталі на столі принтера, при якій вектори навантаження будуть перпендикулярні до меж шарів, що мінімізує ризик розшарування.

Перехід від розрахунку міцності деталі, яка надрукована на 3D принтері, до оцінки її комерційної придатності потребує формування комплексної вартісної моделі. В умовах сучасного автосервісу, де швидкість відновлення працездатності транспортного засобу є критичним конкурентним чинником, традиційні методи калькуляції собівартості, що враховують лише прямі витрати, є недостатніми. Для повного відображення економічної переваги виробництва методом 3D друку нами запропоновано модель сукупних витрат, яка об'єднує виробничу собівартість та втрати від простою техніки.

$$C_{total} = C_{mat} \cdot m + E \cdot t_{print} + A \cdot t_{print} + L_{loss} \cdot T_{downtime}$$

де:

$C_{mat} \cdot m$ – вартість матеріалу масою m;

$E \cdot t_{print}$ – витрати на електроенергію за час друку;

$A \cdot t_{print}$ – амортизація обладнання;

$L_{loss} \cdot T_{downtime}$ – збитки від простою автомобіля (грн-год), помножені на час очікування запчастини.

Запропонована модель сукупних витрат дозволяє провести об'єктивне пряме порівняння між традиційною схемою закупівлі запчастини у офіційного представника та її миттєвим виготовленням за допомогою адитивних технологій. Особливого значення ця модель набуває для комерційного транспорту, де показник часу не просто впливає на зручність, а є ключовим фінансовим чинником. У ситуаціях, коли година простою вантажного автомобіля або спецтехніки може коштувати підприємству від декількох сотень до тисяч гривень, швидкість виготовлення деталі стає стратегічним пріоритетом, що значно переважає вартість самого матеріалу. Застосування цієї формули у поєднанні з розрахунком руйнівного навантаження дозволяє автоматизувати прийняття рішень. Якщо розраховане значення сукупних витрат для адитивного методу є нижчим за сумарну вартість покупки та втрат від очікування, рекомендовано друк деталі.

Аналіз сучасного стану експлуатації систем транспортних засобів підтвердив, що традиційні методи ремонту та стратегії заміни вузлів на нові оригінальні компоненти в умовах глобальних логістичних криз стають неефективними. Ситуація ускладнюється дефіцитом складських запасів для застарілих або ексклюзивних моделей транспортних засобів, де термін очікування необхідної деталі може тривати тижнями. Головною перешкодою для впровадження адитивних технологій у процес відновлення високонавантажених деталей є анізотропна природа FDM-структур та відсутність методик, що інтегрують інженерну надійність з економічними показниками. Перехід до концепції «цифрових складів» (Digital Warehousing) потребує створення єдиного наукового інструментарію, здатного прогнозувати поведінку деталі під високим навантаженням.

На основі аналізу фізико-механічних процесів, що відбуваються всередині надрукованої деталі, запропоновано багатофакторну математичну модель прогнозування руйнівного тиску. Шляхом математичного варіювання вектора укладання філаменту відносно головних напружень стає можливим цілеспрямовано перерозподілити навантаження. Замість того, щоб навантажувати найбільш вразливі зони – міжшарові з'єднання, вектор сили спрямовується на суцільні армовані волокна композиту. Це дозволяє радикально мінімізувати ризики передчасного розшарування та забезпечити цілісність деталі навіть при великих навантаженнях. Припущено, що шляхом варіювання вектора укладання філаменту відносно головних напружень можна перерозподілити навантаження з міжшарових з'єднань на суцільні волокна композиту, що мінімізує ризики розшарування.

Для підприємства технічна придатність деталі автомобіля повинна обов'язково корелювати з економічною ефективністю. Розроблено модель сукупних витрат, яка, на відміну від існуючих підходів, враховує не лише виробничу собівартість, а й динамічні логістичні втрати від простою техніки. Це дозволило реалізувати інтегральний підхід Integrated Fuel Economy, де швидкість виготовлення запчастини стає домінуючим фактором при прийнятті рішення.

Запропонований аналітичний підхід дозволяє автоматизувати процес прийняття інженерних рішень. Розроблений алгоритм порівнює розрахований технічний запас міцності та економічну вигоду, видаючи рекомендацію щодо доцільності друку. Це перетворює адитивне виробництво з експериментальної технології на надійний інструмент управління технічним станом автопарку в межах Індустрії 4.0.

1. Кушнірчук А. С., Ткачук В. П., Харжевський В. О. Дослідження міцнісних характеристик деталей отриманих за допомогою FDM друку із ABS 7 та COPET пластику. Міжвузівський збірник наукових праць (за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки»). Луцьк. Випуск 76. 2023 С. 147–152.

2. Кушнірчук А. С. Установка для дослідження на зносостійкість тіл отриманих FDM друком. The 9th International scientific and practical conference "Modern research in world science", November 28-30, 2022. Lviv, Ukraine. 2022. pp. 506–-509. Описано конструкцію установки для дослідження на зносостійкість тіл отриманих FDM друком.

3. "Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing", 2nd Edition By Ian Gibson (Deakin University, Australia), David Rosen (Georgia Institute of Technology, USA) and Brent Stucker (University of Louisville, USA), Springer Science+Business Media, New York, USA, 2015, 498 pages, ISBN: 978-1-4939-2112-6;

4. Ahn S, Montero M, Odell D, Roundy S, Wright PK (2002), "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS". Rapid Prototyping Journal, Vol. 8 No. 4 pp. 248–257, doi: https://doi.org/10.1108/13552540210441166;

5. Armando Ramalho, Dino Freitas, Henrique Almeida, The anisotropy and friction effect in the design of 3D printed PLA parts – A case study, Materials Today: Proceedings, 2023, ISSN 2214-7853, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.196;

6. J.M. Chacón, M.A. Caminero, E. García-Plaza, P.J. Núñez, Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection, Materials & Design, Volume 124, 2017, Pages 143-157, ISSN 0264-1275, https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065;

7. Holmström J, Partanen J (2014), Digital manufacturing-driven transformations of service supply chains for complex products. Supply Chain Management: An International Journal, Vol. 19 No. 4 pp. 421–430, doi: https://doi.org/10.1108/SCM-10-2013-0387.