
**СКОРОЧЕННЯ ВАРТОСТІ ЖИТТЕВОГО
ЦИКЛУ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ
ЗАЛІЗНИЦЬ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ
У ЛОКОМОТИВОРЕМОНТНЕ ВИРОБНИЦТВО
АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Каращук В. О.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-12>

ВСТУП

Експлуатація тягового рухомого складу залізниць сприяє не лише ефективному перевізному процесу але водночас супроводжується поступовим зносом основних фондів. Утримання локомотивів у справному стані, операції технічного обслуговування, поточних та капітальних ремонтів є невід’ємною частиною транспортного виробництва, як галузі, та складають значну частку вартості їх життєвого циклу. На сьогоднішній день транспортна галузь України стикнулася з низкою серйозних проблем що стосуються стану транспортної інфраструктури. Значна застарілість рухомого складу, низькі темпи оновлення парку локомотивів, недостатність фінансування, незадовільний стан рейкової колії створюють загрозу безпеці процесу перевезень вантажів та пасажирів. Наприклад, загальний парк вантажних вагонів в середньому має ступінь зносу понад 90%, середній відсоток зносу парку локомотивів перевищує 95%¹. Станом на 31.12.2020 знос моторвагонного рухомого складу у приміському сполученні становить по електропоїздах – 90,06%; дизель-поїздах –97,40%, рейкових автобусах – 28,50%. Понад подовженого терміну служби (більше 50 років) експлуатується 262 секції, або 54 состави (43,9%), електропоїздів постійного струму; 28 секцій, або 7 составів (6,1%), електропоїздів змінного струму та (понад 40 років) 47 секцій, або 24 состави (32,0%), дизель-поїздів².

¹ Свириденко Ю. Щодо розвитку залізничної галузі та її впливу на економічне зростання. URL: https://cfts.org.ua/blogs/schodo_rozvitku_zaliznichno_galuzi_ta_vpplivu_na_ekonomichne_zrostannya_561

² Інтегрований звіт АТ «Укрзалізниця» за 2020 рік. URL: <https://www.uz.gov.ua/files/file/about/investors/UZ%20Integrated%20Report%202020%20Ukr.pdf>

Локомотивні господарства залізниць відчувають гостру потребу у запасних частинах, нових підходах та технологіях ремонту. Застарілість тягового рухомого складу викликає специфічні проблеми для ремонтних підрозділів щодо нестачі та замовлення запасних частин. За даними УЗ за 2020 рік заплановано витрати 2851 млн. грн. на закупівлю запасних частин, фактично освоєно 1746 млн. грн., що складає 61% від плану.

Найчастіше запасні частини потребують локомотиви, яким 30-60 років від побудови, крім того в Україні тяговий руханий склад був побудований ще за радянських часів, велика частка маневрових тепловозів та електровозів, електро та дизель-поїздів поставлялися з-за кордону. Відповідно придбання запасних частин та вузлів для тягового рухомого складу часто ускладнено через неможливість замовлення їх з-за кордону, зняття з виробництва, припинення діяльності виробників залізничної техніки, високої вартості деталей внаслідок виготовлення за традиційними технологіями, тривалого часу поставки запасних частин, оптові закупки деталей до того ж потребують значних інвестицій. Тривалий простій тягового рухомого складу в очікуванні ремонту призведе до великих фінансових втрат.

Все вищезначене потребує пошуку нових способів виробництва застарілих запасних частин швидшим та дешевим способом. Однією з таких технологій стає 3D-друк. Ця технологія виробництва спирається на цифрові робочі процеси та не вимагає додаткових інструментів, таких як прес-форми, для створення деталі. Відповідно до звіту EY (Ernst & Young Global Limited), 16% компаній логістичної та транспортної галузі використовують 3D-друк для виробництва запасних частин³.

1. Використання адитивних технологій світовими компаніями для залізничної галузі

Як відомо, адитивні технології (англ. Additive Manufacturing) це технології пошарового нарощування та синтезу об'єктів. Інша назва – 3D-друк, що відноситься до групи технологічних методів виробництва виробів і прототипів, заснованих на поетапному формуванні виробу шляхом додавання матеріалу на основу.

Провідні залізничні компанії почали поступове використання адитивних технологій для друку запасних частин, деталей, елементів інфраструктури.

Так залізничний центр – центр обслуговування залізничних перевезень Siemens Mobility RRX, розташований у Дортмунд-Евінгу,

³ Krzyżanowski J. 3D printing in the Rail Industry. URL: <https://omni3d.com/3d-printing-in-the-rail-industry/>.

Німеччина, використовує 3D-принтер Stratasys Fortus 450mc Production для виготовлення інструментів та запасних частин на вимогу. За даними Siemens Mobility, підрозділу Siemens, час виготовлення деталей скорочено приблизно на 95 відсотків. У Siemens Mobility зазначили, що залізничний центр щомісяця прийматиме в депо близько 100 поїздів. Адитивне виробництво дозволяє Siemens Mobility бути більш ефективним із запасними частинами. Як правило, компанія покладалася на лиття та традиційні методи, що займало близько 6 тижнів для виготовлення спеціальної деталі. Завдяки обладнанню Stratasys Siemens Mobility може виготовити деталі за 13 годин⁴.

Siemens Mobility впровадила 3D-друк у сервісному центрі RRR Rail Service Centre для виробництва складних інструментів та запасних частин. Наприклад, було надруковано з'єднувальний інструмент, який використовується при обслуговуванні візка поїзда (рис.1).



Рис. 1. Інструмент для візка, виготовлений методом 3D-друку

Його досить складно виготовити традиційними методами, оскільки інструмент має складну форму, що вимагає високого ступеня індивідуального налаштування.

Компанія Deutsche Bahn надрукувала на 3D-принтері кришку підшипника колісної пари локомотива класу 294 (рис. 2).

Ця модель локомотиву була введена в експлуатацію в 1960-х і 1970-х роках, і запасні частини для деяких компонентів, таких як кришка, відсутні. Зазвичай деталь доводилося замовляти для виготовлення шляхом лиття. Однак цей метод зазвичай передбачає високі мінімальні обсяги закупівлі, і доставка деталі може тривати кілька місяців. Деталь була виготовлена

⁴ Dignan L. Siemens Mobility's rail service center bets on 3D printing. URL: <https://www.zdnet.com/article/siemens-mobilitys-rail-service-center-bets-on-3d-printing/>

методом 3D-друку з використанням технології адитивного виробництва з дуговим дротом Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) вага її складає 13 кг час друку 7 годин.



Рис. 2. Кришка підшипника колісної пари, надрукована на 3D-принтері за технологією WAAM

Компанія з оренди рухомого складу Angel Trains уклала партнерську угоду зі Stratasys, прагнучи роздрукувати на 3D-принтері компоненти інтер'єру поїзда, такі як підлокітники, поручні та столики у спинках сидінь (рис. 3). Компанія використовує технологію Stratasys FDM у поєднанні з високотемпературним термопластиком ULTEM 9085 для 3D-друку запасних частин. Стверджується, що нитка сумісна зі стандартами залізничної галузі (зокрема, залізничним стандартом EN45545-2) і має більшу вогнестійкість і довговічність, ніж традиційні термопласти⁵.



Рис. 3. Деталі, надруковані на 3D-принтері FDM (зліва направо): кришки електричних з'єднань, підлокітник з поручнями та стіл у спинці сидіння

⁵ Application Spotlight: 3D Printing in the Rail Industry. URL: <https://amfg.ai/2019/10/15/application-spotlight-3d-printing-in-the-rail-industry/>

German Rail (DB) вперше розпочала створення запчастин за допомогою 3D-принтера з металу, скорочуючи терміни доставки та простої транспортних засобів. Принтер зварює тонкі нитки дроту з нержавіючої сталі, накладаючи їх шарами, щоб створити такі елементи, як кришки букс, які важко знайти, а доставка може зайняти до 24 місяців⁶. Загалом, тепер DB може виробляти понад 120 різних виробів, включаючи колеса вентиляторів, підголівники, корпуси, клемні коробки для захисту кабелів та ін. Приклади 3-D друку деталей наведено на рис. 4-5.



Рис. 4. Знак поручня зі шрифтом Брайля



Рис. 5. Роздруковані на 3D-принтері лопаті турбіни (ліворуч) і кришка підшипника колісної пари (праворуч)

Mobility got Additive (MGA), мережа, що займається вивченням впровадження AM у секторі мобільності та стимулюванням індустріалізації, оголосила про затвердження першого компонента, виготовленого методом адитивних технологій, що забезпечує безпеку

⁶ DB begins 3D printing metal parts. URL: <https://www.railjournal.com/technology/db-begins-3d-printing-metal-parts/>

для залізничної галузі. Розглянута деталь, ланка гальмівної підвіски для гальмівного агрегату метро (рис.6), використовується вже компанією Hamburger Hochbahn AG, оператором транспортної системи в Гамбурзі, Німеччина.



Рис. 6. Ланка гальмівної підвіски для гальмівного агрегату метро виготовлена за допомогою АМ

Робочу групу за затвердженням у рамках MGA очолює Siemens Mobility GmbH, до неї входять Deutsche Bahn AG, Fraunhofer IPT та IGCV, Hamburger Hochbahn AG, Knorr-Bremse System für Schienenfahrzeuge GmbH, Photon AG⁷.

Один із партнерів Stratasys у залізничній галузі, Bombardier Transportation застосовує адитивне виробництво. 3D-принтер Stratasys F900 встановлюється на найбільшому виробничому майданчику Bombardier Transportation у Хеннігсдорфі, Німеччина. Виробник планує використовувати цю технологію для 3D-друку внутрішніх та зовнішніх деталей поїзда, таких як повітропроводи, кожухи та тримачі кабелів, а також спеціалізованих рейкових інструментів для полегшення виробничого процесу. Запчастини насамперед задовольнять потреби німецьких, швейцарських та австрійських залізничних та трамвайних компаній⁸.

З використанням технології 3-D друку була побудована вентиляційна система для прототипу поїзда з акумуляторним живленням. Деталь (рис. 7) була надрукована з ULTEM 9085, яка не тільки відповідала

⁷ Boissonneault T. First 3D printed safety-relevant part approved in the railway sector. URL: <https://www.3dprintingmedia.network/first-3d-printed-safety-part-approved-railway/>

⁸ Bombardier Transportation adopts Stratasys F900 to 3D print end-use rail parts. URL: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/bombardier-transportation-stratasys-f900-end-use-rail/>

вимогам сертифікації рейок EN45545-2, але й дозволила компанії істотно зменшити вагу деталі⁹.



Рис. 7. Компонент системи вентиляції, надрукований з використанням технології 3-D друку

Angel Trains, одна з провідних британських компаній з лізингу поїздів, лідер 3D-друку Stratasys (NASDAQ: SSYS), інженерно-консультаційна компанія DB ESG і оператор поїздів Chiltern Railways об'єднали зусилля, щоб випробувати перші 3D-друковані деталі, які були встановлені в пасажирському поїзді, що знаходиться в експлуатації у Великобританії. Ці частини включають чотири підлокітника для пасажирів і сім ручок, які були встановлені на поїздах Chiltern Railways (рис. 8).



Рис. 8. Деталі надруковані на 3-D принтері та встановлені у пасажирському поїзді

⁹ Boissonneault T. Stratasys focuses on 3D printing in transport with Rail Industry Solution. URL: <https://www.3dprintingmedia.network/stratasys-focuses-on-3d-printing-in-transport-with-rail-industry-solution/>

DB ESG провела комплексне тестування низки матеріалів для 3D-друку промислового класу, щоб вперше забезпечити відповідність 3D-друкованих деталей стандарту залізничної промисловості Великобританії EN45545-2. Остаточні частини були надруковані на 3D-друку за допомогою 3D-принтера Fortus 450mc на базі FDM від Stratasys на смолі ULTEM™ 9085, яка була сертифікована для залізничної промисловості відповідно вимогам до стандартів пожежної, димної та токсичної безпеки¹⁰.

Інститут залізничних досліджень Університету Хаддерсфілда отримав фінансування для вивчення потенціалу нових матеріалів для використання в залізничних візках, які встановлюються під вагонами та з'єднують осі з поїздом. Проект є частиною загальноєвропейської програми RUN2RAIL та розпочнеться з дослідження композитів із вуглецевого волокна, які дозволять роботам створювати рами візків пошарово. Основними перевагами нового матеріалу є зменшення ваги, простота конструкції та менші витрати на технічне обслуговування¹¹.

Alstom, світовий лідер у сфері екологічної та розумної мобільності, скорочує терміни доставки запчастин з 45 днів до 48 годин за допомогою 3D-принтерів F370. Алжирська компанія Sétif Tramways виявила, що трамвайні фари розбиваються через скупчення води та каміння, що потрапляють у невеликі отвори під час руху. В результаті до Alstom звернулися із терміновим запитом запасних частин, щоб герметизувати отвори та запобігти подальшому пошкодженню трамваїв. За допомогою спеціального внутрішнього центру 3D-друку компанія Alstom розгорнула свій 3D-принтер Stratasys F370 на основі технології FDM® для створення гумового дренажу та герметизації отворів у фарах трамваїв. Для друку використовувався передовий високоміцний еластомірний матеріал FDM TPU 92A. Поєднуючи гнучкість і розтяг із стійкістю до стирання та розриву, цей еластомірний матеріал ідеально підходить для тривалого використання поза приміщеннями, оскільки деталі працюють і досі. Таким чином, скоротився термін виготовлення деталей за традиційною технологією протягом 45 днів до 48 годин¹².

¹⁰ Angel trains, DB ESG and Stratasys trial the UK's first 3d printed parts on passenger trains. URL: <https://railway-international.com/news/21446-angel-trains.-db-esg-and-stratasys-trial-the-uk%E2%80%99s-first-3d-printed-parts-on-passenger-trains>

¹¹ Carbon fibre and 3D printing could make trains quieter and more comfortable. URL: <https://www.imeche.org/news-article/carbon-fibre-and-3d-printing-will-make-railways-quieter-and-more-comfortable>

¹² Alstom leverages Stratasys FDM 3D printing to create emergency spare parts and minimize downtime of sétif tramway network. URL: <https://railway-international.com/technical-articles/42721-alstom-leverages-stratasys-fdm-3d-printing-to-create-emergency-spare-parts-and-minimize-downtime-of-s%C3%A9tif-tramway-network>

З 2016 року асортимент деталей, виготовлених компанією Alstom за допомогою 3D-друку, постійно розширюється, та зараз компанія друкує близько 40000 деталей на рік. Друк відбувається такими матеріалами, як полімери, кераміка та метал. Використовуються 20 полімерів (в тому числі вогнетривкі та димозахисні – EN45545 для Європи та NFPA130 для Північної Америки) та чотири метали: алюміній, нержавіюча сталь, високоміцна сталь та титан¹³.

З проведеного аналізу можна зазначити, що наразі провідні залізничні компанії досліджують різні матеріали та технології для 3D друку з метою виготовлення запасних частин та елементів тягового рухомого складу залізниць та міського електротранспорту – трамваїв, з дотриманням вимог залізничних стандартів безпеки.

Впровадження технологій адитивного виробництва для залізничної галузі охоплює не лише друк запасних частин для парку локомотивів, вагонів та моторвагонного рухомого складу а і процеси оновлення і модернізації елементів інфраструктури залізниць.

Британська мережа високошвидкісних залізниць HS2, збирається запровадити 3D-друк залізобетону на місці. У проекті HS2 буде використовуватися новий бетонний матеріал, армований графеном, розроблений Британською інноваційною студією для 3D-друку бетону ChangeMaker 3D. Передова технологія під назвою «PrintInfrastructure» буде розгортатися лондонським підрядчиком HS2 Ltd у тунелях SCS JV (сумісне підприємство Skanska Costain STRABAG). Печать бетону за допомогою роботів, керованих комп'ютерів, дозволить створювати конструкції на місці. Використання керуючого комп'ютера робота дозволяє друкувати залізобетонні конструкції з унікальною внутрішньою ґратчастою структурою, яка не тільки значно зменшує кількість необхідної бетонної суміші, але й зменшує кількість відходів. Високотехнологічна інновація використовує процес тривимірного друку бетону і поєднує його з найміцнішим з будь-коли випробуваних матеріалів: графеном. Бетон з мікроскопічними нитками графену товщиною всього кілька атомів, що проходять через нього, як смуги в кам'яній брилі, замінює традиційну сталь, щоб підвищити безпеку на будівельному майданчику, підвищити гнучкість конструкції, скоротити час складання. Використання нового матеріалу дозволить скоротити обсяг використовуваного бетону та сприяти скороченню викидів вуглецю на 50%. За рахунок відмови від сталі та спрощення процесу будівництва, для якого більше не знадобляться крани

¹³ Harnessing 3D printing technology to deliver fast and sustainable rail parts URL: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2023/11/harnessing-3d-printing-technology-deliver-fast-and-sustainable-rail-parts>

та значно менше вантажівок для доставки, скорочення викидів вуглецю може бути ще більшим¹⁴.

Британська інфраструктурна компанія Amey вивчає використання адитивного виробництва для обслуговування транспортної галузі. На відміну від інших компаній, що використовують 3D-друк для виробництва запасних частин для поїздів та інструменту, Amey вивчає технологію обслуговування та оновлення залізничної колії. Компанія досліджує, як 3D-друк можна використовувати для оновлення рейок. Традиційно оновлення колій покладалося на ручну працю для видалення та заміни рейок. Однак за допомогою роботизованого 3D-друку цей процес можна автоматизувати.

Однією з найбільших перешкод на даний момент, яка уповільнює впровадження 3D-друку для обслуговування залізниць, є масштаб. Щоб вирішити цю проблему та розробити 3D-принтери, здатні друкувати до 5 метрів колії за раз, Amey працює над розробкою великомасштабної робототехніки з адитивними можливостями. Однією з областей, де, на думку компанії, 3D-друк може зробити найбільшу різницю – це ремонт або реконструкція стрілок і переїздів, які мають більше ознак зносу, ніж звичайні колії, і які є важливими для функціонування залізничної системи. Нинішній процес їх заміни полягає у видаленні старих перемикачів і перемикачів і заміні їх на нові – дорога та складна робота для координації. Цей процес також спричиняє перебої у використанні залізниці, оскільки ділянка колії має бути закрита під час заміни. Система 3D-друку на рейках на місці може значно спростити процес відновлення, що призведе до зниження витрат, швидшого часу заміни тощо. Технологія, яку розробляє Amey, поєднує метрологічні можливості для перевірки існуючої залізниці; автоматизованого зняття матеріалу для видалення зношеної поверхні; і система осадження для розміщення нової поверхні. Після цього 3D-друкована рейка буде перевірена за допомогою аналізу неруйнівного контролю¹⁵.

Наразі провідними компаніями світу та науковцями ведуться роботи щодо підвищення зносостійкості рейки та опору, для чого використовується спеціальна технологія адитивного виробництва лазерного плавлення, для створення покращеного шару на верхніх поверхнях рейок. Технологію 3-D друку використовують для виготовлення гвинтів для кріплення

¹⁴ Sher D. UK's new high speed rail HS2 looks to concrete 3D printing to cut CO2. URL: <https://www.3dprintingmedia.network/londons-new-high-speed-rail-hs2-looks-to-concrete-3d-printing-to-cut-co2/>

¹⁵ Boissonneault T. Could 3D printing revolutionize the UK rail industry? URL: <https://www.3dprintingmedia.network/amey-could-3d-printing-revolutionize-the-uk-rail-industry/>

залізничної колії, тривимірних друкованих георешіток, звукових бар'єрів для залізниці, композитних опор для верхньої будови колії, часток «розумного» баласту та ін¹⁶.

2. Види та класифікація методів та матеріалів для 3-D друку

Адитивне виробництво – additive manufacturing – процес з'єднання матеріалів для створення об'єктів із даних 3D-моделі, зазвичай пошарово, на відміну від субтрактивних методологій виробництва¹⁷.

Відповідно до стандарту ASTM F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, технології 3-D друку класифікують за технологією обробки на такі групи:

- *binder jetting* – струминне нанесення сполучного – адитивний процес виробництва, в якому рідкий сполучний агент вибірково наноситься для з'єднання порошкових матеріалів;

- *directed energy deposition* – спрямоване осадження енергії – адитивний процес, у якому для плавлення використовується сфокусована тепла енергія матеріалів шляхом плавлення в міру їх осадження;

- *material extrusion* – екструзія матеріалу – адитивний процес виробництва в якій матеріал вибірково подається через насадку або отвір;

- *material jetting* – струминна обробка матеріалу – процес адитивного виробництва в результаті якого краплі будівельного матеріалу вибірково осаджуються;

- *powder bed fusion* – плавлення у порошковому шарі – процес адитивного виробництва у результаті якого тепла енергія вибірково зплавляє дільниці порошкового шару;

- *powder bed fusion* – плавлення у порошковому шарі – адитивний процес виготовлення в якому листи матеріалу з'єднуються, щоб утворити об'єкт;

- *vat photopolymerization* – фотополімерізація у ванні – процес адитивного виробництва, при якому рідкий фотополімер у ванні вибірково затвердіває світлоактивною полімерізацією.

В процесі струминного нанесення сполучного (*Binder Jetting*) (рис. 9) використовується два матеріали: матеріал на основі порошку та сполучний.

¹⁶ Hao Fu, Sakdirat Kaewunruen. State-of-the-Art Review on Additive Manufacturing Technology in Railway Infrastructure Systems. J. Compos. Sci. 2022, 6(1), 7, <https://doi.org/10.3390/jcs6010007>. URL: <https://www.mdpi.com/2504-477X/6/1/7>

¹⁷ ASTM F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. URL: <https://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>

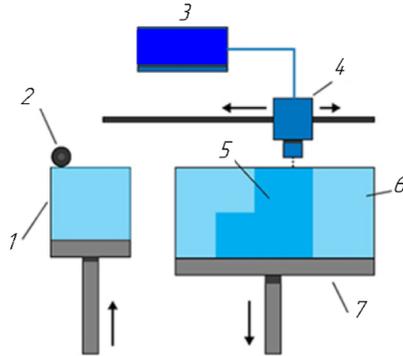


Рис. 9. Технологія 3-D друку методом струминного нанесення сполучного

1 – новий порошок, 2 – валик, 3 – рідкий сполучний матеріал, 4 – струменева друкувальна голівка, 5 – об’єкт (деталь), 6 – порошокове ложе; 7 – будівельна платформа

Сполучний матеріал (зазвичай рідкий) діє як клей між шарами порошку. Порошковий матеріал 1 наноситься по будівельній платформі 1 за допомогою валика 2. Друкувальна голівка 4 наносить сполучний клей 3 поверх порошку 6, де це необхідно. Будівельна платформа 7 опускається на товщину шару деталі 5.

Поверх попереднього шару наноситься ще один шар пудри. Об’єкт утворюється там, де порошок зв’язується з рідиною. Незв’язаний порошок залишається на місці навколо об’єкта. Процес повторюється до тих пір, поки не буде виготовлений весь об’єкт. Об’єкт, що друкується, самопідтримується в порошоківому шарі і після завершення видаляється з незв’язаного порошку.

Спрямоване осадження енергії (*Directed Energy Deposition*) це більш складний процес друку, який зазвичай використовується для ремонту або додавання додаткового матеріалу до існуючих компонентів. Типова машина DED складається з насадки, встановленої на багатівісському кронштейні, яка наносить розплавлений матеріал на задану поверхню, де він застигає (рис. 10).

Матеріал, який можна наносити під будь-яким кутом завдяки 4- і 5-осьовим машинам, розплавляється при осадженні за допомогою лазерного, електронного променя або плазмовою дугою, і все це в контрольованій камері, де в атмосфері знижений рівень кисню. 4- або 5-осевой важіль з насадкою 3 переміщується навколо нерухомого об’єкта 1.

Матеріал наноситься із сопла на наявні поверхні об'єкта. Матеріал подається у вигляді дроту 4 або порошку. Матеріал розплавляється за допомогою лазера, електронного променя 2 або плазмової дуги при осадженні. Подальший матеріал додається шар за шаром і застигає, створюючи або відновлюючи нові властивості матеріалу на існуючому об'єкті. Процес можна використовувати з полімерами, керамікою, але зазвичай використовується для металів у вигляді порошку або дроту.

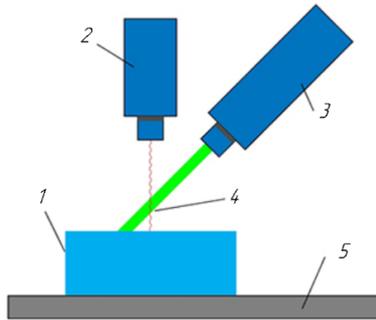


Рис. 10. Технологія 3-D друку методом спрямованого осадження енергії

1 – об'єкт (деталь), 2 – електронний промінь, 3 – подача матеріалу (металевого) дроту, 4 – металевий дріт, 5 – будівельна платформа

Моделювання методом наплавлення (рис. 11) (*Fuse Deposition Modelling*) це поширений процес екструзії матеріалів, зареєстрований під торговою маркою компанії Stratasys. Матеріал 2 протягується через сопло 4, де він нагрівається, а потім осаджується шар за шаром. Шари сплавляються разом при осадженні, оскільки матеріал перебуває у розплавленому стані. Сопло може рухатися горизонтально, а платформа 6 переміщається вгору та вниз вертикально після нанесення кожного нового шару.

Відмінність від інших методів полягає в тому, що матеріал подається через насадку під постійним тиском і безперервним потоком.

У процесі струминної обробки (*Material Jetting*) матеріал наноситься струменем на поверхню або платформу, де він застигає, і модель будується шар за шаром. Друкувальна голівка 3 розташована над платформою 9 для виготовлення (рис.12.).

Краплі матеріалу наносяться з друкувальною голівки на поверхню, де це необхідно, за допомогою термічного або п'єзоелектричного методу. Краплі матеріалу застигають і складають перший шар. Потім шари

матеріалу деталі 7 тверднуть за рахунок поступового охолодження або у разі друку фотополімерами кожен шар обробляється ультрафіолетовим випромінювачем 2 для полімеризації (затвердіння). Після обробка включає видалення підтримуючої частини 6.

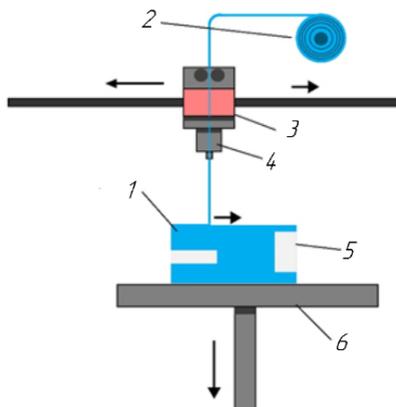


Рис. 11. Технологія 3-D друку методом наплавлення
1 – об’єкт (деталь), 2 – котушка матеріалу, 3 – нагрівальний елемент,
4 – сопло, 5 – підтримуючий матеріал, 6 – будівельна платформа

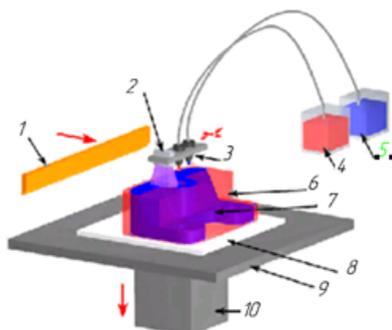


Рис. 12. Технологія 3-D друку методом струминної обробки матеріалу
1 – вирівнювальна лопатка (лезо), 2 – УФ-лампа для затвердіння
матеріалу, 3 – друкувальні голівки, 4 – підтримуючий матеріал,
5 – будівельний матеріал, 6 – підтримуюча частина, 7 – деталь,
8 – будівельна підкладка, 9 – платформа, 10 – поршень

Процес порошкового сплавлення (рис.13) (*Powder Bed Fusion*) включає наступні методи друку: пряме лазерне спікання металів (DMLS), електронно-променевоє плавлення (EBM), селективне теплове спікання (SHS), селективне лазерне плавлення (SLM) і селективне лазерне спікання (SLS).

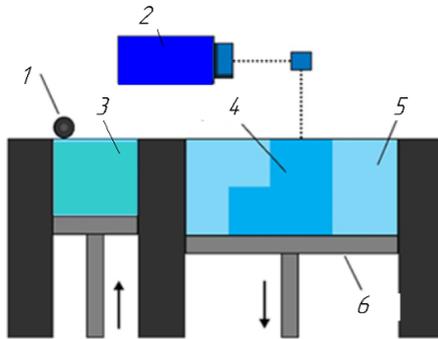


Рис. 13. Технологія 3-D друку методом плавлення у порошковому шарі

1 – ролик, 2 – лазер, 3 – резервуар з новим порошком, 4 – об’єкт (деталь), 5 – порошковий шар, 6 – будівельна платформа

У методах плавки у порошковому шарі (PBF) використовується лазерний або електронний промінь для плавлення та сплавлення порошку матеріалу. Методи електронно-променевої плавки (EBM) вимагають вакууму, але можуть використовуватися з металами та сплавами при створенні функціональних деталей. Всі процеси PBF включають нанесення порошкового матеріалу на попередні шари. І тому існують різні механізми, зокрема ролик чи лезо. Бункер або резервуар під бічною стінкою забезпечує подачу свіжого матеріалу. Пряме лазерне спікання металів (DMLS) – це те саме, що і SLS, але з використанням металів, а не пластмас. Процес спікає порошок шар за шаром. Селективне термічне спікання відрізняється від інших процесів тим, що для сплавлення порошкового матеріалу використовується нагріта термо-друкуюча голівка. Як і раніше, шари додаються валиком у проміжках між сплавленими шарами.

Шар матеріалу товщиною зазвичай 0,1 мм розподіляється по будівельній платформі 6. Лазер 2 сплавляє перший шар або перший поперечний переріз моделі. Новий шар порошку, розташований в резервуарі 3 розподіляється поверх попереднього шару за допомогою валика 1. Додаткові шари або поперечні перерізи сплавляються та додаються. Процес повторюється

доти, доки не буде створено всю модель 4. Пухкий, нерозплавлений порошок 5 залишається на місці, але видаляється під час після обробки.

Процеси листового ламінування (рис.14) включають ультразвукове адитивне виробництво (*Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)*) та виробництво ламінованих об'єктів (*Laminated Object Manufacturing (LOM)*).

У процесі ультразвукового адитивного виробництва використовуються листи чи стрічки металу, які з'єднуються разом за допомогою ультразвукового зварювання. Цей процес вимагає додаткової обробки з ЧПУ та видалення незв'язаного металу, часто в процесі зварювання. Виробництво ламінованих об'єктів (LOM) використовує аналогічний пошаровий підхід, але використовує папір як матеріал і клей замість зварювання.

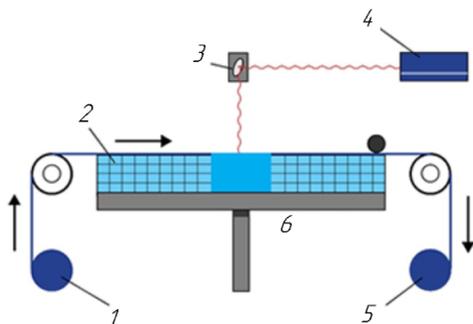


Рис. 14. Технологія 3-D друку методом листового ламінування
1 – котушка матеріалу, 2 – перехресно нагрітий матеріал,
3 – дзеркало з електроприводом, 4 – лазер, 5 – котушка
використаного матеріалу, 6 –будівельна платформа

UAM використовує метали і включає алюміній, мідь, нержавіючу сталь і титан. Цей процес є низькотемпературним та дозволяє створювати внутрішню геометрію. Цей процес може пов'язувати різні матеріали та вимагає відносно мало енергії, оскільки метал не плавиться, натомість використовується комбінація ультразвукової частоти та тиску. Матеріали склеюються, чому сприяє пластична деформація металів. Пластична деформація забезпечує більший контакт між поверхнями та підтримує існуючі зв'язки.

Для процесу фотополімеризації у ванні (*VAT Photopolymerisation*) (рис. 15) використовується ванна 1 з рідкою фотополімерною смолою 2, з якої шар за шаром будується модель. Лазер 3 використовується для

затвердіння смоли, де це потрібно, в той час як платформа 5 переміщує об'єкт, який виготовляється 4, вниз після затвердіння кожного нового шару. Після завершення з ванни зливають смолу і видаляють об'єкт¹⁸.

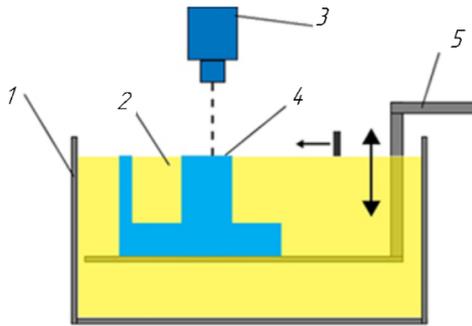


Рис. 15. Технологія 3-D друку методом фотополімеризації у ванні
1 – ванна, 2 – фотополімер (смола), 3 – лазер, 4 – об’єкт побудови,
5 – платформа

Розглянувши технології 3-D друку різними методом та матеріалами проаналізуємо основні їх переваги та недоліки. Результат аналізу наведено у табл. 1. Кожен з методів 3-D друку має перспективи використання у локомотиворемонтному господарстві.

Таблиця 1

Основні переваги та недоліки технологій 3-D друку та матеріалів, що використовуються

Матеріал для друку	Переваги	Недоліки
Струминне нанесення сполучного (BJ)		
Метали: нержавіюча сталь; Полімери: ABS-пластик, поліамід, полікарбонат; Кераміка: скло.	Різнокольоровий друк. Використання різних матеріалів. Швидкий процес. Велика кількість різних комбінацій сполучного та порошку та різних механічних властивостей.	Не завжди підходить для конструкційних деталей через використання сполучного матеріалу. Додаткова після обробка може значно збільшити час всього процесу.

¹⁸ About Additive Manufacturing. URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>

Продовження таблиці 1

Спрямоване осадження енергії (DED)		
Метали: кобальт, хром, титан	Можливість високого рівня контролю структури зерна, що надає процесу ремонту високоякісні, функціональні деталі. Потрібен баланс між якістю поверхні та швидкістю.	Обмежене використання матеріалів. Процеси плавлення потребують додаткових досліджень для подальшого просування процесу до більш поширеного позиціонування
Екструзія матеріалу (ME)		
ABS -пластик, нейлон, полікарбонат	Поширений та недорогий процес. Можна використовувати ABS -пластик, що має хороші структурні властивості та легкодоступний.	Радіус сопла обмежує та знижує кінцеву якість. Точність та швидкість низькі. Потрібен постійний тиск матеріалу для підвищення якості обробки.
Струминна обробка матеріалу (MJ)		
Полімери: поліпропілен, поліетилен високої щільності, полістирол, поліметил-метакрилат, полікарбонат, ABS -пластик, удароміцний полістирол.	Низький рівень відходів, через високу точність осадження крапель. Використання кількох частин матеріалу і кольорів в рамках одного процесу.	Часто потрібен допоміжний матеріал. Обмежені матеріали.
Фотополімеризація у ванні (VP)		
Полімери: УФ – фотополімерна смола. Смоли: лінійка Visijet	Високий рівень точності та гарна обробка. Відносно швидкий процес. Зазвичай великі площі збирання.	Досить вартісний. Тривалий час після обробки та видалення зі смоли. Обмежене використання матеріалів фотосмол. Необхідність опорних конструкції та подальше затвердіння.
Плавлення у порошковому шарі (PBF)		
SHS: нейлон; DMLS, SLS, SLM: нержавіюча сталь, титан, алюміній, кобальт-хром, сталь; EBM: титан, кобальт-хром, нержавіюча сталь, алюміній та мідь.	Відносно недорогий. Підходить для візуальних моделей та прототипів (SHS). Порошок діє як інтегрована опорна структура. Великий вибір матеріалів.	Відносно низька швидкість (SHS). Відсутність структурних властивостей у матеріалів. Обмеження за розміром. Використання високої потужності. Обробка залежить від розміру зерна порошку.

Листове ламінування (UAM), (LOM)		
Папір, пластик листові метали: алюміній, мідь, нержавіюча сталь і титан	Швидкість. Низька вартість. Простота обробки матеріалів.	Після обробка може змінюватись в залежності від паперу або пластику. Обмежене використання матеріалу.

Особливо актуальними будуть методи обробки металів, таких як: спрямоване осадження енергії (DED), плавлення у порошковому шарі (PBF) для друку запасних частин локомотивів переважна частина яких виготовлена з різних металів та сплавів. Для підприємств залізничного транспорту, які займаються ремонтом та виробництвом вагонів та моторвагонного рухомого складу актуальними будуть методи струминного нанесення сполучного (BJ), екструзії матеріалу (ME), струминної обробки матеріалу (MJ), плавлення у порошковому шарі (PBF), листового ламінування (UAM) через наявність багатьох елементів вагонів та потягів виготовлених з пластиків, полімерів, алюмінію і т. ін.

3. Скорочення вартості життєвого циклу тягового рухомого складу залізниць за рахунок впровадження технологій 3-D друку запасних частин

Однією зі складових вартості життєвого циклу тягового рухомого складу залізниць є суми прямих виробничих витрат, що припадають на тягову одиницю в році t життєвого циклу. При цьому враховується, що на протязі року тягова одиниця може знаходитись в простой на капітальному або поточних видах ремонтів та технічному обслуговуванні. Урахування часу простою для виконання цих заходів в році t життєвого циклу визначається за формулою:

$$T_t^{np} = \sum_i (N_{i_t} \cdot t_i^{np}) + N_{To_t} \cdot t_{To_t}^{np} + N_{B_t} \cdot t_{B_t}^{np}, \quad (1)$$

де N_{i_t} – кількість i -х видів капітального, поточного ремонтів i -го виду і технічних обслуговувань, які припадають на рік t життєвого циклу;

t_i^{np} – час простою тягової одиниці на i -му виді капітального або поточного ремонтів, год;

N_{To_t} – кількість технічних обслуговувань на рік t життєвого циклу;

$t_{To_t}^{np}$ – час простою тягової одиниці на технічному обслуговуванні, год;

N_{B_t} – кількість відмов у році t життєвого циклу;

$t_{\text{в}}^{\text{пр}}$ – час простою тягової одиниці для відновлення працездатності після відмови, год.

Час простою $t_i^{\text{пр}}, t_{\text{ТО}}^{\text{пр}}$ – залежить від існуючої системи утримання тягової одиниці, виду тяги та роботи, яку виконує тягова одиниця.

Зазвичай при розрахунках вартості життєвого циклу нового рухомого складу використовуються середні норми простоїв на технічному обслуговуванні та ремонті. Так, наприклад, відповідно до «Положення про систему планово-попереджувального ремонту та технічного обслуговування електровозів, тепловозів (ТРС), електро- та дизель поїздів в тому числі міжрегіональних (МВРС)», затвердженого наказом Укрзалізниці від 30.01.2019 № 55-Ц, вказані середні по АТ «Укрзаліниця» норми простоїв ТРС та МВРС на технічному обслуговуванні та ремонті (з урахуванням очікування та поетапного подовження терміну служби) (табл. 2.).

Таблиця 2

Середні по АТ «Укрзаліниця» норми простоїв ТРС та МВРС на технічному обслуговуванні та ремонті

Вид технічного обслуговування та ремонту	Норма простою		
ТЕПЛОВОЗИ			
тип	вантажні	пасажирські (на секцію)	маневрові
ТО-3	16 год.	12 год.	12 год.
ПР-1 (Поточний)	48 год.	36 год.	24 год.
ПР-2	8 діб	5 діб	4 діб
ПР-3 (Деповський)	10 діб	6 діб	5 діб
ЕЛЕКТРОВОЗИ			
ТО-3	12 год		
ПР-1 (Поточний)	24 год		
ПР-2	2 доби/секцію		
ПР-3 (Деповський)	5 діб/секцію		
МВРС			
Тип	електро-	дизель (поїзд)	
ТО-3	4 год. / поїзд		12 год.
ПР-1	24 год. / поїзд		24 год.
ПР-2	2 доби / секція		10 діб
ПР-3	8 діб / секція		12 діб
МІЖРЕГІОНАЛЬНІ ЕЛЕКТРОПОЇЗДИ			
Серія	HRCS2	ЕКр1	EJ 675 Škoda

Продовження таблиці 2

ТО-3	4 год. / поїзд	4 год. / поїзд	8 год. / поїзд
ПР-1	8 год. / поїзд	48 год. / поїзд	12 год. / поїзд
ПР-2	4 доби / поїзд	96 год. / поїзд	4 доби / поїзд
ПР-3	-	60 діб / поїзд	60 діб / поїзд

Терміни служби локомотивів та МВРС коливаються в межах 15-45 років залежно від серії. За статистичними даними локомотивних депо спостерігається перевищення норм простою локомотивів та МВРС на планових видах ремонтів, також з часом експлуатації збільшується кількість непланових ремонтів та кількість випадків непланової заміни обладнання при планових видах ремонтів.

Наприклад, за 2010 рік по Донецькій залізниці для тепловозів 2ТЕ116 та ЧМЕЗ перевищені норми простою для ремонтів ПР2 та ПР3. На ПР3 при нормі простою тепловозів 2ТЕ116 10 діб фактично простій складає 47,06 доби, для тепловозів ЧМЕЗ – при нормі 5 діб простій складає 30,02 діб. Для тепловозів ЧМЕЗ на ПР2 фактичний простій складає 18,04 доби, що перевищує норму на 14,04 доби. Норми простою електровозів по залізниці не виконуються на поточних ремонтах ПР3, перевищення складає 3,67 діб від норми. Причиною перевищення норм простою на ПР3 є недостатнє фінансування і відсутність необхідної кількості запасних частин для виконання ремонтів, істотного скорочення технологічного запасу справного обладнання локомотивів. Особливо гостра ситуація складається для локомотивів, які перевищили нормативний термін служби, давно зняті з виробництва та рухомого складу зарубіжної побудови.

З урахуванням вищеозначеного, потрібно при розрахунку вартості життєвого циклу тягової одиниці враховувати витрати, що пов'язані з простоєм локомотива більше середньої норми (яка зазвичай береться за основу при цих розрахунках). Перепростою локомотивів при планових видах ремонтів може бути викликаний багатьма причинами, наприклад, недостатність перехідного запасу запасних частин для ремонту локомотивів, тобто очікуванням поставки деталей, часті відмови обладнання викликані низькою надійністю тягової одиниці, що потребують більшої кількості запасних частин, а ні ж були заплановані для використання відповідно до програми ремонтів, недостатність ремонтних позицій та персоналу та ін.

Тобто, фактично час простою T_i^{np} , що визначається з ф. 1. буде набагато більшим ніж при розрахунку.

Відповідно від нього залежать такі експлуатаційні показники, як:

– ефективний фонд робочого часу використання тягової одиниці в році t життєвого циклу, $T_{ефт}$;

- кількість обертів, які здійснює тягова одиниця за рік t життєвого циклу у поїзній роботі, $K_{обі}$;
- пробіг тягової одиниці в році t життєвого циклу, $L_{проб}$;
- вантажообіг, виконаний тяговою одиницею у році t , життєвого циклу $\sum QL_t$;
- середньодобовий пробіг тягової одиниці в році t життєвого циклу, \bar{S}_t .

Відповідно збільшаться прямі виробничі витрати в році t , життєвого циклу, що обумовлені експлуатацією, поточними ремонтами, технічним обслуговуванням та відмовами тягової одиниці.

Для врахування у виробничих витратах впливу перепростою тягової одиниці на планових видах ремонту для локомотивів, що знаходяться в експлуатації, за статистичними даними по Укрзалізниці та відповідно серіям потрібно ввести поправочний коефіцієнт – коефіцієнт перепростою – $k_{пер}$. Він буде враховувати фактичні дані часу простою тягової одиниці на планових видах ремонтів, що наблизить розрахунки прямих виробничих витрат в році t , життєвого циклу до реальних значень. Наприклад, з наведених вище статистичних даних для тепловозів серії 2ТЕ116 при ПР3 та тепловозів серії ЧМЕЗ при ПР2 – коефіцієнт $k_{пер}$ знаходиться в межах $4 \div 5$, для електровозів серії ВЛ8 при ПР3 $k_{пер} = 1 \div 2$.

Таким чином ф. 1. набуде наступного вигляду:

$$T_t^{np} = \sum_t (N_{it} \cdot t_t^{np} \cdot k_{пер}) + N_{ТОt} \cdot t_{ТО}^{np} + N_{вт} \cdot t_{вт}^{np}, \quad (2)$$

Коефіцієнт вводимо для першої частини рівняння, що стосується поточних ремонтів, тому що основна частина перепростоїв спостерігається для обсягів ремонту ПР2, ПР3 в меншому ступені ПР1, що обумовлено технологією виконання робіт та обсягів. Для технічного обслуговування простої $t_{ТО}^{np}$ зазвичай менші і відповідно вплив їх буде значно менший. Простої в результаті відмов тягової одиниці, $t_{вт}^{np}$ (тобто простої локомотивів та МВРС на непланових ремонтах), визначаються по статистичних даних та не регламентовані.

При розрахунку вартості життєвого циклу для тягових одиниць, які плануються до використання, при закупівлі, при складанні договорів лізингу, при порівнянні вартості життєвого циклу декількох нових тягових одиниць, потрібно обов'язково враховувати доступність запасних частин, їх технологічність, уніфікацію, особливо на довгих термінах. Залежність від постачання запасних частин для локомотивів зарубіжної побудови особливо чинить вплив на ефективність використання тягових одиниць

та час їх простою в очікуванні ремонту. Використання коефіцієнту $k_{\text{пер}}$ при розрахунках вартості життєвого циклу для нових тягових одиниць унеможливлена відсутністю статистичних даних про перепростої, тому матиме ймовірнісний характер. Але доцільність введення коефіцієнту, що враховує залежність простоїв тягових одиниць від постачання (доступності) запасних частин особливо через 20-30 років експлуатації є безсумнівною. Водночас потребує додаткових досліджень та розробки механізму, що враховує цей вплив на вартість життєвого циклу тягових одиниць, що пропонуються до використання та впровадження.

Одним з методів скорочення часу простою в очікуванні ремонту тягового рухомого складу є використання адитивних технологій, тобто 3D – друку деталей та запасних частин. Основною метою застосування адитивних технологій у локомотиворемонтне виробництво є скорочення непродуктивного часу простою тягового рухомого складу та МВРС в очікуванні ремонту через нестачу запасних частин. Так як стан парку локомотивів та вагонів, інфраструктури знаходиться в незадовільному стані через значне недофінансування галузі, нестачі коштів на оновлення основних фондів, недотримання графіків постановки на капітальні та планові види ремонтів, значні перепробіги між постановками на ремонт, що призводить до частих непланових ремонтів та непланових заміन обладнання при планових видах ремонтів. Ситуація погіршується тим, що парк локомотивів та МВРС значно застарілий, деякі серії електровозів та тепловозів, вже відпрацювали свій нормативний термін служби, постачання запасних частин часто потребує значного часу, що призводить до затримок у поповненні складських запасів у локомотивних депо. Виготовлення хоча б частини деталей та запасних частин на власних підприємствах дозволить підвищити ефективність роботи з ремонту та утримання парку локомотивів та вагонів. До вторинних ефектів можна віднести зменшення витрат на ремонт локомотивів, за рахунок скорочення вартості самих деталей, створення архіву Cad -проектів, що створює передумови до розвитку модернізації деталей та складових частин тягового рухомого складу, можливість оновлення інструментальної бази ремонтних підприємств та допоміжних дільниць.

Розглянемо очікувані ефекти та проблемні місця від впровадження 3D – друку деталей та запасних частин для локомотиворемонтних підприємств (рис.16 – 17).

Основними проблемними місцями при впровадженні технологій 3D – друку деталей та запасних частин є обмеження технологій друку та матеріалів саме для залізничної галузі, обмеження у виборі технічних засобів для реалізації 3-D друку деталей в тому числі габаритних, жорсткі

вимоги до відповідності друкованих виробів вимогам санітарних, пожежних та вимог безпеки руху, що передбачені державними стандартами з якості продукції для залізничного транспорту, ще не налагоджена інфраструктура постачання сировини для певних технологій друку, бажано вітчизняного виробництва, сертифікація та надійність виробів виготовлених в процесі 3-D друку.

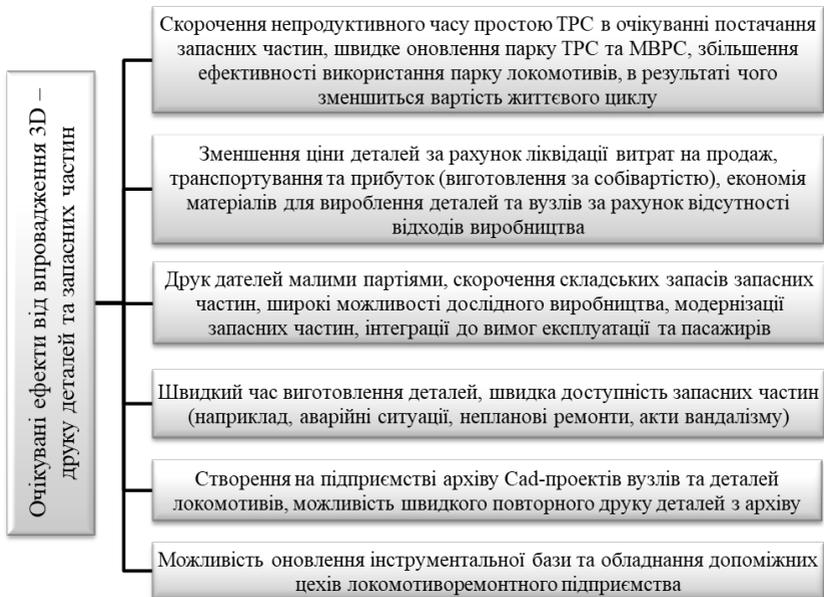


Рис. 16. Очікувані ефекти від впровадження 3D – друку деталей та запасних частин

Також потрібна розробка механізму впровадження технологій 3-D друку у процес ремонту залізничних транспортних засобів з урахуванням потреб локомотивних депо, розрахунку обсягів виробництва, технологій, методів, матеріалів, навчання операторів, розробки технології після друкарської обробки та доведення готових виробів.

Але перспективи впровадження адитивних технологій у залізничній галузі дуже широкі з поступовою розробкою нових методів 3D-друку особливо з використанням металів, розробки вогнестійких термопластів, що відповідатимуть галузевим стандартам пожежної безпеки, розробки вогнестійких композитних матеріалів на основі нейлону та ін.

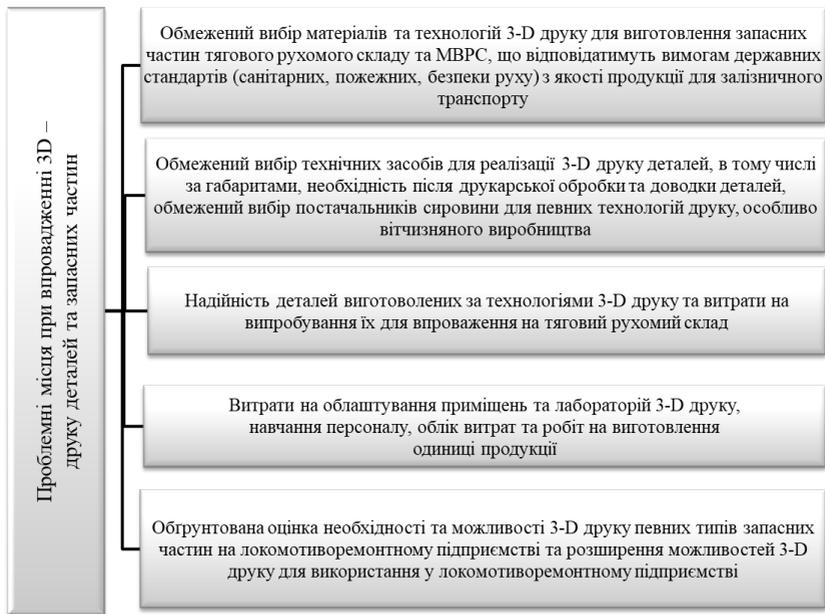


Рис. 17. Проблемні місця при впровадженні 3D – друк деталей та запасних частин

ВИСНОВКИ

В роботі досліджено питання впливу адитивних технологій на вартість життєвого циклу тягового рухомого складу залізниць. Зношення інфраструктури залізниць, парків вагонів, локомотивів та МВРС, складна ситуація з постачання запасних частин і деталей, що впливає на ефективність функціонування транспорту спонукає до пошуку нових підходів та методів відновлення технічного стану транспорту, що підтверджує актуальність даних досліджень. В останні роки локомотивобудівельні та транспортні компанії для оновлення тягових одиниць використовують адитивні технології, а саме технологій 3-D друк деталей та запасних частин. Лідерами у впровадженні технологій 3-D друк для залізниць є компанії Siemens Mobility, Bombardier Transportation, Alstom та ін. Виготовляються методом 3-D друк такі деталі, як: кришка підшипника колісної пари, кришки електричних з'єднань, підлокітник з поручнями та стіл у спинці сидіння, знак поручня зі шрифтом Брайля, ланка гальмівної підвіски для гальмівного агрегату метро, вентиляційна система для прототипу поїзда з акумуляторним живленням. Для відновлення залізничних

рейок використовується технологія адитивного виробництва лазерного плавлення, для створення покращеного шару на верхніх поверхнях рейок. Технологію 3-D друку використовують для виготовлення гвинтів для кріплення залізничної колії, тривимірних друкованих георешіток, звукових бар'єрів для залізниці, композитних опор для верхньої будови колії, часток «розумного» баласту та інших.

Авторкою роботи проаналізовано різні технології 3-D друку, розглянуто особливості методів та матеріалів, що використовуються для друку в контексті використання їх для залізничної галузі. На думку авторки особливо актуальними до впровадження будуть методи обробки металів, таких як: спрямоване осадження енергії, плавлення у порошковому шарі, тому що основна частина конструкційних деталей локомотивів виготовлена з різних металів та сплавів. Для підприємств залізничного транспорту, які займаються ремонтом та виробництвом вагонів та моторвагонного рухомого складу актуальними будуть методи струминного нанесення сполучного, екструзії матеріалу, струминної обробки матеріалу, плавлення у порошковому шарі, листового ламінування.

Однією зі складових вартості життєвого циклу тягового рухомого складу залізниць є суми прямих виробничих витрат, що припадають на тягову одиницю. Ці витрати, в тому числі, залежать від часу простою в усіх видах ремонтів та технічного обслуговування локомотиву. Для врахування перевищення норм простою локомотивів (в тому числі простій від нестачі запасних частин та деталей для ремонту) при планових видах ремонтів запропоновано використання коефіцієнта перепростою – $k_{пер}$, який враховує фактичні дані часу простою тягової одиниці на планових видах ремонтів, що наблизить розрахунки прямих виробничих витрат в році t , життєвого циклу до реальних значень. Також для скорочення часу простою локомотивів в очікуванні постачання запасних частин пропонується впровадження технології 3-D друку для локомотиворемонтних та вагоноремонтних підприємств.

АНОТАЦІЯ

В останні роки технології тривимірного друку застосовуються майже у всіх галузях промисловості. Однак незважаючи на швидкий розвиток технологій та методів, створення деталей складних конфігурацій, швидкості 3-D друку застосування технологій адитивного виробництва для виготовлення вузлів тягових транспортних засобів та інфраструктурних елементів залізниць все ще знаходиться на етапі досліджень.

В представлений роботі досліджено використання адитивних технологій в залізничній галузі. Розглянуто досвід провідних залізничних компаній

у питанні використання 3-D друку деталей та запасних частин для тягового рухомого складу залізниць та інфраструктури. Проаналізовано технології, методи та матеріали для 3-D друку, що можуть бути застосовані у локомотиворемонтному та вагоноремонтному підприємстві, визначені їх переваги та недоліки. Окреслені проблемні місця при впровадженні 3D – друку деталей та запасних частин в процес ремонту залізничної техніки та очікувані ефекти від впровадження.

Література

1. Свириденко Ю. Щодо розвитку залізничної галузі та її впливу на економічне зростання. URL: https://cfts.org.ua/blogs/schodo_rozvitku_zaluznichno_galuzi_ta_vplivu_na_ekonomichne_zrostannya_561
2. Інтегрований звіт АТ «Укрзалізниця» за 2020 рік. URL: <https://www.uz.gov.ua/files/file/about/investors/UZ%20Integrated%20Report%202020%20Ukr.pdf>
3. Krzyżanowski J. 3D printing in the Rail Industry. URL: <https://omni3d.com/3d-printing-in-the-rail-industry/>.
4. Dignan L. Siemens Mobility's rail service center bets on 3D printing. URL: <https://www.zdnet.com/article/siemens-mobilitys-rail-service-center-bets-on-3d-printing/>
5. Application Spotlight: 3D Printing in the Rail Industry. URL: <https://amfg.ai/2019/10/15/application-spotlight-3d-printing-in-the-rail-industry/>
6. DB begins 3D printing metal parts. URL: <https://www.railjournal.com/technology/db-begins-3d-printing-metal-parts/>
7. Boissonneault T. First 3D printed safety-relevant part approved in the railway sector. URL: <https://www.3dprintingmedia.network/first-3d-printed-safety-part-approved-railway/>
8. Bombardier Transportation adopts Stratasys F900 to 3D print end-use rail parts. URL: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/bombardier-transportation-stratasys-f900-end-use-rail/>
9. Boissonneault T. Stratasys focuses on 3D printing in transport with Rail Industry Solution. URL: <https://www.3dprintingmedia.network/stratasys-focuses-on-3d-printing-in-transport-with-rail-industry-solution/>
10. Angel trains, DB ESG and Stratasys trial the UK's first 3d printed parts on passenger trains. URL: <https://railway-international.com/news/21446-angel-trains,-db-esg-and-stratasys-trial-the-uk%E2%80%99s-first-3d-printed-parts-on-passenger-trains>
11. Carbon fibre and 3D printing could make trains quieter and more comfortable. URL: <https://www.imeche.org/news/news-article/carbon-fibre-and-3d-printing-will-make-railways-quieter-and-more-comfortable1>

12. Alstom leverages Stratasys FDM 3D printing to create emergency spare parts and minimize downtime of sétif tramway network. URL: <https://railway-international.com/technical-articles/42721-alstom-leverages-stratasys-fdm-3d-printing-to-create-emergency-spare-parts-and-minimize-downtime-of-s%C3%A9tif-tramway-network>

13. Harnessing 3D printing technology to deliver fast and sustainable rail parts URL: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2023/11/harnessing-3d-printing-technology-deliver-fast-and-sustainable-rail-parts>

14. Sher D. UK's new high speed rail HS2 looks to concrete 3D printing to cut CO2. URL: <https://www.3dprintingmedia.network/londons-new-high-speed-rail-hs2-looks-to-concrete-3d-printing-to-cut-co2/>

15. Boissonneault T. Could 3D printing revolutionize the UK rail industry? URL: <https://www.3dprintingmedia.network/amey-could-3d-printing-revolutionize-the-uk-rail-industry/>

16. Hao Fu, Sakdirat Kaewunruen. State-of-the-Art Review on Additive Manufacturing Technology in Railway Infrastructure Systems. J. Compos. Sci. 2022, 6(1), 7, <https://doi.org/10.3390/jcs6010007>. URL: <https://www.mdpi.com/2504-477X/6/1/7>

17. ASTM F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. URL: <https://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>

18. About Additive Manufacturing. URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>

Information about the author:

Karashchuk Viktoriia Oleksandrivna,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor at the Department of Electromechanics

and Railway Rolling Stock,

National Transport University,

1, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., Kyiv, 02000, Ukraine