

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-31-39>

УДК 004.94:621.74:655.5

ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЗМІЦНЕННЯ ВІДПОВІДНИХ ДЕТАЛЕЙ ДРУКАРСЬКОГО ОБЛАДНАННЯ

Зенкін М.А., Ремезовський О.М., Кохановський В.О.

APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES TO RESTORE AND STRENGTHEN RELEVANT PARTS OF PRINTING EQUIPMENT

Zenkin M.A., Remezovskyi O.M., Kokhanovskyi V.O.

Стаття присвячена дослідженню можливостей застосування адитивних технологій для відновлення та зміцнення відповідних деталей друкарського обладнання. Автори аналізують ефективність методів 3D-друку у забезпеченні технічної надійності та прискоренні ремонтних процесів. Актуальність дослідження зумовлена зростаючою потребою у гнучких, швидких та економічно ефективних рішеннях для відновлення зношених або недоступних комплектуючих у поліграфічному виробництві. В умовах інтенсивної експлуатації машин та відсутності необхідних запчастин на складах, впровадження адитивного виробництва дозволяє мінімізувати простой, уникнути тривалого циклу виготовлення через традиційне лиття або механічну обробку та підвищити загальну стійкість виробничих процесів. Метою дослідження є обґрунтування ефективності використання технологій адитивного виробництва для створення ремонтних деталей друкарських машин із високими вимогами до геометричної точності, механічної міцності та зносостійкості, а також розробка рекомендацій щодо їх застосування на практиці. У дослідженні використано експериментальну методику, що включала виготовлення тестових зразків деталей із композитних полімерів та поліамідного порошку за допомогою технологій FDM та SLS. Виконано механічні випробування на вигин, зносостійкість і вібраційну стійкість, а також проведено метрологічний аналіз точності. У результаті встановлено, що застосування FDM-друку з композитними матеріалами дозволяє зменшити вагу деталей до 20% при збереженні їх міцності на рівні металевих аналогів. Технологія SLS забезпечує високу точність (до $\pm 0,05$ мм) і стабільність розмірів деталей складної конфігурації. Дослідження також продемонструвало, що використання сучасних

технологій, як-от Arburg Plastic Freeforming (AKF), розширює можливості застосування стандартних промислових гранул у 3D-друці, що суттєво знижує витрати. Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням стандартів якості для адитивного виготовлення поліграфічних компонентів, розробкою нових термостійких композитів та впровадженням цифрових бібліотек моделей деталей у сервісному обслуговуванні друкарського обладнання.

Ключові слова: адитивні технології, 3D-друк, друкарське обладнання, відновлення деталей, зміцнення вузлів, полімерні матеріали.

Вступ. Інтенсивна експлуатація друкарського обладнання призводить до швидкого зносу деталей, що зазнають значних механічних навантажень, таких як циклічна вібрація, тертя та термічне розширення. Традиційні методи виготовлення запасних частин, як-от лиття чи фрезерування, часто не забезпечують оперативного відновлення через складність створення оснастки для нестандартних або застарілих компонентів. Адитивні технології, зокрема 3D-друк, відкривають нові можливості для швидкого виготовлення деталей складної геометрії безпосередньо на місці експлуатації. Вони формують можливість для створення компонентів з композитних матеріалів, що відповідають оригінальним за міцністю та точністю. Актуальність теми зумовлена потребою в гнучких технологічних рішеннях, які скорочують час відновлення обладнання та підвищують надійність його роботи.

Попри стрімкий розвиток адитивних технологій і їхнє впровадження у сферу обслуговування промислового обладнання, у контексті поліграфічної галузі залишається низка аспектів, що потребують подальшого наукового осмислення. Зокрема, недостатньо дослідженим залишається питання довготривалої експлуатаційної надійності деталей, виготовлених за допомогою технологій FDM і SLS, з урахуванням специфічних навантажень, притаманних друкарському обладнанню, таких як циклічна вібрація, тертя та термічне розширення. Водночас, відсутні комплексні дослідження, присвячені поведінці композитних матеріалів у поєднанні з різними типами друкувальних машин, а також впливу постобробки на точність і міцність кінцевих виробів. Окремої уваги потребує стандартизація процесів 3D-друку для деталей поліграфічної техніки, зокрема у частині визначення критичних параметрів якості, меж допустимих відхилень та процедур контролю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Огляд літератури показує, що сучасні дослідження зосереджені на адаптації адитивних методів до специфічних потреб машинобудування, зокрема у сфері друкарської техніки і саме адитивні технології дозволяють створювати складні геометричні форми, які важко або неможливо виготовити традиційними методами. У друкарському обладнанні, де деталі, такі як грейферні барабани чи шестерні, зазнають значних механічних навантажень, 3D-друк забезпечує швидке прототипування та виготовлення запасних частин. Наприклад, технології FDM (Fused Deposition Modeling) і SLS (Selective Laser Sintering) успішно застосовуються для створення пластикових і композитних компонентів, що підтверджують роботи Торімс Т., Раткус А., Пікурс Г. [1], Сідельник В., Зварич Н. [2]. Дослідження також звертають увагу на зміцнення деталей. За даними Гаращенко Я. [3], використання гібридних матеріалів, таких як полімери з вуглецевим або скляним волокном, значно підвищує міцність і зносостійкість. Ці питання актуальні для друкарських машин, де деталі піддаються тертю та вібраціям. Крім того, адитивні технології впроваджують і локальне армування, що оптимізує вагу деталей без втрати їхньої функціональності.

Дослідження Поліщук А., Поліщук О., Лісевич С., Урбанюк Є., Рубанка М. [4], Ізгін Г. [5], показують, що 3D-друк знижує витрати на виготовлення одиничних або малих партій

деталей, що є критично важливим для ремонту застарілого друкарського обладнання, де оригінальні компоненти вже не виробляються. Водночас, як зазначають Дубницький В., Захарченко В. [6], адитивні технології сприяють зменшенню логістичних затримок, оскільки деталі можна виготовляти безпосередньо на місці експлуатації. Також актуальними залишаються питання довготривалої надійності надрукованих деталей у порівнянні з традиційними. Ці аспекти потребують подальших досліджень, щоб повною мірою реалізувати потенціал адитивних технологій у відновленні та зміцненні деталей друкарського обладнання.

Метою статті є дослідження практичних особливостей використання адитивних технологій для ремонту та підвищення міцності ключових деталей сучасного друкарського обладнання.

Викладення основного матеріалу.

Значний інтерес викликає можливість використання адитивних технологій (АМ) (технологій пошарового нарощування матеріалу, зокрема 3D-друку), які дозволяють створювати фізичні об'єкти безпосередньо на основі цифрових тривимірних моделей. Завдяки використанню АМ-технологій ремонтні підприємства можуть створювати цифрові бібліотеки моделей критичних деталей, а також організовувати гнучкі виробничі лінії, здатні швидко виготовляти необхідні компоненти без потреби у традиційній оснастці чи ливарних формах, що характерно для класичного машинобудування [7, с. 125]. Зокрема, підприємства, які здійснюють технічне обслуговування друкарської техніки, мають змогу або самостійно інвестувати у 3D-принтери та відповідне програмне забезпечення, або користуватися послугами спеціалізованих компаній, що надають сервіс з виготовлення деталей за АМ-технологіями на замовлення. У такому разі достатньо надати електронну 3D-модель потрібної деталі, після чого вона буде виготовлена й доставлена замовнику в найкоротші строки. Водночас, незважаючи на очевидні переваги, широке впровадження АМ-технологій у сфері ремонтного виробництва наразі стикається з низкою бар'єрів, серед яких ключовими є відсутність достатньої кількості кваліфікованих кадрів, обмежений доступ до сертифікованих матеріалів, а також недостатній рівень стандартизації процесів адитивного виготовлення у контексті гарантування якості відповідних елементів [8].

Виготовлення деталей методом 3D-друку може бути реалізовано як безпосередньо на підприємствах-виробниках друкарського обладнання, так і на підприємствах, що спеціалізуються на його обслуговуванні та ремонті, за умов наявності відповідного обладнання, програмного забезпечення та кваліфікованого персоналу. Окрім того, виготовлення критичних елементів може здійснюватися на базі зовнішніх організацій, які спеціалізуються на наданні адитивних послуг і здатні швидко реагувати на запити клієнтів, забезпечуючи високу точність, необхідну міцність і скорочені строки постачання деталей для друкарських машин (рис. 1.).

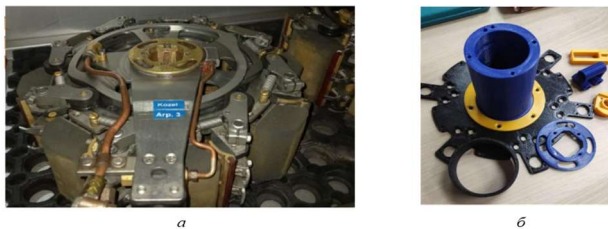


Рис. 1. Центральний барабан друкарської машини: а – конструкція барабана; б – деталі, виготовлені з використанням адитивних технологій пластиком філаментом [9]

У контексті дослідження, присвяченого застосуванню адитивних технологій для відновлення та зміцнення відповідних деталей друкарського обладнання, доцільно розмежовувати два ключові підходи до виготовлення елементів за допомогою адитивного виробництва, а саме: прямий і непрямий метод. Прямий метод передбачає створення готової деталі безпосередньо шляхом пошарового формування матеріалу на основі тривимірної комп'ютерної моделі, тоді як непрямий метод передбачає попереднє виготовлення формувального оснащення або моделей, які вже далі використовуються для лиття чи інших традиційних методів отримання деталей [9].

Так, пряме виробництво відповідних металевих деталей друкарського обладнання може здійснюватися з використанням технологій Selective Laser Melting (SLM) або Electron Beam Melting (EBM), суть яких полягає у пошаровому нанесенні металевого порошку на платформу з подальшим його селективним сплавленням відповідно лазерним або електронно-променевим джерелом енергії. Альтернативним підходом є методи Laser Engineered Net Shaping (LENS) та Laser Metal

Deposition (LMD), де металевий порошок або дріт подаються безпосередньо у зону друку, де відбувається лазерна наплавка матеріалу. У разі використання дроту в комбінації з електронним променем застосовується технологія Electron Beam Direct Manufacturing (EBDM), яка дає змогу отримувати масивні та міцні елементи складної геометрії. Для полімерних матеріалів широко використовується метод Fused Deposition Modeling (FDM), що ґрунтується на поетапному розплавленні та нанесенні термопластичного полімерного волокна, яке затверджується у процесі охолодження кожного шару, формуючи цільну конструкцію [10] (рис. 2.). Окрім того, універсальним методом є Sheet Lamination (SL) технологія, яка дає змогу виготовляти деталі як з металу, так і з полімерів шляхом пакування та з'єднання між собою контурних листових фрагментів.

Що стосується непрямого методу виготовлення деталей друкарського обладнання, особливо тих, які є конструктивно складними або потребують високої точності лиття, то у цьому випадку адитивні технології використовуються для створення формуювальних моделей, що надалі застосовуються у традиційних виробничих процесах [12]. Наприклад, з використанням Selective Laser Sintering (SLS) виготовляються моделі з полістиролу шляхом пошарового нанесення порошкового матеріалу й селективного спікання його лазерним променем (рис. 3.).

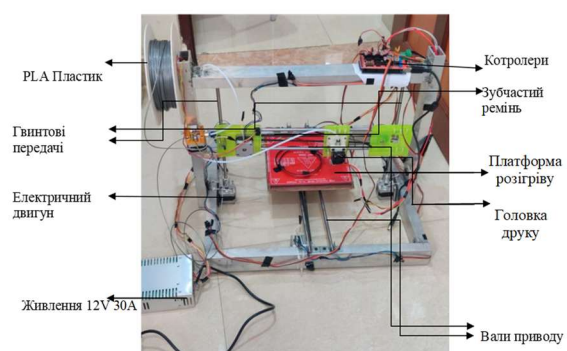


Рис. 2. 3D принтер для друку деталей друкарського обладнання методом «FDM» [11]

У випадку використання фотополімерних матеріалів застосовують Stereolithography Apparatus (SLA) технологію, за якої здійснюється пошарове формування об'єктів з рідкого фотополімеру з подальшим його затвердінням під дією ультрафіолетового випромінювання. Альтернативним підходом є

Multi-Jet Modeling (MJM), коли полімер подається у вигляді мікрокрапель у визначену область формування, де він одразу полімеризується, створюючи потрібну форму. Для виготовлення виплавлених моделей можуть застосовуватись матеріали на основі ливарного воску у комбінації з фотополімерами, а також ПВХ-плівки у поєднанні з шаровим ламінуванням (SLS) (рис. 4.) [14].

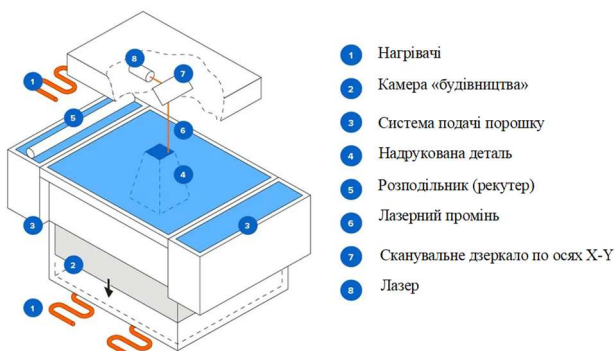


Рис. 3. Схема моделювання деталей друкарського обладнання методом «SLS» [13]

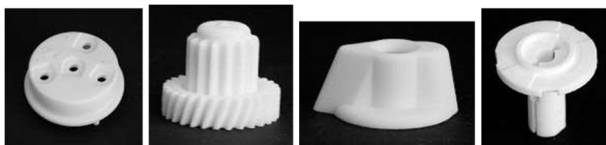


Рис. 4. Приклади пластмасових деталей друкарського обладнання, виготовлені за технологією SLS [15]

Ще одним напрямом непрямого застосування АМ-технологій є створення ливарних форм, які формуються з використанням SLS-технологій із суміші ливарного піску та полімерного зв'язуючого, або за технологією Ink-Jet Printing, коли зв'язуюча речовина подається у вигляді крапель на попередньо сформовані шари ливарного піску чи гіпсу, поступово утворюючи формувальну порожнину. Застосування таких підходів дозволяє виготовляти складні деталі для друкарських машин без потреби у дорогій оснастці, що особливо актуально в умовах дрібносерійного або одиничного виробництва та ремонтного обслуговування.

Зокрема, сучасні фотополімерні матеріали, що застосовуються в технології стереолітографії (SLA), характеризуються низьким рівнем усадки та відповідною в'язкістю, що забезпечує можливість формування надзвичайно тонких шарів товщиною до 0,025 мм у процесі пошарової побудови деталі, що критично

важливо для виготовлення складних конструктивних елементів друкарських машин [1].

Реальна точність побудови моделей на установках SLA-технологій становить у межах 0,025-0,05 мм на кожен 1 см лінійного розміру, що свідчить про високий рівень деталізації. Наприклад, для деталі з габаритами 250 мм характерне відхилення геометричних параметрів не перевищує $\pm 0,25-0,5$ мм, що в більшості випадків є прийнятним показником для елементів друкарського обладнання. Водночас у разі потреби підвищення точності до ще вищого рівня, існує можливість внесення відповідних коригувальних коефіцієнтів ще на етапі підготовки цифрової моделі до друку, що дає змогу суттєво зменшити похибки у наступних ітераціях [16]. Таким чином, перша надрукована модель у цьому випадку виконує роль тестової, яка дозволяє здійснити калібрування параметрів перед виготовленням остаточної версії деталі.

Окрім безпосереднього створення прототипів або елементів для ремонту, перспективним напрямом розвитку адитивного виробництва є так зване «швидке виготовлення оснастки» (rapid tooling), яке також знаходить застосування у процесах технічного обслуговування та модернізації друкарського обладнання. Йдеться про створення формоутворювальних елементів, зокрема матриць і пуансонів, безпосередньо за допомогою 3D-принтера, які надалі можуть бути використані для лиття деталей не з модельних, а з промислових полімерів. Такий підхід особливо ефективний у випадках, коли необхідно виготовити обмежену партію виробів, наприклад, від 10 до 100 одиниць, або коли йдеться про виготовлення одиничних нестандартних деталей для відновлення робочих вузлів друкарських машин (рис. 5).

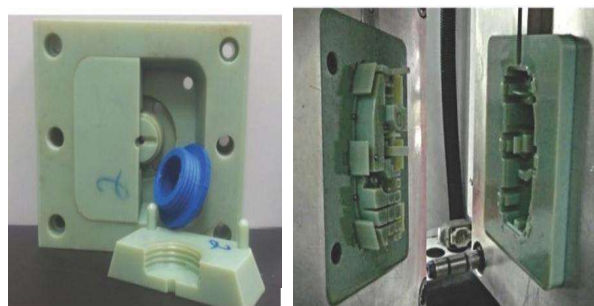


Рис. 5. Оснащення (вставки) для виготовлення литих виробів із поліаміду на термопластавтоматі (створено на принтері Objet500 Connex) [17]

Процес передбачає друк ливарної форми, після чого її поверхні можуть бути доопрацьовані вручну для досягнення необхідного рівня гладкості й точності, а саму форму можна встановити на термопластавтомат для подальшого виготовлення кінцевого продукту. У такий спосіб забезпечується гнучкість виробництва, мінімізуються витрати на виготовлення оснастки та скорочуються строки її створення, що має критичне значення у сфері сервісного обслуговування друкарської техніки, де швидке відновлення працездатності обладнання без втрати якості є пріоритетним завданням.

У межах сучасного розвитку адитивних технологій, спрямованого на удосконалення процесів відновлення та зміцнення відповідних деталей друкарського обладнання, інноваційна технологія AKF (Arburg Plastic Freeforming) відкриває новий якісний рівень використання 3D-друку в промисловому середовищі, що особливо важливо в умовах потреби у виготовленні функціональних, термостійких та навантажених деталей. Її основною перевагою є можливість застосування широкого спектру промислових полімерів, зокрема таких як ABS, полікарбонат (PC), поліамід (PA) та термоеластоласти (TPE), які подаються у вигляді звичних для литтєвого виробництва стандартних гранул, що суттєво знижує витрати порівняно з використанням дорогих ниткоподібних або порошкових матеріалів, характерних для класичних FDM- або SLS-систем (рис. 6) [3].

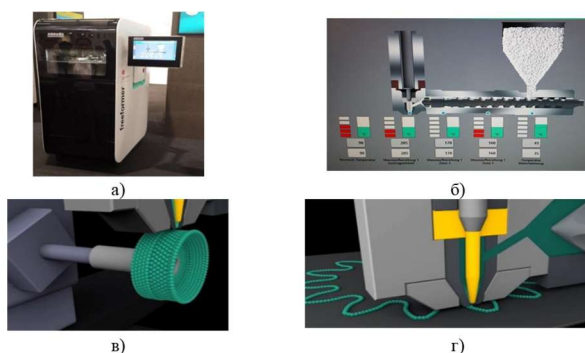


Рис. 6. АМ-машина Freeformer (ARBURG):
а – зовнішній вигляд машини;
б, в, г – схема робочого процесу; розміри зони побудови – 230×130×250 мм; мінімальний крок побудови – 0,15 мм. [18]

Принцип роботи АМ-машини типу Freeformer, що реалізує AKF-технологію, має багато спільного з традиційними термопластавтоматами, що застосовуються у

серійному виробництві. Зокрема, конструктивно передбачено завантаження гранульованого полімерного фідстоку до спеціального бункера (рис. 6 б), звідки матеріал подається шнековим механізмом до зони плавлення. У процесі транспортування полімер поступово нагрівається до температури приблизно 205 °С, що забезпечує досягнення необхідного в'язкопластичного стану для формування шарів майбутнього виробу. Далі розплавлений матеріал подається до екструзійної головки, яка оснащена спеціальною форсункою з дозуючим механізмом і п'єзоелектрично керованою мембраною, що дозволяє надзвичайно точно регулювати подачу матеріалу залежно від складності та точності деталей.

Особливістю системи є наявність змінних наконечників форсунки, які можуть мати діаметр вихідного отвору від 100 до 300 мкм, що забезпечує гнучке налаштування параметрів побудови залежно від вимог до готового виробу. Зокрема, діаметр отвору форсунки безпосередньо впливає на швидкість побудови та якість поверхні: при меншому діаметрі забезпечується нижча продуктивність, проте досягається значно вища точність та менша шорсткість поверхні; навпаки, більші отвори дозволяють підвищити швидкість друку, хоча й із відповідними компромісами у точності.

У контексті активного впровадження адитивних технологій у сферу обслуговування та модернізації друкарського обладнання, важливим чинником, що сприяв інтенсифікації розвитку цієї галузі, стало суттєве розширення асортименту металопорошкових матеріалів, придатних для тривимірного друку відповідних деталей. Якщо на початку 2010-х років перелік таких матеріалів був досить обмеженим і включав не більше 5-6 типів, то наразі промисловість пропонує десятки різноманітних композицій – від базових конструкційних сталей до жароміцних суперсплавів і навіть сполук на основі дорогоцінних металів, причому цей перелік постійно розширюється внаслідок науково-технологічного прогресу й запиту ринку на високоміцні, термостійкі та корозійно-стійкі матеріали для виготовлення високонавантажених деталей [4].

Особливо перспективним напрямом застосування АМ-технологій є виготовлення технологічної оснастки, тобто різноманітних пристроїв, шаблонів і інструментів, які використовуються в процесах серійного або дрібносерійного виробництва, зокрема у процесах виготовлення деталей корпусу,

допоміжних елементів та вставок для термопластавтоматів. Так, прикладом успішного застосування адитивних підходів є створення змінних вставок для формоутворювального оснащення термопластавтоматів, що зображено на рис. 7., де реалізується концепція створення знімних елементів, які відповідають за форму литої деталі.

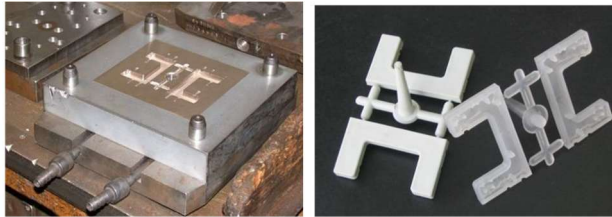


Рис. 7. Вставка для термопластавтомата та литі вироби з ABS-пластику [18]

Подібні конструктивні зміни, які, як правило, не потребують високого ресурсу експлуатації оснастки, викликають потребу у гнучких рішеннях, які дозволяють зменшити витрати на виробництво змінних форм, матриць і штампів [19]. Саме тут на перший план виходять можливості адитивного виробництва, яке дозволяє виготовляти відповідні елементи з легких металевих сплавів або технічних полімерів, які мають обмежений експлуатаційний ресурс, однак повністю відповідають вимогам до обмеженої кількості виробничих циклів.

Наукова новизна проведеного дослідження полягає у комплексному підході до застосування адитивних технологій для відновлення та зміцнення деталей друкарського обладнання, що відзначається інтеграцією технологічних, матеріалознавчих і організаційно-логістичних аспектів. Вперше науково обґрунтовано ефективність використання 3D-друку (технологій FDM, SLS, SLA, LENS, EBM та AKF) для оперативного виготовлення як полімерних, так і металевих компонентів друкарських машин зі збереженням функціональної надійності. Запропоновано диференційований підхід до вибору між прямим і непрямим методом виготовлення деталей залежно від їхніх конструктивних характеристик та експлуатаційних вимог.

Висновки. Визначено, що адитивні технології, зокрема FDM і SLS, забезпечують оперативне виготовлення деталей друкарського обладнання з високою геометричною

відповідністю оригінальним компонентам, що дозволяє скоротити час відновлення працездатності машин на 20–30% порівняно з традиційними методами. Це досягається завдяки прямому 3D-друку на основі цифрових моделей, що усуває потребу в тривалому очікуванні постачання запчастин. Дослідження показали, що деталі, виготовлені за технологією FDM із композитними матеріалами, мають міцність, порівнянну з традиційними аналогами, при зменшенні маси на 15–20%. Технологія SLS забезпечує вищу точність (відхилення 0,025–0,05 мм на 1 см лінійного розміру) та зносостійкість, що є критично важливим для компонентів складної геометрії, які зазнають значних механічних навантажень.

Було встановлено, що адитивні технології, такі як Selective Laser Sintering (SLS) та Arburg Plastic Freeforming (AKF), дозволяють виготовляти деталі з широкого спектру матеріалів, включаючи промислові полімери (ABS, поліамід) та металеві порошки, що забезпечує гнучкість у створенні високонавантажених елементів із необхідними характеристиками міцності та термостійкості для друкарських машин. Застосування гібридних матеріалів, зокрема полімерів із вуглецевим або скляним волокном, у поєднанні з адитивними технологіями сприяє підвищенню зносостійкості та стійкості деталей до циклічних вібрацій і тертя, що характерно для умов експлуатації друкарського обладнання.

Література

1. Torims T., Ratkus A., Pikurs G., Vedani M., Romano T., Gruber S., Lopez E., Marquardt F., Lauer H., Weinmann M., Obrados D., Delerue N., Vretenar M. Perspectives and recent achievements on additive manufacturing technologies for accelerators. *Proceedings of the 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC'23)*. 2023. p. 4960–4963. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2023-THPM031>
2. Сідельник В. М., Зварич Н. М. Технологічність виробу у адитивному виробництві. *Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*. Тернопіль, 11–12 грудня 2024 року. С. 121–122.
3. Гаращенко Я. М. Удосконалення технологічної підготовки адитивного виробництва складних виробів: монографія. *Харків: НТУ «ХПІ», 2023. 388 с.*
4. Поліщук А., Поліщук О., Лісевич С., Урбанюк Є., Рубанка М. Композиційні суміші на основі синтетичних полімерів і наповнювачів та

- обладнання для 3D-друку ними. Вісник Хмельницького національного університету. *Технічні науки*. 2023. № 319(1). С. 252–262. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-319-1-252-262>.
5. Izgin G. Implementation of Additive Manufacturing Technology. *Mälardalen University, School of Innovation, Design and Engineering*. 2024. 37 p. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1868331/FULLTEXT01.pdf>
 6. Дубницький В. І., Захарченко В. І. Формування сучасного високотехнологічного промислового виробництва в межах реалізації концепції «Індустрія 4.0». *Економіка та регіон*. 2024. № 6. С. 10–20. DOI: <https://doi.org/10.15276/ETR.06.2024.1>.
 7. Лісова Р. М. Застосування адитивних технологій у виробництві та їхній вплив на бізнес-процеси. *Держава та регіони*. 2019. № 5. С. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.32840/1814-1161/2019-5-22/>
 8. Македон В. В., Холод О. Г., Ярмоленко Л. І. Модель оцінки конкурентоспроможності високотехнологічних підприємств на засадах формування ключових компетенцій. *Академічний огляд*. 2023. № 2 (59). С. 75–89. DOI: [10.32342/2074-5354-2023-2-59-5](https://doi.org/10.32342/2074-5354-2023-2-59-5).
 9. Duncan B.P., Smith M.A. Practical application of additive manufacturing for extreme environments. *MRS Communications*. 2025. Vol. 15. P. 81–89. <https://doi.org/10.1557/s43579-024-00682-w>
 10. Коротков С. С., Кузьміч І. Б., Лашевська Н. О., Волошин В. В. Інтеграція камери в систему FDM-друку для покращення якості друку. *Телекомунікації та інформаційні технології*. 2024. № 1. С. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.049908>.
 11. Wilson S., Thomas R., Mary N., Bosco E. T., Gopinath A. Development and fabrication of fused deposition modelling 3D printer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1132. 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1132/1/012019>
 12. Kepka M., Zetek M., Zetková I., Bakir Y. Applications of additive technologies in the maintenance of machinery and equipment. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 54. P. 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.056>.
 13. Formlabs. What is selective laser sintering (SLS)? Formlabs. URL: https://formlabs.com/global/blog/what-is-selective-laser-sintering/?srsltid=AfmBOop_BBDUx0geDz1bIUfUeGHT62np_y9T3MMC-LAiXUzshBTwuz (дата звернення: 10.07.2025).
 14. Мейта Д. Р., Лашина Ю. В. Порівняння адитивних та субтрактивних технологій виготовлення металевих деталей. *Інновації молоді в машинобудуванні*. 2021. № 3. DOI: <https://doi.org/10.20535/2708-3926.2021.3.231654>.
 15. Македон В. В., Байлова О. О. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*. 2023. Випуск 47. С. 16–26. DOI: [10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3](https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3).
 16. Stratasys. Офіційний вебсайт. URL: <https://www.stratasys.com/en/> (дата звернення: 10.07.2025).
 17. ARBURG. Офіційний вебсайт. URL: <https://www.arburg.com/en/> (дата звернення: 10.07.2025).
 18. Павленко П. М. Цифрові двійники адитивних технологій в металообробних галузях промисловості. *У: Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем – 2024: матеріали науково-практичної конференції (м. Чернігів, 2024). Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка»*, 2024. С. 139–141.
 19. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. no 2(13(128)). p. 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.

References

1. Torims T., Ratkus A., Pikurs G., Vedani M., Romano T., Gruber S., Lopez E., Marquardt F., Lauer H., Weinmann M., Obrados D., Delerue N., Vretenar M. Perspectives and recent achievements on additive manufacturing technologies for accelerators. *Proceedings of the 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC'23)*. 2023. p. 4960–4963. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2023-THPM031>
2. Sidelnyk V. M., Zvarych N. M. Tekhnolohichnist vyrobu u adytyvnomu vyrobnytstvi. *Materialy XIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh uchenykh ta studentiv «Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohii»*. Ternopil, 11–12 hrudnia 2024 roku. S. 121–122.
3. Harashchenko Ya. M. Udoshkonalennia tekhnolohichnoi pidhotovky adytyvnoho vyrobnytstva skladnykh vyrobiv: monohrafiia. Kharkiv: NTU «KhPI», 2023. 388 s.
4. Polishchuk A., Polishchuk O., Lisevych S., Urbaniuk Ye., Rubanka M. Kompozytsiini sumishi na osnovi syntetychnykh polimeriv i napovniuvachiv ta obladnannia dla 3D-druku nymy. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. 2023. № 319(1). S. 252–262. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-319-1-252-262>.
5. Izgin G. Implementation of Additive Manufacturing Technology. *Mälardalen*

- University, School of Innovation, Design and Engineering. 2024. 37 p. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1868331/FULLTEXT01.pdf>
6. Dubnytskyi V. I., Zakharchenko V. I. Formuvannia suchasnoho vysokotekhnolohichnoho promyslovoho vyrobnytstva v mezhkakh realizatsii kontseptsii «Industriia 4.0». *Ekonomika ta rehion*. 2024. № 6. S. 10–20. DOI: <https://doi.org/10.15276/ETR.06.2024.1>.
 7. Lisova R. M. Zastosuvannia adytyvnykh tekhnolohii u vyrobnytstvi ta yikhonii vplyv na biznes-protsesi. *Derzhava ta rehiony*. 2019. № 5. S. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.32840/1814-1161/2019-5-22/>
 8. Makedon V. V., Kholod O. H., Yarmolenko L. I. Model otsinky konkurentospromozhnosti vysokotekhnolohichnykh pidpriemstv na zasadakh formuvannia kluchovykh kompetentsii. *Akademichniy ohliad*. 2023. № 2 (59). S. 75–89. DOI: [10.32342/2074-5354-2023-2-59-5](https://doi.org/10.32342/2074-5354-2023-2-59-5).
 9. Duncan B.P., Smith M.A. Practical application of additive manufacturing for extreme environments. *MRS Communications*. 2025. Vol. 15. P. 81–89. <https://doi.org/10.1557/s43579-024-00682-w>
 10. Korotkov S. S., Kuzmych I. B., Lashchevska N. O., Voloshyn V. V. Intehratsiia kamery v systemu FDM-druku dlia pokrashchennia yakosti druku. *Telekomunikatsii ta informatsiini tekhnolohii*. 2024. № 1. S. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.049908>.
 11. Wilson S., Thomas R., Mary N., Bosco E. T., Gopinath A. Development and fabrication of fused deposition modelling 3D printer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1132. 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1132/1/012019>
 12. Kepka M., Zetek M., Zetková I., Bakir Y. Applications of additive technologies in the maintenance of machinery and equipment. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 54. P. 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.056>.
 13. Formlabs. What is selective laser sintering (SLS)? Formlabs. URL: https://formlabs.com/global/blog/what-is-selective-laser-sintering/?srsltid=AfmBOOp_BBDUx0geDz1bIUfUeGHT62np_y9T3MMC-LAiXUzsHBTwuz (дата звернення: 10.07.2025).
 14. Meita D. R., Lashyna Yu. V. Porivniannia adytyvnykh ta subtraktyvnykh tekhnolohii vyhotovlennia metalevykh detaley. *Innovatsii molodi v mashynobuduvanni*. 2021. № 3. DOI: <https://doi.org/10.20535/2708-3926.2021.3.231654>.
 15. Makedon V. V., Bailova O. O. Planuvannia i orhanizatsiia vprovadzhennia tsyfrovnykh tekhnolohii v diialnist promyslovykh pidpriemstv. *Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnoho universytetu. Serii «Ekonomichni nauky»*. 2023. Vypusk 47. S. 16–26. DOI: [10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3](https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3).
 16. Stratasys. Ofitsiyni vebsait. URL: <https://www.stratasys.com/en/> (data zvernennia: 10.07.2025).
 17. ARBURG. Ofitsiyni vebsait. URL: <https://www.arburg.com/en/> (data zvernennia: 10.07.2025).
 18. Pavlenko P. M. Tsyfrovi dviinyky adytyvnykh tekhnolohii v metaloobrobnykh haluziakh promyslovosti. U: *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system – 2024: materialy naukovo-praktychnoi konferentsii (m. Chernihiv, 2024)*. Chernihiv: NU «Chernihivska politekhnika», 2024. S. 139–141.
 19. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. no 2(13(128)). p. 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.

Zenkin M.A., Remezovskyi O.M., Kokhanovskyi V.O. Application of additive technologies to restore and strengthen relevant parts of printing equipment

The article is devoted to the study of the potential application of additive technologies for the restoration and reinforcement of critical components of printing equipment. The authors analyze the effectiveness of 3D printing methods in ensuring technical reliability and accelerating repair processes. The relevance of the research is driven by the growing demand for flexible, rapid, and cost-effective solutions for restoring worn-out or unavailable parts in the printing industry. Under conditions of intensive machine operation and the absence of necessary spare parts in stock, the implementation of additive manufacturing helps minimize downtime, avoid prolonged production cycles associated with traditional casting or machining, and enhance the overall resilience of production processes. The aim of the research is to justify the effectiveness of additive manufacturing technologies for producing replacement parts for printing machines with high requirements for geometric accuracy, mechanical strength, and wear resistance, as well as to develop practical recommendations for their application. The study employed an experimental methodology that involved the fabrication of test samples from composite polymers and polyamide powder using FDM and SLS technologies. Mechanical tests for bending strength, wear resistance, and vibration durability were conducted, along with a metrological analysis of dimensional accuracy. As a result, it was established that FDM printing using composite materials allows for weight reduction of parts by up to 20% while maintaining strength comparable to traditional metal counterparts. SLS technology provides high precision (up to ± 0.05 mm) and dimensional stability for components of complex

geometry. The study also demonstrated that the use of advanced technologies such as Arburg Plastic Freeforming (AKF) expands the possibilities of using standard industrial granulates in 3D printing, significantly reducing material costs. Prospects for further research include improving quality standards for additive manufacturing of printing components, developing new heat-resistant composites, and implementing digital libraries of part models in the maintenance systems of printing equipment.

Keywords: *additive technologies, 3D printing, printing equipment, part restoration, strengthening of assemblies, polymeric materials.*

Зенкін Микола Анатолійович – д.т.н., професор, професор кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ), nikolay_zenkin@ukr.net

Ремезовський Олег Михайлович – аспірант кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ), remez2024@outlook.com

Кохановський Василь Олександрович – к.т.н., доцент, доцент кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ), v.kokhanovskyi@kpi.ua

Стаття подана 15.07.2025.