

**Муравйов О.В.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Нижник Ю.М.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Петрик В.Ф.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Протасов А.Г.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Сєрий К.М.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

*Технології 3D-друку з кожним днем набувають ширшого використання та навіть впроваджуються у виробництво продукції. Кілька десятиліть тому адитивні технології застосовувалися виключно для прототипування, а нині використовуються під час виробництва високоточних надсучасних приладів і систем. Різноманітність методів тривимірного друку, широка номенклатура використовуваних матеріалів і вражаючі можливості такої техніки дозволили залучити 3D-друк у багатьох сферах життєдіяльності людини. Однак на шляху масового впровадження 3D-принтерів у серійне виробництво все ще залишається чимало проблем і питань, які необхідно виявити для пошуку ефективного їх розв'язання. Метою роботи є дослідження та аналіз існуючих адитивних технологій, визначення їх можливостей, шляхів подальшого розвитку й перспектив застосування.*

*Стаття містить порівняльний аналіз існуючих технологій 3D-друку із зазначенням областей застосування, основних можливостей і короткого опису принципів роботи. Виявлено найбільш перспективні в найближчому майбутньому області застосування адитивних технологій та основні тенденції їх удосконалення. У роботі обґрунтовані переваги впровадження тривимірного друку в серійне виробництво продукції. Розглянуто новітню технологію виправлення дефектів під час тривимірного друку Renelore, що знайшла застосування під час використання 3D-принтера, заснованого на лазерному синтезі порошкового шару.*

*Розвиток адитивних технологій вже нині дає змогу створювати деталі й конструкції надзвичайно складної форми з високою точністю, водночас собівартість певних моделей 3D-принтерів створює передумови для поширення такої техніки серед усіх бажуючих. Натепер 3D-друк уже знайшов застосування в медицині, освіті, харчовій і навіть військовій промисловості. Основними напрямками вдосконалення методів і технологій тривимірного друку є підвищення точності й швидкості виготовлення деталей, розширення номенклатури застосовуваних і використовуваних одночасно матеріалів, усунення дефектів друкованої продукції. Концентрація наукових зусиль у таких напрямках дозволить незабаром впровадити адитивні технології в серійне виробництво, що відкриє перед людством нові перспективи.*

**Ключові слова:** 3D-принтер, тривимірний друк, адитивні технології, можливості технологій 3D-друку, система Renelore.

**Постановка проблеми.** Людині, яка ніколи не зустрічалася з 3D-друком, може здатися, що 3D-принтер – це сучасна технологія, проте інженери та

вчені працювали з цим дивовижним обладнанням ще з 1983 року. Це був час, коли американський інженер на ім'я Чарльз Халл винайшов перший 3D-принтер.

Спочатку у 90-х роках методи 3D-друку вважалися придатними лише для виготовлення функціональних чи естетичних прототипів, проте технологія тривимірного друку розширила горизонти для медицини, промислового прототипування, освіти. Станом на 2021 рік точність відтворення та номенклатура використовуваних матеріалів збільшилися настільки, що деякі процеси 3D-друку вважають придатними для промислового виробництва.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Натепер адитивні технології охоплюють різноманітні процеси, які загалом засновані на пошаровій побудові тривимірних об'єктів з віртуальної моделі. Віртуальна модель – це 3D-модель для друку, яка може бути створена за допомогою комп'ютерного середовища CAD (computer aided design), за допомогою 3D-сканера або звичайного цифрового фотоапарата та фотограмметрії. 3D-друковані моделі, створені за допомогою програми CAD, призводять до зменшення похибок і можуть бути виправлені перед друком, що дозволяє перевірити параметри моделі та дизайн об'єкта ще до початку його відтворення [1, chapter 18].

Типи технологій 3D-друку, що застосовуються сьогодні, можна об'єднати за наступними процесами, що лежать в основі принципу роботи цієї техніки [2; 3, с. 773–785; 4].

1. Екструзія матеріалу (Material Extrusion Fused deposition Modeling (FDM)).

2. Полімеризація (Vat Polymerization: SLA (Stereolithography) and DLP (Digital Light Processing)).

3. Синтез порошкового шару (полімери) (Powder Bed Fusion (polymers): Selective Laser Sintering (SLS)).

4. Синтез порошкового шару (метали) (Powder Bed Fusion (metal): Direct Metal Laser Sintering (DMLS); Selective Laser Melting (SLM); Electron Beam Melting (EBM)).

5. Струменеве нанесення в'язучого агента (Binder Jetting: Sand and Metal Binder Jetting (BJ)).

6. Струменеве нанесення матеріалу (Material Jetting: Material Jetting (MJ), Drop on Demand (DOD)) [5, p. 130–139].

Основні відмінності між цими процесами полягають у способі нанесення шарів для створення деталей та використовуваних матеріалах. Кожен метод має свої переваги та недоліки. До основних характеристик 3D-принтера на сьогоднішній день, як правило, відносять: швидкість друку, точність позиціонування, витрати, номенклатуру використовуваних матеріалів, а також кольорові можливості друку деталей.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз сучасних адитивних технологій, визначення їх можливостей, сфер застосування, а також доцільності впровадження у серійне виробництво, виявлення основних проблем розвитку та шляхів їх подолання.

### **Виклад основного матеріалу.**

1. Аналіз сучасних адитивних технологій

Розглянемо коротко принципи роботи 3D-принтерів, побудованих за вказаними вище технологіями друку, та порівняємо їх можливості (табл. 1).

**1.1. Екструзія матеріалу.** Процес 3D-друку, при якому нитка твердого термопластичного матеріалу розігрівається і переходить у рідкий стан. Принтер розподіляє матеріал по заданим координатам, де нитка охолоджується і твердне. Після того, як шар буде завершений, принтер переходить до побудови наступного шару. Цей процес друку перерізується, будуючи шар за шаром, до повного формування об'єкта. Пристрої, що використовують екструзію матеріалів, найпоширеніші та найдешевші серед усіх технологій 3D-друку. Сьогодні така технологія знайшла застосування при прототипуванні, виготовленні шаблонів для лиття та корпусних елементів конструкцій.

**1.2. Полімеризація.** Як конструкційний матеріал цієї технології використовують фотополімерну смолу, яку вибірково затверджують джерелом світла. Дві найпоширеніші форми полімеризації – це SLA (стереолітографія) та DLP (Digital Light Processing). Принципова відмінність цих типів технологій 3D-друку – тип джерела світла, яке вони використовують для затвердіння матеріалу. Принтери SLA використовують точковий лазер, на відміну від воксельного підходу, що застосовується принтером DLP, де затвердіння фотополімеру відбувається під впливом ультрафіолетового випромінювання. Полімеризація в якості технології 3D-друку широко застосовується для виготовлення ювелірних виробів.

**1.3. Синтез порошкового шару (полімери).** Процес 3D-друку, де джерело теплової енергії вибірково розплавляє шар термопластичного порошку для формування твердотілого об'єкта. Технологія знайшла застосування при виготовленні функціональних елементів і деталей складної форми, які передбачають низький рівень експлуатації.

**1.4. Синтез порошкового шару (метали).** Процес 3D-друку, який формує об'єкти, використовуючи теплове джерело для індукування синтезу частинок металевого порошку. В якості

матеріалів при цьому виступають порошкові алюміній, нержавіюча сталь, титан. Деталі, сформовані за цією технологією, широко застосовуються сьогодні в медицині (хірургії та стоматології) для протезування.

**1.5. Струменеве нанесення в'язучого агента.** Процес 3D-друку, де рідкий агент вибірково зв'яже ділянки порошкового шару. Ця технологія 3D-друку вимагає наявності початкового шару порошку на платформі. Binder Jetting переміщує друкуючу голівку над поверхнею металевого порошку, осаджуючи краплі рідкого агента, що мають діаметр зазвичай 80 мкм. Ці краплі зв'язують частинки порошку разом, щоб утворити шар деталі. Після цього надрукований шар опускається, а на нього наноситься новий шар порошку. Цей процес повторюється до повного формування об'єкта. Потім предмет залишають у порошку для затвердіння, а залишки видаляють за допомогою стисненого повітря [6, с. 26–30].

**1.6. Струменеве нанесення матеріалу.** Такий 3D-принтер працює аналогічно звичайному струменевому принтеру. Ключова відмінність полягає в тому, що друкуюча голівка випускає сотні крихітних крапель фотополімерної смоли, а потім їх затверджує за допомогою ультрафіолетового світла. Після того, як один шар нанесений і затверджений, платформа збірки опускається вниз на товщину одного шару і процес повторюється для створення 3D-об'єкта. Технологія знайшла застосування при виготовленні інжекторних форм з невеликим пробігом, створенні прототипів виробів та медичних

моделей з можливістю отримання різнокольорових об'єктів [7, р. 167–184; 8, с. 20–21].

**2. Виправлення дефектів в технологіях адитивного виробництва**

За останні роки активного розвитку 3D-друку технологія лазерного синтезу порошкового шару (Laser Powder Bed Fusion (LPBF)) отримала багато досягнень, однак адитивне виробництво металевих деталей, особливо за наявності складної геометрії та нових матеріалів, все ще передбачає деякі технологічні обмеження, які необхідно подолати. Однією з головних проблем для досліджень та розробок у цьому секторі є необхідність покращення стабільності, повторюваності та спроможності друкарських систем.

Професори Б'янка Марія Колосімо та Марко Грассо з кафедри машинобудування у Politecnico di Milano нещодавно презентували переконливу нову технологію, що здатна не лише виявити невідповідності в процесі LPBF, але й виправити їх під час друку, що робить її одним із найперспективніших та найсучасніших нововведень лазерного синтезу порошкового шару сьогодні. Пристрій, відкрита архітектура, високочутливий прототип LPBF з вбудованою системою видалення, називається Penelope [9]. Система названа на честь дружини Одисея з грецької міфології, яка стала символом вірності: щоб уникнути зазіхань женихів, вона пообіцяла, що обере одного з них для одруження, коли закінчить плести похоронну плащаницю. Однак щовечора вона розплутувала фрагмент так, як система Penelope «скасовує» надрукований шар.

Таблиця 1

**Порівняльний аналіз можливостей технологій 3D-друку**

Назва технології	Переваги	Недоліки	Точність розмірів, мкм
Екструзія матеріалу	Найнижча вартість Багатоматеріальний друк Складна геометрія виробів Простота використання	Ламкість Не можна використовувати в якості механічних деталей	50
Полімеризація	Гладка поверхня об'єкту Складна форма деталей Висока точність	Ламкість Невеликий вибір матеріалів	15-30
Синтез порошкового шару (полімери)	Хороші механічні властивості Функціональні деталі	Потребує більше часу Висока вартість	30
Синтез порошкового шару (метали)	Міцність Функціональні деталі Висока точність	Невеликі розміри виробу Найдорожча з усіх технологій друку	10
Струменеве нанесення в'язучого агента	Низька вартість Великі обсяги нарощування Функціональні металеві деталі	Гірші механічні властивості, ніж в технології синтезу порошкового шару (метали)	20
Струменеве нанесення матеріалу	Найкраща обробка поверхні Різнокольоровий та багатоматеріальний друк Швидкість	Ламкість Не можна використовувати в якості механічних деталей	10

Технологію моніторингу 3D-друку можна розбити на три структурні сегменти: контроль якості, термографія та виправлення дефектів. У сукупності ці три елементи складають вирішення проблеми виробництва бездоганних деталей, що використовують технологію LPBF. Команда продемонструвала, що один з найбільш вражаючих досягнень на даний момент – це те, що виправлення дефектів зовсім не змінює остаточну якість деталі.

### 3. Етапи роботи системи Penelope

Розглянемо окремо кожен етап роботи технології моніторингу системи видалення дефектів 3D-друку Penelope.

**3.1. Контроль якості друку.** Система контролю, запропонована італійською дослідницькою командою, є першим кроком в технології Penelope, що складається з пристрою візуалізації високої роздільної здатності із зображеннями до/після експозиції та розміром пікселя 20 мкм, а також відрегульованою системою освітлення, що встановлено над вбудованою камерою принтера.

Система контролю друку реалізує виявлення геометричних спотворень шляхом зйомки пластових зображень з високою роздільною здатністю при різних умовах освітлення. Це дає змогу визначити контури об'єктів за допомогою сегментації зображень. Система візуалізації постійно фіксує геометричні розміри певної частини, тобто вона може виявити навіть миттєві невідповідності в шарах деталі. Також Penelope здатна оцінити зміни в системі самого принтера та його параметрів друку при кожній наступній побудові.

**3.2. Термографія.** Іншим важливим елементом у запатентованому процесі моніторингу є термографія, яка спирається на швидкісну систему контролю теплових полів для зображення та моніторингу швидкоплинних температурних процесів, включаючи бризки та шлейф. Розглянута система являє собою інфрачервону (далі – ІЧ) камеру із спектральним діапазоном чутливості 3–5 мкм (MWIR) та 1 000 кадрів на секунду, що дає можливість реєструвати температури до 1 500°C.

Завдання термографічної системи – фіксована оцінка мікроструктури деталі на основі відеозображення. Це досягається пошаровим аналізом, моделюванням просторових і часових температурних градієнтів в межах сканованої області та оцінкою мікроструктурних показників побудови зерна.

**3.3. Виправлення дефектів.** Мабуть, найважливішою части-

ною технології моніторингу Penelope є функція виправлення дефектів, яка поєднує моніторинг та гібридні можливості виготовлення, що дає змогу системі ефективно шліфувати поверхню деталі, стираючи останні надруковані шари. Ця нова методика може дати можливість LPBF ідентифікувати дефекти під час виникнення, видалити несправні шари, а потім скоригувати параметри процесу та відновити завдання друку.

Система, призначена для видалення несправного шару, складається з поверхневого шліфувального круга, що встановлюється у візок, розташований на лінійній осі, паралельній осі Y. Робочий інструмент – абразивне колесо із середнім розміром зерна 120 мкм, максимальною швидкістю 4 000 об/хв, максимальною подачею 30 мм/с та глибиною різання 10–20 мкм.

Отже, дослідники врахували чимало нюансів техніко-економічного обґрунтування процесу видалення дефектного шару, включаючи можливість відновлення незабрудненого та рівномірного порошкового шару після того, як шліфувальний круг видалить верхні шари деталі, та вплив видалення шару на механічні властивості відредатованої деталі. При випробуваннях прототип системи Penelope підтвердив очікування розробників. Подальші тести віддрукованих зразків показали відсутність статистичної різниці щільності суцільної деталі та деталі з видаленим шаром, так само не виявлено аномальної концентрації пор. Результати такого аналізу наведені на рис. 1.

На думку розробників, у подальшому необхідно провести роботу з покращення оцінки внутрішньої мікроструктури друкованих об'єктів. Серед наступних етапів дослідження – вдосконалення калібрування ІЧ камери, що є важким або навіть неможливим внаслідок особливостей коефіцієнту випромінювання матеріалу та зміни його фази в

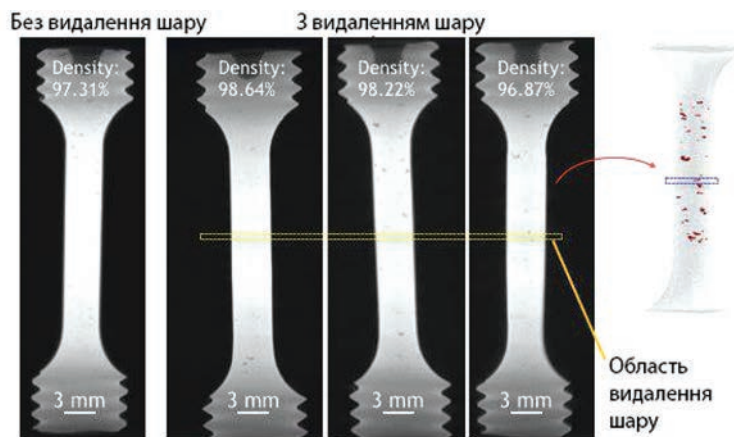


Рис. 1. Тестування результатів роботи системи Penelope

процесі LPBF; подальше підтвердження методології шляхом проведення аналізу впливу на різні мікроструктурні властивості; моніторинг профілів теплового охолодження для стабілізації процесу. Після вирішення цих питань дослідники мають намір запровадити Penelope 2.0 – повністю інтегрований контролер для автономного виявлення та виправлення дефектів тривимірного друку.

**Висновки.** Найбільш поширена на сьогодні технологія 3D-друку (46% станом на 2020 рік) – екструзія матеріалу, завдяки своїй низькій вартості та простоті у використанні. Однією з ключових переваг 3D-друку є можливість створення об'єктів надзвичайно складної форми.

На відміну від традиційного виготовлення виробів, коли шматочки матеріалу вирізаються з більших блоків, 3D-принтер створює продукти пошарово і друкує лише відповідні деталі, витрачаючи набагато менше матеріалу, а, отже, і менше енергії на виробництво. Виконуючи лише основні конструктивні потреби продукції, виробництво добавок (друкованих елементів конструкцій) може внести великий внесок у полегшення ваги,

зменшення споживання енергії та викидів парникових газів транспортних засобів.

3D-принтер, що дозволяє використовувати одночасно декілька матеріалів, є основним елементом розвитку майбутніх технологій тривимірного друку. Багато експертів пророкують створення фабрик нового формату, які не будуть спеціалізуватися на декількох видах однотипної продукції, а зможуть виробляти буквально все, що завгодно, завдяки універсальності технології 3D-друку та можливостям масштабувати принтер навіть до розмірів цілого будинку. Однак існує декілька джерел помилок і різних типів дефектів – внутрішня пористість, залишкові напруження, геометричні деформації, мікроструктурні розриви тощо, які можуть виникати в процесі друку, що негативно впливає не лише на кінцеву якість та продуктивність продукції, але також і на час виробництва та витрати. Розробка першої системи адитивного друку, такої як Penelope, що здатна автономно виявляти дефекти за допомогою моніторингової технології, а потім видаляти несправний шар, може призвести до повної індустріалізації 3D-друку.

#### Список літератури:

1. Redwood Ben, Schoffer Filemon, Garret Brian. The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications. *3D Hubs*. 2017. 304 p.
2. Types of 3D Printing Technology. URL: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology> (дата звернення: 13.09.2021).
3. Murphy S., Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology*. 2014. Volume 32. P. 773–785.
4. Different Types of 3D Printers. URL: <https://3dinsider.com/3d-printer-types> (дата звернення: 13.09.2021).
5. Xu T. Complex heterogeneous tissue constructs containing multiple cell types prepared by inkjet printing technology. *Biomaterials*. 2013. Volume 34. P. 130–139.
6. Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Качурин А.А. Обзор современных технологий 3D печати. *Современные наукоемкие технологии*. 2015. № 6. С. 26–30.
7. Aranda Sean. 3D Printing Failures: 2020 Edition: How to Diagnose and Repair ALL Desktop 3D Printing Issues. 2019. 293 p.
8. Демецкая А.В. Медицина будущего: биопринтинг. *Фармацевт Практик*. 2018. № 1. С. 20–21.
9. PENELOPE: Politecnico di Milano researchers file patent for self-repairing LPBF system. URL: <https://www.3dprintingmedia.network/penelope-politecnico-di-milano-researchers-file-patent-for-self-repairing-lpbf-system> (дата звернення: 13.09.2021).

#### **Muraviov O.V., Nyzhnyk Yu.M., Petryk V.F., Protasov A.G., Syeryy K.M. CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF ADDITIVE TECHNOLOGIES**

*Technologies of 3D printing are becoming more widely used every day. Nowadays they are introduced even into manufacturing processes. A few decades ago additive technologies were used only for prototyping but today they are using in the manufacture of high-precision ultramodern devices and systems. The variety of three-dimensional printing methods, wide range of using materials and the impressive capabilities of such technique allow using 3D printing in many areas of human life. However, there are still a lot of problems and unresolved questions that need to be identified in order to find an effective their solving. The purpose of this work is investigation and analyzing of existing additive technologies, determination of their capabilities, ways of further development and application prospects.*

*The article contains comparative analysis of existing 3D printing technologies with indication of application areas, main features and brief description of the work principles. The most promising in the near*

*future application areas of additive technologies and the main trends for their improvement are identified. The paper substantiates the introducing advantages of three-dimensional printing into mass manufacturing. Modern technology for defect correction during 3D printing, named Penelope, is considered, which has found application at using 3D printers based on laser synthesis of powder layer.*

*Development of additive technologies today make it possible to create parts and structures of extremely complex shape with high accuracy, while the cost of certain models of 3D printers creates the prerequisites for the distribution of such technology among everyone who wants. Today 3D printing has already found application in medicine, education, food and even military industry. The main development directions of methods and technologies of three-dimensional printing are improving the accuracy and speed of parts manufacturing, expansion of used materials range and elimination of defects in printed component. The concentration of scientific efforts in these areas will soon allow introduce the additive technologies in mass manufacturing, which will open up new perspectives for humanity.*

**Key words:** *3D printer, three-dimensional printing, additive technologies, capabilities of 3D printing technologies, system Penelope.*