

Ігор Петренко¹, Максим Болотов², Тімур Ганєєв³

¹аспірант

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: igor.petrenko0511@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2103-4324>. ResearcherID: [IQV-2134-2023](https://orcid.org/0009-0006-2103-4324)

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: Bolotovmg@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>. ResearcherID: [H-4183-2014](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132)

³кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: gatavltim@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6037-5494>. ResearcherID: [G-5191-2014](https://orcid.org/0000-0001-6037-5494)

КОМПАРАТИВНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА В ГАЛУЗІ МАШИНОБУДУВАННЯ

Технології адитивного виробництва існує понад 30 різновидів і кожного року їх стає дедалі більше, які також патентуються, стають новими, по-різному називаються, але всі вони так чи інакше мають відношення до якогось конкретного типу технологій адитивного виробництва або комбінації типів. Ця стаття містить компаративний аналіз основних технологій адитивного виробництва, опис унікальності використання кожного типу технологій, застосування технологій, їх переваги, недоліки та можливість реалізації у машинобудуванні. У роботі наведено систематизацію даних, приведення вищеперахованих показників у табличний вигляд, стан технологій адитивного виробництва та перспективи розвитку в галузі машинобудування.

Ключові слова: 3D-друк; адитивне виробництво; галузеве машинобудування; Binder Jetting; Directed Energy Deposition; Material Extrusion; Material Jetting; Powder Bed Fusion; Sheet Lamination; Vat Photopolymerization.

Рис.: 15. Табл.: 2. Бібл.: 75.

Актуальність теми дослідження. Темпи розвитку виробничих галузей вимагають сучасних технологій виробництва, які можливо реалізувати з мінімальними витратами часу та інвестицій з отриманням якісного робочого вихідного продукту. Цим вимогам відповідають адитивні технології, які знаходять дедалі більше застосування в усіх сферах життєдіяльності людини і є одним із найбільш перспективних напрямів промислового виробництва [1]. Остання промислова революція, Industry 4.0, заохочує інтеграцію інтелектуальних виробничих систем і передових інформаційних технологій. Адитивне виробництво (АВ) вважається важливою частиною цього нового руху. В еру використання сучасних виробничих навичок у контексті інтеграції нових інформаційних технологій відіграє важливу роль для економічної конкурентоспроможності [2]. Дослідження адитивних технологій у галузевому машинобудуванні (ГМ) має великий потенціал для розвитку й покращення якості виготовлення деталей і компонентів. Однією з головних переваг адитивного виробництва є можливість виготовлення складних форм, які дуже складно або неможливо отримати за допомогою традиційних методів виробництва.

Постановка проблеми. Зростаючі вимоги до якості та складності виробів у галузі машинобудування потребують швидкого та ефективного вирішення завдань щодо організації виробництва. У цьому контексті адитивні технології можуть бути ефективним рішенням, оскільки вони дозволяють створювати складні вироби з високою точністю та якістю, знижуючи при цьому час та витрати на виробництво. Існує близько 30 різноманітних технологій АВ і кожного року їх кількість зростає, проте досліджень, присвячених систематизації даних та аналізу практичного застосування АВ, досить мало. Для вирішення цієї проблеми необхідно провести літературний аналіз та систематизувати дані про технології адитивного виробництва в галузі машинобудування, зокрема порівняти їхню вартість, якість, продуктивність і можливості застосування, щоб визначити найбільш ефективні та перспективні види технологій для вирішення завдань галузей машинобудування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тема адитивних технологій активно досліджується як закордонними, так і вітчизняними авторами, їхні роботи присвячені аналізу технологій АВ, параметрам друку, міцнісним характеристикам матеріалів, значущості АВ у четвертій промисловій революції.

Наприклад, у дослідженні [3] Sanjay Shrestha та Guha Manogharan аналізується вплив різних технологічних параметрів технології Binder Jetting на механічні властивості спечених металевих деталей АВ та вплив вибраних параметрів процесу на характеристики TRS спечених зразків SS 316L вивчається за допомогою стандартного методу випробування ASTM. Однак автор не акцентує увагу лише на поведінці матеріалу, що робить опис зосередженим на конкретному аспекті технології, забуваючи про її базові особливості.

Beth E. Carroll, Todd A. Palmera та Allison M. Beese у роботі [4] дослідили анізотропні механічні властивості тривимірного хрестоподібного компонента Ti-6Al-4V, виготовленого за допомогою процесу АВ спрямованого енергетичного осадження (CEO). Досліджено механічні властивості компонента в поздовжній і поперечній орієнтаціях щодо шарів побудови при одновісному розтягу. У процесі дослідження авторами виявлено покращені фізико-механічні властивості компоненту з матеріалу Ti-6Al-4V створеного методом CEO у порівнянні з альтернативними методами. Представлені результати показують достатній рівень міцності матеріалу.

Останні досягнення, а також основні аспекти, що регулюють взаємодію лазерного випромінювання з матеріалом під час процесу DED, термічну поведінку ванни розплаву, передовий моніторинг на місці та механізми взаємодії розглядаються у роботі [5]. Також визначено та обговорено найбільш критичні змінні параметри обробки та їхній вплив на властивості нанесеного матеріалу, а також механізми утворення дефектів і методи визначення характеристик. Представлено огляд програм високого класу, поточні проблеми, пов'язані з використанням DED, і критичний погляд на технологію. Не висвітлено переваги та галузі застосування даної технології.

З матеріалів представлених у роботі [6] можна виділити таке: дослідження та розробка гібридних машин, вивчення та розробка нових матеріалів. Стаття являє собою огляд останніх тенденцій в адитивному виробництві.

У дослідженні [7] описано, як АВ підтримує потребу в інструментах нового покоління, проходячи перевірку якості, моніторинг, контроль та оптимізацію процесів за допомогою великого потоку даних. Автори окреслили нові цікаві напрямки для досліджень, пов'язуючи нові виклики передового виробництва з деякими поточними тенденціями в статистичній інженерії якості. Проте у статті відсутня конкретика щодо застосування до конкретного виду промисловості, лише поверхнево наводить спроможності використання АВ.

Роботи [8; 9] присвячені огляду полімерних композитів, застосуванню в науці та інженерії. Опису тенденцій технологій фотополімеризації, огляду методів кубової полімеризації, їх унікальне застосування в галузі доставки ліків і виготовлення медичних пристроїв, прикладам матеріалів і перевагам, які вони надають у сфері охорони здоров'я присвячені роботи [10; 11].

Виділення недосліджених частин. У більшості з розглянутих робіт по технології АВ основна увага приділяється особливостям використання сировини, оптимізації процесів та фізико-механічним характеристикам виробів, що породжує нерозуміння використання певних видів технологій для конкретних технологічних задач. Більше того, наявна література з цього приводу або надто розрізнена, що ускладнює її вивчення для професіоналів, або обмежена лише фундаментальними концепціями. На сьогодні відсутня достатня кількість досліджень присвячених порівняльному аналізу технологій АВ та висвітленню проблематики застосування їх у галузі машинобудування.

Мета цієї роботи полягає в зібранні та систематизації інформації з різних літературних джерел про використання сучасних технологій автоматизованого виробництва в галузі машинобудування. Основна увага приділяється визначенню найбільш перспективних технологій та їх аналізу з техніко-економічного погляду. Мета полягає в з'ясуванні, які технології найбільш ефективні для вирішення завдань, пов'язаних із машинобудуванням, з огляду на показники ефективності та рентабельності.

Виклад основного матеріалу. Відмітивши актуальність цього огляду та визначившись з метою дослідження, розглянемо широкоживані типи адитивних технологій і проведемо аналіз щодо доцільності їх використання в галузі машинобудування.

Типи технологій адитивного виробництва: принцип роботи, перспективи застосування.

Найбільш поширеними видами технологій адитивного виробництва є:

- 1) Струменеве нанесення в'язучого/ Binder Jetting (BJ);
- 2) Пряме підведення енергії та матеріалу/ Directed Energy Deposition (DED);
- 3) Екструзія матеріалів/ Material Extrusion (ME);
- 4) Струменеве нанесення матеріалу/Material Jetting (MJ);
- 5) Синтез на підкладці/ Powder Bed Fusion (PBF);
- 6) Листова ламінація/ Sheet Lamination (SL);
- 7) Фотополімеризація у ванні/ Vat Photopolymerization (VP).

Провівши аналіз досліджень у напрямку впровадження виготовлених деталей за допомогою АВ у галузі машинобудування, розглянемо перспективи застосування кожного з видів.

Перший вид технології адитивного виробництва це Binder Jetting (BJ). Метод схожий на роботу звичайного офісного принтера, але замість нанесення чорнила на папір, тривимірний принтер за технологією BJ наносить клей, так звану в'язучу речовину в порошок, таким чином формуючи модель. Висота шару при друці за даною технологією 50-200 мкм.

Принцип роботи принтеру за технологією BJ (рис. 1) можна розділити на такі стадії:

1. Переміщення головки друку над платформою.
2. Розподілення крапель в'язучої речовини по шару матеріалу.
3. Переміщення платформи вниз на задану висоту шару.
4. Нанесення нового шару порошку над попереднім.

Стадії 1-4 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

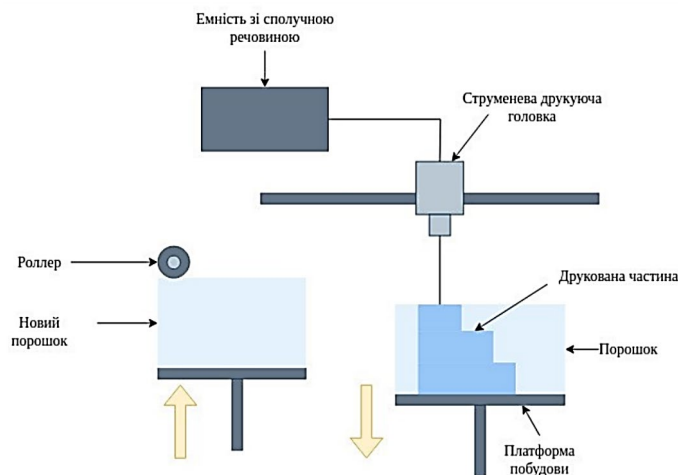


Рис. 1. Принцип роботи принтеру за технологією BJ

Джерело: розроблено авторами.

Серед інших технологій АВ, BJ відрізняється високою роздільною здатністю та можливістю друку однієї деталі різними матеріалами [12]. Як витратну сировину використовують: алюміній, бронзу, кераміку, гіпс, пісок, інконель та нержавіючу сталь [13]. Технологія дозволяє створювати об'єкти швидше ніж більшість інших процесів АВ, в залежності від типу принтера 1100-3120 см³/год, у повній кольоровій гаммі за рахунок додавання барвнику до в'язучої речовини [14].

Найчастіше для покращення механічних властивостей деталі до в'язучої речовини додають ущільнювачі, такі як цианокрілатний клей при використанні кераміки або бронзи. Друк на керамічній основі ідеально підходить для створення архітектурних моделей, форм для лиття у піщану форму, сувенірів або прикрас. Металеві деталі можуть бути використані як функціональні компоненти, вони мають нижчу вартість ніж ті що виготовлені за технологією SLM або DMSL але і їх механічні властивості гірше [2].

Широко досліджено виготовлення за допомогою ВІ провідних доріжок плат керування [15; 16], досліджували виробництво, за допомогою ВІ, світловипромінюючих речовин [17; 18] та електрично активних пристроїв [19; 20; 21].

Вартість принтерів за технологією ВІ сягає від 5 тис. до 1,8 млн дол. США.

Другий вид технологій адитивного виробництва це Directed Energy Deposition (DED). Технологія має багато спільних рис з технологією де використовується екструзія пластикових матеріалів (FDM), але замість полімеру використовується метал [22].

Принцип роботи принтеру за технологією DED можна розділити на такі стадії:

1. Вихідний металевий матеріал у вигляді порошку або дроту безперервно подається через сопло де відбувається розплавлення матеріалу лазером, електронним променем або дугою. У місці осадження він охолоджується та твердіє.

2. Триосьова машина друкує форму поперечного перерізу відбитка вздовж осей X та Y, накладаючи перерізи один на одного вздовж осі Z для створення об'ємної деталі.

П'ятиосьові DED принтери не обмежені пошаровим нарощуванням деталі, оскільки вони можуть наносити матеріал під будь-яким кутом. Такі принтери можуть використовуватись навіть більше ніж просто машини для створення виробів з нуля, вони також застосовуються для ремонту інших наявних металевих виробів, оскільки мають можливість наносити матеріал безпосередньо на них, за рахунок чого відбувається відновлення вихідної геометрії, зробити нарощування, якого раніше не було [4]. Технологію Directed Energy Deposition інколи називають Directed Metal Deposition, причиною являється те, що фактично це те ж саме, адже DMD (Directed Metal Deposition) це технологія осадження металів.

З технологію прямого підведення енергії та матеріалу можна виділити два основні типи технологій:

- Laser Engineered Net Shape (LENS Building) – плавлення шляхом створення форми лазером;
- Electron Beam Additive Manufacture (EBAM) – електронно-променеве адитивне виробництво.

В LENS Building використовується головка осадження, яка складається з лазерної головки, сопел для дозування порошку і трубок з інертним газом.

Принцип роботи принтеру за технологією LENS (рис. 2) можна поділити на такі стадії:

- 1) лазер проходить через центр головки створюючи басейн розплаву;
- 2) у місці побудови виробу з боків відбувається розпилення порошку, де він розплавляється після чого твердне;
- 3) інертний газ утворює покриття, яке не містить кисню і вологи, що запобігає окисленню поверхні та сприяє покращеній адгезії шарів.

Стадії 1-3 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

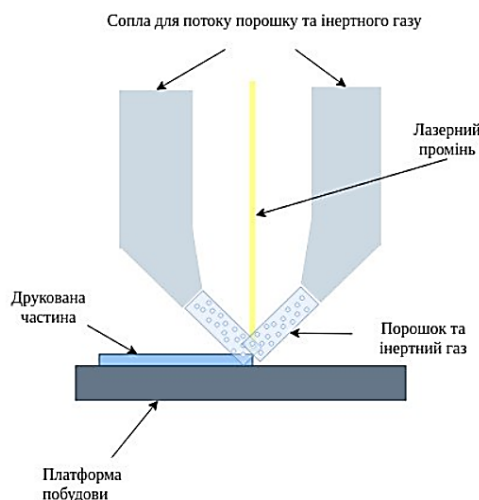


Рис. 2. Принцип роботи принтеру за технологією LENS Building

Джерело: розроблено авторами.

У принтері працюючому за технологією EBAM (рис. 3) металевий зварювальний дріт подається через сопло й розплавляється електронним променем у місці контакту із зоною збірки.

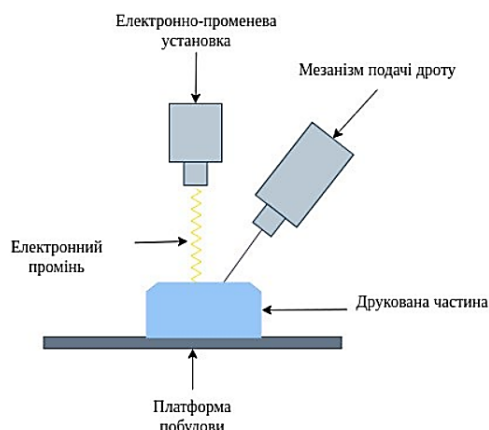


Рис. 3. Принцип роботи принтера за технологією EBAM

Джерело: розроблено авторами.

Технологія LENS може друкувати як на поверхні металів, так і на кераміці, кераміка є більш поширеним матеріалом. Матеріали, які можна використовувати для технологій LENS та EBAM, містять практично будь-які метали та сплави, що зварюються, такі як алюміній, сталь, титан, інконель, тантал, вольфрам, нікель та ніобій.

Недоліки DED технології.

- Supporting structures – конструкції, що використовуються для підтримання нависаючих частин (кут понад 75°). Використання конструкцій можливе, але складне, оскільки великий басейн рідкого розплаву в точні осадження не дозволяє робити випирання і ця ж властивість означає, що складні геометричні форми також неможливі;

- низька роздільна здатність у порівнянні з іншими 3D-принтерами, які використовують технології друку металами, висота шару становить 250-5000 мкм;

- розмір частинок порошку становить від 50 до 150 мікрон, а дріт для зварювання варіюється від 1 до 3 міліметрів у діаметрі.

- гострі кути можуть бути отримані лише у процесі постобробки, зазвичай на фрезерному станку ЧПУ;

- мають погану якість поверхні, що потребує вторинної обробки.

Велика кількість енергії, яка необхідна для підтримання температури розплаву в точці осадження, викликає великі теплові градієнти, що можуть викликати велику залишкову напругу, але DED виробляє повністю щільні деталі з механічними властивостями, які не поступаються кованим металевим виробам.

Одним із найважливіших секторів, у якому процес DED активно використовується для виробництва, є аерокосмічний сектор. Основною причиною, яка спонукає до використання процесу DED у цьому секторі, є можливість виробляти компоненти великих розмірів, на які у процесі традиційного виробництва витрачається дуже велика кількість енергії та сировини, при цьому швидкість нарощування матеріалу сягає 3-11 кг/год або $430-1570 \text{ см}^3/\text{год}$ [23; 24]. У 2003 році Північно-Західний політехнічний університет виготовив центральний лонжерон крила для пасажирського літака Comac C313, центральний лонжерон крила має довжину 5 м [25].

Вартість принтерів за технологією DED сягає від 200 тис. до 5 млн дол. США.

Третій вид технологій адитивного виробництва – це Material Extrusion (ME). Технологія є однією з найпоширеніших систем 3DP, яка широко розглядалася більшістю дослідників у всьому світі. Статистичні дані наведені в Parandoush і Lin [26] підкреслили, що комерційні системи FDM (Fused Deposition Modeling) займали 41,5 % частки ринку, із

загальною кількістю проданих 15 000 машин до кінця 2010 року. Однак сьогодні майже неможливо порахувати продажі систем FDM, оскільки після краху патенту на технологію, який раніше належав Stratasys Inc., різні фірми почали виробництво економічно ефективних принтерів. FDM дотримується принципу екструзії, як обговорювалося в безлічі публікацій [27-31]. Крім того, залежно від обладнання принтери мають продуктивність 720-4680 см³/год [32] і процесу параметри [33; 34; 35] виділені іншими.

МЕ має високу спорідненість з DED технологією, МЕ обмежена використанням лише синтетичних та штучних полімерів [36].

Принцип роботи принтеру за технологією типу FDM (Fused Deposition Modeling) або моделювання пошаровим наплавленням (рис. 4) можна розділити на такі стадії:

1. Розплав філаменту та його проштовхування через розігріте сопло.
2. Переміщення головки друку відповідно до траєкторії.
3. Охолодження він твердіння укладеного матеріалу.
4. Утворення готового шару деталі.

Стадії 1-4 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

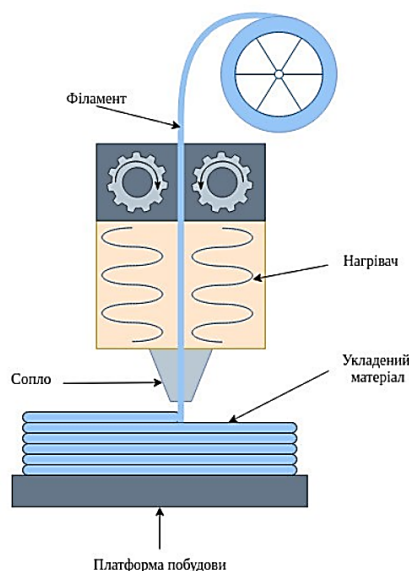


Рис. 4. Принцип роботи принтеру за технологією FDM

Джерело: розроблено авторами.

Матеріалів, які використовуються для FDM друку, велика кількість. Це і класичні ABS (Акрилонітрилбутадієнстирол), PLA (Полілактид), PET-G (Поліетилентерефлатат-гліколь), PP (Поліпропілен), PC (Полікарбонат), та композитні (армовані) матеріали. Композити можуть бути армовані вуглецевими волокнами, скловолокнами або базальтовими волокнами. Це збільшує їхню міцність на розрив, стиск, згин, сколювання та надає матеріалам нові фізико-механічні властивості. Також існують композити з включенням металевого порошку, не так багато виробників, які випускають такого роду матеріали [37].

Крім технології типу FDM, до виду технології адитивного виробництва Material Extrusion належить і технологія друку типу FGF (Fused Granulate Fabrication), або побудова розплавленням гранул, адитивне виробництво зі шнековою екструзією для швидкого виробництва великогабаритних виробів з використанням гранульованих термопластиків (рис. 5).

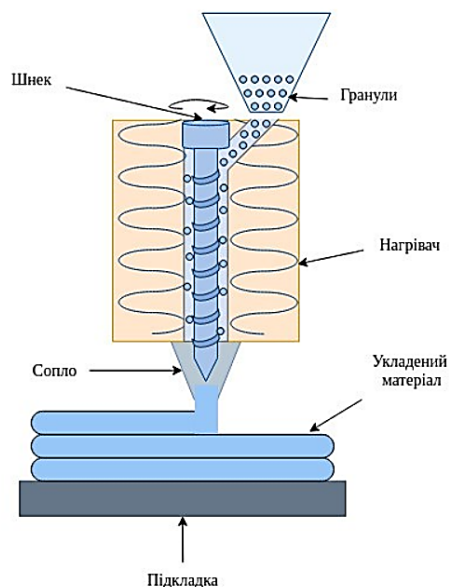


Рис. 5. Принцип роботи принтера за технологією FGF

Джерело: розроблено авторами.

Ця технологія як сировина використовує найперший початковий матеріал пластичного виробництва – гранули, значно зменшуючи витрати часу на виробництво. Робота з гранулами достатньо складна і поки ще не забезпечує тієї якості та контролю за процесом, які забезпечують принтери технології FDM. Найбільш значимою перевагою технології FGF є велика швидкість виробництва компонентів до $4380 \text{ см}^3/\text{год}$. У порівнянні з технологією FDM – до $1600 \text{ см}^3/\text{год}$.

Вартість принтерів за технологією ME сягає від 0,2 тис. до 400 тис. дол. США.

Четвертий вид технологій адитивного виробництва – це Material Jetting (MJ). Подібно струменевому друку на в'язучому при струменевому друку – на поверхню наноситься шар матеріалу і створюється об'єкт.

Однак замість того, щоб наносити клей на шар порошку, MJ використовує воскоподібні матеріали, розплавляє їх і точково каплями наносить на поверхню друку і по мірі нарощування шарів об'єкт набуває своєї заданої форми [7]. MJ принтер друкує модель шар за шаром, наносячи фотополімери із сотень дрібних сопел головки друку, кількість сопел варується від 96 до 448. Продуктивність технології в залежності від принтеру $900\text{-}2530 \text{ см}^3/\text{год}$ [38]. MJ принтери наносять на платформу весь шар одразу, його висота становить 16-32 мкм. Коли краплі матеріалу опиняються на платформі, вони обробляються ультрафіолетовим світлом і шар твердне (рис. 6). Усі опори моделі можна друкувати одночасно із самою моделлю, використовуючи при цьому розчинний матеріал. Коли виріб готовий, опори легко можна видалити за допомогою води під тиском або зануривши виріб в ультразвукову ванну [39].

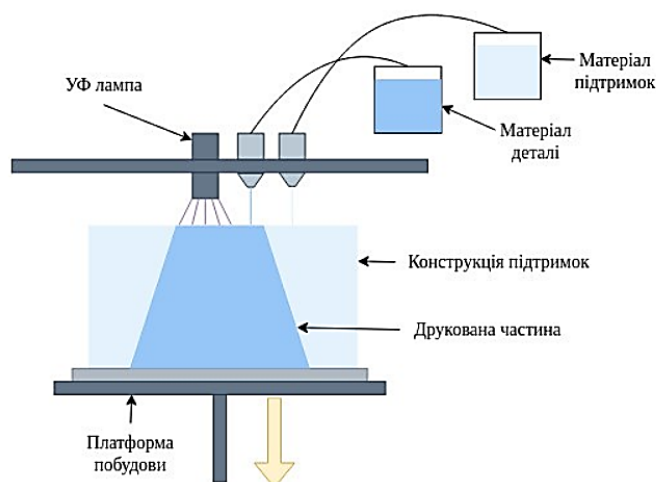


Рис. 6. Принцип роботи принтера за технологією MJ

Джерело: розроблено авторами.

У цій технології використовуються різні за властивостями матеріали: жорсткі, тверді, прозорі, різнокольорові фотополімери.

Ще один тип технології, який відноситься до струменевого друку є NPG (Nano Particle Jetting) або струменевий друк наночастинками. У струменевому друці наночастинками використовується рідина, яка містить у собі наночастинки металів, які оператор завантажує в принтер у вигляді картриджу. Сопла принтера розподіляють рідину по платформі струменем або невеликими краплями, у той час коли висока температура всередині корпусу призводить до випаровування рідини, після чого на платформі залишається лише шар з металу (рис. 7).

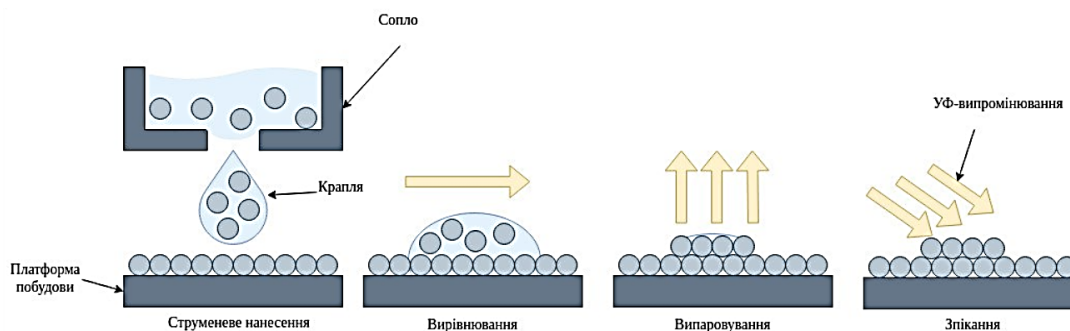


Рис. 7. Принцип роботи принтера за технологією NPG

Джерело: розроблено авторами.

Як матеріал використовується нержавіюча сталь і кераміка [40].

Третій тип технології, який належить до струменевого друку, – це DOD (Drop-On-Demand) або наплавлення з вирівнюванням шару летючим різцем.

У DOD принтерів є дві друкуючі головки. Перша розподіляє воскоподібний матеріал на платформі, а друга створює опори з розчинного матеріалу. Подібно до FDM та SLA принтерам, DOD слідують попередньо заданій траєкторії і розподіляють матеріал точно [41]. У принтерах DOD використовується різець для вирівнювання кожного шару, для покращення якості друківаних деталей необхідно створювати рівну поверхню перед друком наступного шару (рис. 8).

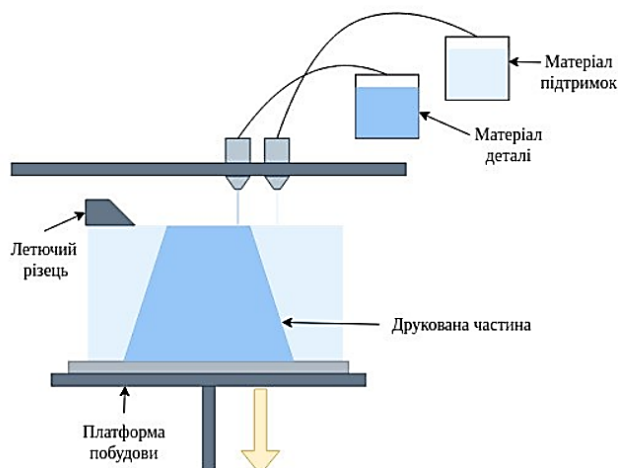


Рис. 8. Принцип роботи принтеру за технологією DOD

Джерело: розроблено авторами.

Вартість принтерів за технологією MJ сягає від 20 тис. до 600 тис. дол. США.

П'ятий вид технологій адитивного виробництва – це Powder Bed Fusion (PBF) або синтез на підкладці. Друк відбувається за допомогою термічної обробки порошкоподібного матеріалу [42].

Під тепловим впливом порошок шар за шаром твердне, спікається тим самим утворюється модель. Методи PBF відрізняються між собою різноманітними джерелами енергії та типами порошків, які використовуються. Більшість PBF принтерів обладнані механізмом для розгладжування тонкого шару порошку, товщиною 30-120 мкм. Швидкість друку невелика в порівнянні з іншими технологіями і становить 30-400 см³/год [43].

Після друку деталей, яка затвердла дістається, а порошок, який залишився, можна використовувати вторинно.

Технологія типу SLS (Selective Laser Sintering) або селективного (вибіркового) лазерного спікання дозволяє створювати міцні пластикові деталі за допомогою спікання тонких шарів порошку лазером шар за шаром [44]. Як витратний матеріал використовують полімери та кераміку.

Принцип роботи принтеру за технологією SLS (рис. 9) можна розділити на такі стадії:

1. Нанесення на платформу першого шару матеріалу.
2. Спікання порошку лазером згідно до геометрії моделі.
3. Опускання платформи на товщину шару.
4. Нанесення нового шар матеріалу.

Стадії 1-4 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів. Після чого готову деталь дістають із робочої області, очищають і за потреби піддають вторинній обробці.

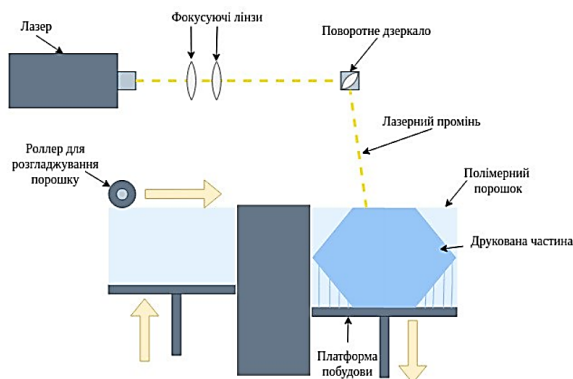


Рис. 9. Принцип роботи принтера за технологією SLS

Джерело: розроблено авторами

Технологія типу MJF (Multi Jet Fusion) або мультиструменева плавка – це, по суті, комбінація технологій SLS та MJ [45].

Принцип роботи принтера за технологією MJF (рис. 10) можна поділити на такі стадії:

1. Головка друку із соплами аналогічними соплам 2D-принтера розповсюджує речовину на тонкий шар порошкоподібного пластику, який засипаний у спеціальну ємність.

2) По межах шару моделі сопла друкують речовиною, яка запобігає процес спікання, оскільки створюється контур шару.

3) Потужне джерело інфрачервоного випромінювання проходить над ємністю з порошком і спікає зони вкриті речовиною.

4) Опускання платформи на товщину шару.

5) Нанесення нового шару матеріалу.

Стадії 1-5 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

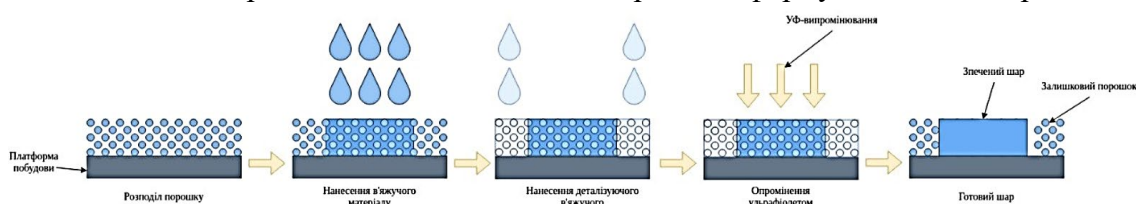


Рис. 10. Принцип роботи принтера за технологією MJF

Джерело: розроблено авторами.

Технологія типу SLM/DMLS (Selective Laser Melting/Direct Metal Laser Sintering) або селективної (вибіркової) лазерної плавки, або прямого лазерного спікання металів працює за таким самим принципом, що і SLS принтери тільки з металевого порошку (рис. 11). SLM передбачає собою повну плавку порошку [46], у той час як DMLS розігріває порошок майже до температури плавлення і часточки порошку сплавляються через хімічну реакцію [47].

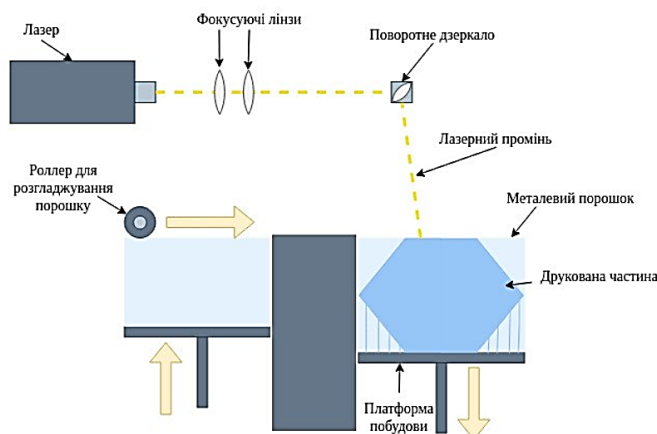


Рис. 11. Принцип роботи принтера за технологією SLM/DMLS

Джерело: розроблено авторами.

При DMLS друку використовуються нікелієві сплави, титан та ін. SLM принтери можуть працювати і з чистими металами, наприклад алюмінієм. SLM і DMLS моделі друкуються з опорами, щоб вилучити деформації роздрукованої деталі від залишкового механічного напруження.

Технологія типу EBM (Electron Beam Melting) або електронно-променева плавка. Принтери EBM використовуються для друку металевих об'єктів. Принцип роботи технології (рис. 12) можна поділити на такі стадії:

1. У робочу камеру засипається металевий порошок.

2. Принтер плавить порошок потужним електронним випромінювачем шар за шаром згідно поперечним перерізам цифрової моделі.

Стадії 1-2 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

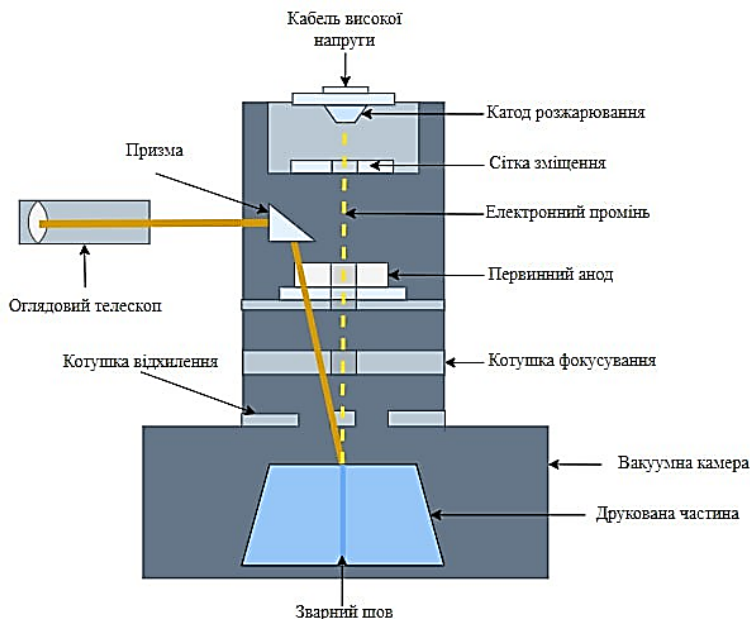


Рис. 12. Принцип роботи принтера за технологією EBM

Джерело: розроблено авторами.

Увесь процес відбувається у вакуумному середовищі. Електронно-променевий друк не вимагає побудови опорних конструкцій для моделі зважаючи на відсутність залишкового механічного напруження, який виникає в результаті градієнту температур між охолодженими та гарячими шарами [48]. Крім того, EBM використовує менше енергії і може виробляти шари швидше, ніж SLM/DMLS, але якість цих моделей гірша.

Вартість принтерів за технологією PBF сягає від 20 тис. до 2 млн. дол. США.

Шостий вид технологій адитивного виробництва – це Sheet Lamination (SL), або листовна ламінація. Ламінування листів відоме також як ультразвукове адитивне виробництво або виробництво ламінованих об'єктів.

Це процес адитивного виробництва при якому тонкі листи матеріалу, 70-200 мкм, укладаються стопкою і з'єднуються разом за допомогою ультразвукового зварювання, склеювання або пайки [9]. У міру укладання шарів об'єкт набуває форму. Коли всі шари укладені й ламіновані станок з ЧПУ або лазерний різак видаляє надлишковий матеріал, створюючи кінцеву форму об'єкта.

Технологія друку LOM (Laminated Object Manufacturing), друк об'єктів шляхом ламінування є досить тривалим, швидкість формування виробу становить 30-320 см³/год [49].

Принцип роботи принтера за технологією LOM (рис. 13) можна поділити на такі стадії:

1. На платформу або готові об'єкти розігрітим ролером наклеюється лист матеріалу.
2. Лазер вирізає об'єкт по контуру згідно з геометрією моделі.
3. Залишки матеріалу видаляються.
4. Платформа опускається і наступний лист клейкого матеріалу подається до робочої камери.

5. Платформа піднімається вгору і новий шар прилипає до попереднього.

Стадії 1-5 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

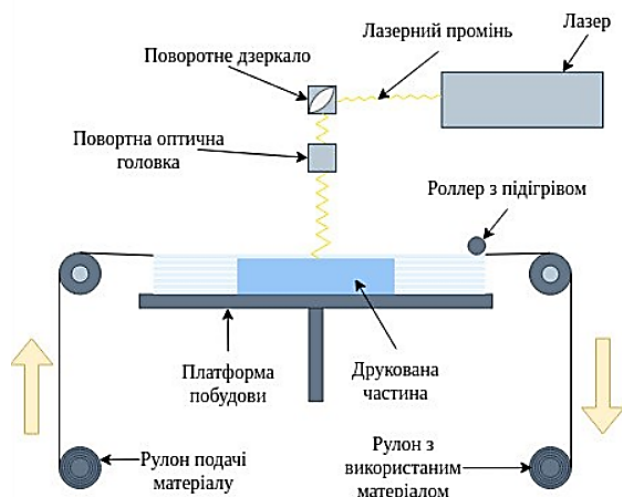


Рис. 13. Принцип роботи принтеру за технологією LOM

Джерело: розроблено авторами.

Вартість принтерів за технологією SL сягає від 9 тис. до 37 тис. дол. США.

Сьомий вид технологій адитивного виробництва це Vat Photopolymerization (VP) або фотополімеризація у ванні. У цьому типі технології фотополімерна смола твердне під впливом джерела світла з різною довжиною хвилі і весь цей процес носить назву фотополімеризація. Швидкість побудови за цією технологією становить 192-600 см³/год.

Технологія SLA (Stereolithography) або стереолітографія належить до виду адитивного виробництва VP [10].

Принцип роботи принтера за технологією SLA (рис. 14) можна поділити на такі стадії:

1. Платформа, на якій тримається майбутня модель, занурюється у резервуар з рідкою фотополімерною смолою.
2. Один або декілька точкових лазерів, які розташовані всередині принтера, починають засвічувати знизу ті зони, які згідно з тривимірною цифровою моделлю повинні тверднути для створення шару деталі.
3. Формування першого шару об'єкта.
4. Підняття платформи на відстань рівну товщині шару.

Стадії 1-4 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів. Після чого роздрукована деталь промивається і здебільшого піддається додатковому ультрафіолетовому опроміненню поза межами принтера для завершення процесу фотополімеризації і збільшення міцності об'єкта.

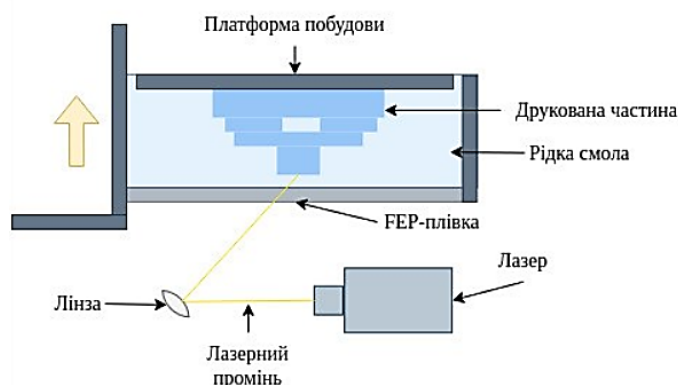


Рис. 14. Принцип роботи принтера за технологією SLA

Джерело: розроблено авторами.

Деталі роздруковані SLA у своїй більшості вимагають наявності опор для нависаючих елементів моделі, які додаються до цифрової моделі перед друком, після чого видаляються вручну по завершенню постобробки виробу ультрафіолетовим випроміненням [50].

Альтернативною і більш дешевою технологією є технологія DLP (Direct Light Processing) або цифрова світлодіодна проекція [11]. Технологія друку DLP дуже схожа на SLA, різниця у тому, що замість дорогих точкових лазерів у DLP принтерах використовують цифрову світлодіодну проекцію для опромінення всього шару [51].

Принцип роботи принтера за технологією DLP (рис. 15) можна поділити на такі стадії:

1. Платформа, на якій тримається майбутня модель, занурюється у резервуар з рідкою фотополімерною смолою.
2. Цифровий проектор передає проекцію зображення цілого шару на рідку фотополімерну смолу до її повного затвердіння.
3. Формування першого шару об'єкта.
4. Підняття платформи на відстань рівну товщині шару.

Стадії 1-4 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

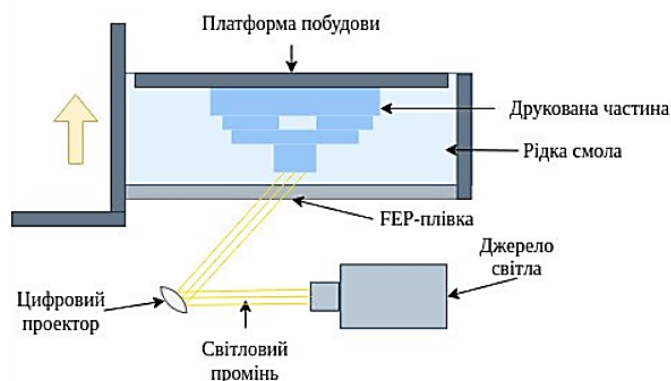


Рис. 15. Принцип роботи принтера за технологією DLP

Джерело: розроблено авторами.

Технологія типу CDLP (Continuous Direct Light Processing) або безперервна цифрова світлодіодна проекція. Технологія така сама, як і у DLP, єдина відмінність це те, що друк передбачає постійний рух платформи вгору вздовж осі Z, що збільшує швидкість виробництва моделей до 1500 см³/год [52].

На основі проведеного літературного аналізу існуючих способів адитивного виробництва нами систематизовано та представлено у вигляді табл. 1 та табл. 2 ключові відомості про технології та їхні особливості.

Таблиця 1 – Технологічні особливості методів адитивного виробництва

Вид технології	Метод виробництва	Переваги	Недоліки	Сфери застосування
1	2	3	4	5
Binder Jetting	BJ	<ul style="list-style-type: none"> • довговічність деталей друку; • друк декількома матеріалами одночасно. 	<ul style="list-style-type: none"> • крихкість друкованих деталей; • необхідність вторинної обробки. 	<ul style="list-style-type: none"> • прототипування [53]; • розробка електронних компонентів [15; 16; 19-21]; • ливарна справа [54].
Directed Energy Deposition	LENS	<ul style="list-style-type: none"> • швидкість друку; • вартість матеріалів; • дуже велика область друку. 	<ul style="list-style-type: none"> • дуже великі витрати енергії; • низька роздільна здатність. 	<ul style="list-style-type: none"> • виробництво деталей високої відповідальності [55]; • ремонт та додавання деталей [56].
	EBAM			

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5
Material Extrusion	FDM	<ul style="list-style-type: none"> • низька вартість обладнання та матеріалів для друку; • відкритий вихідний код; 	<ul style="list-style-type: none"> • обмежена точність друку; • анізотропія. 	<ul style="list-style-type: none"> • виготовлення функціональних прототипів [57];
	FGF	<ul style="list-style-type: none"> • можливість придбати такий принтер у розібраному вигляді за низькою ціною або зібрати самостійно • друк декількома матеріалами одночасно. 	<ul style="list-style-type: none"> • обмежена точність друку; • анізотропія; • низька швидкість друку. 	<ul style="list-style-type: none"> • виробництво деталей високої відповідальності [58].
Material Jetting	MJ	<ul style="list-style-type: none"> • висока точність друку; • друк декількома матеріалами одночасно; • висока деталізація. 	<ul style="list-style-type: none"> • висока вартість принтерів та матеріалів для друку; • крихкість друкованих деталей. 	<ul style="list-style-type: none"> • виготовлення функціональних прототипів [59, 60]; • розробка електронних компонентів [61]; • ювелірне виробництво [62]; • промисловий і архітектурний дизайн [63].
	NPJ			
	DOD	<ul style="list-style-type: none"> • висока вартість принтерів та матеріалів для друку; • обмежений вибір матеріалів для друку; • крихкість друкованих деталей. 	<ul style="list-style-type: none"> • високоточне прототипування [60]; • створення форм для подальшого лиття [64]; • ювелірне виробництво [62]. 	
Powder Bed Fusion	SLS	<ul style="list-style-type: none"> • друк об'єктів зі складною геометрією; • відсутність підтримок; • дуже висока міцність друкованих деталей; • високі механічні властивості з'єднанні з самим матеріалом. 	<ul style="list-style-type: none"> • висока вартість принтерів; • неможливість друку деяких пористих деталей. 	<ul style="list-style-type: none"> • виготовлення функціональних прототипів [65]; • ливарна справа [66]; • виробництво деталей високої відповідальності [65].
	MJF	<ul style="list-style-type: none"> • друк об'єктів зі складною геометрією; • відсутність підтримок; • дуже висока міцність друкованих деталей; • високі механічні властивості з'єднанні з самим матеріалом. 	<ul style="list-style-type: none"> • шорстка поверхня; • пористість деталей без постобробки; • усадка або деформація деталей під час обробки. 	<ul style="list-style-type: none"> • виготовлення функціональних прототипів [67]; • виробництво деталей високої відповідальності [67].
	SLM	<ul style="list-style-type: none"> • друк об'єктів зі складною геометрією; • друк пористих об'єктів; • дуже висока міцність друкованих деталей; • високі механічні властивості з'єднанні з самим матеріалом; • різноманітність доступних матеріалів; • висока роздільна здатність друкованих деталей; • безвідходне виробництво; • швидкість вища ніж у ливарного процесу; • відсутність зварних швів. 	<ul style="list-style-type: none"> • дуже висока вартість принтерів; • великі витрати енергії. 	<ul style="list-style-type: none"> • виготовлення функціональних прототипів [68]; • виробництво деталей високої відповідальності [68]; • друк імплантів [69]; • аерокосмічна промисловість [70].
	DMLS			
	EBM	<ul style="list-style-type: none"> • висока щільність та механічна міцність об'єктів; • друк об'єктів зі складною геометрією; • відсутність підтримок; • безвідходне виробництво; • друк у вакуумній камері. 	<ul style="list-style-type: none"> • шорстка поверхня; • дуже висока вартість принтерів; • великі витрати енергії; • низька роздільна здатність. 	

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5
Sheet Lamination	LOM	<ul style="list-style-type: none"> • дешевий матеріал для друку; • різноманітність варіантів постобробки; • виробництво крупних моделей; 	<ul style="list-style-type: none"> • дуже повільна швидкість друку; • невисока міцність моделей; • низька роздільна здатність друку. 	<ul style="list-style-type: none"> • прототипування та створення макетів [71].
Vat Photopolymerization	SLA	<ul style="list-style-type: none"> • висока точність друку; • друк дуже тонких шарів. 	<ul style="list-style-type: none"> • крихкість друкованих деталей; • висока вартість принтерів та матеріалів. 	<ul style="list-style-type: none"> • стоматологія [72]; • медицина [73]; • ювелірна справа [74];
	DLP	<ul style="list-style-type: none"> • висока точність друку; • висока швидкість друку (вище ніж SLA принтер); • наявність домашніх та промислових моделей. 	<ul style="list-style-type: none"> • крихкість друкованих деталей; • висока вартість матеріалів. 	<ul style="list-style-type: none"> • ливарна справа [75].
	CDLP	<ul style="list-style-type: none"> • висока точність друку; • висока швидкість друку (вище ніж SLA та DLP принтер); • наявність домашніх та промислових моделей. 		

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Техніко-економічні показники технологій адитивного виробництва

Вид технології	Продуктивність, см ³ /год	Різнманітність матеріалу	Якість, мкм	Вартість обладнання, \$
Binder Jetting	1100 – 3120	Алюміній, бронза, кераміка, гіпс, пісок, інконель, нержавіюча сталь	50-200	від 5 тис. до 1,8 млн
Directed Energy Deposition	430 – 1570	Сплави які зварюються, кераміка	250-5000	від 200 тис. до 5 млн
Material Extrusion	720 – 4680	Полімери, композити, метали, біоматеріали	50-5000	від 0,2 тис. до 400 тис.
Material Jetting	900 – 2530	Фотополімери, нержавіюча сталь, кераміка, віск	16-32	від 20 тис. до 600 тис.
Powder Bed Fusion	30 – 400	Алюміній, кераміка, кобальт, інконель, золото, полімери, титан, сплави які зварюються	30-120	від 20 тис. до 2 млн.
Sheet Lamination	20 – 320	Папір, кевлар, бронза, металева фольга, листовий пластик	70-200	від 9 тис. до 37 тис.
Vat Photopolymerization	192 – 1500	Фотополімери, композити	25-100	від 3 тис. до 800 тис.

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Аналіз досліджень показав, що сфера застосування технологій АВ всеохоплююча, універсальність застосування кожної з технологій дозволяє охопити майже весь спектр задач, які вимагає суспільство (створення дешевих малосерійних виробів), наука (створення протопитів, корисних моделей, макетів), медицина (застосування в ортодонції, протезуванні, ортезуванні, імплантуванні та заміщенні органів), аерокосмічна промисловість (виробництво нескладних авіаційних компонентів) тощо, кожна з технологій має безліч напрямків застосування. В даний час відбувається перехід від традиційних технологій виробництва до технологій АВ. Причиною заміщення є можливість точного контролю над процесом, більша вірогідність отримання деталей з попередньо заданими фізико-механічними характеристиками, значне зменшення часу і витрат на виробництво, створення деталей з високою роздільною спроможністю, створення індивіду-

альних виробів (запчастин) за короткий час без необхідності зміни параметрів устаткування, створення виробів зі складними геометричними формами та конструкціями, дуже велика кількість матеріалів, які використовуються у якості сировини.

Загалом, технології адитивного виробництва займають все більш важливе місце у галузі машинобудування, оскільки вони дозволяють швидко та ефективно створювати фізичні об'єкти з цифрових моделей. Проте, вибір найбільш оптимальної технології може бути складним, оскільки варується залежно від конкретного завдання.

На основі проведеного літературного аналізу можемо зробити висновки щодо незручності/недоцільності використання у ГМ таких технологій, як VJ і MJ через великі матеріальні витрати які не супроводжуються високою міцністю отриманих деталей, і неможливості використання технологій SL та VP через крихкість отриманих деталей шляхом виготовлення даними технологіями. Результат зумовлений тим, що технології, переважно, використовують у якості витратного матеріалу фотополімерні смоли, які не володіють достатніми міцнісними характеристиками для використання у ГМ.

У процесі дослідження виявлено, що найефективнішими технологіями АВ у ГМ застосовуються такі види, як DED, ME та PBF. Використання цих технологій забезпечує швидке отримання деталей з високим рівнем відповідальності та з попередньо заданими фізико-механічними характеристиками. Технології можуть використовувати достатньо великий спектр матеріалів, не обмежені виготовленням надскладних геометричних форм та володіють високим коефіцієнтом використання матеріалу.

На фоні двох інших технологій, які володіють можливістю друку металами, вирізняється технологія можливість якої обмежена використанням лише матеріалів з полімерною матрицею. Основними перевагами технології ME є швидкість, доступність і стрімкі розвідки устаткування та витратних матеріалів. Ця технологія поступається по міцності отриманих деталей таким технологіям, як DED та PBF але ME здатна виготовляти деталі з поліпшеними характеристиками, а інколи поєднання цих характеристик, наприклад, термостійкість з підвищеною механічною чи хімічною стійкістю, за рахунок створених полімерних композитів. Деталі, виготовлені за допомогою технології ME, забезпечують значно нижчу масу виробів, що у деяких вузлах механізмів грає значну роль. Такий огляд свідчить про постійний розвиток адитивних технологій, що своєю чергою впливає на розвиток економіки, науки, техніки. Розвиток технології це необхідність у нових матеріалах, спеціалістах та промисловій революції.

Перспективними дослідженнями у напрямку технологій АВ, а саме технології ME, є створення нових матеріалів (наприклад матеріалів наповнених металевим порошком), розширення можливостей програмного забезпечення для контролю точності друку, оптимізація параметрів швидкості друку, умови масштабування технології.

Загалом технології АВ, а саме технологія ME, має великий потенціал у різних галузях. Розвиток технології є важливим, у роботі [2] адитивне виробництво називають ключовим напрямом у четвертій промисловій революції, який потребує подальших досліджень та вдосконалень.

Список використаних джерел

1. Diegel O. A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing / O. Diegel, A. Nordin, D. Motte // Additive Manufacturing Technologies. – 2019. – P. 19-39. DOI: 10.1007/978-981-13-8281-9_2.
2. The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0 / U. M. Dilberoglu, B. Gharehpagh, U. Yaman, M. Dolen // Procedia Manufacturing. – 2017. – Vol. 11. – P. 545-554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>.
3. Shrestha S. Optimization of Binder Jetting Using Taguchi Method / S. Shrestha, G.P. Manogharan // Article JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society. – 2017. – Vol. 69, No3. DOI: 10.1007/s11837-016-2231-4.
4. Carroll B. E. Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing / B. E. Carroll, T. A. Palmer, A. M. Beese // Acta Materialia. – 2015. – Vol. 87, 1 April. – P. 309-320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.054>.

5. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications / D. Svetlizky, M. Das, B. Zheng, A. L. Vyatskikh, S. Bose, A. Bandyopadhyay, J. M. Schoenung, E. J. Lavernia, E. Noam // *Materials Today*. – 2021. – Vol. 49, October. – P. 271-295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>.
6. Current advances in additive manufacturing / M. Perez, D. Carou, E. M. Rubio, R. Teti // 13th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. – 2019. – 17-19 July.
7. Opportunities and challenges of quality engineering for additive manufacturing / B. M. Colosimo, Q. Huang, T. Dasgupta, F. Tsung // *Quality Engineering for Advanced Manufacturing*. – 2018. – Is. 3; Vol. 50. DOI: <https://doi.org/10.1080/00224065.2018.1487726>.
8. Singh S. 3D Printing of polymer composites: A short review / S. Singh, S. Ramakrishna, F. Berto // *MDPS*. – 2020. – Vol. 2, Is. 2, April. DOI: <https://doi.org/10.1002/mdp2.97>.
9. Mechanical property evaluation of glass-jute fiber reinforced polymer composites / Md. Rafiquz-zaman, Md. M. Islam, Md. H. Rahman, Md. S. Talukdar, Md. N. Hasan // *Polymers for advanced technologies*. – 2016. – Vol. 27, Is. 10, October. – P. 1308-1316. DOI: <https://doi.org/10.1002/pat.3798>.
10. A robotic cell for performing sheet lamination-based additive manufacturing / P. M. Bhatt, A. M. Kabir, M. Peralta, H. A. Bruck, S. K. Gupta // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 27, May. – P. 278-289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.002>.
11. Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications / X. Xu, A. Awad, P. Robles-Martinez, S. Gaisford, A. Goyanes, A. W. Basit // *Journal of Controlled Release*. – 2021. – Vol. 329, 10 January. – Pp. 743-757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.008>.
12. Calvert P. Inkjet printing for materials and devices / P. Calvert // *Chem Mater*. – 2001. – № 13(10), Oct 15. – Pp. 3299-3305.
13. Calvert P. Chemical solid free-form fabrication: making shapes without molds / P. Calvert, R. Crockett // *Chem Mater*. – 1997. – № 9 (3), Mar. 18. – Pp. 650-663.
14. Vat Photopolymerization 3D Printing of Nanocomposites: A Literature Review / A. Medellin, W. Du, G. Miao, J. Zou, Z. Pei, C. Ma // *J. Micro Nano-Manuf*. – 2019. – № 7(3), Sep. – 031006 (11 pages). DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4044288>.
15. Inkjet printing of narrow conductive tracks on untreated polymeric substrates / O. T. H. Van, J. Perelaer, A. W. Laet, U. S. Schubert // *Adv Mater*. – 2008. – № 20(2), Jan 18. – Pp. 343-345.
16. Siringhaus H. High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits / H. Siringhaus, T. Kawase, R. H. Friend // *Science*. – 2000. – № 290(5499), Dec 15. – Pp. 2123-2126.
17. Inkjet printing of light-emitting polymer displays / T. Shimoda, K. Morii, S. Seki, H. Kiguchi // *Mrs Bulletin*. – 2003. – P. 28(11), Nov. – Pp. 821-827.
18. Bharathan J. Polymer electroluminescent devices processed by inkjet printing: I. Polymer light-emitting logo / J. Bharathan, Y. Yang // *Appl Phys Lett*. – 1998. – № 72(21), May 25. – Pp. 2660-2662.
19. Kordás K. Inkjet printing of electrically conductive patterns of carbon nanotubes / K. Kordás, T. Mustonen, G. Tóth // *Small*. – 2006. – № 2 (8-9), Aug. – Pp. 1021-1025.
20. One-step inkjet printing of conductive silver tracks on polymer substrates / J. Perelaer, C. E. Hendriks, A. W. de Laet, U. S. Schubert // *Nanotechnology*. – 2009. – № 20(16), Mar 31. – 165303.
21. Liu Y. All-polymer capacitor fabricated with inkjet printing technique / Y. Liu, T. Cui, K. Varshramyan // *Solid State Electron*. – 2003. – № 47(9), Sep 1. – Pp. 1543-1548.
22. Ziaee M. Binder jetting: A review of process, materials, and methods / M. Ziaee, N. B. Crane // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 28, August. – Pp. 781-801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>.
23. Aerospace applications of laser additive manufacturing / R. Liu, Z. Wang, T. Sparks, F. Liou, J. Newkirk // *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*. – 2017. – Pp. 351-371. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00013-0>.
24. Najmon J. C. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry / J. C. Najmon, S. Raeisi, A. Tovar // *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*. – 2019. – Pp. 7-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9>.
25. Морі Д. Адитивне виробництво в якості фрезерування / Д. Морі. – 2014.
26. Parandoush P. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites / P. Parandoush, D. Lin // *Composite Structures*. – 2017. – Vol. 182, 15 December. – Pp. 36-53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.
27. Temperature FDM 3D Printing for the Manufacture of Patient-Specific Immediate Release Tablets A Lower / T. C. Okwuosa, D. Stefaniak, B. Arafat, A. Isreb, K.-W. Wan, M. A. Alhnan // *Pharmaceutical Research*. – 2016. – Vol. 33. – Pp. 2704-2712.

28. Hot-melt extruded filaments based on pharmaceutical grade polymers for 3D printing by fused deposition modeling / A. Melocchi, F. Parietti, A. Maroni, A. Foppoli, A. Gazzaniga, L. Zema // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2016. – Vol. 509, Is. 1–2, 25 July. – P. 255-263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.05.036>.

29. Ravi A. K. An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing / A. K. Ravi, A. Deshpande, K. H. Hsu // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2016. – Vol. 24, P. 1, October. – Pp. 179-185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.08.007>.

30. Comparison of Stainless Steel 316L Parts Made by FDM- and SLM-Based Additive Manufacturing Processes / H. Gong, D. Snelling, K. Kardel, A. Carrano // *JOM*. – 2019. – Vol. 71. – Pp. 880-885.

31. Jeffrey Plott. Voids and tensile properties in extrusion-based additive manufacturing of moisture-cured silicone elastomer / Jeffrey Plott, Xiaoqing Tian, Albert J. Shih // *Additive Manufacturing*. – August 2018. – Vol. 22. – Pp. 606-617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.010>.

32. Turner B. N. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling / B. N. Turner, R. Strong, S. A. Gold // *Rapid prototyping journal*. – 2014. – Vol. 20, Is. 3, 14 Apr. – P. 192-204. DOI: 10.1108/RPJ-01-2013-0012.

33. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B* / X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, D. Hui // *Engineering*. – 2017. – Vol. 110, 1 February. – Pp. 442-458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.

34. Kalsoom U. Recent developments in 3D printable composite materials / U. Kalsoom, P. N. Nesterenko, B. Paull // *RSC Adv*. – 2016. – № 6. – Pp. 60355-60371. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6RA11334F>.

35. Parandoush P. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites / P. Parandoush, D. Lin // *Composite Structures*. – 2017. – Vol. 182, 15 December. – Pp. 36-53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.

36. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications / D. Svetlizky, M. Das, B. Zheng, A. L. Vyatskikh, S. Bose, A. Bandyopadhyay, J. M. Schoenung, E. J. Lavernia, N. Eliaz // *Materials Today*. – 2021. – Vol. 49, October. – Pp. 271-295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>.

37. A survey of design methods for material extrusion polymer 3D printing / J. Huang, Q. Chen, H. Jiang, B. Zou, L. Li // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2020. – Vol. 15, Is. 2. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1708027>.

38. Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review / G. D. Goh, Y. L. Yap, H. K. J. Tan, S. L. Sing, G. L. Goh, W. Y. Yeong // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. – 2020. – Vol. 45, Is. 2. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408436.2018.1549977>.

39. Gülcan O. The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review / O. Gülcan, K. Günaydın, A. Tamer // *Additive Manufacturing II, Polymers*. – 2021. – Special Issue: Process–Structure–Properties in Polymer 13(16). – 2829. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162829>.

40. Material Jetting / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani // *Additive Manufacturing Technologies*. – 2020. – Pp. 203-235.

41. Kunchala P. 3D printing high density ceramics using binder jetting with nanoparticle densifiers / P. Kunchala, K. Kappagantula // *Materials & Design*. – 2018. – Vol. 155, 5 October. – Pp. 443-450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.06.009>.

42. Dong H. An experimental study of drop-on-demand drop formation / H. Dong, W. W. Carr // *Physics of Fluids*. – 2006. – № 18. – 072102. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2217929>.

43. Sun S. Powder bed fusion processes: An overview / S. Sun, M. Brandt, M. Easton // *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*. – 2017. – Pp. 55-77. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00002-6>.

44. Powder Bed Fusion / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani // *Additive Manufacturing Technologies*. – 2020. – Pp. 125-170.

45. 3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering / A. Awad, F. Fina, A. Goyanes, S. Gaisford, A. W. Basit // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2020. – Vol. 586, 30 August. – 119594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119594>.

46. Comparative study on 3D printing of polyamide 12 by selective laser sintering and multi jet fusion / C. Cai, W. S. Tey, J. Chen, W. Zhu, X. Liu, T. Liu, L. Zhao, K. Zhou // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2021. – Vol. 288, February. – 116882. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116882>.
47. Fatigue behaviour of selective laser melting steel components / L. M. S. Santos, J. A. M. Ferreira, J. S. Jesus, J. M. Costa, C. Capela // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2016. – Vol. 85, Part A, October. – P. 9-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.08.011>.
48. Nandy J. A. Review on Direct Metal Laser Sintering: Process Features and Microstructure Modeling / J. Nandy, H. Sarangi, S. Sahoo // *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. – 2019. – Vol. 6. – Pp. 280-316.
49. Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review / C. Körner // *International Materials Reviews*. – 2016. – Vol. 61, Is. 5. DOI: <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289>.
50. Mekonnen B. G. A Study on State of the Art Technology of Laminated Object Manufacturing (LOM) / B. G. Mekonnen, G. Bright, A. Walker // *CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future*. – Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME). – 2016. – Pp. 207-216.
51. Huang J. A. Review of Stereolithography: Processes and Systems / J. Huang, Q. Q. Wang // *Processes*. – 2020. – № 8(9). – 1138. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8091138>.
52. Stereolithography vs. Direct Light Processing for Rapid Manufacturing of Complete Denture Bases: An In Vitro Accuracy Analysis / A. Unkovskiy, F. Schmidt, F. Beuer, P. Li, S. Spintzyk, P. K. Fernandez // *Digital Workflows and Material Sciences in Dental Medicine, J. Clin. Med.* – 2021. – № 10(5). – 1070. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm10051070>.
53. Producing a Full-Scale Model From Computed Tomographic Data with the Rapid Prototyping Technique Using the Binder Jet Method / O. Ichiro, A. Keita, S. Shingo, H. Yasuhiko // *Journal of Craniofacial Surgery*. – 2000. – № 11(6), November. – Pp. 527-537.
54. Hodder K. J. Bridging additive manufacturing and sand casting: Utilizing foundry sand / K. J. Hodder, R. J. Chalaturnyk // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 28, August. – Pp. 649-660. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.06.008>.
55. A review of slicing methods for directed energy deposition based additive manufacturing / J. Xu, X. Gu, D. Ding, Z. Pan, K. Chen // *Rapid Prototyping Journal*. – 2018. – Vol. 24, No. 6. – Pp. 1012-1025. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2017-0196>.
56. Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair / A. Saboori, A. Avers, G. Marchese, S. Biamino, M. Lombardi, P. Fino // *Appl. Sci.* – 2019. – № 9 (16). – 3316. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9163316>.
57. Additive manufacturing of functional parts based on material extrusion technology / M. Šljivić, C. Fragassa, A. Pavlović, M. Krašnik, J. Ilić, M. Stanojević // *Contemporary Materials VII-2*. – 2016. – Vol. 7, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.7251/COMEN1602178S>.
58. Review on Machine Designs of Material Extrusion based Additive Manufacturing (AM) Systems - Status-Quo and Potential Analysis for Future AM Systems / A. Kampker, J. Triebs, S. Kawollek, P. Ayvaz, S. Hohenstein // *Procedia CIRP*. – 2019. – Vol. 81. – Pp. 815-819. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.205>.
59. Moore J. P. Fatigue properties of parts printed by PolyJet material jetting / J. P. Moore, C. B. Williams // *Rapid prototyping journal*. – 2015. – Vol. 21, Is. 6, 19 Oct. – P. 675-685. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2014-0031>.
60. Tyagi S. Review on mechanical characterization of 3D printed parts created using material jetting process / S. Tyagi, A. Yadav, S. Deshmukh // *Materials Today*. – 2022. – Vol. 51, Part 1. – Pp. 1012-1016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.073>.
61. High speed 3D material-jetting additive manufacturing of viscous graphene-based ink with high electrical conductivity / E. Jabari, F. Liravi, E. Davoodi, L. Lin, E. Toyserkani // *Additive Manufacturing*. – 2020. – Vol. 35, October. – 101330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101330>.
62. Assessment of the Dimensional and Geometric Precision of Micro-Details Produced by Material Jetting / M. R. Silva, A. M. Pereira, A. M. Sampaio, A. J. Pontes // *Materials*. – 2021. – № 14(8). – 1989. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081989>.
63. Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks / Y. L. Ya, C. Wang, S. L. Sing, V. Dikshit, W. Y. Yeong, J. Wei // *Precision Engineering*. – 2017. – Vol. 50, October. – Pp. 275-285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.05.015>.

64. Additive manufacturing of zirconia ceramics by material jetting / E. Willems, M. Turon-Vinas, B. Camargo dos Santos, B. V. Hooreweder, F. Zhang, B. Van Meerbeek, J. Vleugels // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2021. – Vol. 41, Is. 10, August. – Pp. 5292-5306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.04.018>.

65. Rapid prototyping manufacturing of silica sand patterns based on selective laser sintering / J. L. Song, Y. T. Li, Q. L. Deng, D. J. Hu // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – Vol. 187-188, 12 June. – Pp. 614-618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.108>.

66. Rapid casting technology based on selective laser sintering / Li Yang, Shi-yan Tang, Zi-tian Fan, Wen-ming Jiang, Xin-wang Liu // *China Foundry*. – 2021. – Vol. 18. – Pp. 296-306.

67. Multi Jet Fusion PA12 Manufacturing Parameters for Watertightness, Strength and Tolerances / S. Morales-Planas, J. Minguella-Canela, J. Lluma-Fuentes, J. A. Travieso-Rodriguez, A.-A. García-Granada // *Materials*. – 2018. – № 11(8). – 1472. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11081472>.

68. Padmakumar M. Additive Manufacturing of Tungsten Carbide Hardmetal Parts by Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) and Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Techniques / M. Padmakumar // *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. – 2020. – Vol. 7. – Pp. 338-371.

69. Demir A. G. Selective laser melting of pure Zn with high density for biodegradable implant manufacturing / A. G. Demir, L. Monguzzi, B. Previtali // *Additive Manufacturing*. – 2017. – Vol. 15, May. – P. 20-28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.03.004>.

70. Experimental and numerical investigation on compressive fatigue strength of lattice structures of AlSi7Mg manufactured by SLM / L. Boniotti, S. Beretta, L. Patriarca, L. Rigoni, S. Foletti // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 128, November. – 105181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.041>.

71. Nakagawa T. Laser Cut Sheet Laminated Forming Dies by Diffusion Bonding / T. Nakagawa, M. Kunieda, S.-D. Liu // *Proceedings of the Twenty-Fifth International Machine Tool Design and Research Conference*. – 1985. – P. 505-510.

72. Raines R. Experimental Characterization of the Mechanical Properties of Medical-Grade Dental Implants, Fabricated Using Vat-Photopolymerization Additive Manufacturing Process / R. Raines, J. B. Day, R. Salary // *MSEC*. – 2022. – V. № 001, T. 07, A. 011. – 85436, 7 pages. DOI: <https://doi.org/10.1115/MSEC2022-85436>.

73. Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications / X. Xu, A. Awad, P. Robles-Martinez, S. Gaisford, A. Goyanes, A. W. Basit // *Journal of Controlled Release*. – 2021. – Vol. 329, 10 January. – Pp. 743-757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.008>.

74. Vat photopolymerization of fly-like, complex micro-architectures with dissolvable supports / Z. Xu, R. Hensleigh, N. J. R. K. Gerard, H. Cui, M. Oudich, W. Chen, Y. Jing, X. (R.) Zheng // *Additive Manufacturing*. – 2021. – Vol. 47, November. – 102321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102321>.

75. Large Scale Vat-Photopolymerization of Investment Casting Master Patterns: The Total Solution / F. Sameni, B. Ozkan, S. Karmel, D. S. Engstrøm, E. Sabet // *Polymers*. – 2022. – № 14 (21). – 4593. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14214593>.

References

1. Diegel, O., Nordin, A., & Motte, D. (2019). A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing Technologies*, 19-39. doi:10.1007/978-981-13-8281-9_2.

2. Dilberoglu, U.M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545-554. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>.

3. Shrestha, S., & Manogharan, G.P. (2017). Optimization of Binder Jetting Using Taguchi Method. *Article JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 69(3). doi:10.1007/s11837-016-2231-4.

4. Carroll, B.E., Palmer, T.A., & Beese, A.M. (1 April, 2015). Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Materialia*, 87, 309-320. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.054>.

5. Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B., Vyatskikh, A.L., Bose, S., Bandyopadhyay, A., Schoenung, J. M., Lavernia, E. J., & Noam, E. (2021). Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 49, 271-295. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>.

6. Perez, M., Carou, D., Rubio, E. M., & Teti, R. (17-19 July 2019). Current advances in additive manufacturing. *13th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*.
7. Colosimo, B.M., Huang, Q., Dasgupta, T., Tsung, F. (2018). Opportunities and challenges of quality engineering for additive manufacturing. *Quality Engineering for Advanced Manufacturing*, 50(3). <https://doi.org/10.1080/00224065.2018.1487726>.
8. Singh, S., Ramakrishna, S., & Berto, F. (2020). 3D Printing of polymer composites: A short review. *MDPS*, 2(2). <https://doi.org/10.1002/mdp2.97>.
9. Rafiquzzaman, Md., Islam, Md.M., Rahman, Md.H., Talukdar, Md.S., & Hasan, Md.N. (2016). Mechanical property evaluation of glass-jute fiber reinforced polymer composites. *Polymers for advanced technologies*, 27(10), 1308-1316. <https://doi.org/10.1002/pat.3798>.
10. Bhatt, P.M., Kabir, A.M., Peralta, M., Bruck, H.A., & Gupta, S.K. (2019). A robotic cell for performing sheet lamination-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 27, 278-289. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.002>.
11. Xu, X., Awad, A., Robles-Martinez, P., Gaisford, S., Goyanes, A., Basit, A.W. (2021). Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications. *Journal of Controlled Release*, 329, 743-757. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.008>.
12. Calvert, P. (2001). Inkjet printing for materials and devices. *Chem Mater*, (13(10)), 3299-3305.
13. Calvert, P., & Crockett, R. (1997). Chemical solid free-form fabrication: making shapes without molds. *Chem Mater*, (9 (3)), 650-663.
14. Medellin, A., Du, W., Miao, G., Zou, J., Pei, Z., & Ma, C. (2019). Vat Photopolymerization 3D Printing of Nanocomposites: A Literature Review. *J. Micro Nano-Manuf.*, (7(3)), 031006. <https://doi.org/10.1115/1.4044288>.
15. Van, O.T.H., Perelaer, J., Laat, A.W., & Schubert, U.S. (2008). Inkjet printing of narrow conductive tracks on untreated polymeric substrates. *Adv Mater.*, (20(2)), 343-345.
16. Siringhaus, H., Kawase, T., & Friend, R.H. (2000). High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits. *Science*, (290(5499)), 2123-2126.
17. Shimoda, T., Morii, K., Seki, S., & Kiguchi, H. (2003). Inkjet printing of light-emitting polymer displays. *Mrs Bulletin*, 28(11), 821-827.
18. Bharathan, J., & Yang, Y. (1998). Polymer electroluminescent devices processed by inkjet printing: I. Polymer light-emitting logo. *Appl Phys Lett.*, (72(21)), 2660-2662.
19. Kordás, K., Mustonen, T., & Tóth, G. (2006). Inkjet printing of electrically conductive patterns of carbon nanotubes. *Small*, (2(8-9)), 1021-1025.
20. Perelaer, J., Hendriks, C. E., de Laat, A. W., & Schubert, U.S. (2009). One-step inkjet printing of conductive silver tracks on polymer substrates. *Nanotechnology*, (20(16)), 165303.
21. Liu, Y., Cui, T., Varahramyan, K. (2003). All-polymer capacitor fabricated with inkjet printing technique. *Solid State Electron*, (47(9)), 1543-1548.
22. Ziaee, M., & Crane, N.B. (2019). Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28, 781-801. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>.
23. Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F., & Newkirk, J. (2017). Aerospace applications of laser additive manufacturing. *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*, 351-371. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00013-0>.
24. Najmon, J.C., Raeisi, S., & Tovar, A. (2019). Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, 7-31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9>.
25. Mori, D. (2014). *Adytyvne vyrobnytstvo v yakosti frezeruvannia [Additive production as milling]*.
26. Parandoush, P., & Lin, D. (2017). A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures*, (182), 36-53. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.
27. Okwuosa, T.C., Stefaniak, D., Arafat, B., Isreb, A., Wan, K.-W., & Alhnan, M. A. (2016). Temperature FDM 3D Printing for the Manufacture of Patient-Specific Immediate Release Tablets A Lower. *Pharmaceutical Research*, 33, 2704-2712.
28. Melocchi, A., Parietti, F., Maroni, A., Foppoli, A., Gazzaniga, A., & Zema, L. (2016). Hot-melt extruded filaments based on pharmaceutical grade polymers for 3D printing by fused deposition modeling. *International Journal of Pharmaceutics*, 509(1-2), 255-263. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.05.036>.

29. Ravi, A.K., Deshpande, A., & Hsu, K.H. (2016). An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 24(1), 179-185. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.08.007>.
30. Gong, H., Snelling, D., Kardel, K., & Carrano, A. (2019). Comparison of Stainless Steel 316L Parts Made by FDM- and SLM-Based Additive Manufacturing Processes. *JOM*, 71, 880-885.
31. Jeffrey, Plott, Xiaoqing, Tian, & Albert, J. Shih. (August 2018). Voids and tensile properties in extrusion-based additive manufacturing of moisture-cured silicone elastomer. *Additive Manufacturing*, 22, 606-617. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.010>.
32. Turner, B.N., Strong, R., & Gold, S.A. (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid prototyping journal*, 20(3), 192-204. doi:10.1108/RPJ-01-2013-0012.
33. Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B. Engineering*, 110, 442-458. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.
34. Kalsoom, U., Nesterenko, P.N., & Paull, B. (2016). Recent developments in 3D printable composite materials. *RSC Adv.*, (6), 60355-60371. <https://doi.org/10.1039/C6RA11334F>.
35. Parandoush, P., & Lin, D. (2017). A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures*, 182, 36-53. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.
36. Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B., Vyatskikh, A.L., Bose, S., Bandyopadhyay, A., Schoenung, J.M., Lavernia, E.J., & Eliaz, N. (2021). Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 49, 271-295. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>.
37. Huang, J., Chen, Q., Jiang, H., Zou, B., & Li, L. (2020). A survey of design methods for material extrusion polymer 3D printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 15(2). <https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1708027>.
38. Goh, G.D., Yap, Y.L., Tan, H.K.J., Sing, S.L., Goh, G.L., & Yeong, W.Y. (2020). Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45(2). <https://doi.org/10.1080/10408436.2018.1549977>.
39. Gülcan, O., Tamer, A., & Günaydin, K. (2021). The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review. *Additive Manufacturing II, Polymers. Special Issue: Process–Structure–Properties in Polymer 13(16)*. 2829. <https://doi.org/10.3390/polym13162829>.
40. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2020). Material Jetting. *Additive Manufacturing Technologies* (pp. 203-235).
41. Kunchala, P., & Kappagantula, K. (2018). 3D printing high density ceramics using binder jetting with nanoparticle densifiers. *Materials & Design*, 155, 443-450. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.06.009>.
42. Dong, H., & Carr, W.W. (2006). An experimental study of drop-on-demand drop formation. *Physics of Fluids*, (18), 072102. <https://doi.org/10.1063/1.2217929>.
43. Sun, S., Brandt, M., & Easton, M. (2017). Powder bed fusion processes: An overview. *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials* (pp. 55-77). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00002-6>.
44. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2020). Powder Bed Fusion. *Additive Manufacturing Technologies* (pp. 125-170).
45. Awad, A., Fina, F., Goyanes, A., Gaisford, S., & Basit, A.W. (2020). 3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering. *International Journal of Pharmaceutics*, 586, 119594. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119594>.
46. Cai, C., Tey, W.S., Chen, J., Zhu, W., Liu, X., Liu, T., Zhao, L., Zhou, K. (2021). Comparative study on 3D printing of polyamide 12 by selective laser sintering and multi jet fusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 288, 116882. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116882>.
47. Santos, L.M.S., Ferreira, J.A.M., Jesus, J.S., Costa, J.M., & Capela, C. (2016). Fatigue behaviour of selective laser melting steel components. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 85(Part A), 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.08.011>.
48. Nandy, J.A., Sarangi, H., & Sahoo, S. (2019). Review on Direct Metal Laser Sintering: Process Features and Microstructure Modeling. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 6, 280-316.

49. Körner, C. (2016). Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review. *International Materials Reviews*, 61(5). <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289>.
50. Mekonnen, B.G., Bright, G., Walker, A. (2016). A Study on State of the Art Technology of Laminated Object Manufacturing (LOM). In: Mandal, D.K., Syan, C.S. (Eds.), *CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, New Delhi (pp. 207-216)*.
51. Huang, J.A., & Wang, Q.Q. (2020). Review of Stereolithography: Processes and Systems. *Processes*, 8(9), 1138. <https://doi.org/10.3390/pr8091138>.
52. Unkovskiy, A., Schmidt, F., Beuer, F., Li, P., Spintzyk, S., & Fernandez, P.K. (2021). Stereolithography vs. Direct Light Processing for Rapid Manufacturing of Complete Denture Bases: An In Vitro Accuracy Analysis. *Digital Workflows and Material Sciences in Dental Medicine, J. Clin. Med.*, 10(5), 1070. <https://doi.org/10.3390/jcm10051070>.
53. Ichiro, O., Keita, A., Shingo, S., & Yasuhiko, H. (2000). Producing a Full-Scale Model From Computed Tomographic Data with the Rapid Prototyping Technique Using the Binder Jet Method. *Journal of Craniofacial Surgery*, 11(6), 527-537.
54. Hodder, K.J., Chalaturnyk, R.J. (2019). Bridging additive manufacturing and sand casting: Utilizing foundry sand. *Additive Manufacturing*, 28, 649-660. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.06.008>.
55. Xu, J., Gu, X., Ding, D., Pan, Z., & Chen, K. (2018). A review of slicing methods for directed energy deposition based additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 24(6), 1012-1025. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2017-0196>.
56. Saboori, A., Avers, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M., & Fino, P. (2019). Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair. *Appl. Sci.*, 9(16), 3316. <https://doi.org/10.3390/app9163316>.
57. Šljivić, M., Fragassa, C., Pavlović, A., Krašnik, M., Ilić, J., & Stanojević, M. (2016). Additive manufacturing of functional parts based on material extrusion technology. *Contemporary Materials VII-2*, 7(2). <https://doi.org/10.7251/COMEN1602178S>.
58. Kampker, A., Triebs, J., Kawollek, S., Ayvaz, P., & Hohenstein, S. (2019). Review on Machine Designs of Material Extrusion based Additive Manufacturing (AM) Systems - Status-Quo and Potential Analysis for Future AM Systems. *Procedia CIRP*, 81, 815-819. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.205>.
59. Moore, J.P., & Williams, C.B. (2015). Fatigue properties of parts printed by PolyJet material jetting. Moore. *Rapid prototyping journal*, 21(6), 675-685. doi:10.1108/RPJ-03-2014-0031.
60. Tyagi, S., Yadav, A., Deshmukh, S. (2022). Review on mechanical characterization of 3D printed parts created using material jetting process. *Materials Today*, 51(1), 1012-1016. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.073>.
61. Jabari, E., Liravi, F., Davoodi, E., Lin, L., & Toyserkani E. (2020). High speed 3D material-jetting additive manufacturing of viscous graphene-based ink with high electrical conductivity. *Additive Manufacturing*, 35, 101330. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101330>.
62. Silva, M.R., Pereira, A.M., Sampaio, Á.M., & Pontes, A.J. (2021). Assessment of the Dimensional and Geometric Precision of Micro-Details Produced by Material Jetting. *Materials*, 14(8), 1989. <https://doi.org/10.3390/ma14081989>.
63. Ya, Y.L., Wang, C., Sing, S.L., Dikshit, V., Yeong, W.Y., & Wei, J. (2017). Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks. *Precision Engineering*, 50, 275-285. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.05.015>.
64. Willems, E., Turon-Vinas, M., Camargo dos Santos, B., Hooreweder, B.V., Zhang, F., Meerbeek Van, B., & Vleugels, J. (2021). Additive manufacturing of zirconia ceramics by material jetting. *Journal of the European Ceramic Society*, 41(10), 5292-5306. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.04.018>.
65. Song, J.L., Li, Y.T., Deng, Q.L., & Hu, D.J. (2007). Rapid prototyping manufacturing of silica sand patterns based on selective laser sintering. *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188, 614-618. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.108>.
66. Li, Yang, Shi-yan, Tang, Zi-tian Fan, Wen-ming, Jiang, & Xin-wang, Liu. (2021). Rapid casting technology based on selective laser sintering. *China Foundry*, 18, 296-306.
67. Morales-Planas, S., Minguella-Canela, J., Lluma-Fuentes, J., Travieso-Rodriguez, J.A., García-Granada, A.-A. (2018). Multi Jet Fusion PA12 Manufacturing Parameters for Watertightness, Strength and Tolerances. *Materials*, 11(8), 1472. <https://doi.org/10.3390/ma11081472>.
68. Padmakumar, M. (2020). Additive Manufacturing of Tungsten Carbide Hardmetal Parts by Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) and Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Techniques. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 7, 338-371.

69. Demir, A.G., Monguzzi, L., & Previtali, B. (2017). Selective laser melting of pure Zn with high density for biodegradable implant manufacturing. *Additive Manufacturing*, 15, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.03.004>.

70. Boniotti, L., Beretta, S., Patriarca, L., Rigoni, L., & Foletti, S. (2019). Experimental and numerical investigation on compressive fatigue strength of lattice structures of AlSi7Mg manufactured by SLM. *International Journal of Fatigue*, 128, 105181. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.041>.

71. Nakagawa, T., Kunieda, M., & Liu, S.-D. (1985). Laser Cut Sheet Laminated Forming Dies by Diffusion Bonding. *Proceedings of the Twenty-Fifth International Machine Tool Design and Research Conference* (pp. 505-510).

72. Raines, R., Day, J.B., & Salary, R. (2022). Experimental Characterization of the Mechanical Properties of Medical-Grade Dental Implants, Fabricated Using Vat-Photopolymerization Additive Manufacturing Process. *MSEC*, 001(07), A. 011, 85436. <https://doi.org/10.1115/MSEC2022-85436>.

73. Xu, X., Awad, A., Robles-Martinez, P., Gaisford, S., Goyanes, A., & Basit, A.W. (2021). Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications. *Journal of Controlled Release*, 329, 743-757. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.008>.

74. Xu, Z., Hensleigh, R., Gerard, N.J.R.K., Cui, H., Oudich, M., Chen, W., Jing, Y., Zheng, X. (R.). (2021). Vat photopolymerization of fly-like, complex micro-architectures with dissolvable supports. *Additive Manufacturing*, 47, 102321. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102321>.

75. Sameni, F., Ozkan, B., Karmel, S., Engström, D. S., & Sabet, E. (2022). Large Scale Vat-Photopolymerization of Investment Casting Master Patterns: The Total Solution. *Polymers*, 14(21), 4593. <https://doi.org/10.3390/polym14214593>.

Отримано 24.05.23

UDC 621.791.9

Ihor Petrenko¹, Maksym Bolotov², Timur Hanieiev³

¹postgraduate

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: igor.petrenko0511@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-2103-4324>. **ResearcherID:** [IQV-2134-2023](https://orcid.org/0009-0006-2103-4324)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding and Construction technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: bolotovmg@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>. **ResearcherID:** [H-4183-2014](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding and Construction technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: gatavltim@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6037-5494>. **ResearcherID:** [G-5191-2014](https://orcid.org/0000-0001-6037-5494)

COMPARATIVE ANALYSIS OF ADDITIVE PRODUCTION TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

Today, there are more than 30 varieties of additive manufacturing technologies, and their number is constantly growing. Each type of these technologies has its own unique features and specifics, but they are all related to certain types of additive manufacturing or combinations of these types. In this article, a comparative analysis of the main technologies of additive manufacturing is carried out, where their unique features, applications, advantages and disadvantages are considered in detail.

The main attention is paid to the systematization of data and tabulation of indicators for convenient comparison of different technologies. The state of additive manufacturing technologies, as well as their prospects for development in the field of mechanical engineering, are considered in detail. The article provides a comprehensive overview of the technologies, including a description of the uniqueness of each type, its capabilities and limitations.

The analysis of recent studies devoted to additive technologies showed the interest of the scientific community in the optimization of processes and physical and mechanical characteristics of products, features and directions of use of raw parts, features of printing parameters, scaling of technologies, applications in various industries. The existing literature on this subject is either limited to only fundamental concepts or is too disparate and does not present systematic data, making it difficult for professionals to study. The final tables presented in the work make it possible to conduct a comparative characterization of technologies without spending a lot of time, to single out a technology or several technologies, the capabilities and features of which make it possible to solve the tasks. The work contains a comprehensive overview of additive manufacturing technologies and provides practical value for specialists, scientists and engineers working in the field of mechanical engineering. It helps to understand the potential and advantages of each technology and provides important information for choosing the optimal approach when applying additive manufacturing.

Keywords: 3D printing; additive manufacturing; industrial engineering; Binder Jetting; Directed Energy Deposition; Material Extrusion; Material Jetting; Powder Bed Fusion; Sheet Lamination; Vat Photopolymerization.

Fig.: 15. Table: 2. References: 75.