

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНУ «Український інститут науково-технічної експертизи та інформації»

Т.К. КВАША, О.І. КОВАЛЕНКО

**ПЕРСПЕКТИВНІ СВІТОВІ НАУКОВІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ НАПРЯМИ
ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ КРИТИЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ «АДИТИВНЕ
ВИРОБНИЦТВО ТА ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ»**

Науково-аналітична записка

Київ – 2026

УДК 001.18; 002.513.5; 355/359 - 356.252.5

ISBN 978-966-479-174-5 (online)

Автори:

Кваша Тетяна Костянтинівна, заввідділу, ДНУ «Український інститут науково-технічної експертизи та інформації».

Коваленко Олена Іванівна, канд. екон. наук, с. н. с., ДНУ «Український інститут науково-технічної експертизи та інформації».

Рекомендовано до друку вченою радою Українського інституту науково-технічної експертизи та інформації МОН України (протокол № 2 від 27.02.2026)

Рецензенти:

Писаренко Тетяна Василівна, канд. техн. наук, заст. директора з прогнозно-аналітичних досліджень та моніторингу науково-технологічного розвитку, ДНУ «Український інститут науково-технічної експертизи та інформації»;

Мусіна Людмила Абдрахманівна, канд. екон. наук, пров. н. с., ДНУ «Український інститут науково-технічної експертизи та інформації».

Кваша Т. К. Перспективні світові наукові та технологічні напрями досліджень у сфері критичної технології «Адитивне виробництво та технології 3D-друку» : Науково-аналітична записка [Електронний ресурс] / Т.К. Кваша, О.І. Коваленко. – Київ : УкрІНТЕІ, 2026. – 84 с.

В Україні адитивне виробництво (Additive Manufacturing, AM), або 3D-друк, офіційно визначене одним із напрямів розвитку критичних технологій у сфері озброєння та військової техніки. Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 серпня 2017 р. №600-р затверджено Перелік критичних технологій, серед яких особливе місце посідають «Матеріали нового покоління та вироби з них», що включають 3D-друк. У даній роботі викладено результати наукометричного та патентного дослідження з використанням баз наукових публікацій Web of Science та патентів Derwent Innovation (інформація яких не містить державну таємницю) із визначення світових перспективних науково-технологічних пріоритетів вищезначеної сфери.

Визначено, що абсолютними лідерами (пріоритетами) у сфері 3D-друку є класи екструзійних технологій та технологій плавлення порошку. Перспективні класи – наплавлення зі спрямованою енергією, струменеве нанесення зв'язувальної речовини, ламінування листів і фотополімеризація у ванні – демонструють активний перехід від дослідницької фази до розширення виробничих сценаріїв.

Результати, представлені в монографії, можуть бути використані представниками органів державної влади, експертами, науковцями, інженерно-технічним персоналом, викладачами закладів вищої освіти.

ISBN 978-966-479-174-5 (online)

© МОН України, 2026

© УкрІНТЕІ, 2026

© Кваша Т.К., Коваленко О.І., 2026

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТЕХНОЛОГІЙ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА	5
ВИКОНАВЧЕ РЕЗЮМЕ.....	8
Наукометричний аналіз.....	8
Патентна динаміка.....	9
Інтегрований науково-технологічний аналіз.....	10
ВСТУП.....	12
Класифікація технологій і матеріалів адитивного виробництва та напрямки їх застосування	12
Сучасні тенденції та технологічні можливості адитивного виробництва, з фокусом на 3D-друк.....	19
Геометрія та архітектура виробів	19
Переваги та обмеження основних технологій АМ	20
Новітні матеріальні інновації.....	20
Значення для оборонної та безпекової сфери.....	21
1. НАУКОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ	23
Результати наукометричного аналізу даних міжнародної бази публікацій Web of Science за видом «3D-друк військового та подвійного призначення»	23
Основні категорії.....	24
Географічна структура публікацій	25
за кількістю публікацій.....	25
структура публікацій за інституціями	26
структура публікацій за видавцями	27
Ключові наукові фонди та інвестиції у розвиток 3D-друку	27
Загальний огляд показників наукового інтересу	28
Аналіз наукового впливу за класами технологій адитивного виробництва	31
Клас технологій: Плавлення в порошковому шарі (Powder Bed Fusion, PBF).....	32
Клас технологій: Фотополімеризація у ванні (Vat Photopolymerization, VPP).....	33
Клас технологій: Адитивне наплавлення зі спрямованою енергією (Directed Energy Deposition, DED).....	34
Клас технологій: Струменеве нанесення зв'язувальної речовини (Binder Jetting, BJT)	35
Клас технологій: Екструзія матеріалу (Material Extrusion, MEX)	35
Клас технологій: Ламінування листів (Sheet Lamination, SHL).....	36
Клас технологій: Струменеве нанесення матеріалу (Material Jetting, MJT)	36
2. ПАТЕНТНИЙ АНАЛІЗ.....	38
Загальний огляд патентування	38
Основні патентоволодільці	39
Географія патентування та ринки застосування	40
Технологічні тенденції та динаміка розвитку	41
Технологічна класифікація (IPC)	42

Технологічна динаміка основних класів адитивного виробництва.....	44
Аналітична інтерпретація патентної активності за класами	
адитивних технологій.....	45
Методологічні засади	45
Динаміка патентної активності всередині класів технологій адитивного	
виробництва	50
Узагальнені висновки	51
Ландшафтні карти	52
3. ІНТЕГРОВАНІЙ АНАЛІЗ НАУКОМЕТРИЧНИХ І ПАТЕНТНИХ	
ДАНИХ	58
Загальні тенденції	59
Інтегральний аналіз наукової та патентної динаміки за класами	
адитивних технологій	65
1. Абсолютні лідери – екструзійні технології (Material Extrusion, MEX)	64
2. Технології плавлення порошку (Powder Bed Fusion, PBF)	65
3. Струменеве нанесення матеріалу (Material Jetting, MJT)	65
4. Фотополімеризація (Vat Photopolymerization, VPP)	65
5. Міждисциплінарні напрями	66
6. Інші тематичні напрями	66
ДОДАТОК 1.....	67
Фотополімеризація у ванні (VPP)	67
Екструзія матеріалу (MEX).....	68
Спікання порошкового шару (PBF)	71
Струменеве нанесення матеріалу (MJT)	71
DED, Направлене енергетичне наплення	73
BJT, Струменеве нанесення зв'язуючого.....	74
NL, Ламінація листів.....	75
ДОДАТОК 2. Інтегральний аналіз наукової та патентної динаміки у	
класах адитивних технологій за 2020–2024 рр.	77

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТЕХНОЛОГІЙ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

AM (Additive Manufacturing) – адитивне виробництво. Сукупність технологічних процесів, у яких об'єкти створюються шляхом послідовного нанесення матеріалу шар за шаром відповідно до цифрової тривимірної моделі.

VPP (Vat Photopolymerization) – фотополімеризація у ванні. Процес, у якому рідкий фотополімер у ванні вибірково твердіє під дією світлового випромінювання відповідно до цифрової моделі.

MJT (Material Jetting) – струменеве нанесення матеріалу. Процес, у якому краплі рідкого матеріалу вибірково наносяться на поверхню відповідно до цифрової моделі з подальшим затвердінням.

BJT (Binder Jetting) – струменеве нанесення зв'язувальної речовини. Процес, у якому рідкий зв'язувальний агент вибірково наноситься на шар порошкового матеріалу з метою формування та закріплення об'єкта.

PBF (Powder Bed Fusion) – плавлення в порошковому шарі. Процес, у якому теплова енергія (лазерне або електронно-променеве випромінювання) вибірково плавить або сплавляє ділянки порошкового шару для формування об'єкта.

MEX (Material Extrusion) – екструзія матеріалу. Процес, у якому матеріал (переважно термопластичний) вибірково подається через сопло та наноситься шарами для створення тривимірної деталі.

DED (Directed Energy Deposition) – адитивне наплавлення зі спрямованою енергією. Процес, у якому матеріал у вигляді порошку або дроту подається в зону дії спрямованого джерела енергії (лазера, електронного променя або електричної дуги), де він плавиться та наплавляється з формуванням деталі. До цього класу належать, зокрема:

- **WAAM / WAM (Wire Arc Additive Manufacturing)** – адитивне виробництво з використанням дроту та електричної дуги;

- EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing) – адитивне виробництво з подачею дроту з використанням електронного променя в умовах вакууму;
- LSF (Laser Solid Forming) – різновид DED, що застосовує лазерне формування з подачею матеріалу (термін історично та комерційно зумовлений, не є базовою категорією ISO/ASTM).

SHL (Sheet Lamination) – ламінування листів. Процес, у якому шари листового матеріалу вирізаються за заданим контуром та з'єднуються між собою шляхом склеювання, зварювання або іншого методу з'єднання для формування об'єкта.

SLA (Stereolithography) – стереолітографія. Процес адитивного виробництва, у якому рідкий фотополімер вибірково твердіє під дією лазерного випромінювання відповідно до цифрової тривимірної моделі.

DLP (Digital Light Processing) – цифрова світлова проєкція. Різновид фотополімеризації у ванні, у якому затвердіння шару рідкого фотополімеру здійснюється шляхом проєкції цифрового світлового зображення на всю площину шару одночасно.

SLM / LPBF (Selective Laser Melting / Laser Powder Bed Fusion) – вибіркоче лазерне плавлення порошкового шару. Процес плавлення в порошковому шарі, у якому лазерне випромінювання вибірково повністю плавить металевий порошок для формування щільного суцільного об'єкта відповідно до цифрової моделі.

SLS (Selective Laser Sintering) – вибіркоче лазерне спікання. Процес у порошковому шарі, у якому лазерне випромінювання вибірково спікає частинки порошкового матеріалу (полімерного або композитного) без повного плавлення для формування виробу.

EBM (Electron Beam Melting) – плавлення електронним променем. Процес плавлення в порошковому шарі, у якому електронний промінь у вакуумному середовищі вибірково плавить металевий порошок, забезпечуючи високу щільність та структурну однорідність деталей.

DIW (Direct Ink Writing) – пряме нанесення пастоподібних матеріалів. Процес екструзійного типу, у якому пастоподібні, в'язкі або тиксотропні матеріали вибірково наносяться через сопло відповідно до цифрової моделі з подальшим затвердінням або сушінням.

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) – вуглеволоконний армований полімер. Композитний матеріал, що складається з полімерної матриці, армованої вуглецевими волокнами, та характеризується високим співвідношенням міцності до маси і жорсткості.

MMC (Metal Matrix Composite) – металевий матричний композит. Клас композитних матеріалів, у яких метал слугує матрицею, армованою частинками, волокнами або наноструктурами, що забезпечує підвищені механічні, термічні та зносостійкі властивості.

ВИКОНАВЧЕ РЕЗЮМЕ

Наукометричний аналіз

Наукометричний аналіз за базою Web of Science (2020–2024 pp.) показує інтенсивне зростання глобальних досліджень у сфері адитивного виробництва (Additive Manufacturing, AM), що дедалі частіше спрямовуються на оборонні та подвійні технології. Кількість публікацій зросла на 72%, а цитувань – у 28 разів, із середнім щорічним приростом 132%. Це підкреслює зростання стратегічного значення технологій AM у контексті національної безпеки та промислової інноваційності.

Глобальними центрами розвитку є Китай (27%), США (18%) та Індія (7%), а провідні позиції утримує Китайська академія наук. Україна наразі формує близько 0,3% від загальної кількості публікацій.

Провідні наукові хаби, зокрема Національний центр наукових досліджень Франції, Міністерство енергетики США та індійські технологічні інститути, діють у тісній взаємодії з ключовими науковими видавництвами (Elsevier, MDPI, Wiley, Springer Nature, American Chemical Society) та за підтримки провідних донорських організацій – Національного наукового фонду Китаю і США, Дослідницької та інноваційної установи Сполученого Королівства та Німецького наукового товариства, формуючи глобальну екосистему трансферу знань і промислової комерціалізації.

Розподіл наукового впливу між технологічними класами адитивного виробництва є істотно нерівномірним. Ядро зрілих технологій формують PBF і VPP, які мають найвищі інтегральні показники наукового впливу та задають галузеві стандарти для високотехнологічних застосувань. Другу хвилю масштабування забезпечують DED і BJT, орієнтовані на промислову інтеграцію та прикладні сценарії. MEX виступає універсальною інноваційною платформою для полімерних, біомедичних і сенсорних застосувань, тоді як SHL і MJT характеризуються відносно молодого наукометричною базою з високою науковою доданою вартістю та різним рівнем технологічної зрілості.

Патентна динаміка

За даними бази Derwent Innovation (Clarivate Analytics), загальна кількість патентів у сфері АМ перевищила 57 тисяч, з яких понад 49 тисяч зареєстровано у 2020–2024 рр., тобто близько 86 % усіх реєстрацій за два десятиліття.

Патентний аналіз підтверджує перехід АМ у фазу технологічної зрілості. З 2020 по 2024 рік кількість патентів зростала щорічно на 106–468%. Лідерами патентування є Китай (≈67%), США (≈11%) та Південна Корея (≈ 7%).

Заявниками виступають переважно університети та державні наукові центри, тоді як корпорації Hewlett Packard, Siemens, Boeing, GE зосереджені на практичному впровадженні розробок.

Патентний аналіз засвідчує, що основна концентрація заявок у сфері адитивного виробництва припадає на коди МПК В33У, які безпосередньо охоплюють технології АМ, а також на суміжні класи В29С і В22F, пов'язані з формуванням полімерів і порошковою металургією. Вагомий масив патентів зосереджений у класах С08L і С08К, що відображає інтенсивний розвиток полімерних композицій і функціональних матеріалів, тоді як коди Н05К і G06F фіксують зростаючу роль цифрового керування, автоматизації та гібридизації адитивних процесів.

За інтегральною оцінкою інноваційної пріоритетності до пріоритетних (+++) віднесено технології PBF, MEX, VPP і BJT, а також гібридні та багатоматеріальні адитивні системи й аналітичні та допоміжні процеси, для яких характерне стійке зростання патентної активності. Перспективні напрями (++) представлені технологіями DED, MJT і ламінуванням листів (SHL), тоді як локальні та нішеві рішення (+) відображають етап технологічної зрілості галузі без формування окремих платформ.

У фокусі ключових технологічних пріоритетів перебувають високотемпературні металеві процеси, насамперед PBF і DED, полімерне екструзійне адитивне виробництво (MEX), гібридні та інтегровані адитивні

системи, а також цифрова автоматизація, моніторинг і контроль якості процесів.

Інтегрований науково-технологічний аналіз

Інтегрований аналіз наукометричних і патентних даних за 2020–2024 рр. засвідчив перехід адитивного виробництва від експериментальної фази до етапу структурованого технологічного розвитку з високою інноваційною динамікою. Поєднання показників наукового впливу з патентною активністю дозволило виділити технологічні напрями, що формують ядро зрілої АМ-екосистеми, а також напрями, які перебувають на етапі активного прикладного масштабування.

На основі інтегральної оцінки, що враховує наукову зрілість, темпи патентного зростання та системну роль технологій, визначено три рівні інноваційної пріоритетності.

До пріоритетних напрямів (++++) віднесено Powder Bed Fusion (PBF) та Material Extrusion (MEX), які поєднують високу інтенсивність патентування з широкою матеріальною базою та масштабованістю промислових застосувань.

Перспективні напрями (++) – Directed Energy Deposition (DED), Binder Jetting (BJT), Sheet Lamination (SHL) і Vat Photopolymerization (VPP) – демонструють активний перехід від дослідницької фази до розширення прикладних і виробничих сценаріїв.

Середньоперспективний рівень (+), представлений насамперед технологією Material Jetting (MJT), відображає зрілі прикладні рішення з локальними зонами інноваційного розвитку.

Узагальнення результатів наукометричного та патентного аналізу дозволяє перейти від опису окремих тенденцій до їх системного зіставлення за ключовими технологічними напрямами адитивного виробництва. Нижче наведено інтегровану порівняльну оцінку, яка відображає відносну інноваційну пріоритетність технологій за рівнем наукового впливу та патентної активності (табл. 1).

Таблиця 1. Пріоритетність технологічних напрямів за рівнем наукового впливу та патентної активності

Технологічний напрям AM	Науковий вплив	Патентна активність	Інтегрована пріоритетність
Powder Bed Fusion (PBF)	+++	+++	+++
Material Extrusion (MEX)	+	+++	+++
Vat Photopolymerization (VPP)	+++	+++	++
Directed Energy Deposition (DED)	++	++	++
Binder Jetting (BJT)	+	+++	++
Sheet Lamination (SHL)	+	++	++
Material Jetting (MJT)	+	++	+

ВСТУП

В Україні адитивне виробництво (Additive Manufacturing, AM), або 3D-друк, офіційно визначене одним із критичних напрямів розвитку технологій у сфері створення озброєння та військової техніки. Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 серпня 2017 р. №600-р затверджено Перелік критичних технологій, серед яких особливе місце посідають «Матеріали нового покоління та вироби з них»¹, що включають 3D-друк. Це створює передумови для технічного переоснащення та модернізації оборонно-промислового комплексу, локалізації виробництва, зменшення залежності від зовнішніх постачальників і впровадження найкращих світових практик матеріалознавства й інженерії.

Класифікація технологій і матеріалів адитивного виробництва та напрями їх застосування

Хоча терміни «3D-друк» та «адитивне виробництво» (Additive Manufacturing, AM) часто використовуються як синоніми, між ними існує певне зміщення акцентів. У науковому та стандартизаційному контексті 3D-друк розглядається як підмножина адитивного виробництва, що охоплює як побутові, так і промислові застосування відповідних технологій. Натомість адитивне виробництво є офіційним технічним терміном, закріпленим у міжнародних стандартах (зокрема ISO/ASTM 52900:2021), і охоплює весь спектр технологій формування об'єктів шляхом пошарового нанесення матеріалу. У цьому дослідженні терміни вживатимуться відповідно до контексту: AM – для опису технологічної бази й класифікацій, а 3D-друк – при аналізі тематичних публікацій і прикладних рішень.

Адитивне виробництво – сучасна технологія виготовлення деталей шар за шаром на основі цифрових моделей. На відміну від традиційного

¹ Деякі питання розвитку критичних технологій у сфері виробництва озброєння та військової техніки. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 серпня 2017 р. № 600-р (в редакції розпорядження Кабінету Міністрів України від 23 лютого 2022 р. № 223-р) URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/600-2017-%D1%80#Text>

субтрактивного виробництва, АМ дозволяє створювати складні геометрії, швидко прототипувати, індивідуалізувати продукцію та знижувати матеріальні втрати^{2,3,4}. Технологія дедалі активніше інтегрується в аерокосмічну, автомобільну, медичну, будівельну та оборонну галузі, змінюючи виробничі процеси та логістику⁵.

У нормативному значенні, згідно зі стандартом ISO/ASTM 52900:2021⁶, адитивне виробництво визначається як процес з'єднання матеріалів для виготовлення деталей за даними 3D-моделі, зазвичай шар за шаром⁷. У межах цього стандарту розрізняють **сім основних технологічних класів адитивного виробництва**:

1. **Фотополімеризація у ванні (Vat Photopolymerization, VPP)** – процес, у якому рідкий фотополімер у ванні вибірково затвердіває під дією світлового випромінювання. До цієї категорії належать, зокрема, SHLA (Stereolithography) та DLP (Digital Light Processing).
2. **Струменеве нанесення матеріалу (Material Jetting, MJ)** – процес, у якому краплі матеріалу вибірково наносяться на поверхню відповідно до цифрової моделі.

² S. Dehghan, S. Sattarpanah Karganroudi, S. Echchakoui, and N. Barka, “The Integration of Additive Manufacturing into Industry 4.0 and Industry 5.0: A Bibliometric Analysis (Trends, Opportunities, and Challenges),” *Machines*, vol. 13, no. 1, pp. 1–37, 2025, <https://doi.org/10.3390/machines13010062>.

³ A. Haleem and M. Javaid, “Additive Manufacturing Applications in Industry 4.0: A Review,” vol. 4, no. 4, pp. 1–23, 2019, <https://doi.org/10.1142/S2424862219300011>.

⁴ A. Jayswal and S. Adanur, “An overview of additive manufacturing methods, materials, and applications for flexible structures,” vol. 52, pp. 1–42, 2022, <https://doi.org/10.1177/15280837221114638>.

⁵ Yeshiwas et al. *J Mater. Sci: Mater Eng.* (2025) <https://doi.org/10.1186/s40712-025-00306-8>

⁶ ISO/ASTM 52900:202. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>
ДСТУ EN ISO/ASTM 52900:2022 Адитивне виробництво. Загальні принципи. Основи та словник (EN ISO/ASTM 52900:2021, IDT; ISO/ASTM 52900:2021, IDT)

⁷ Vilas J Kharat, Puran Singh, G Sharath Raju, Dinesh Kumar Yadav, M Satyanarayana.Gupta, Vanya Arun, Ali Hussein Majeed, Navdeep Singh, Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Materials Today: Proceedings*, 2023, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.033>.

3. **Струменеве нанесення зв'язувальної речовини (Binder Jetting, BJT)** – процес, у якому рідкий зв'язувальний агент вибірково наноситься на шар порошкового матеріалу для формування деталі.
4. **Плавлення порошкового шару (Powder Bed Fusion, PBF)** – процес, у якому теплова енергія (лазер або електронний промінь) вибірково плавить або спікає ділянки порошкового шару.
5. **Екструзія матеріалу (Material Extrusion, MEX)** – процес, у якому матеріал подається через сопло або отвір і наноситься пошарово. Технологія FDM (Fused Deposition Modeling) є комерційною реалізацією цього класу.
6. **Спрямоване енергетичне наплавлення (Directed Energy Deposition, DED)** – процес, у якому матеріал у вигляді порошку або дроту подається у зону дії концентрованого джерела енергії (лазера, електронного променя або електричної дуги), де він плавиться та формує деталь.
7. **Ламінування листів (Sheet Lamination, SHL)** – процес, у якому шари матеріалу послідовно з'єднуються шляхом склеювання або зварювання з подальшим формуванням геометрії об'єкта.

Узагальнено ці технологічні класи реалізують три базові фізико-технологічні механізми: екструзію матеріалу, затвердіння рідких середовищ та затвердіння порошкових матеріалів. Саме ці механізми визначають ключові переваги та обмеження адитивного виробництва щодо вибору матеріалів, досяжної точності, механічних властивостей, масштабованості та вартості^{8, 5}.

Сучасні досягнення в галузі нових матеріалів – металевих сплавів, композитів, біосумісних полімерів – у поєднанні з розвитком АМ-процесів (SHLA, SHLS, FDM) перетворюють цю технологію на ключовий чинник **індустріальної трансформації**, цифровізації виробництва й стратегічної автономії. Попри наявні виклики масштабування, стандартизації та контролю

⁸ K. Mondal et al., “International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology: Advanced manufacturing technologies for enhancing security in nuclear and radiological materials transport ☆,” vol. 5, no. January, pp. 144–150, 2024

якості⁵, інтеграція машинного навчання та нових інженерних рішень відкриває можливості для підвищення точності, прогнозування дефектів та автоматизації виробництва.

Таким чином, адитивне виробництво – це не просто набір технологій, а виробнича парадигма, що забезпечує розвиток матеріалів нового покоління та зміцнює технологічний суверенітет України, модернізує оборонно-промисловий комплекс і інтегрує його в глобальні виробничі мережі.

Різноманіття матеріалів, що використовуються в адитивному виробництві, безпосередньо впливає на функціональні характеристики виробів та розширює можливості їх застосування у промисловості й оборонній сфері.

Окрім класифікації АМ за технологічними процесами, сучасні наукові огляди (українські та англомовні джерела) також виділяють **основні класи матеріалів**, що застосовуються в адитивному виробництві:

- полімери,
- фотополімери,
- метали,
- кераміка,
- композити,
- біоматеріали,
- функціональні («розумні») матеріали,
- матеріали сталого розвитку.

Такий поділ дозволяє оцінювати потенціал і обмеження адитивних технологій залежно від конкретних завдань виробництва, вимог до властивостей готових виробів, екологічності та економічної ефективності.

Критерії вибору матеріалів для АМ у наукових і промислових публікаціях охоплюють:

- механічну міцність і питому вагу;
- термостійкість і корозійну стійкість;
- точність відтворення й сумісність з конкретною АМ-технологією;

- біосумісність (для медичних застосувань);
- вартість і сталість (екологічний аспект).

У таблиці 2 наведено основні типи матеріалів, їх ключові властивості, характерні процеси АМ та потенційне застосування в оборонно-промисловому комплексі України.

Таким чином, систематизація матеріалів для адитивного виробництва й аналіз їхніх характеристик дозволяє не лише ефективно добирати матеріали під конкретні оборонні завдання, а й прогнозувати напрями розвитку українського ОПК у сфері інноваційних технологій.

Важливою складовою розвитку адитивних технологій є не лише вибір матеріалів, а й проектування **структур та архітектур** майбутніх виробів.

Таблиця 2. Основні типи матеріалів, їх ключові властивості, характерні процеси АМ та потенційне застосування в оборонно-промисловому комплексі

Тип матеріалу	Приклади	Ключові властивості	Типові процеси АМ	Критерії вибору	Потенційне застосування в ОПК та секторі оборони
Полімери	PLA, ABS, PETG, Nylon	Легкі, корозійностійкі, середня міцність	FDM, SHLS	Низька вартість, легкість друку, біорозкладність (PLA)	Корпуси та елементи безпілотників; прототипування деталей; корпуси електроніки; навчальні макети
Фотополімери	Епоксидні смоли, акрилати	Висока точність, УФ-затвердіння, крихкість	SHLA, DLP	Прототипування, точні деталі	Виготовлення прецизійних оптичних чи сенсорних компонентів; дрібносерійні моделі обладнання
Метали	Ti6Al4V, SS316L, AlSi10Mg, Inconel 718	Висока міцність, теплостійкість, корозійна стійкість	SHLM, EBM, DED	Висока міцність, складна геометрія, теплостійкість, потреба в локальному ремонті	Комплектуючі для бронетехніки, авіації й БПЛА; елементи двигунів; тепловідвідні деталі; ремонт і відновлення зношених вузлів
Кераміка	Алюміна, цирконія, карбід кремнію	Висока твердість, термостійкість, крихкість	BJT, SHLA зі шламом	Термостійкість, електроізоляційні властивості, зносостійкість	Броньові панелі; теплозахисні та ізоляційні матеріали; елементи електроніки, сенсори у складних умовах
Композити	CFRP, MMC	Висока питома міцність, налаштовувані властивості	FDM, SHLS, DED	Структурні елементи, авіація, автомобілі	Легкі та міцні конструкційні деталі для бронетехніки, БПЛА, гвинтокрилів; модернізація військових транспортних засобів
Біоматеріали	Гідроксиапатит, желатин, колаген, суміші на основі PLA	Біосумісність, біодеградація, сумісність з тканинами	FDM, SHLA, Біодрук	Імплантати, тканинні каркаси	Виготовлення протезів та імплантатів для військових із травмами; тканинна інженерія для відновлення поранених

Тип матеріалу	Приклади	Ключові властивості	Типові процеси АМ	Критерії вибору	Потенційне застосування в ОПК та секторі оборони
Розумні матеріали	Сплави з пам'яттю форми, п'єзоелектрики	Реагують на зовнішні стимули (температура, електричне поле)	SHLM, MJ, DIW	Сенсори, актуатори, самовідновлювані вироби	Самовідновлювані елементи броні; сенсорні системи у зброї та дронах; приводи й актуатори для високоточних систем
Сталий розвиток	Перероблений пластик, біо-PLA, лігнінові суміші	Екологічність, відновлюваність, біорозкладність	FDM, SHLA	Мінімізація відходів, локальне виробництво, низька вартість матеріалів	Навчально-тренувальне обладнання, тимчасові конструкції, макети; зменшення логістичного навантаження за рахунок локального друку

Сучасні тенденції та технологічні можливості адитивного виробництва, з фокусом на 3D-друк

Попередній розділ окреслив нормативно-термінологічні засади адитивного виробництва відповідно до стандарту ISO/ASTM 52900, а також систематизував ключові класи технологій і матеріалів. Подальший аналіз зосереджується вже не на формальній класифікації, а на практичній еволюції адитивного виробництва як інженерної та виробничої системи. У цьому контексті розділ «Сучасні тенденції та технологічні можливості адитивного виробництва і 3D-друку» структуровано за логікою переходу від геометрії та архітектури виробів, через технологічні обмеження й матеріальні інновації, до цифрових рішень і прикладних ефектів для оборонної та безпекової сфери.

Геометрія та архітектура виробів

Сучасне адитивне виробництво вже не обмежується простими геометричними формами. У ньому активно застосовують топологічно складні та функціонально градієнтні структури – решітки, каркаси, пористі й трикратно періодичні мінімальні поверхні (TPMS), біоскляні та кальцій-фосфатні каркасні структури, 3D-металеві решітки та біоміметичні скелети, зокрема з біополімерів і гідрогелів. Такі структури забезпечують високе співвідношення міцності до ваги, оптимізацію механічних та теплових характеристик і точну біосумісність у медичних застосуваннях.

У військово-оборонному секторі це означає:

- створення легких і надміцних конструкцій для бронезахисту, дронів, безпілотних платформ та обладнання;
- швидке виробництво індивідуалізованих елементів захисту чи імплантів для військових;
- розробку сенсорних чи енергопоглинаючих структур, інтегрованих у корпуси техніки.

Переваги та обмеження основних технологій АМ

Різні технології АМ (екструзія матеріалу, плавлення порошкового шару, струменеве нанесення сполучних речовин чи матеріалів, спрямоване енергетичне осадження / наплавлення, ламінування листів, фотополімеризація у ваннах) мають **специфічні переваги й обмеження**. Наприклад:

- **екструзія матеріалу** – доступна, дешева й придатна для прототипування, але знижена точність і швидкість;
- **плавлення (спікання) порошкового шару** – широкий вибір матеріалів і висока якість, але обмеження розміру деталей, повільність і високе споживання енергії;
- **струменеве нанесення сполучних речовин** – дозволяє швидко створювати багатоколірні та двоматеріальні вироби, однак потребує тривалої післяобробки й не підходить для структурних елементів;
- **спрямоване енергетичне осадження / наплавлення** – забезпечує високу точність і функціональні деталі, але потребує подальшої обробки й обмежене у виборі матеріалів.

Для оборонної промисловості правильний підбір технології дозволяє балансувати між швидкістю виготовлення, вартістю та експлуатаційними характеристиками виробів.

Новітні матеріальні інновації

Останні роки характеризуються вибуховим розвитком нових матеріалів:

- **нанокомпозитні філаменти** для FDM з вуглецевими нанотрубками – суттєво підвищують міцність і термостійкість;
- **функціонально градієнтні матеріали (FGM)** у DED дозволяють виготовляти імпланти з градієнтом механічних властивостей або елементи конструкцій із заданим розподілом міцності;
- **біодеградовані полімери** для біодруку сприяють створенню сталих медичних рішень;

- **легкі авіакосмічні компоненти** з титанових порошків методом ЕВМ суттєво знижують масу літальних апаратів і витрати пального;
- **ІІІ-інтеграція та Індустрія 4.0** – сенсори й алгоритми глибинного навчання вже застосовуються для прогнозування дефектів, корекції шарів у реальному часі, оптимізації траєкторій друку й інтеграції з цифровими двійниками.

Для оборонної сфери ці розробки означають можливість оперативно створювати високофункціональні та індивідуалізовані вироби безпосередньо у зоні розгортання.

Значення для оборонної та безпекової сфери

Поєднання передових матеріалів, адаптивних технологій та цифрових рішень відкриває можливості:

- **виготовлення деталей на місці застосування**, що мінімізує логістику й час очікування;
- **створення легких і високоміцних елементів** техніки, броні, дронів, безпілотних систем і медичних імплантів;
- **впровадження «розумних» конструкцій** – сенсорних, самовідновлюваних чи таких, що реагують на зміну температури, тиску, електричного поля;
- **реалізація концепції «цифрового складу»**, де ключові деталі зберігаються у вигляді 3D-моделей і друкуються за потреби.

Отже, адитивне виробництво поступово переходить від вузько спеціалізованого інструменту прототипування до **ключової технології оборонної, аерокосмічної та медичної галузей**. Завдяки розвитку матеріалів (нанокомпозити, біополімери, функціонально градієнтні метали, високоентропійні сплави), інтеграції ІІІ та використанню складних архітектур (решітки, TPMS, пористі й біоміметичні структури) АМ дозволяє **створювати вироби з унікальними властивостями**, недосяжними традиційними методами.

У контексті цього дослідження особливу увагу буде приділено саме **3D-друку** як ключовому напрямку адитивного виробництва, що активно досліджується у світовій науковій літературі. Зважаючи на стрімкий розвиток матеріалів, технологій та цифрових рішень, важливо проаналізувати, **як тематика 3D-друку відображена у сучасних наукових публікаціях**, які напрями досліджень переважають, які виклики обговорюються, та які технологічні рішення пропонуються.

Нижче представлено систематизований огляд наукових і аналітичних джерел, присвячених застосуванню 3D-друку в оборонній, медичній, авіаційній та інших високотехнологічних галузях.

1. НАУКОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ

Результати наукометричного аналізу даних міжнародної бази публікацій Web of Science за видом «3D-друк військового та подвійного призначення»

За напрямом «3D-друк військового та подвійного призначення» з основної колекції Web of Science отримано 30 502 публікації. Більше половини з них доступні у відкритому доступі.

Загальна картина публікацій щодо 3D-друку свідчить про стабільний ріст інтересу до цієї теми упродовж останніх п'яти років. За цей період кількість щорічних публікацій зросла в 1,7 разу – з 4 342 у 2020 році до 7 470 у 2024 році, середній темп зростання склав 14,5% (рис. 1). Це свідчить про значну наукову активність в галузі 3D-друку для військового та подвійного призначення.

У 2023 році спостерігався дещо менший темп зростання порівняно з 2024 роком, проте кількість публікацій залишалася на високому рівні – 6 726 од.

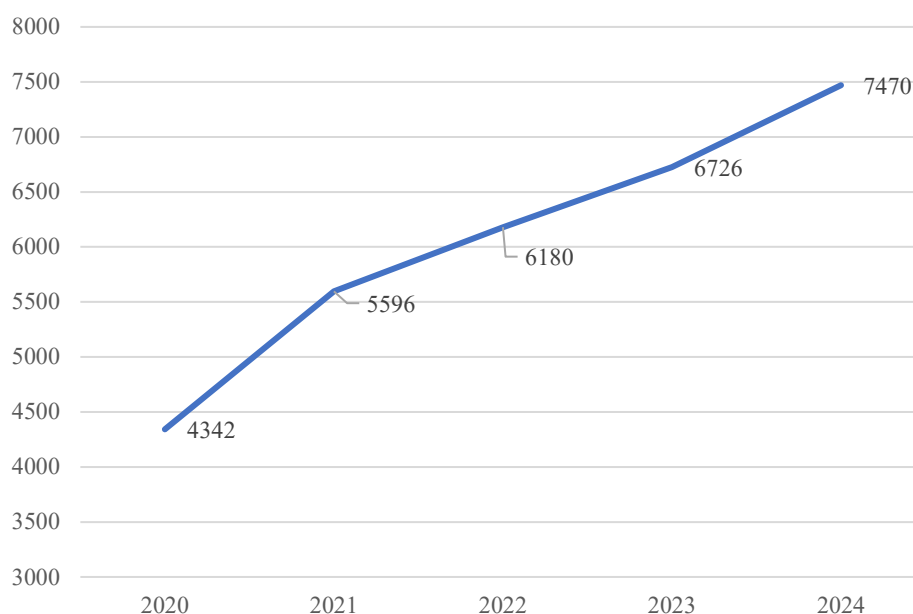


Рис. 1. Динаміка публікаційної активності щодо 3D-друк військового та подвійного призначення у 2020-2024 роках, одиниць

Основні категорії:

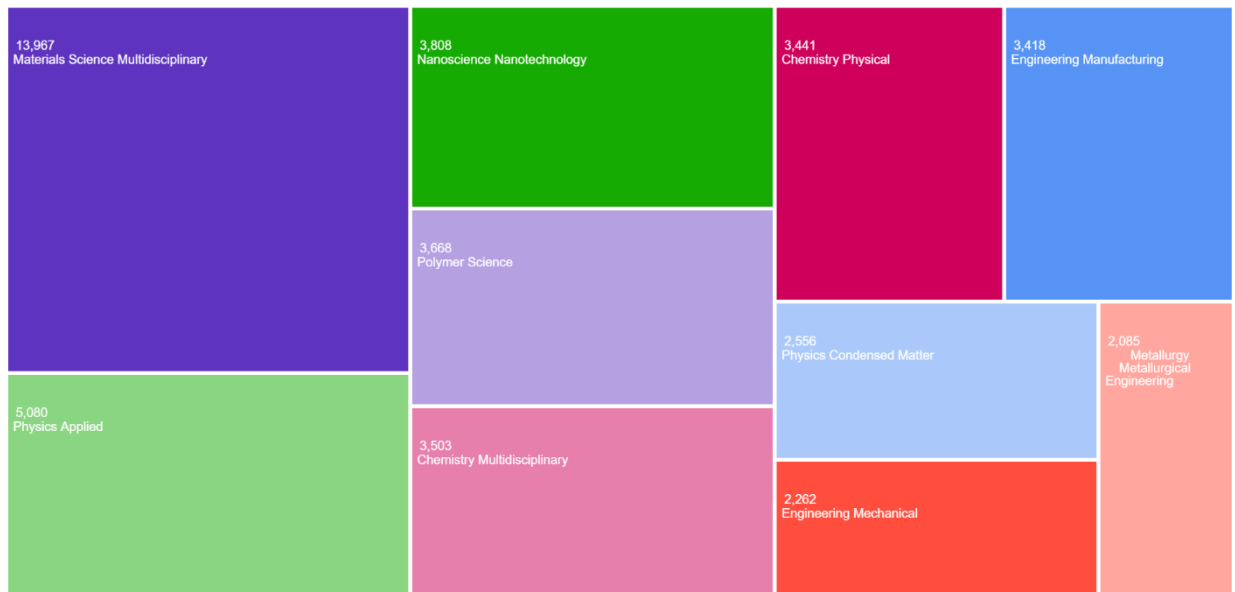


Рис. 2 Галузевий розподіл публікаційної активності

Галузевий розподіл публікаційної активності вказує на те, що адитивне виробництво більше не розглядається виключно як інженерна або прикладна технологія. Натомість воно формує окремий міждисциплінарний напрям, де нові матеріали, їхні хімічні модифікації, мікроструктура, фазові переходи та функціональні властивості досліджуються у тісному зв'язку з технологією друку. Вагома частка публікацій у категоріях фізики конденсованого стану та фізичної хімії свідчить про активне залучення фундаментальних наук до розв'язання прикладних завдань адитивного виробництва. Це також демонструє зростання інтересу до точного контролю властивостей виробів на атомному та молекулярному рівні – особливо актуального для біомедичних, авіаційних і оборонних застосувань.

Помітна присутність інженерно-виробничих дисциплін, зокрема машинобудування, виробничої інженерії та металургійної інженерії, підкреслює важливість адаптації адитивних технологій до реальних умов експлуатації: масштабування процесів, надійності обладнання, оптимізації витрат матеріалу й енергії, а також забезпечення високої якості продукції.

Вищевказаний розподіл публікацій (рис.2) підтверджує системний підхід до 3D-друку як до інноваційної виробничої платформи, де наука, інженерія та цифрові технології тісно інтегруються для створення рішень нового покоління. Є зрушення від вузькоспеціалізованого інженерного підходу до системного науково-технологічного бачення, в якому ключову роль відіграють інноваційні матеріали, цифрова інженерія та обчислювальні методи.

Географічна структура публікацій *за кількістю публікацій*

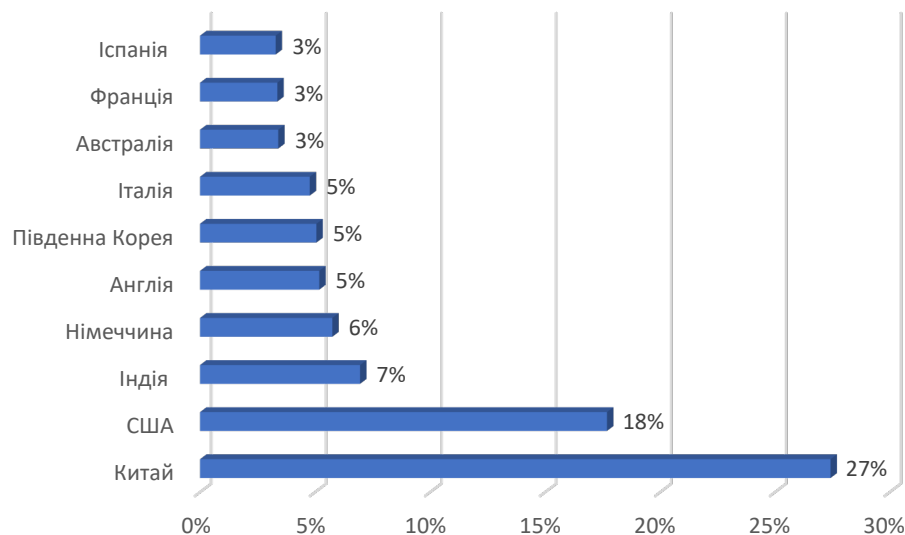


Рис. 3 Топ-10 країн світу за кількістю публікацій, % від загальної кількості

Світовим лідером за кількістю наукових публікацій у галузі 3D-друку є Китай – 8364 публікації, що становить 27% загального обсягу. На другому місці – США (5395 публікацій, 18%), на третьому – Індія (2122, 7%). Це свідчить про стратегічне значення технології для цих країн.

Попри лідерство Китаю та США, 3D-друк є глобальною технологією, яка динамічно розвивається в різних країнах. Німеччина (6%), Велика Британія (5%) та Південна Корея (5%) також демонструють високий рівень наукової активності. Усі ці країни активно розвивають як технології друку, так і нові матеріали для промислових і медичних застосувань.

До ТОП-20 також входять Польща, Канада, Сінгапур, Бразилія, Іран, Японія, Чехія, Швейцарія та Тайвань. Україна, зі 102 публікаціями (0,3%), наразі має обмежену присутність, однак напрям 3D-друку розвивається. Підвищення наукової активності, інвестицій та міжнародної співпраці може значно посилити її позиції;

структура публікацій за інституціями

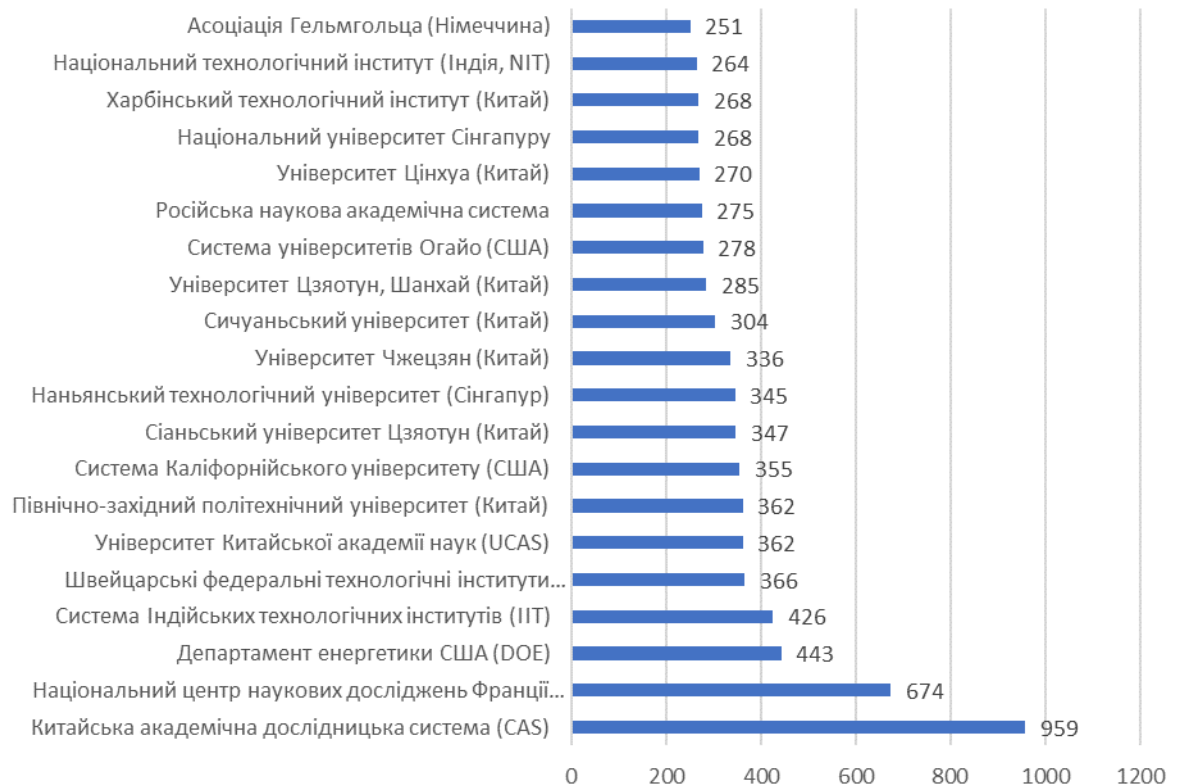


Рис. 4 Топ-20 наукових установ світу за кількістю публікацій

У першій двадцятці наукових установ за кількістю публікацій у сфері 3D-друку вісім позицій займають установи з Китаю, що свідчить про його системне лідерство в цій галузі. Найбільшу кількість публікацій мають структури Китайської академії наук (CAS) – 959 робіт. Друге місце посідає Національний центр наукових досліджень Франції (CNRS) із 674 публікаціями. Далі йдуть Департамент енергетики США (DOE) – 443, Індійські технологічні інститути (IIT) – 426 та Швейцарські федеральні технологічні інститути (ETH/EPFL) – 366 публікацій.

Загалом цей розподіл відображає домінування азійських наукових центрів у розвитку технологій адитивного виробництва за одночасної активної участі провідних західних інституцій. Українські наукові установи наразі не представлені серед лідерів за кількістю публікацій, однак мають потенціал для зростання завдяки розвитку міжнародної співпраці, інтеграції в глобальні дослідницькі мережі та цільовим інвестиціям у наукову інфраструктуру;

структура публікацій за видавцями

Наукові результати у сфері 3D-друку переважно публікуються через міжнародні видавничі платформи, штаб-квартири яких розташовані у США, Великій Британії, Німеччині, Швейцарії та Нідерландах. Ці країни концентрують провідні наукові видавництва, що забезпечують систематичну публікацію та поширення досліджень з адитивного виробництва.

Такий розподіл публікацій відображає міжнародний характер досліджень у сфері 3D-друку та їх міждисциплінарну спрямованість, зокрема на перетині матеріалознавства, інженерії та хімії. За кількістю публікацій у цій тематиці провідні позиції посідають Elsevier (8476 публікацій), MDPI (5300), Wiley (3621), Springer Nature (2200) та American Chemical Society (1800).

Ключові наукові фонди та інвестиції у розвиток 3D-друку

Основними країнами, що інвестують у розвиток 3D-друку, є Китай, США, Велика Британія та країни ЄС. Китай підтримує дослідження через Національний природничий фонд (NSFC), Національну ключову програму розвитку та Фонди фундаментальних досліджень для центральних університетів. У США ключову роль відіграють Національний науковий фонд (NSF) і Департамент охорони здоров'я та соціальних служб, що фінансують наукові та медичні проекти у сфері 3D-друку. Велика Британія має UK Research Innovation (UKRI) та Раду інженерно-фізичних наук (EPSRC), а ЄС підтримує розвиток через власні інноваційні ініціативи.

Корея та Німеччина також фінансують дослідження через свої національні дослідницькі фонди – Національний дослідницький фонд Кореї та Німецький дослідницький фонд (DFG) відповідно.

Загальний огляд показників наукового інтересу

Упродовж останніх п'яти років у сфері 3D-друку військового та подвійного призначення спостерігається стрімке зростання кількості цитувань, що свідчить про посилення уваги наукової спільноти до цієї тематики. Загалом у період з 2020 по 2024 рік кількість цитувань зросла майже у 28 разів – із 5 558 у 2020 році до 157 222 у 2024-му. Середньорічний приріст становив близько 132%, що вказує не лише на розширення обсягу досліджень, а й на високий рівень зацікавленості в їх результатах.

Найінтенсивніше зростання відбулося у 2021 році, коли кількість цитувань збільшилася більш ніж у шість разів порівняно з попереднім роком. У подальші роки темпи приросту дещо знизилися, проте залишалися стабільно високими (табл. 3).

Таблиця 3. Динаміка публікацій та цитувань у галузі 3D-друку військового та подвійного призначення (2020–2024 роки)

Рік	Кількість публікацій	Темп зростання (%)	Кількість цитувань	Темп зростання (%)
2020	4 342	—	5 558	—
2021	5 596	129%	34 729	625%
2022	6 180	110%	72 245	208%
2023	6 726	109%	111 909	155%
2024	7 470	111%	157 222	140%

З урахуванням постійного збільшення кількості публікацій і наявності часової затримки між публікацією наукових результатів та їх активним цитуванням, можна прогнозувати подальше зростання наукової уваги до технологій 3D-друку у військових і суміжних сферах застосування.

Для проведення більш точного аналізу показників наукового інтересу в обіг введено новий комбінованим показник – Індекс наукового впливу, який враховує як кількість публікацій, так і їх цитування. Формула розрахунку:

$$I_{\{н.в.\}} = \sqrt{\{I_{\{п\}} \times I_{\{ц\}}\}}$$

де I_p – індекс публікацій (співвідношення кількості публікацій у 2024 р. до 2020 р.),

I_c – індекс цитувань (співвідношення кількості цитувань у 2024 р. до 2020 р.).

Індекси визначено для кожного ключового слова / піднапряму окремо. Отримані значення згруповано у чотири категорії відповідно до рівня наукового впливу (табл. 4).

Таблиця 4. Класифікація категорій за рівнем наукового впливу

Категорія	Інтервал індексу наукового впливу	Характеристика
Пріоритетні (+++)	$\geq 1500\%$	Висока концентрація публікацій і цитувань, стратегічні напрями розвитку
Перспективні (++)	1000–1499%	Інтенсивний науковий розвиток, формування нових дослідницьких ніш
Середньоперспективні (+)	401–999%	Помірна активність, потенціал технологічного зростання
Малоперспективні (+/-)	$\leq 400\%$	Вузькопрофільні або спадні напрями

Запропонована класифікація дозволяє зіставляти напрями адитивних технологій за рівнем їх наукової активності та цитованості. Для аналізу динаміки розвитку різних напрямів адитивного виробництва індекс наукового впливу було застосовано до основних класів технологій, визначених стандартом ISO/ASTM 52900:2021⁹. Отримані результати наведено в табл. 5.

⁹ ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. International Organization for Standardization / ASTM International. 2021-11. Доступно за посиланням: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>

Таблиця 5. Індекс наукового впливу основних класів технологій АМ (2020–2024)

Клас технології АМ	Індекс наукового впливу
Плавлення в порошковому шарі (Powder Bed Fusion, PBF)	4436,8
Фотополімеризація у ванні (Vat Photopolymerization, VPP)	2226,5
Адитивне наплавлення зі спрямованою енергією (DED)	1131,8
Струменеве нанесення зв'язувальної речовини (Binder Jetting, BJ)	988,3
Екструзія матеріалу (Material Extrusion, MEX)	924
Ламінування листів (Sheet Lamination, SHL)	783,2
Струменеве нанесення матеріалу (Material Jetting, MJT)	734,2

Узагальнюючи результати розрахунку Індексу наукового впливу, можна зробити низку висновків.

Найвищі значення індексу наукового впливу зафіксовано для технології плавлення в порошковому шарі (Powder Bed Fusion, PBF) – 4436,8, що майже вдвічі перевищує показник фотополімеризації у ванні (Vat Photopolymerization, VPP) – 2226,5. Це свідчить про домінування PBF у наукових дослідженнях і прикладних розробках, зокрема завдяки її універсальності під час роботи з металами та сплавами, які мають ключове значення для військових і технологій подвійного призначення (деталі озброєнь, безпілотні системи, елементи турбін, системи тепловідведення тощо).

Друге місце посідає фотополімеризація у ванні (VPP), що характеризується високим рівнем цитованості у сферах прецизійного виготовлення полімерних і композитних компонентів, зокрема для оптичних, сенсорних і біомедичних систем. Це вказує на активне впровадження фотополімерних технологій у суміжні напрями оборонного виробництва, зокрема у створення легких конструкцій і мікроструктурованих деталей.

Далі розташовуються адитивне наплавлення зі спрямованою енергією (Directed Energy Deposition, DED) – 1131,8 та струменеве нанесення зв'язувальної речовини (Binder Jetting, BJT) – 988,3. Ці технології

демонструють стабільно високий науковий інтерес завдяки можливостям ремонту, відновлення та оперативного виготовлення металевих компонентів, що робить їх перспективними для застосування у військовій інфраструктурі.

Екструзійне формування матеріалу (Material Extrusion, MEX) з показником 924 має помірний рівень наукового впливу. Технологія широко використовується для навчальних і дослідницьких прототипів, однак залишається обмеженою щодо виготовлення високонавантажених металевих конструкцій.

Порівняно нижчі значення індексу мають технології ламінування листів (Sheet Lamination, SHL) – 783,2 та струменеве нанесення матеріалу (Material Jetting, MJT) – 734,2. Водночас це не свідчить про їхню низьку значущість: обидві технології активно розвиваються у напрямі створення багатофункціональних матеріалів, зокрема композитів, бронепластин і мікроструктурованих елементів для електроніки та біомедичних застосувань.

Загалом структура індексу наукового впливу відображає нерівномірний розподіл дослідницької активності в галузі адитивного виробництва. Провідні позиції утримують технології порошкового плавлення в шарі та фотополімеризації у ванні, які формують основні напрями розвитку матеріалознавства й оборонної інженерії. Водночас поступове зростання інтересу до технологій енергетичного наплавлення, струменевого нанесення зі зв'язувальним і пошарового формування листового матеріалу свідчить про формування нової хвилі досліджень, орієнтованих на енергоефективні та комбіновані процеси локального виробництва складних систем для потреб військової та подвійної інфраструктури.

Аналіз наукового впливу за класами технологій адитивного виробництва

Для поглибленого розуміння структури наукового інтересу та технологічної зрілості різних класів адитивного виробництва здійснено деталізований аналіз за типами елементів – матеріалами,

пристроями/виробами та процесами/властивостями. (Детальна інформація подана у Додатку 1). Такий підхід дозволяє не лише виявити провідні напрями досліджень, а й зрозуміти, які технологічні рішення визначають інноваційний потенціал кожного класу АМ.

Клас технології: Плавлення в порошковому шарі (Powder Bed Fusion, PBF)

Клас плавлення в порошковому шарі (Powder Bed Fusion, PBF) демонструє стійке зростання наукового інтересу протягом останнього десятиліття, що відображається у значному збільшенні кількості публікацій та цитувань, зокрема у роботі з металевими, керамічними та композитними порошками. До цього класу належать провідні технології: селективне лазерне плавлення (Selective Laser Melting, SHLM), лазерне плавлення порошку в шарі (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) та електроннолучеве плавлення (Electron Beam Melting, EBM), які встановлюють стандарти високоточної обробки матеріалів.

Аналіз динаміки розвитку PBF дозволяє виділити три групи напрямів досліджень – пріоритетні, перспективні та середньоперспективні, що різняться інтенсивністю наукової активності та рівнем технологічної зрілості. Спостерігається чітка тенденція переходу від базових матеріалознавчих досліджень до інтеграції процесів та оптимізації конструкцій, зокрема шляхом підвищення точності, ефективності обробки та стандартизації якості.

Ядро наукового інтересу (індекс >1000) формують напрями, пов'язані з високоентропійними сплавами, аерокосмічними компонентами, біомедичними імплантатами, а також процесами ефективного видалення порошку та післяпроцесної обробки поверхні. Зони потенційного зростання (індекс 500–1000) охоплюють топологічну оптимізацію, реакційне спікання та розробку нових композитів, що забезпечують перехід до наступного покоління промислових рішень на основі PBF.

Технологія порошкового плавлення в шарі залишається ядром досліджень у сфері адитивного виробництва. Її пріоритетні напрями –

високоентропійні сплави, легкі металеві структури та післяпроцесні операції – задають темп розвитку всього сегмента АМ. Перспективні та середньоперспективні дослідження формують навколо PBF екосистему підтримувальних інновацій: від оптимізації порошкових матеріалів до цифрового контролю мікроструктури.

Така багаторівнева структура свідчить, що PBF є найбільш зрілим і водночас динамічним класом технологій, який визначає стратегічні вектори розвитку у військовій, аерокосмічній та енергетичній сферах.

Клас технології: Фотополімеризація у ванні (Vat Photopolymerization, VPP)

Клас фотополімеризації у ванні (VPP) демонструє стабільно високу наукову активність, що зростає у зв'язку з розширенням сфер застосування у біомедичних, оптичних та мікротехнологічних напрямках. Показники індексу наукового впливу свідчать про зрілість основних процесів і апаратних рішень цього класу, тоді як частина нових матеріалів залишається на стадії активних наукових досліджень. Основні тенденції розвитку зосереджені на підвищенні просторової роздільної здатності, точності процесів полімеризації та біосумісності сформованих структур.

Для цього класу характерне поєднання високого рівня технологічної зрілості процесів із поступовим розширенням матеріальної бази. Ядро досліджень (індекс наукового впливу понад 1000) зосереджене навколо технологій цифрової обробки світлом (DLP), безперервного рідинного інтерфейсного виробництва (CLIP), процесів безперервного затвердіння та методів високоточної фотополімеризації, які формують основу промислових застосувань.

Перспективний науково-технологічний резерв становлять адаптивні полімери (гідрогелі, матеріали з ефектом пам'яті форми) та двофотонна полімеризація, що розвиваються у напрямі створення мікрофункціональних і біосумісних структур.

Загальною тенденцією є перехід від класичних фотополімерних систем до розумних, біосумісних і високоточних технологій 4D-друку, що відображає зміщення фокусу з властивостей матеріалів на функціональні характеристики виробів і рівень інтеграції технологічних процесів.

Клас технологій: Адитивне наплавлення зі спрямованою енергією (Directed Energy Deposition, DED)

Клас адитивного наплавлення зі спрямованою енергією (DED, Directed Energy Deposition) демонструє стабільно високу наукову активність, що зростає у зв'язку з розширенням використання цієї технології в авіаційній, енергетичній та оборонній галузях. Сучасні дослідження зосереджені на оптимізації енергетичних параметрів лазерного наплавлення, створенні багатофункціональних шарових структур і підвищенні якості сформованих з'єднань. Показники індексу наукового впливу свідчать про зрілість основних процесів і перехід від дослідницької фази до широкого промислового впровадження.

Для цього класу спостерігається стійке зростання наукового інтересу, спрямоване на підвищення ефективності, екологічності та функціональності технологічних процесів.

Ядро наукової активності (індекс наукового впливу понад 1000) формують напрями сталих порошкових матеріалів, нікель–алюмінієвих (Ni–Al) та титаново–мідних (Ti–Cu) сплавів, технологій лазерного керування процесом наплавлення, розроблення термобар'єрних покриттів і біомедичних імплантатів.

Перспективна зона (індекс 500–1000) зосереджена навколо композитних матеріалів, функціонально-градієнтних систем та моделей формування залишкових напружень, які поступово наближаються до рівня промислової зрілості.

Загальна тенденція полягає у зміщенні фокусу від розроблення базових сплавів до інтегрованих систем DED, у яких ключову роль відіграють

енергоефективність, сталість матеріального циклу та автоматизований контроль мікроструктури.

Клас технології: Струменеве нанесення зв'язувальної речовини (Binder Jetting, BJT)

Клас Binder Jetting (BJT) демонструє стаłe зростання наукового інтересу, особливо у сфері високопористих структур, біомедичних та енергетичних застосувань. Динаміка цитувань і публікацій свідчить про перехід технології від етапу лабораторних експериментів до поглибленої оптимізації матеріалів, процесів і властивостей. Аналіз структури досліджень дозволяє виокремити три рівні пріоритетності – пріоритетні, перспективні та середньоперспективні напрями, що відображають зрілість технологічної бази й темпи наукового розвитку.

Для цього класу характерне поступове зміщення акценту від розробки матеріалів до контролю процесів спікання, щільності та мікроструктури, що свідчить про перехід до етапу технологічного вдосконалення. Ядро наукового інтересу формують напрями керамічних і склокерамічних матеріалів, біомедичних виробів (зокрема стоматологічних реставрацій) та енергетичних елементів (SOFC, теплоізоляційні структури). Зони потенційного зростання охоплюють оптимізацію зв'язувальної хімії, низькотемпературне спікання і стабілізацію механічних властивостей.

Клас технології: Екструзія матеріалу (Material Extrusion, MEX)

Клас Екструзія матеріалу демонструє стабільне зростання наукового інтересу протягом останніх років, що підтверджується високими значеннями індексу наукового інтересу для широкого спектра матеріалів, апаратних рішень і технологічних процесів. У межах цього класу спостерігається активне розширення дослідницьких напрямів – від гідрогелів і армованих полімерів до біоелектроніки та функціональних структур із пам'яттю форми.

Загальною характеристикою цього класу є чіткий перехід від дослідження базових матеріалів до створення складних функціональних виробів із покращеними експлуатаційними властивостями, що забезпечують

їх інтеграцію у високотехнологічні системи – від тканинної інженерії до м'якої робототехніки. Пріоритетні напрями (індекс наукового інтересу понад 1000) формують ядро сучасних досліджень, тоді як перспективні зони (500–1000) відображають активний розвиток і створюють підґрунтя для майбутніх проривів у сфері біоадаптивних і розумних матеріалів.

Клас технології: Ламінування листів (Sheet Lamination, SHL)

Клас Sheet Lamination (SHL) демонструє помітне зростання наукового інтересу упродовж останнього десятиліття, особливо у сфері гібридних композитів, електронних структур і функціональних матеріалів. Цей клас характеризується поєднанням шарових процесів із цифровими методами з'єднання, що розширює його можливості у створенні багатофункціональних систем. Аналіз динаміки дозволяє виділити три рівні технологічних напрямів – пріоритетні, перспективні та середньоперспективні, що відображають як інтенсивність наукової активності, так і рівень технологічної зрілості.

Для класу SHL спостерігається зсув фокусу від розробки матеріалів до інтеграції електронних і функціональних властивостей у багат шарові структури. Основні тренди розвитку визначаються високими показниками у напрямках електро- та теплопровідності, гібридного з'єднання й цифрової оптимізації дизайну, що свідчить про перехід SHL від допоміжного до інтелектуального виробничого класу.

Зони потенційного зростання включають:

- багатоматеріальні системи з керованою інтерфейсною провідністю,
- екологічні ламінати для електроніки та пакування,
- масштабування гібридних процесів із використанням полімерів і функціональних композитів.

Клас технології: Струменеве нанесення матеріалу (Material Jetting, MJT)

Цей технологічний клас демонструє стабільне зростання наукової активності, зокрема у сфері створення функціональних матеріалів для

енергонакопичення, гнучкої електроніки та сенсорних систем. Технологія струменевого нанесення матеріалів активно використовується для формування складних мікроструктур, тонкоплівкових шарів і провідних елементів, що поєднують механічну гнучкість і високу електрохімічну стабільність. Науковий інтерес концентрується навколо напрямів, які можна класифікувати за трьома рівнями – пріоритетні (>1000), перспективні (500–1000) та середньоперспективні (200–500), що дозволяє простежити еволюцію MJT від лабораторних досліджень до промислових застосувань.

Для цього класу характерна концентрація досліджень навколо енергетичних і сенсорних застосувань – зокрема, струменевого друку Zn-ion батарей, суперконденсаторів та роботизованих «електронних шкір». Найвищу наукову активність (>1000) демонструють напрями, пов'язані з іонним транспортом, наноструктурованими електродами та гнучкими носіями струму.

Перспективна група (500–1000) формує основу для комерціалізації гнучких батарей, провідних чорнил і сенсорних платформ. Середньоперспективні напрями (200–500) забезпечують технологічну підтримку через покращення плівкових процесів (CVD, ALD, металізація) і стабілізацію властивостей.

У підсумку MJT еволюціонує від технології «структурного нанесення» до платформи функціонального мікродруку для енергоємних і біоінтегрованих систем, що робить її одним із найдинамічніших напрямів у сучасному АМ-дослідженні.

2. ПАТЕНТНИЙ АНАЛІЗ

Загальний огляд патентування

Технології 3D-друку та адитивного виробництва пройшли тривалий шлях становлення – від поодиноких експериментів і лабораторних розробок у 2000-х роках до масштабного промислового впровадження. Перші патентні заявки у цій сфері були зафіксовані ще в середині 2000-х, коли формувалися базові принципи пошарового нанесення матеріалів і створювалися перші полімерні композиції для друку. Протягом 2004–2018 років активність залишалася низькою, у цей період було зареєстровано лише 599 патентів, що відображало етап накопичення знань і пошуку технологічних рішень.

Починаючи з 2019 року, ситуація докорінно змінюється – технологія переходить з експериментальної площини у фазу широкого науково-технічного та комерційного розвитку. За даними бази Derwent Innovation (Clarivate Analytics), загальна кількість патентів у сфері адитивних технологій перевищила 57 тисяч, з яких понад 49 тисяч було зареєстровано у 2020–2024 роках ($\approx 86\%$ усіх реєстрацій за два десятиліття). Саме цей період визначив формування зрілого ринку адитивних технологій, на якому конкурують провідні індустріальні компанії, стартапи та науково-дослідні центри.

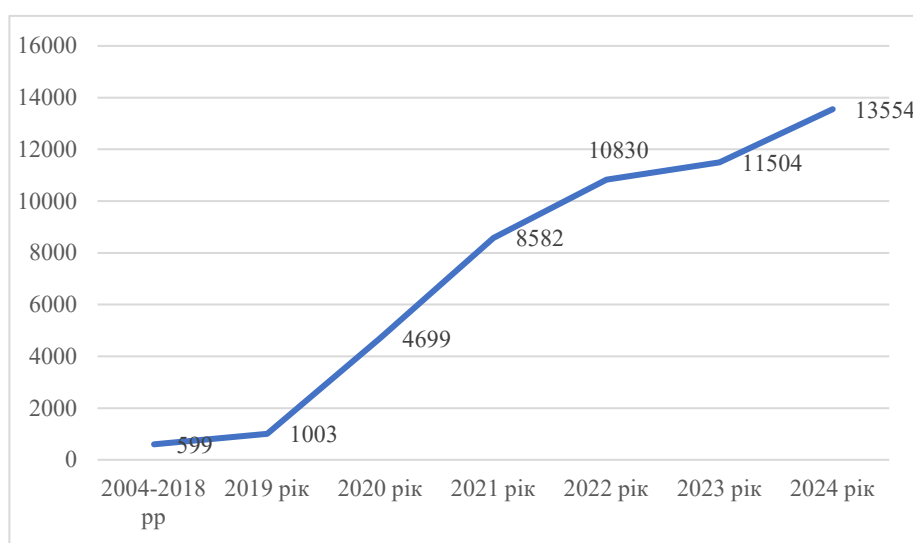


Рис. 5 Динаміка кількості патентів за напрямом «Технології 3Д-друку та Адитивного виробництва» у 2004–2024 рр., од.

Різке посилення патентної активності свідчить про перехід до системного розвитку галузі – розширюються напрями досліджень, удосконалюються властивості матеріалів, зростає інтерес до металевих, композитних і біосумісних складів. У цей час активно інтегруються цифрові рішення – штучний інтелект, моделювання процесів, автоматизований контроль якості, що робить 3D-друк невід’ємною частиною нової виробничої парадигми.

Фактично, 2020–2024 роки стали переломним етапом у розвитку адитивних технологій, коли наукові розробки переросли у масштабні промислові практики. Зростання кількості патентів у цей період відображає не лише технологічну зрілість галузі, а й стратегічну орієнтацію світової економіки на інновації, сталий розвиток і цифрову трансформацію виробництва.

Основні патентоволодільці

Аналіз структури патентування свідчить, що у сфері 3D-друку провідні позиції посідають як великі транснаціональні корпорації, так і численні університети, насамперед з Китаю. Хоча серед індивідуальних чи малих заявників зафіксовано понад 53 тисячі патентів із загальної кількості 57 тисяч, у глобальному лідерстві все ж виокремлюються кілька потужних центрів.

Hewlett Packard Development Company утримує помітну перевагу серед корпоративних гравців, значно випереджаючи General Electric, Siemens і Boeing за кількістю патентів. Ці компанії представляють промислову й комерційну складову галузі, зосереджену на застосуванні 3D-друку у виробництві складних технічних систем, машинобудуванні та високоточному обладнанні.

Водночас більшість позицій у топ-20 заявників займають китайські університети та дослідницькі інститути – Сіаньський, Нанкінський, Харбінський, Хуачжунський, Цзілінський, Чжецзянський, а також університети Шанхаю, Січуані, Центрального Півдня та ін. Загалом 11 із 20 провідних заявників походять із Китаю.

Різниця між університетським і корпоративним патентуванням є принциповою. Якщо університети демонструють дослідницький і експериментальний характер розвитку галузі, спрямований на пошук нових матеріалів і процесів, то великі корпорації концентруються на комерціалізації та масштабуванні вже апробованих технологій. Таким чином, сучасна структура заявників у 3D-друку відображає баланс між наукою та індустрією – між лабораторним пошуком і промисловим впровадженням.

Географія патентування та ринки застосування

Географічний розподіл патентів у сфері 3D-друку і адитивного виробництва також демонструє чітке домінування Китаю, на який припадає понад 67% усіх патентів. Китай утримує позицію глобального центру розвитку адитивних технологій, поєднуючи масштабні університетські дослідження з активністю промислових корпорацій. США посідають друге місце з часткою близько 11%, що підтверджує значний внесок американських компаній та інженерних шкіл у розбудову світового ринку 3D-друку (рис. 6). Серед країн Азії вагомі позиції займають Республіка Корея та Японія, які стабільно демонструють високий рівень технологічної зрілості.

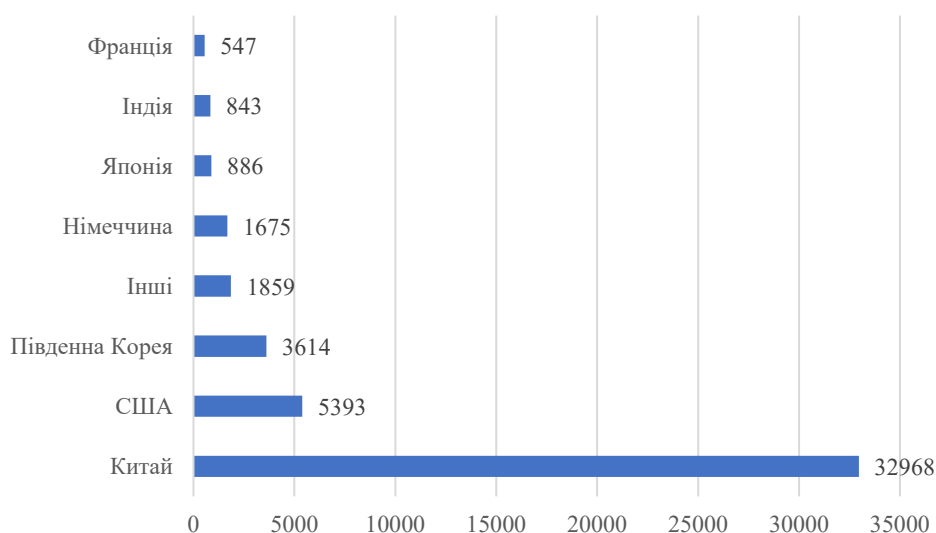


Рис. 6 Країни-лідери за кількістю патентів за напрямом «Технології 3D-друку та Адитивного виробництва» у 2024 р., од.

У Європі найбільш активними є Німеччина, Франція, Польща, Іспанія та Велика Британія, тоді як Канада, Австралія, Індія, Бразилія, Мексика, Ізраїль і Сінгапур формують помітний, проте менш масштабний сегмент інноваційної активності.

В Україні зареєстровані поодинокі патенти у сфері 3D-друку, які всі мають статус чинних охоронних документів. Це свідчить про наявність науково-технологічної активності та прагнення українських розробників інтегруватися у глобальний ринок інновацій.

У цілому, ринок адитивних технологій перебуває у фазі стрімкого розширення, з чітко вираженим провідним впливом азійського регіону, високою динамікою подання нових заявок і формуванням міжнародних патентних портфелів, що відображає зростаючу конкуренцію та відкриває простір для нових учасників.

Технологічні тенденції та динаміка розвитку

Аналіз ключових технологічних напрямів свідчить про зростаючу концентрацію інновацій навколо базових технологій адитивного виробництва, зокрема таких як тривимірний друк, порошкові матеріали, композити, смоли, метали та сплави. Ці групи ключових слів охоплюють понад 57% усіх патентів, що вказує на відносно високу ступінь технологічного насичення галузі та формування сталих домінант у сфері розробок.

Найактивніше зростання фіксується за класифікацією “Тривимірний, адитивний, друк, матеріал, об’єкт, порошок”, яка стабільно нарощувала кількість реєстрацій – у середньому на понад 340 патентів щороку – і досягла піку у 2024 році. Це свідчить про перехід галузі до фази технологічного розквіту, коли розробки перетворюються з експериментальних рішень на промислові стандарти.

Цікавим є період 2019 року, який вважається етапом найбільшої технологічної різноманітності, коли у патентному полі одночасно були представлені практично всі основні напрями – від формування об’єктів зі смол

і порошків до створення композитних структур і нових сплавів. Це стало своєрідною точкою розгалуження технологічної еволюції, після якої ринок поступово сфокусувався на найефективніших і наймасовіших рішеннях.

Технологічна класифікація (IPC)

Структура Міжнародної патентної класифікації (IPC) свідчить про високу концентрацію інновацій у ключових виробничих напрямках адитивних технологій. Найбільшу частку становлять патенти з позначенням B33Y – клас, що безпосередньо охоплює адитивне виробництво та тривимірний друк. Його присутність у понад 30 тисячах документів відображає системне формування самостійного технологічного сектору в межах сучасного машинобудування (табл. 6).

Таблиця 6. Технологічна класифікація (IPC) патентів у сфері 3D-друку¹⁰

Клас IPC	Назва / Галузь застосування	Основні підкласи	Ключовий зміст / фокус інновацій	Кількість патентів
B33Y	Адитивне виробництво, 3D-друк	B33Y10/00, B33Y30/00, B33Y40/00, B33Y50/02, B33Y70/00, B33Y70/10	Процеси створення тривимірних об'єктів, обладнання, матеріали, керування процесом	30 087
B29C	Адитивне формування полімерних матеріалів	B29C64/393, B29C64/209, B29C64/386, B29C64/245, B29C64/118	Екструзія, пошарове формування, полімерна подача матеріалу, формування полімерів для 3D-друку	17 570
B22F	Порошкова металургія (включно з адитивними методами)	B22F001/028	Технології металевих порошків, синтез сплавів, виготовлення деталей із порошкових матеріалів	9 882

¹⁰ Слід зазначити, що в наведеній класифікації поряд із класами IPC, які безпосередньо описують процеси адитивного виробництва, також включено класи, орієнтовані на матеріалознавчі аспекти (зокрема C08L/C08K, C22C, C04B). Вони не регламентують технологічні процеси 3D-друку, однак охоплюють розробку матеріалів і композицій, спеціалізованих для застосування в адитивних технологіях.

Клас IPC	Назва / Галузь застосування	Основні підкласи	Ключовий зміст / фокус інновацій	Кількість патентів
C08L / C08K¹¹	Полімерні композиції, добавки, модифікатори	—	Нові рецептури полімерів, композити, покращення властивостей для друку	3 027 / 2 231
C04B	Керамічні та цементні матеріали	—	Формування та твердіння матеріалів для 3D-друку у будівництві	2 524
C22C	Металеві сплави	—	Розробка спеціалізованих сплавів для адитивних технологій	2 311
B23K	Лазерні та дугові процеси, інтегровані в адитивні технології (DED, WAAM)	—	Лазерні та термічні методи обробки при друці металів	2 449
B28B	Вироби з мінеральних / керамічних матеріалів	B28B1/00	Адитивні технології для цементних і керамічних структур	1 528
G06F	Обробка даних, цифрове керування	—	Комп'ютерне моделювання, автоматизація, цифровий контроль процесів друку	2 072

Значний обсяг патентів припадає також на класи B29C (адитивне формування полімерів), B22F (порошкова металургія) та суміжні матеріальні класи C08L і C08K, що охоплюють полімерні композиції та добавки. Сукупно ці напрями відображають матеріальну основу адитивних процесів – розробку полімерів, металевих порошків і композитів, оптимізованих для 3D-друку. Помітна частка інновацій зосереджена також у класах C04B (цементно-керамічні матеріали), C22C (металеві сплави) та B23K, який відображає використання лазерних і термічних процесів у металевих адитивних технологіях. Це свідчить про розширення застосування адитивного виробництва у металургії, будівництві та важкому машинобудуванні.

¹¹ Об'єднано суміжні класи, що спільно описують матеріальні рецептури для АМ.

Після розгляду структурної класифікації патентів за Міжнародною патентною системою (IPC) доцільно перейти до аналізу технологічних напрямів, що визначають практичну динаміку розвитку адитивного виробництва.

Технологічна динаміка основних класів адитивного виробництва

Аналіз патентної активності за 2020–2024 роки свідчить про стале зростання всіх ключових технологічних напрямів адитивного виробництва. Найбільш динамічно розвивалися спікання порошкового шару (Powder Bed Fusion, PBF) та екструзія матеріалу (Material Extrusion, MEX) – саме ці технології формують основу промислового 3D-друку. Зростання кількості патентів у понад три рази вказує на інтенсивну конкуренцію у сфері високоточного виготовлення деталей із полімерних та металевих матеріалів (рис. 7).

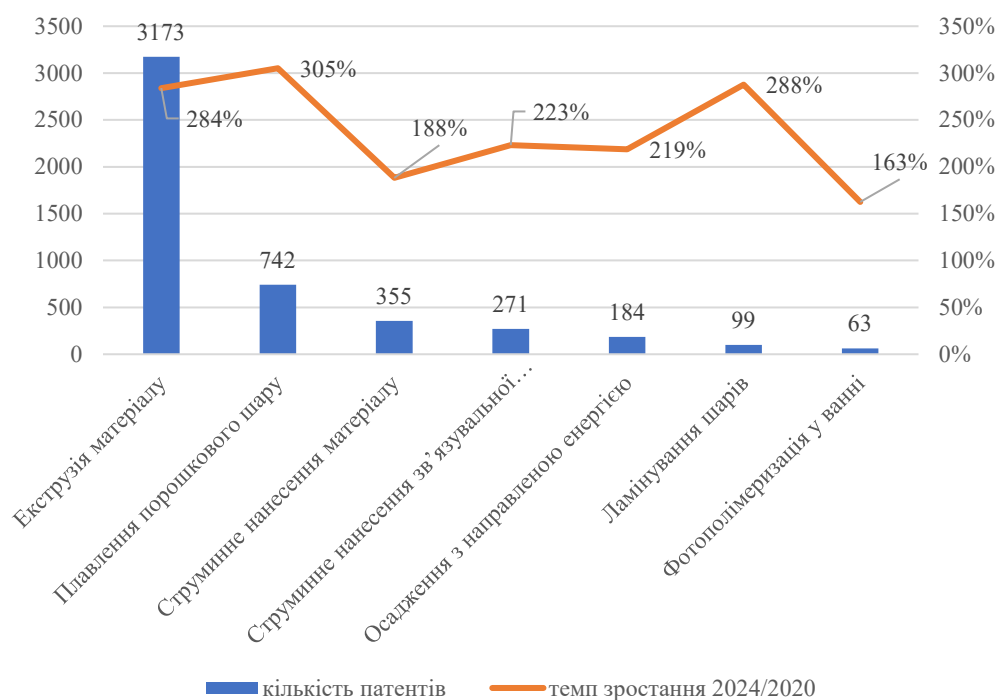


Рис. 7. Кількість патентів і темпи зростання за основними технологічними класами адитивного виробництва, 2020–2024 рр.

Аналітична інтерпретація патентної активності за класами адитивних технологій

Методологічні засади

Для зіставлення технологічних напрямів адитивного виробництва із динамікою патентної активності проведено емпіричне зіставлення класів адитивного виробництва із кодами Міжнародної патентної класифікації (МПК) (табл. 7) .

Період дослідження: 2020–2024 рр.

Індекс зростання: 2024/2020 (%).

Таблиця 7. Оцінювання за трирівневою шкалою

Категорія	Інтервал індексу патентної активності	Положення на ландшафтній карті
Пріоритетні (+++)	переважно $\geq 200\%$ або такі, що виконують базову чи системоутворювальну роль у АМ-екосистемі незалежно від абсолютного індексу зростання	$\geq 75\%$ патентів розміщені у блакитних і зелених зонах (висока новизна)
Перспективні (++)	100–199%	$\geq 75\%$ патентів у зонах інноваційної активності
Середньоперспективні (+)	$\leq 99\%$	Патентна активність розпорошена, експериментальний етап

Категоризація технологічних напрямів ґрунтується на інтегральній оцінці, що поєднує динаміку патентної активності, абсолютний обсяг патентів і системну роль технологій у структурі адитивного виробництва (табл. 8).

Як видно із таблиці 8:

- усі технологічні напрями адитивного виробництва демонструють зростання патентної активності у 2020–2024 роках на рівні понад 100%, що свідчить про відсутність спадних трендів і загальну високу інноваційну динаміку АМ-сектора за різної інтенсивності між окремими сегментами;

- галузь перебуває у фазі активного розширення та масштабування технологій, що відображає перехід від експериментального використання до формування стійких виробничих і матеріальних платформ;
- до пріоритетних або близьких до пріоритетних (+++) напрямів належать PBF, VPP, BJT, гібридне та багатоматеріальне АМ, а також аналітичні й допоміжні процеси; ці сегменти характеризуються високими темпами зростання та формуванням зрілих технологічних екосистем;
- напрям MEX займає проміжне положення між пріоритетним і перспективним (+++ / ++), що зумовлено широкою матеріальною базою, масштабованістю та різною глибиною технологічної спеціалізації;
- до перспективних напрямів (++) належать DED, MJT та SHL, які демонструють стійке зростання й орієнтацію на нішеві або процесно-специфічні застосування (ремонт, багатоматеріальність, композитні структури);
- відсутність окремої групи середньоперспективних (+) напрямів свідчить не про насичення ринку, а про загальну високу інтенсивність розвитку більшості технологічних сегментів АМ;
- основні вектори розвитку адитивного виробництва зосереджені на удосконаленні матеріалів, гібридизації процесів, цифровому керуванні та інтеграції АМ у виробничі ланцюги.

Таблиця 8. Аналітичне мапування класів МПК на технологічні напрями адитивного виробництва (АМ)

Технологічний напрям АМ (виправлено)	Типові класи МПК (асоціативно)	Аналітична роль класів МПК	Логіка віднесення	Роль	Динаміка 2020–2024	Категорія	Інтерпретація
Плавлення в порошковому шарі (PBF)	B33Y, B22F, C22C, C04B	Процеси АМ; порошкова металургія; сплави; неорганічні матеріали	Класи охоплюють базові процеси адитивного плавлення порошків і матеріальну основу металевого АМ	Матеріаль но- процесна	Висока ($\approx +230\text{--}300\%$)	+++	Формування високорозвиненої технологічної платформи металевого АМ з акцентом на порошкові матеріали та лазерне або електронно-променеве плавлення.
Екструзія матеріалу (MEX)	B29C, C08L, C08K, C08F, C08G	Адитивне формування полімерів; композиції; модифікація властивостей	Відображає полімерні матеріали та процеси, критичні для екструзійного адитивного виробництва	Матеріаль на	Висока ($\approx +180\text{--}300\%$)	+++ / ++	Домінуючий за кількістю застосувань і матеріалів напрям полімерного АМ з активною матеріальною диверсифікацією та масштабованістю.
Фотополімеризація у ванні (VPP)	B33Y, B29C, C08F, C08G	Процеси АМ; фотополімерні смоли; УФ-затвердіння	Поєднання адитивних процесів із хімією фотополімерних систем	Матеріаль но- процесна	Висока ($\approx +270\text{--}280\%$)	+++	Швидке зростання сегмента фотополімерів, орієнтованого на високу точність та розвиток функціоналізованих фотополімерів.
Адитивне наплавлення зі спрямованою енергією (DED)	B23K, B33Y, C22C	Лазерні, електронно-променеві та дугові процеси; АМ-процеси; спеціалізовані сплави	Класи відображають одночасне кероване введення матеріалу та спрямованої енергії для	Процесна	Помірно висока ($\approx +170\text{--}250\%$)	++ / +++	Розвиток процесно орієнтованого металевого АМ для ремонту, наплавлення та гібридних виробничих операцій.

Технологічний напрям АМ (виправлено)	Типові класи МПК (асоціативно)	Аналітична роль класів МПК	Логіка віднесення	Роль	Динаміка 2020–2024	Категорія	Інтерпретація
			формування металевих структур				
Струменеве нанесення зв'язувальної речовини (BJT)	B22F, C04B, B33Y	Порошкові матеріали; неорганічні системи; АМ-процеси	Віднесення базується на формуванні об'єктів шляхом зв'язування порошків без стадії плавлення	Матеріаль но- процесна	Висока ($\approx +230\text{--}300\%$)	+++	Зростаючий інтерес до масштабованого формування деталей із подальшою термічною або інфільтраційною обробкою.
Струменеве нанесення матеріалу (MJT)	B41J, C09D, B33Y	Струменеві системи; функціональні матеріали; АМ-процеси	Поєднання струминних технологій із фотополімерними та іншими функціональними матеріалами через контрольоване краплинне дозування	Матеріаль но- процесна	Помірна ($\approx +100\text{--}200\%$)	++	Нішевий напрям із фокусом на багатоматеріальні та функціональні полімерні системи.
Ламінування листів (SHL)	B32B, B33Y	Шарові композити; АМ-процеси	Формування об'єктів шляхом послідовного з'єднання вирізаних	Структур на	Помірна ($\approx +180\text{--}210\%$)	++	Стабільний, але обмежений сегмент для композитних і конструкційних застосувань.

Технологічний напрям АМ (виправлено)	Типові класи МПК (асоціативно)	Аналітична роль класів МПК	Логіка віднесення	Роль	Динаміка 2020–2024	Категорія	Інтерпретація
			листових матеріалів				
Гібридне та багатоматеріальне адитивне виробництво	G06F, G06T, H01L, H05K	Цифрове керування; моделювання; інтеграція електроніки	Класи відображають інтеграцію АМ із цифровими, сенсорними та електронними системами на рівні керування, функціоналізації та вбудованих компонентів	Системна	Висока ($\approx +220\text{--}290\%$)	+++	Формування міждисциплінарних рішень над базовими АМ-технологіями на стику АМ, електроніки та цифрового виробництва
Аналітичні та допоміжні процеси адитивного виробництва	G01N, B28B	Контроль якості; підготовка матеріалів	Підтримувальні процеси, необхідні для стабільності та відтворюваності АМ	Інфраструктурна	Висока ($\approx +200\text{--}350\%$)	+++	Зростання ролі контролю якості, матеріалознавства та передвиробничих операцій у ланцюгах АМ.

Динаміка патентної активності всередині класів технологій адитивного виробництва

Як було зазначено, інноваційна активність зростає практично у всіх ключових класах АМ. За інтегральним показником (2024/2020), п'ять із семи класів перевищують поріг у 200%, що дозволяє віднести їх до пріоритетної категорії (+++), тобто з високою концентрацією патентів у зонах технологічної новизни (блакитних і зелених зонах патентного ландшафту).

Найвищу динаміку продемонстрував клас спікання в порошковому шарі (Powder Bed Fusion, PBF) – 305% при 742 патентах. Це свідчить про активний розвиток технологій лазерного та електронно-променевого спікання порошкових матеріалів, що залишаються провідними у виробництві високоточних металевих деталей.

Суттєве зростання також спостерігається у класі екструзія матеріалу (Material Extrusion, MEX) – 284% при 3173 патентах. Цей напрям демонструє найбільшу кількість заявок, що підтверджує його провідне місце у структурі світового адитивного виробництва, зокрема в сегменті промислових і настільних 3D-принтерів.

До пріоритетної групи (+++) належать і технології пошарового ламінування (Sheet Lamination, SHL) – 288% – струминного зв'язування порошку (Binder Jetting, BJT) – 223%. Вони демонструють зростаючу активність у галузях комбінованих матеріалів, гібридного виробництва та прототипування.

Показник 219% у класі осадження матеріалу енергією (Directed Energy Deposition, DED) також підтверджує високий рівень інноваційності та потенціал для застосування у відновленні та ремонті металевих компонентів великої складності.

Дещо нижчі темпи зростання зафіксовано у класі струминного нанесення матеріалу (Material Jetting, MJT) – 188%, який належить до перспективної категорії (++). Цей напрям залишається важливим для

високоточного друку полімерів, фотополімерів і біоматеріалів, хоча темпи патентної активності дещо поступаються більш масовим технологіям.

Найнижчий показник серед проаналізованих класів має фотополімеризація у ванні (Vat Photopolymerization, VPP) – 163% при 63 патентах, що також відповідає перспективній категорії (++). Незважаючи на відносно нижчий індекс зростання, ця технологія залишається базовою для точного формування полімерних моделей та у сфері біоінженерії.

Загалом, за результатами аналізу, переважна більшість класів адитивних технологій належать до пріоритетної зони (+++), що свідчить про активне технологічне оновлення, зростання кількості інноваційних рішень і розширення можливостей застосування АМ-технологій у різних галузях промисловості.

Узагальнені висновки

Аналітичне дослідження патентної активності у сфері адитивних технологій охопило два взаємодоповнювальні рівні аналізу – профіль за кодами Міжнародної патентної класифікації (МПК) та структурований аналіз за технологічними класами АМ. Такий підхід дозволив поєднати кількісну оцінку патентної динаміки з технологічною інтерпретацією процесів розвитку у галузі.

Результати аналізу показали високу кореляцію між зростанням патентної активності за кодами МПК і розвитком відповідних технологічних напрямів АМ. Найбільш динамічні коди (B22F, B29C, C08F, C08G, C04B, H05K, G06F) відображають ті ж тенденції, що й пріоритетні класи адитивного виробництва – Powder Bed Fusion (PBF), Material Extrusion (MEX), Binder Jetting (BJT) та Hybrid АМ. Це підтверджує надійність МПК-профілю як аналітичного індикатора технологічних трендів у 3D-друці.

За період 2020–2024 років усі основні класи адитивних технологій продемонстрували стійке зростання інноваційної активності, при цьому кілька з них показали приріст понад 200% за індексом (2024/2020), що свідчить про

їхню належність до пріоритетних або близьких до пріоритетних категорій розвитку. Зокрема, PBF продемонстрував найвищі темпи зростання завдяки розвитку технологій лазерного та електронно-променевого плавлення металів. MEX утримує позицію найбільш масового напрямку та займає проміжне положення між пріоритетною (+++) і перспективною (++) категоріями залежно від матеріальної та технологічної спеціалізації. Технології VJT і Hybrid AM демонструють посилення ролі масштабованих і гібридних рішень, тоді як DED залишається стратегічно важливим напрямом для ремонту, відновлення та гібридного формування металевих компонентів.

До перспективної категорії (++) віднесено технології Material Jetting (MJT) та Sheet Lamination (SHL), що перебувають на етапі розширення сфер застосування й технологічного вдосконалення. Відсутність виокремленої групи середньоперспективних (+) напрямів свідчить про загалом високу інтенсивність розвитку більшості сегментів адитивного виробництва.

Таким чином, узагальнений аналіз підтверджує, що структура патентної активності за кодами МПК точно відтворює динаміку розвитку технологічних класів АМ. Поєднаний підхід «МПК-профіль + класифікація АМ» може розглядатися як ефективний інструмент стратегічного моніторингу інновацій у сфері адитивних технологій, що фіксує високу фазу інноваційного зростання галузі та формування чітко окреслених зон пріоритетного розвитку.

Ландшафтні карти

Ландшафтні карти всіх технологій і технологічних піднапрямів, наведених на рис. 8-16 свідчать, що існує значний потенціал для патентування в означених сферах.



Рис. 8. Ландшафтна карта за напярм «Powder Bed Fusion (PBF)»



Рис. 9. Ландшафтна карта за напярм Vat Photopolymerization (VPP)



Рис. 10. Ландшафтна карта за напрямом C08J (один з елементів класу Матеріальне екструдкування (MEX))



Рис. 11. Ландшафтна карта за напрямом B01D (один з елементів класу Зв'язувальне струменеве друкування (BJT))

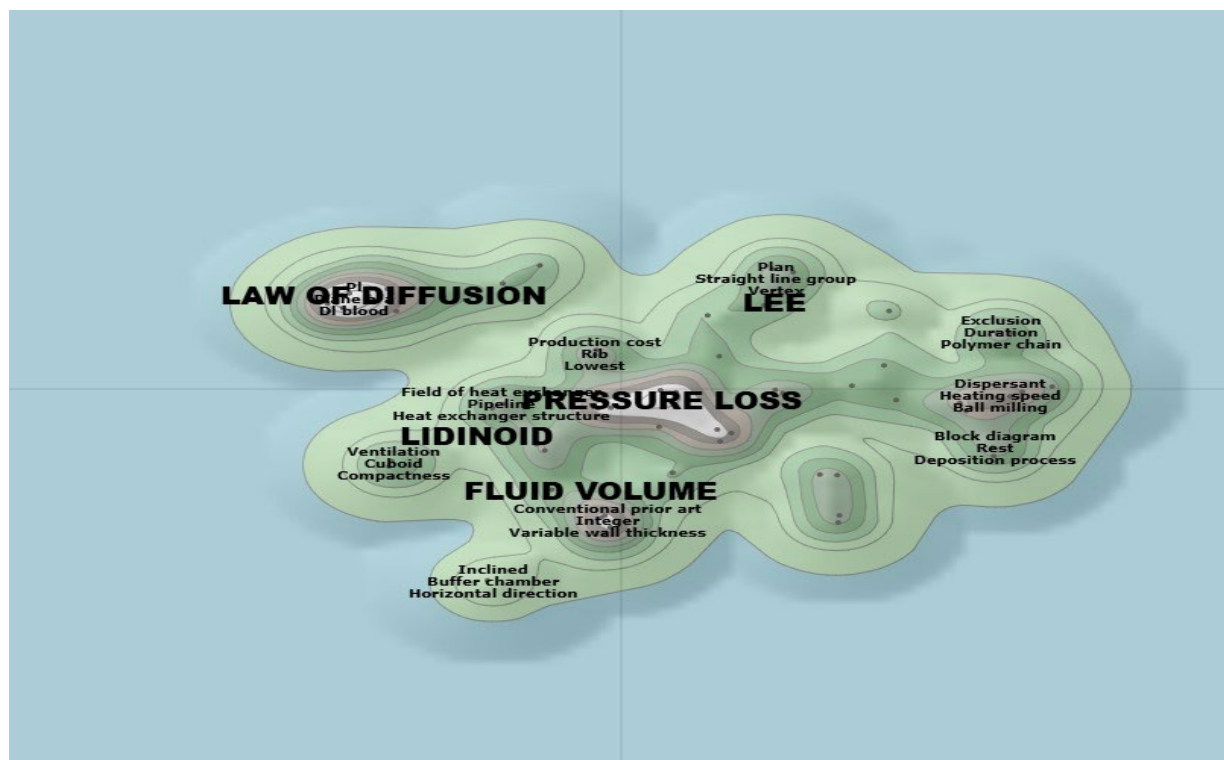


Рис. 12. Ландшафтна карта за напрямом Triply periodic minimal surface (TPMS)



Рис. 13. Ландшафтна карта за напрямом Hydrogel

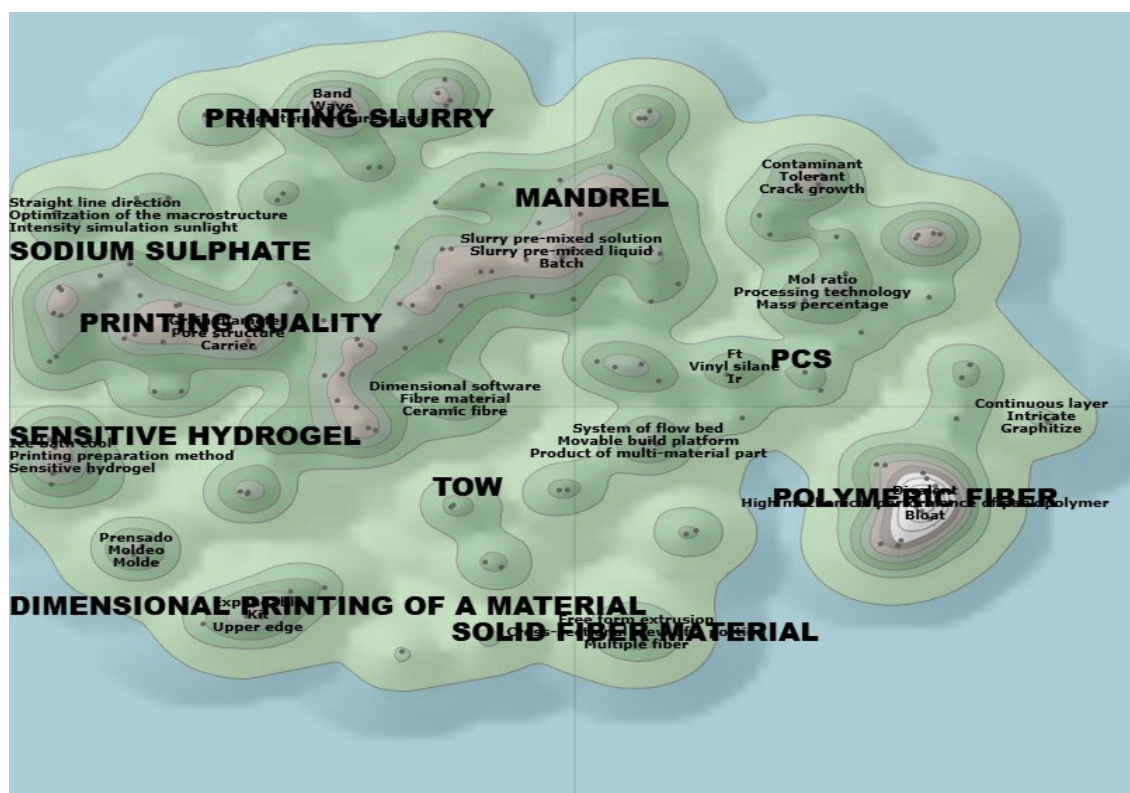


Рис. 14. Ландшафтна карта за напрегом Ceramic-matrix



Рис. 15. Ландшафтна карта за напрегом Printed Batteries

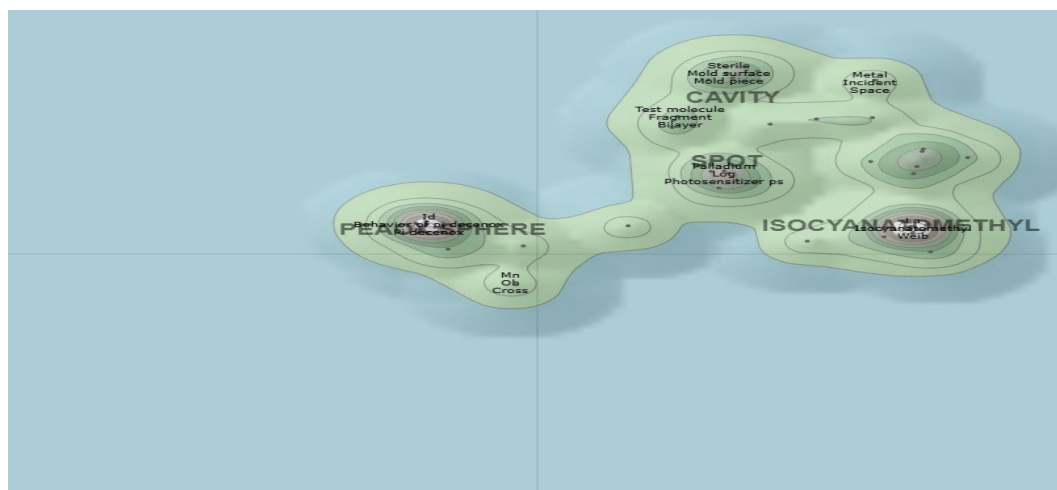


Рис. 16. Ландшафтна карта за напрямом 2-photon polymerization

3. ІНТЕГРОВАНІЙ АНАЛІЗ НАУКОМЕТРИЧНИХ І ПАТЕНТНИХ ДАНИХ

Комплексний аналіз розвитку адитивних технологій здійснювався шляхом поєднання результатів наукометричного та патентного досліджень. Такий підхід дозволив співставити наукову динаміку (рівень академічної уваги, тематику досліджень, цитованість) із технологічною (практичне впровадження, патентна активність, галузеві тренди).

Порівняння цих двох масивів даних забезпечує цілісне уявлення про інноваційний цикл у сфері адитивного виробництва – від фундаментальних досліджень до комерційного застосування.

Методика інтегрованого аналізу ґрунтується на порівнянні Індексу наукового впливу (який поєднує показники кількості публікацій і цитувань) із темпом зростання патентування за Міжнародною патентною класифікацією (МПК). Кожен піднапрямок адитивного виробництва було віднесено до одного з трьох класів пріоритетності залежно від співвідношення цих двох показників. Поєднання високих значень обох індексів вказує на збалансований інноваційний розвиток, тоді як дисбаланс між ними свідчить про переважання фундаментальної чи прикладної орієнтації.

Застосування методики дозволило класифікувати технологічні піднапрями за рівнем інноваційної зрілості – від науково-дослідницьких до комерційно зрілих.

Принципи інтерпретації подано в таблиці 9.

Таблиця 9. Інтерпретація співвідношення наукової та патентної активності

Клас пріоритетності	Тип співвідношення	Характеристика стану	Інтерпретація / аналітичний висновок
Пріоритетні (+++)	Високий науковий інтерес і висока патентна активність	Збалансований інноваційний цикл	Відображає стратегічно значущі напрями, у яких результати наукових досліджень швидко трансформуються у прикладні рішення. Характеризує сфери з високою технологічною готовністю та потенціалом

Клас пріоритетності	Тип співвідношення	Характеристика стану	Інтерпретація / аналітичний висновок
			для глобальної конкурентоспроможності.
Перспективні (++)	Високий науковий інтерес за відносно низьких темпів патентування	Фундаментальні або ранньодослідницькі розробки	Свідчить про активне формування нових знань і підґрунтя для інновацій, які ще не перейшли у прикладну фазу. Має високий потенціал для майбутньої комерціалізації та міждисциплінарного розвитку.
Середньо-перспективні (+)	Висока патентна активність за нижчого наукового інтересу	Прикладні, зрілі технології	Вказує на стадію індустріалізації або розширеного впровадження технологій. Орієнтовано на оптимізацію існуючих рішень, підвищення ефективності та економічну реалізацію вже відомих підходів.

Загальні тенденції

Аналіз 2020–2024 рр. показує, що адитивні технології перейшли від експериментального до індустріально-прикладного етапу розвитку. Поступово формується більш структурований ландшафт, де науковий інтерес, патентна активність і промислове впровадження не збігаються повністю, але демонструють взаємодоповнення (табл. 10).

Таблиця 10. Інтегрований аналіз технологічних класів адитивного виробництва (2020–2024 рр.)

Клас технології АМ	Наукова зрілість (індекс наукового впливу)	Патентна зрілість (темп зростання 2024/2020)	Кількість патентів (2020–2024)	Інтегральна позиція / рівень інноваційної зрілості	Аналітична характеристика
Плавлення в порошковому шарі (Powder Bed Fusion, PBF)	Висока (4436,8)	Висока (305%)	742	+++ Пріоритетний	Баланс фундаментальної науки й прикладних розробок; провідний напрям металевого АМ.
Екструзія матеріалу (Material Extrusion, MEX)	Середня (924,0)	Дуже висока (284%)	3173	+++ Пріоритетний	Потужна прикладна база у полімерних технологіях; високий рівень комерціалізації.
Ламінування листів (Sheet Lamination, SHL)	Середня (783,2)	Висока (288%)	99	++ Перспективний	Стабілізований технологічний напрям із переважною орієнтацією на виробниче впровадження
Адитивне наплавлення зі спрямованою енергією (Directed Energy Deposition, DED)	Висока (1131,8)	Висока (219%)	184	++ Перспективний	Розвиток промислових застосувань у ремонті, металургії, авіаційних конструкціях.
Струменеве нанесення зв'язувальної речовини (Binder Jetting, BJT)	Висока (988,3)	Висока (223%)	271	++ Перспективний	Активний напрям на стику хімії та порошкової металургії; зростаюча прикладна значущість.
Фотополімеризація у ванні (Vat Photopolymerization, VPP)	Дуже висока (2226,5)	Помірна (163%)	63	++ Перспективний	Фундаментально орієнтований сегмент; сильна наукова база, але повільні темпи впровадження.
Струменеве нанесення матеріалу (Material Jetting, MJT)	Середня (734,2)	Помірна (188%)	355	+ Середньоперспективний	Зріла технологія з помірним інноваційним оновленням, переважно в оптимізації процесів.

Інтегрований аналіз підтвердив, що у структурі адитивних технологій спостерігається чітке розшарування між класами з високою науково-патентною синергією та тими, що залишаються на етапі формування інноваційного потенціалу (табл. 11).

- **Пріоритетні напрями (PBF, MEX)** формують ядро технологічної зрілості галузі, демонструючи одночасно високу інтенсивність наукових публікацій і стрімке зростання патентної активності.
- **Перспективні напрями (DED, BJT, SHL, VPP)** зосереджують активні науково-дослідницькі процеси та перебувають у фазі переходу від наукового опрацювання до ширшого технологічного впровадження.
- **Середньоперспективний напрям (MJT)** репрезентує зрілі прикладні рішення, орієнтовані переважно на оптимізацію й підвищення ефективності наявних процесів.

Таким чином, **співвідношення індексу наукового впливу та динаміки патентування** дозволяє ідентифікувати ключові «точки зростання» у сфері адитивного виробництва та сформулювати пріоритети для науково-технологічної політики, орієнтованої на інноваційний баланс між дослідженнями й практикою.

**Таблиця 11. Внутрішня структурна динаміка інноваційних напрямів адитивного виробництва
(поєднання наукової та патентної активності)**

Клас технологій АМ	Пріоритетні напрями (+++)	Перспективні напрями (++)	Середньоперспективні напрями (+)
Фотополімеризація у ванні (Vat Photopolymerization, VPP)	Полімеризація під дією світла (1416,2; +486%); DLP (1416,9; +442%); Безперервне затвердіння (2260,3; +160%)	Висока роздільна здатність (771,6; +300%); Біосумісність (965,7; +365%); Швидке виготовлення (1210,6; +200%)	CLIP (1217,9; +139%); Міцні гідрогелі (1175,8; 0%)
Струменеве нанесення матеріалу (Material Jetting, MJT)	Друковані сенсори (655,4; +435%); Пористі аноди/катоди (1395,9; +1100%); Гнучкі дисплеї (1469,7; +450%)	Друковані батареї (808,1; +257%); Друковані елементи живлення (803,6; +400%); Друковані діелектричні шари (575,5; +283%)	Провідні траси (550,9; +175%); Друковані схеми (493,3; +150%); Гібридні батареї (1426,4; +125%); Легкі електроди (1414,2; –)
Струменеве нанесення зв'язувальної речовини (Binder Jetting, BJT)	Низьковуглецева сталь (2580,7; +250%)	Гранульовані матеріали (1476,5; +191%); Ізотропна сталь (1573; –)	–
Плавлення в порошковому шарі (Powder Bed Fusion, PBF)	Ефективне видалення порошку (2121,3; +500%); Біомедичні імпланти (1280,7; +650%); LPBF (889,3; +580%); Аерокосмічні компоненти (1265,6; +451%)	Високотемпературне спікання (1029,0; +264%); Елементи реакторів (1080,7; +217%); Метаматеріали (963,6; –)	Захисні покриття (1968,1; +89%); Металевий порошок (829,2; +100%)

Клас технологій АМ	Пріоритетні напрями (+++)	Перспективні напрями (++)	Середньоперспективні напрями (+)
Екструзія матеріалу (Material Extrusion, MEX)	WAAM (2905,7; +1567%); Сенсорна інтеграція (1041,6; +2000%); Контрольована деградація (1051,1; +380%); Стійкість до деформацій (1312,2; +222%)	Структурна стабільність (1736,2; +300%); Поведінка набухання (1451,1; +300%); Провідність іонів/електронів (1629,6; +308%); Механічна стабільність шарів (1052,6; +292%); Екструзія через сопло (1113,3; +316%); Контроль в'язкості (937,0; +240%)	Орієнтація волокон (1165,2; +150%); Реологічне налаштування (1450,4; +100%); Масоперенесення (1014,5; +178%); Фізична гелеутворюваність (1096,6; –)
Міждисциплінарні напрями (застосування технологій АМ)	Йонна провідність (1734,3; +265%); Йонна селективність (1861,9; +333%); Циклічна стабільність (1573,2; +700%)	Наноструктуровані електроди (1229,8; –); Сенсорна інтеграція (1428,3; +175%); Фотонна чутливість (1293,3; +300%)	Тонкошарове нанесення катодів/анодів (1387,6; +296%); Підвищена діелектрична проникність (916,5; –)
Інші напрями (змішані / тематичні)	Перероблювані термопласти (2149,4; +200%); Армовані термопластикові композити (842,6; +300%)	Високоентропійні сплави (1605,4; +150%); Цифрові двійники (2323,8; +100%)	–

Аналіз даних показує, що протягом останніх років відбувається швидке зростання технологічної складності, міждисциплінарності та функціональної інтеграції в адитивному виробництві. Провідними тенденціями стають підвищення точності, керованість матеріальних властивостей, біосумісність, енергоефективність і інтеграція сенсорних функцій у друковані структури.

Інтегральний аналіз наукової та патентної динаміки за класами адитивних технологій

Інтегральний аналіз наукової та патентної динаміки у класах адитивних технологій за 2020–2024 рр. дозволив визначити групу пріоритетних і перспективних напрямів, які формують ядро сучасного інноваційного розвитку галузі. Найвищий рівень інноваційної зрілості (+++) демонструють технології Material Extrusion (MEX) та Powder Bed Fusion (PBF) (табл.12). Детальну інформацію дивись у Додатку 2.

Таблиця 12. Пріоритетні та перспективні напрями АМ

Технологічний напрям АМ	Наукометрична категорія	Категорія за патентною динамікою	Інтегрована інноваційна пріоритетність
PBF	Пріоритетні (+++)	Пріоритетні (+++)	Пріоритетні (+++)
VPP	Пріоритетні (+++)	Пріоритетні (+++)	Перспективні (++)
DED	Перспективні (++)	Перспективні (++)	Перспективні (++)
BJT	Середньоперспективні (+)	Пріоритетні (+++)	Перспективні (++)
MEX	Середньоперспективні (+)	Пріоритетні (+++)	Пріоритетні (+++)
SHL	Середньоперспективні (+)	Перспективні (++)	Перспективні (++)
MJT	Середньоперспективні (+)	Перспективні (++)	Середньоперспективні (+)

1. Абсолютні лідери – екструзійні технології (Material Extrusion, MEX)

MEX демонструє найвищу динаміку зростання (до +2000%) у напрямках сенсорної інтеграції, WAAM (адитивне виробництво з використанням

дротової дуги) та контрольованої деградації матеріалів. Це свідчить про перехід від простого виготовлення деталей до розумного виробництва з функціональними властивостями – наприклад, у біомедичних або енергетичних застосуваннях. *Особливу увагу* отримують матеріали з регульованими механічними та реологічними характеристиками, що відкриває можливості для друку складних гнучких або композитних структур.

2. Технології плавлення порошку (Powder Bed Fusion, PBF)

PBF зберігає статус провідного напрямку для металевого 3D-друку, зокрема у створенні біомедичних імплантатів (+650%), аерокосмічних компонентів (+451%) та ефективних методів видалення порошку (+500%). Цей клас демонструє стабільне зростання у напрямку *високотемпературного спікання та метаматеріалів*, що дозволяє виробляти високоточні, міцні та легкі конструкції з індивідуальними властивостями.

3. Струменеве нанесення матеріалу (Material Jetting, MJT)

Попри те, що MJT загалом зберігає статус середньоперспективного напрямку, окремі піднапрями демонструють вибухове зростання та формують зони випереджального розвитку. Так, MJT вирізняється потужним проривом у галузі *гнучкої електроніки*, зокрема у розробці друкованих сенсорів (+435%), *пористих анодів/катодів* (+1100%) і *гнучких дисплеїв* (+450%). Технологія поступово перетворюється на *основу друкованої енергетики та електроніки нового покоління*, що поєднує функціональні матеріали з високою просторовою точністю.

4. Фотополімеризація (Vat Photopolymerization, VPP)

VPP лишається лідером за якістю відтворення, точністю та швидкістю процесів. Серед найбільш динамічних напрямів – *DLP-друк* (+442%), *полімеризація під дією світла* (+486%) і *безперервне затвердіння* (+160%). Це свідчить про зростання попиту на високоточне виготовлення біосумісних елементів у стоматології, біопринтингу та мікромеханіці.

5. Міждисциплінарні напрями

Тенденції розвитку АМ все більше перетинаються з галузями енергетики, сенсорики, електрохімії та фотоніки. Ключовими є *йонна провідність* (+265%), *йонна селективність* (+333%) та *циклічна стабільність* (+700%), що відкриває нові можливості для створення друкованих елементів живлення, батарей і наноструктурованих електродів.

6. Інші тематичні напрями

Високу актуальність мають екологічні рішення – зокрема, *перероблювані термoplastи* (+200%) та *армовані композити* (+300%), які дозволяють створювати стійкі до зношування деталі з поєднанням екологічності та міцності. *Високоентронійні сплави та цифрові двійники* демонструють потенціал інтеграції АМ у цифрове інженерне моделювання та штучний інтелект.

ДОДАТОК 1

Фотополімеризація у ванні (VPP)

Матеріали		Пристрої / вироби		Процеси / властивості	
Фотополімеризація у ванні	2162	DLP (Цифрова обробка світлом)	1416,9	Полімеризація під дією світла	1416,2
				Висока роздільна здатність	771,6
Респонсні гідрогелі або Чутливі гідрогелі	664,7	CLIP Безперервне виробництво рідкого інтерфейсу	1217,9	Контроль кінетики полімеризації	369,7
				Безперервне затвердіння	2260,3
				Швидке виготовлення	1210,6
Полімери з ефектом пам'яті форми	654,2	2-фотонна полімеризація (2PP)	830,6	Мікромасштабна точність	1428,9
				Програмована деформація	743,2
Гідрогелі полі(етилєнглїколь	534,3	Фотонні структури	1055	Фотоініційована зшивка	509,0
				Біосумісність	965,7
				Оптична прозорість	850,7
		Мікрооптичні компоненти	600	Висока точність виготовлення;	1293,5
				Мікрооптичне структурування	342,3
				Поверхнева гладкість	872,4
Гідрогелі полівініловий спирт	463,8	SHLA (Стереолїтографїя)	642,1	Висока стабільність форми	1736,2

Екструзія матеріалу (MEX)

Матеріали		Пристрої / вироби		Процеси / властивості	
Екструзія матеріалу (MEX)	922,7			Екструзія через сопло	1113,3
				Контроль в'язкості	937,0
				Механічна стабільність шарів	1052,6
Полімери-провідні гідрогелі	5714	Друк безпосередньо чорнилом	1134,7	Провідність іонів/електронів	1629,6
				Висока роздільна здатність друку	688,1
Тверді гідрогелі	1175,8	Жорсткі біокомпозити	993,8	Механічне зміцнення	812,9
				Багатошарова екструзія	646,2
				Підвищена стійкість до деформацій	1312,2
Етер-кетон	984,3	Підсилені термопластичні композити	842,6	Високотемпературна екструзія	563,9
				Постобробка термоплавленням	738,1
				Контроль кристалічності	359,5
Гідрогелі самовідновлювані	922,8	Композити з армованими волокнами	840,4	Реологічна адаптивність	926,0
Фізичні гідрогелі	842,9	Системи доставки ліків	729	Контрольована дифузія	930,3
				Фізична гелеутворюваність	1096,6
				Біосумісність	985,1
			741	Біопринтинг клітинних структур	803,3
		Гідрогелеві каркаси (скелети)	675,6	Формування пористої структури	600,0

Матеріали		Пристрої / вироби		Процеси / властивості	
				Біодеградабельність	925,7
Гідрогель	793,7	Адитивне виробництво	734,1	3D біодрук	359,9
				фотокрослінкінг	509,0
				поведінка набухання	1451,1
Полілактична кислота	790,7	Bioprinting	726,6	Екструзія розплаву	754,7
Термопластичні полімери	677,6	Functional prototypes	653	структурна стабільність	1736,2
Полімери / Полімерні композити	764	Технологія моделювання відкладення / FDM (Технологія моделювання осадження / FDM)	708,4	Армування волокнами	957,4
Виготовлене вуглецеве волокно	742,4	Васкуляризація	692,7	Ламінування; орієнтація волокон	1165,2
Вуглець	733	Сенсори	682,9	Електропровідність	818,5
				3D-друк провідних сіток	325,2
				чутливість до деформацій	728,0
Гідрогелі з ефектом пам'яті форми	640,1	Моделювання 3D	641,1		
Гідрогелі гіалуронової кислоти	599	4D-друк	636,4	Самозбирання	556,6
Каппа-карагінан гідрогель	566,6	Моделювання методом плавленого осадження (FDM)	628	Гелеутворення	878,9
				контроль в'язкості	1450,4
Двошарові гідрогелі	420,7	Композитні скелети	627,3	Механічна адаптивність	940,8

Матеріали		Пристрої / вироби		Процеси / властивості	
Біодеградовані синтетичні полімери	438,3	Скелети (усі типи)	622,8	Контрольована деградація	1051,1
Архітектурні клітинні матеріали	421,2	Каркаси для тканин	646,6	Оптимізація пористості	720,5
				клітинна інтеграція	683,8
Пористі скелети	658,3	Матриці для регенерації тканин	736,8	Масоперенесення	1014,5
				дифузія поживних речовин	625,2
М'які матеріали	674,4	М'які актуатори	574	Деформаційна відповідь	990,2
				сенсорні властивості	807,3
Крос-лінкінг	656,4	Інтелектуальні гелі	869,5	контрольована полімеризація	718,8
		Конструкції з клітинами	762,2	васкуляризація	710,2
Еластомер	600,2	Гнучкі актуатори	697	Еластичне формування	401,1
		Компоненти м'якої робототехніки	717	Сенсорна інтеграція	1041,6
		Носимі пристрої	855	Розтяжність	1424,8
Кальцій-фосфат	588,4	Біокерамічні каркаси	1138	Контроль кристалічності	359,5
				остеоіндуктивність	698,8
		Замінники кісток	629	Біоактивність	838,1
				зрощення з кісткою	711,1
Strain sensors	524,2	Носимі датчики деформації	777	П'єзорезистивний ефект	954,8
				стабільність сигналу	1343,0
Галій-індієвий сплав	819,3	Електроніка на рідких металах	484	Самовідновлювальна провідність	843,1
Безперервні композити з волокнами	990			Волоконне армування	1165,2

Спінання порошкового шару (PBF)

Матеріали		Пристрої / вироби		Процеси / властивості	
PBF, Спінання порошкового шару	772,6				
Сплави високої ентropії	1842,2	Лазерне спінання порошку	684,3	Ефективне видалення	3238,2
		Аерокосмічні компоненти	1265,6	Контроль мікроструктури	703,7
		Теплообмінники	638,2	Термічна обробка	728,2
		Захисні покриття	1968,1		
3D металеві решітки	1705,9	Метаматеріали	963,6	Оптимізація топології	604,1
		Біомедичні імпланти	1280,7	Постобробка поверхні	774,4
		Легкі структурні елементи	2921,2	Селективне лазерне плавлення (SHLM)	449
Керамічна матриця	1300,7	Елементи реакторів	1080,7	Високотемпературне спінання	1029
Керамічні композити (СМС)	943,3			Реактивне спінання	613,5
Металевий порошок		Друковані деталі корпусів	509,9	Лазерне плавлення порошкового шару (LPBF)	699
		Високотемпературне спінання	1029,0	Плавлення електронним променем (EBM)	400
				Ефективне видалення порошку	2121,3

Струменеве нанесення матеріалу (MJT)

Матеріали		Пристрої / вироби		Процеси / властивості	
Zn-іонні батареї	3086,3	Підсилювач	757,2	CVD (Хімічне осадження з парової фази)	345,4
				Йонна провідність	1734,3
Електрохімічні конденсатори подвійного шару (EDLC)	1697,1	Гнучка електроніка	827,2	ALD (Атомно-шарове осадження)	343,8

Матеріали		Пристрої / вироби		Процеси / властивості	
				наноструктуровані електроди	1229,8
				висока ємність	612,6
Роботичні шкіри	1393,7	Мікросхема	577	сенсорна інтеграція	1428,3
Електронна шкіра	1294,6	Рентгенівська візуалізація	485,2	Фотонна чутливість	1293,3
				тонкоплівкове формування	592,3
Провідник	1145,3	Провідні доріжки, гнучкі схеми	550,9	Металізація струменевим методом	351,9
				наночастинкові пасти	665,1
Чорнила	847,6	Друковані сенсори	655,4	Оптимізація в'язкості	937,0
Батареї	800,7	Друковані батареї	808,1	Тонкошарове нанесення катодів/анодів	1387,6
				електрохімічна стабільність (Electrochemical cycling)	689,7
Провідні чорнила	771,7	Друковані схеми	493,3	Наночастинкове спікання	665,1
Графен / аерогелі на основі графену	576,2	Легкі електроди	1414,2	Пориста архітектура	339,1
				висока площа поверхні	642,3
Суперконденсатори	563,2	Друковані енергетичні елементи	803,6	Швидкий заряд/розряд	694,1
				електрохімічна стабільність	318,9
Ємність	548,6	Друковані діелектричні шари	575,5	Підвищена діелектрична проникність	496,0
2D MXenes	535,8	Гібридні електроди	558,3	Поверхнева функціоналізація	916,5
Електрохімічне накопичення енергії	515,1	Гібридні батареї	1426,4	Контроль переносу заряду	764,9
				стійкість циклів	1573,2
				іонна селективність	1861,9
Високоякісний графен	506,1	Прозорі провідники	790,6	Контроль дефектів	525,9
Електроди (загальні)	489,7	Пористі аноди/католи	1395,9	Оптимізація пористості	720,5
		Гнучкі дисплеї	1469,7	міжфазна стабільність	748,7

DED, Направлене енергетичне напilenня

Матеріали		Пристрої / вироби		Процеси / властивості	
Сплави з високою ентропією (HEA)	1030,6	Великі ремонти	1043	Термічна обробка	747
		Системи покриттів	661	Моделювання залишкових напружень	675,6
Композити з металевою матрицею для DED	492,4	Теплообмінники	638		
		Змішані порошки	1500	Моніторинг in-situ	1189
Титан (Ti)	577,8	Біомедичні імпланти	1281	Удосконалення мікроструктури	675,6
Нікель (Ni)	600,8			Покращена технологічність	706,7
Функціонально градієнтні матеріали (FGM)	605,2	Теплозахисні покриття	1625	В'язкість руйнування	697
		Адаптивні з'єднання	486,5	Технологія моделювання нанесення	742
		Рами	822,5	Загартовані властивості	1100
				Механічна міцність	905
				Стійкість до втоми	895,5
		Інтелектуальні форми	707	Формування та модуляція лазерного променя для зменшення дефектів	
Аморфні	837,2			Покращена корозійна стійкість	632,2
				Зносостійкість	975,5
Екологічно сталий матеріал для виробництва	3824	Лопаті турбін	859,6		
Перероблений	2892			Контроль розплаву	484
Керамічно-зміцнені матеріали для DED (Al_2O_3)	650	Градiєнтні функціональні шари	1433	Стійкість до тріщин	1246
Керамічно-зміцнені матеріали для DED (ZrO_2)	756			Контроль залишкових напружень	446

Матеріали		Пристрої / вироби		Процеси / властивості	
Титан–Мідь (Ti–Cu)	1475	Деталі з багатьох матеріалів	652	Контроль інтерфейсу	606
Нікель–Алюміній (Ni–Al)	1554			Міцність з'єднання	940
Гібридне виробництво (DED + CNC)	938			Покращення точності	865

ВІТ, Струменеве нанесення зв'язуючого

Матеріали		Пристрої / вироби		Процеси / властивості	
Порошок	1138	Друк «зеленої» (неспеченої) заготовки	872,6	Контроль пористості	600
Біокерамічні каркаси	628,8	Тканинні каркаси, навантажені лікарськими засобами	1224,7		
Замінники кісткової тканини	1813,8			Оптимізована хімія зв'язувальної речовини	317,7
Фосфатні каркаси	641,4			Ущільнення (спікання–гаряче ізостатичне пресування, HIP)	1138,8
Скляні каркаси	1265,5	Електролітні підкладки для твердотільних оксидних паливних елементів (SOFC)	2326,3		
Склокераміка	1331,4	Теплоізоляційні структури	3229	Контроль кристалізації	1087,4
Тривимірні металеві ґратки		Каталітичні носії	1048,5		
Високоентропійний сплав	1705,2	Демпфувальні структури (поглинаючі вібрації)	936	Контроль механічної анізотропії	574
Керамічна матриця	1841,2	Носії каталізаторів	1372	Підвищена щільність	934
Цирконій(IV) оксид (цирконія)	7004			Ріст зерен	468
Металеві порошки	756,5	Стоматологічні реставрації	4794	Підвищена механічна стабільність	1016

Матеріали		Пристрої / вироби		Процеси / властивості	
Керована морфологія	465,8	Високощільні конструкційні деталі	612	Геометрична (розмірна) точність	787
controlled morphology	610,6	Теплообмінники	638		
		Термозахист	655,5	Низькотемпературне спікання	477,3

HL, Ламінація листів

Матеріали		Пристрої / вироби		Процеси / властивості	
Армовані термопластичні композити	842,6	Легкі конструкційні панелі ★	770,5	Гібридне з'єднання (механічне + ультразвукове)	1326,7
Волокнисті (армовані волокнами) композити	840,4	Екологічна упаковка	2098	Інтеграція багатоматеріальних шарів	839,1
Композити з безперервним волокном	990,0	Автомобільні деталі	940,0	Високе співвідношення міцності до ваги	724,0
Шаруваті композити	614,4	Гнучкі електронні підкладки	677,0		
Армовані вуглецевим волокном листові матеріали	313,6	Електрично або теплопровідні модулі	797,0	Покращена теплопровідність та електропровідність	4409,0
Кераміко-полімерний матеріал	941,6	Деталі систем для високих температур	924,0	Лазерне або ультразвукове різання шарів	578,5
Перероблювані термопластик	2149,4			Ітеративне проектування	1290,0
Функціонально-градієнтні матеріали (FGM)	605,2	Гнучкі сенсори та антени	932,2	Оптимізація провідності на стиках	1549,2
Розумні матеріали (сплави з пам'яттю форми, п'єзоелектричні шари)	685,4	Структури для екранування від електромагнітних завад	1985	Гібридний цифровий друк	899,6
Полімер із пам'яттю форми	439,2	Адаптивні трансформовані структури	1377		

Матеріали		Пристрої / вироби		Процеси / властивості	
Багатошарові енергетичні матеріали (на основі Li, твердих електролітів)	624,6	Твердотільні акумулятори	735,6		
Паперові ламінати з провідними чорнилами	1624,3				
Фізичні гідрогелі (у ламінованій формі)	842,9	Теплообмінники, вставки для інструментів	638,2	Низькотемпературне ламінування	625,8

ДОДАТОК 2

Інтегральний аналіз наукової та патентної динаміки у класах адитивних технологій за 2020–2024 рр.

Тип елемента	Піднапрямок	Індекс наукового інтересу	Зростання патентів 2024/2020, %	Коментар	Пріоритетність
Фотополімеризація у ванні	Vat Photopolymerization (VPP)	2162	162%	Збалансований розвиток, стратегічно важливий напрям із швидким переходом до промислових рішень	+++
Полімеризація під дією світла	Процес	1416,2	486%	Висока інноваційна активність; технологія швидко комерціалізується. Помітний стрибок патентування у 2024 р.	+++
DLP (Цифрова обробка світлом)	Пристрій	1416,9	442%	Потужне зростання інтересу в напрямі точного виробництва	+++
Біосумісність	Процес	965,7	365%	Високий потенціал для біомедичних застосувань. Напрямок переходить у прикладну фазу	+++
Висока роздільна здатність	Процес	771,6	300%	Помітний стрибок патентування у 2024 р.	++
Швидке виготовлення	Процес	1210,6	200%	Напрямок переходить у прикладну фазу. Помітний стрибок патентування у 2024 році	+++
Безперервне затвердіння	Процес	2260,3	160%	Стабільне зростання при високій науковій базі	+++
CLIP Безперервне виробництво рідкого інтерфейсу	Пристрій	1217,9	139%	Напрямок переходить у прикладну фазу. Помітний стрибок патентування у 2024 році	+++
Tough hydrogels	Матеріал	1175,8	0%	Наукові дослідження тривають, патентів поки немає. Типовий ранньодослідницький фундаментальний напрям	++

Тип елемента	Піднапрямок	Індекс наукового інтересу	Зростання патентів 2024/2020, %	Коментар	Пріоритетність
Material Extrusion (MEX)	Material Extrusion (MEX)	922,7	284%	Високий науковий інтерес при високому патентуванні	+++
структурна стабільність	Процеси / властивості	1736,2	300%	Високі значення обох показників: активне вдосконалення якості друку та точності форми.	+++
поведінка набухання	Процеси / властивості	1451,1	300%	Збалансоване зростання науки й патентів – застосування в біодруці та гідрогелях.	+++
контроль в'язкості	Процеси / властивості	1450,4	100%	Високий науковий інтерес, але обмежене патентування – фундаментальні дослідження.	++
розтяжність	Матеріали	1424,8	200%	Активна динаміка: розвиток еластомерів для гнучких конструкцій і біоматеріалів.	+++
стійкість до деформацій	Процеси / властивості	1312,2	222%	Синергія науки та практики: удосконалення міцності та довговічності матеріалів.	+++
волоконне армування	Процеси / властивості	1165,2	150%	Високий науковий інтерес, але обмежене патентування – фундаментальні дослідження.	+++
контроль в'язкості	Процеси / властивості	937	240%	Помітний перехід до прикладних рішень	+++
механічна стабільність шарів	Процеси / властивості	1052,6	292%	Зростання патентів свідчить про прикладні рішення для підвищення міцності.	+++
контрольована деградація	Процеси / властивості	1051,1	380%	Висока патентна динаміка: актуально для біосумісних матеріалів.	+++
сенсорна інтеграція	Пристрої / вироби	1041,6	2000%	Потужне зростання патентів – тренд на розумні та інтерактивні матеріали.	+++

Тип елемента	Піднапрямок	Індекс наукового інтересу	Зростання патентів 2024/2020, %	Коментар	Пріоритетність
масоперенесення	Процеси / властивості	1014,5	178%	Стійке зростання інтересу – важливо для тканинної інженерії.	+++
провідність іонів/електронів	Матеріали	1629,6	308%	Баланс фундаментальних і прикладних досліджень у провідних гідрогелях.	+++
підсилені термопластичні композити	Матеріали	842,6	300%	Стабільна прикладна динаміка: розробка міцних матеріалів для промислового 3D-друку.	+++
перероблювані термопласти	Матеріали	2149,4	200%	Провідний напрямок сталого виробництва, що поєднує інновації та екологічність.	+++
провідні полімерні гідрогелі	Матеріали	5714	-	Дуже високий науковий інтерес, але відсутність патентів – експериментальний етап.	++
екструзія через сопло	Пристрої / вироби	1113,3	316%	Активна технологічна оптимізація – розробка точних багатоканальних сопел.	+++
MEX / Material extrusion (загальний рівень)	—	922,7	-	Базовий орієнтир без конкретної патентної динаміки – загальна методична позиція.	++
PBF, powder bed fusion		772,6	305%	Баланс фундаментальних досліджень та прикладної фази	++
Ефективне видалення порошку	Процес / властивість	2121,3	500%	Дуже високий науковий інтерес та сильний приріст патентів → інтенсивна інженерна та комерційна активність з оптимізації видалення незапеченого порошку (важливо для якості та безпеки виробництва).	+++

Тип елемента	Піднапрямок	Індекс наукового інтересу	Зростання патентів 2024/2020, %	Коментар	Пріоритетність
Захисні покриття	Матеріали	1968,1	89%	Дуже високий науковий інтерес при нестабільній патентній активності	++
Біомедичні імпланти	Пристрої / вироби	1280,7	650%	Високий науковий інтерес і дуже швидке зростання патентів → активна трансляція фундаментальних досліджень у прикладні медичні рішення; сильний ринковий та регуляторний інтерес.	+++
Аерокосмічні компоненти	Пристрої / вироби	1265,6	451%	Значний індекс і висока патентна динаміка → сфера з інтенсивним інвестуванням у стандартизацію, легкі конструкції та матеріали з підвищеною продуктивністю.	+++
Елементи реакторів	Пристрої / вироби	1080,7	217%	Стабільний науковий інтерес і помірне зростання патентів – напрям із високими вимогами до матеріалів та підтвердження технологічності, рух до індустріального впровадження.	++
Високотемпературне спікання	Процеси / властивості	1029	264%	Помітний науковий розвиток та зростання патентів – оптимізація процесів термообробки для поліпшення мікроструктури та механічних властивостей.	+++
Laser powder bed fusion (LPBF)	Пристрої / технологія	889,3	580%	Середній/високий науковий інтерес і дуже високе патентування → сильна інженерна інноваційна хвиля навколо лазерних установок і їх параметрів.	+++

Тип елемента	Піднапрям	Індекс наукового інтересу	Зростання патентів 2024/2020, %	Коментар	Пріоритетність
Металевий порошок	Матеріали	829,2	100%	Стабільна наукова увага і помірний рівень патентування – поліпшення властивостей порошку й оптимізація підготовки матеріалу для PBF.	++
BJT, binder jetting	–	972,3	223%	Баланс фундаментальних досліджень та прикладної фази	++
Гранульований	порошковий матеріал	1476,5	191%	Зростання обох показників – висока інноваційна динаміка, перспективи комерціалізації.	+++
Ізотропна сталь	структурований метал	1573,2	-	Високий інтерес при відсутності патентів.	++
Низьковуглецева сталь	сплав	2580,7	250%	Синхронне зростання науки й патентів – активна технологічна зрілість і попит на ринку.	+++
МЈТ, струменеве нанесення матеріалу	–	749,4	188%	Високий інтерес при помірних патентах патентів– фаза технічного вдосконалення.	++
Провідні доріжки, гнучкі схеми	гнучкі провідники	550,9	175%	Помірна наука й активні патенти – прикладна зріла технологія.	++
Друковані сенсори	сенсорні елементи	655,4	435%	Обидва показники зростають – інноваційна галузь із високим потенціалом застосування.	+++
Друковані батареї	енергетичні елементи	808,1	257%	Динамічний розвиток і швидка комерціалізація.	+++
Друковані схеми	електронні схеми	493,3	150%	Середній інтерес і сталий патентний ріст – технологія у фазі оптимізації.	++

Тип елемента	Піднапрям	Індекс наукового інтересу	Зростання патентів 2024/2020, %	Коментар	Пріоритетність
Легкі електроди	електродні матеріали	1414,2	-	Високий інтерес без патентів – переважає наукове експериментування.	++
Друковані енергетичні елементи	мініатюрні батареї	803,6	400%	Сильна синергія науки й інновацій, перспективний напрям.	+++
Друковані діелектричні шари	функціональні шари	575,5	283%	Прикладна технологія зі стабільним патентним зростанням.	+++
Гібридні батареї	комбіновані елементи	1426,4	125%	Висока наука при нестабільній динаміці патентів – фаза технічного вдосконалення.	++
Пористі аноди/катоди	електродні структури	1395,9	1100% (загалом 37 патентів)	Стабільний патентний ріст – зріла, комерційно приваблива технологія.	+++
Гнучкі дисплеї	гнучкі дисплеї	1469,7	450%	Високі обидва показники – активна конкуренція та ринкова готовність.	+++
EDLC (Електрохімічні конденсатори подвійного шару)	–	1697,1	-	Високий науковий інтерес, поки без прикладної реалізації.	++
Йонна провідність	електрохімічна характеристика	1734,3	265%	Зростання обох показників – високий потенціал упровадження в акумуляторних технологіях.	+++
Наноструктуровані електроди	електродний матеріал	1229,8	--	Активна фундаментальна розробка.	+++
Сенсорна інтеграція	сенсорна платформа	1428,3	175%	Високий науковий інтерес й стабільні патенти – прикладне впровадження.	+++
Фотонна чутливість	оптоелектронний матеріал	1293,3	300%	Стійке зростання науки й патентів – напрям із високим ринковим потенціалом.	+++

Тип елемента	Піднапрямок	Індекс наукового інтересу	Зростання патентів 2024/2020, %	Коментар	Пріоритетність
Тонкошарове нанесення катодів/анодів	технологічний процес	1387,6	296%	Стабільна інноваційна динаміка, технологія наближається до зрілості.	+++
Підвищена діелектрична проникність	діелектричний матеріал	916,5	-	Високий науковий інтерес без патентів – базові дослідження.	++
Стійкість циклів	характеристика надійності	1573,2	700%	Висока наука й вибуховий патентний ріст – зріла комерційна технологія.	+++
Йонна селективність	електрохімічний параметр	1861,9	333%	Високий інтерес і активна патентна динаміка – перспективний ринок енергозберігаючих систем.	+++

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

КВАША Т.К.

КОВАЛЕНКО О.І.

**ПЕРСПЕКТИВНІ СВІТОВІ НАУКОВІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ НАПРЯМИ
ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ КРИТИЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ «АДИТИВНЕ
ВИРОБНИЦТВО ТА ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ»**

Науково-аналітична записка

Матеріали публікуються в авторській редакції

Формат: PDF. Об'єм даних 1,75 МБ.

Редакція: ДНУ «Український інститут науково-технічної експертизи та інформації»
(УкрІНТЕІ)

03150, м. Київ, вул. Антоновича, 180 Тел. (044) 521-00-10, e-mail: uintei@uintei.kiev.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5332 від 12.04.2017 р