

УДК 621.98.074+620.1

АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ І ТЕХНОЛОГІЙ СУЧАСНОГО АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

В. Г. Слободяник¹, Т. С. Голубник²,

¹ Національний Університет «Львівська Політехніка», вул. С. Бандери, 12,
Львів, 79013, Україна <https://orcid.org/0000-0001-6982-7194>
e-mail: valentyana.h.slobodianyuk@lpnu.ua

² Національний Університет «Львівська Політехніка», вул. С. Бандери, 12,
Львів, 79013, Україна <https://orcid.org/0000-0002-8325-9813>
e-mail: tetiana.s.holubnyk@lpnu.ua



Ліцензія Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0).

У статті розглянуто сучасний стан розвитку адитивних технологій з акцентом на матеріальних рішеннях для виготовлення одно- і багатofункціональних виробів. Проаналізовано основні типи матеріалів, що застосовуються у поширених технологіях 3D-друку, а також їх вплив на функціональні властивості кінцевих конструкцій. Узагальнено ключові переваги та обмеження полімерів, композитів і фотополімерних смол, що визначають можливості їх застосування у різних галузях промисловості. Окрему увагу приділено багатоматеріальному адитивному виробництву (МММ), яке забезпечує поєднання різних матеріальних фаз у межах одного виробу. Висвітлено основні вимоги до сумісності матеріалів та міжфазної взаємодії, що впливають на довговічність і надійність отриманих деталей. Результати дослідження можуть бути використані під час вибору технологічних і матеріальних рішень для виготовлення виробів з підвищеним експлуатаційним потенціалом.

Ключові слова: адитивні технології; 3D-друк; конструкційні матеріали; багатоматеріальне адитивне виробництво; міжфазна взаємодія; функціонально-градієнтні структури.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток цифрових технологій спричинив широке впровадження 3D-моделювання та адитивного виробництва у промисловість. Сучасний 3D-друк застосовується для виготовлення не лише прототипів, а й повнофункціональних деталей, що свідчить про зрілість технологій. Після завершення патентного захисту базових рішень галузь отримала доступ до ширшого спектра обладнання та матеріалів, а конкуренція між виробниками посилилася [1].

Попри високий рівень розвитку класичних технологій, що використовують один матеріал, досі недостатньо дослідженими залишаються системи багатоматеріального формування. Вони забезпечують варійовані функціональні властивості

в межах однієї конструкції, що підвищує надійність і адаптивність виробів без ускладнення процесу складання.

Розширення матеріальної бази та технологічних підходів актуалізує потребу у аналізі можливостей і обмежень таких рішень для подальшого розвитку багатофункціональних 3D-конструкцій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Наукові джерела, присвячені адитивному виробництву, здебільшого зосереджуються на систематизації класичних технологій 3D-друку та характеристик основних полімерних і металевих матеріалів. Зокрема, Андрощук Г. О. [2, 3] аналізує перспективи впровадження 3D-друку та відзначає технічні й організаційні бар'єри розвитку галузі в Україні. Довідкові ресурси [4–6] пропонують порівняння параметрів різних технологій (FDM, SLA, SLS) і наводять орієнтовні рекомендації щодо вибору витратних матеріалів залежно від вимог до виробів. Окремий масив робіт присвячено процесам цифрового моделювання та підготовки геометрії до друку [7–9], де акцент робиться на підвищенні точності та оптимізації структури моделей.

Розглянуті праці описують переважно одноматеріальні системи, орієнтовані на формування деталей із рівномірними фізико-механічними властивостями по всьому об'єму. Значно меншою мірою розглянуто поєднання різномірних матеріалів у межах одного виробу, формування градієнтних функціональних зон, керування міжфазною адгезією та стандартизацію експлуатаційних характеристик багатоматеріальних структур. Також недостатньо висвітлено питання сумісності матеріалів, оптимізації параметрів спільного формування та критеріїв вибору технологічних рішень під конкретні навантажувальні умови.

Отже, сучасний стан досліджень підтверджує потребу у комплексному аналізі інноваційних підходів адитивного виробництва, що дозволяють створювати багатофункціональні конструкції без додаткових операцій складання. Саме ця наукова прогалина й визначає актуальність проведеного дослідження.

Мета статті. Проаналізувати сучасний стан адитивних технологій із акцентом на матеріальних рішеннях для виготовлення одно- та багатофункціональних виробів, узагальнити принципи класифікації класичного та багатоматеріального адитивного виробництва, а також визначити вперше особливості технології багатоматеріального адитивного виробництва (ММММ — Multi-Material Additive Manufacturing).

Виклад основного матеріалу дослідження. Адитивне виробництво ґрунтується на принципі пошарового формування виробу на основі цифрової моделі, що забезпечує високу дизайн-гнучкість, можливість швидкого внесення конструктивних змін і зниження витрат матеріалу порівняно з традиційними методами. Відсутність необхідності виготовлення прес-форм та іншого оснащення розширює потенціал застосування технології для дрібносерійного та індивідуалізованого виробництва.

Суттєвою перевагою є можливість створення структур із внутрішніми порожнинами, осередками або топологічно оптимізованими елементами, які неможливо виготовити субтрактивними методами. Однак досягнення високих експлуатаційних

характеристик виробу значною мірою визначається типом і властивостями матеріалів, що використовуються у процесі формування конструкцій.

Саме тому матеріали змінюються від визначального технологічного фактора до центрального об'єкта інновацій у 3D-друці, а їх класифікація набуває ключового значення для правильного вибору технології відповідно до призначення виробу (рис. 1).

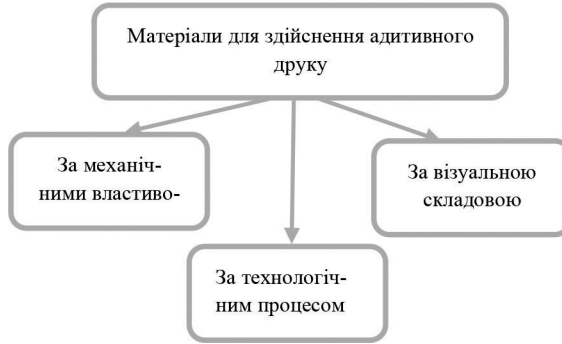


Рис. 1. Класифікація матеріалів адитивного друку

Матеріали для адитивного виробництва вирізняються широким спектром властивостей, що визначають функціональні можливості, точність та експлуатаційну надійність готових виробів. Їх вибір залежить від технологічного процесу, температурних режимів друку, адгезії шарів, а також вимог до міцності, хімічної стійкості та ресурсу конструкції.

Для технології FDM застосовуються переважно термопластичні матеріали, серед яких найбільш поширені PLA, ABS, PETG, нейлон, TPU та полікарбонат. Вибір конкретного полімеру визначається його міцністю, стійкістю до термічного й механічного впливу, а також здатністю забезпечувати належну адгезію між шарами, що прямо впливає на функціональне призначення виробу.

Матеріали для SLA-друку (рис.2) мають найширший вибір серед усіх адитивних технологій.



Рис. 2. Матеріали для SLA-технології

SLA-матеріали виготовляються на основі термореактивних смол, які відрізняються за складом і властивостями. Основні характеристики таких матеріалів — висока міцність, гнучкість та адгезія, що важливо для виготовлення високоякісних виробів.

Залежно від вимог до точності, жорсткості, термостійкості або гнучкості реалізуються смоли різних класів, узагальнену класифікацію яких наведено на рис. 3.

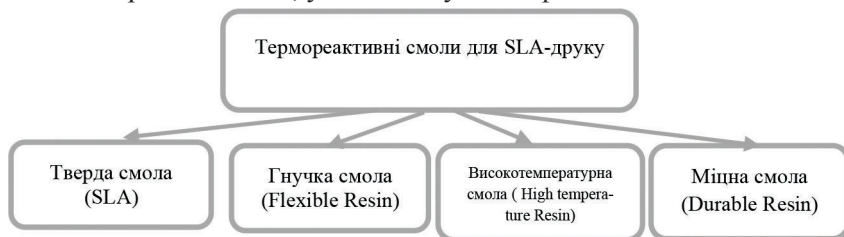


Рис. 3. Класифікація термореактивних смол

З огляду на підвищення вимог до конструкційного та функціонального наповнення виробів, можливості класичних (одноматеріальних) технологій АМ стають обмежувальними для створення деталей, які поєднують жорсткі та еластичні зони, градієнт механічних властивостей або локальні електропровідні елементи. Ці виклики зумовили активний розвиток технології багатоматеріального адитивного виробництва — ММММ (Multi-Material Additive Manufacturing), що передбачає одночасне пошарове формування виробу з двох чи більше матеріалів різної природи.

ММММ забезпечує функціональну інтеграцію у межах єдиної конструкції, усуваючи потребу в подальшому складанні та підвищуючи точність відтворення складних поверхонь. Додатковими перевагами є зменшення кількості відходів, можливість створення топологічно оптимізованих структур і адаптація до навантажень.

Водночас використання різномірних матеріалів висуває вимоги до міжфазної адгезії, теплової сумісності та стабільності з'єднання. Тому ключовим напрямом розвитку ММММ стає розширення матеріальної бази — полімерів, композитів, металів, кераміки та гібридних структур, які поєднуються в межах одного виробничого процесу.

Узагальнену класифікацію матеріалів, що застосовуються для створення багатофункціональних конструкцій у межах ММММ, подано на рисунку 4.



Рис. 4. Класифікація технологій ММММ за категоріями технології та матеріалами

Одним із ключових завдань ММAM є забезпечення надійної міжфазної взаємодії матеріалів, що характеризуються різними фізико-механічними властивостями та температурно-реологічними режимами оброблення. Якість формування міжшарового з'єднання визначає експлуатаційні характеристики готового виробу, включаючи його опір відшаруванню, стабільність при змінних навантаженнях та тривалість ресурсу в умовах практичного застосування.

Проектування багатоматеріальних конструкцій потребує ретельного врахування критеріїв сумісності матеріалів, що забезпечують стабільність та довговічність отриманих виробів. До таких критеріїв належать узгодженість коефіцієнтів теплового розширення матеріалів, які контактують у процесі друку, достатній рівень адгезійної взаємодії на межі поділу фаз, відповідність температур плавлення або отвердіння та реологічних властивостей компонентів у момент формування з'єднання. Важливо також враховувати енергетику поверхні та її вплив на утворення дефектів у зоні контакту, що в комплексі визначає якість міжшарової взаємодії та опір виробу до відшарування під дією навантажень та змінних експлуатаційних умов. Недотримання цих умов може спричинити локальні напруження, мікротріщини або розшарування, що знижує ресурс виробу навіть при достатній початковій міцності.

У природних системах широко представлені структури, що поєднують різні матеріальні фази та локально змінні властивості, що забезпечує їхню оптимальну функціональність у складних умовах. Реалізація подібних принципів у технічних виробках потребує застосування економічно ефективних виробничих процесів, здатних забезпечувати формування багатфункціональних конструкцій у межах однієї деталі. Технологія ММAM дає можливість створювати об'єкти зі складною внутрішньою будовою та локально заданими характеристиками без використання трудомістких традиційних методів виготовлення. Багатоматеріальні вироби можуть містити градієнти жорсткості, теплофізичних параметрів або тріщиностійкості, що розширює можливості їх застосування у конструкціях, які зазнають циклічних або ударних навантажень.

Узагальнення сучасних досліджень підтверджує наявність як технологічних переваг, так і конструкційних обмежень у процесах ММAM [10,11], що визначає актуальність подальшого розвитку методів поєднання матеріалів та розширення сфери їх промислового застосування.

Багатоматеріальне адитивне виробництво забезпечує інтеграцію жорстких, еластичних та функціональних зон у межах єдиної конструкції, що дозволяє зменшувати масу виробів без втрати їхньої міцності, мінімізувати потребу в механічних з'єднаннях і підвищувати біологічну та хімічну сумісність деталей, призначених для експлуатації в специфічних умовах. Попри це, ММAM залишається технологічно складним процесом, оскільки вимагає сумісності матеріалів із різними властивостями, високої точності позиціонування інструмента, належного контролю теплопередачі під час формування виробу та подальшої постобробки, зокрема у разі поєднання металевих і композитних компонентів. Вказані чинники визначають актуальність подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію технологічних

режимів і вдосконалення градієнтних структур, що розширюватиме можливості промислової інтеграції ММAM.

Приклади формування градієнтних властивостей та інтеграції різномірних матеріалів у межах одного виробу наведені на рис. 5.

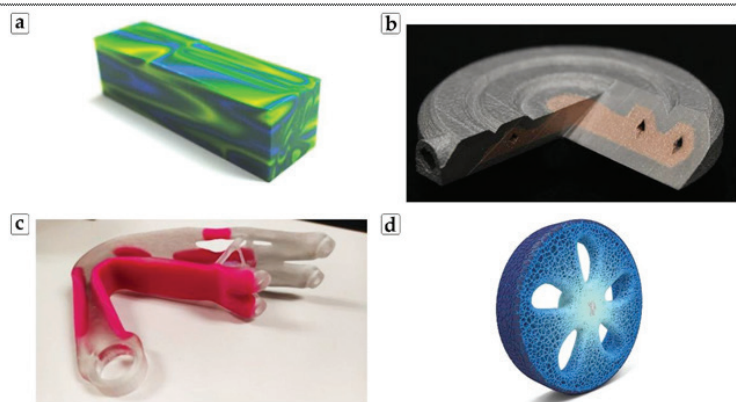


Рис. 5. Приклади багатоматеріальних виробів, виготовлених за допомогою технологій ММAM: а — полімерна деталь зі змінними механічними властивостями; б — металева конструкція з інтегрованими зонами підвищеної міцності; с — комбінований полімерний елемент із функціональними областями; д — структурований полімер із градієнтом жорсткості для транспортних застосувань

Подальше зростання інтересу до багатоматеріального адитивного виробництва зумовлене потребою у створенні конструкцій нового покоління, здатних поєднувати функціональні властивості на мікро- та макрорівні. Вирішення питань матеріальної сумісності, підвищення точності формування міжфазних з'єднань та розширення спектра доступних матеріальних комбінацій визначатимуть напрям розвитку ММAM у найближчі роки, зберігаючи її статус однієї з найдинамічніших технологій сучасного виробництва.

Висновки. Проведено аналіз сучасного стану адитивних технологій із акцентом на матеріальних рішеннях для виготовлення одно- та багатофункціональних виробів. Визначено, що вибір матеріалу є ключовим чинником забезпечення функціональності та експлуатаційної надійності друкованих деталей. Узагальнено класифікацію матеріалів для основних технологій AM і показано, що можливості одноматеріальних підходів стають обмежувальними у разі вимог до локального варіювання властивостей конструкцій. Обґрунтовано переваги технології ММAM як інноваційного напрямку розвитку галузі, що дозволяє формувати складні градієнтні структури без операцій складання. Виявлено вперше основні технологічні виклики ММAM, пов'язані із сумісністю матеріалів, міжфазною адгезією та контролем теплових процесів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію матеріальних комбінацій і розширення спектра промислових застосувань багатоматеріального адитивного виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. Additive manufacturing technologies. Cham: Springer, 2020. 691 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>.
2. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D друку. Наука, технології, інновації. 2017. № 1. URL: https://nti.ukrintei.ua/wp-content/uploads/2018/05/2017-1_stat9-UA_povn.pdf (дата звернення: 01.10.2025).
3. Chebotarova, I., & Astakhova, A. (2025). Using FDM 3D printing technology to create a lamp with custom design. *Jóvenes en la ciencia*, 35. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4727>.
4. Вибір матеріалу для 3D-друку: від пластику до металу [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://easy3dprint.com.ua/uk/yakij-material-vikoristovuye-3d-printer/> (дата звернення: 15.10.2025).
5. Багатоматеріальний 3D-друк [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://monofilament.com.ua/ua/blog-novini-3d-druku-ta-additivnih-tehnologij/bagatomaterialnij-3d-druk> (дата звернення: 27.10.2025).
6. Пояснення технології струминного 3D-друку та порівняння з DLP, MSLA та SLA [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.liqcreate.com/uk/supportarticles/jetting-3dprinting-versus-dlp-sla/> (дата звернення: 01.11.2025).
7. Transfer of knowledge about basics of 3D printing concepts to the VET teachers [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.e3dplusvet.eu/wp-content/docs/O1A1-EN.pdf> (дата звернення: 02.11.2025).
8. The free beginner's guide to 3D printing [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2014/07/3D-Printing-Guide.pdf> (дата звернення: 03.11.2025).
9. Голубник Т. С., Маїк Л. Я., Снігур Н. С. Аналіз процесу створення 3D-моделей. Квалілогія книги. 2023. № 1 (43). С. 56–62. DOI: <https://doi.org/10.32403/2411-3611-2023-1-43-56-62>.
10. Callister W. D., Rethwisch D. G. Materials Science and Engineering: An Introduction. URL: [https://ftp.idu.ac.id/wpcontent/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Materials%20Science%20and%20Engineering%20An%20Introduction%20by%20William%20D.%20Callister,%20Jr.,%20David%20G.%20Rethwisch%20\(z-lib.org\).pdf](https://ftp.idu.ac.id/wpcontent/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Materials%20Science%20and%20Engineering%20An%20Introduction%20by%20William%20D.%20Callister,%20Jr.,%20David%20G.%20Rethwisch%20(z-lib.org).pdf) (дата звернення: 12.11.2025).
11. Mohanavel V., Ali K. A., Ranganathan K., Jeffrey J. A., Ravikumar M. M., Rajkumar S. The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 47. Pp. 405–409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.596>.

REFERENCES

1. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2020). *Additive manufacturing technologies*. Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7> (in English).
2. Androshchuk, H. O. (2017). *Adytyvni tekhnolohii: perspektyvy i problemy 3D druku. Nauka, tekhnolohii, innovatsii*, 1. Retrieved from https://nti.ukrintei.ua/wp-content/uploads/2018/05/2017-1_stat9-UA_povn.pdf (accessed: 01.10.2025) (in Ukrainian).

3. Chebotarova, I., & Astakhova, A. (2025). Using FDM 3D printing technology to create a lamp with custom design. *Jóvenes en la ciencia*, 35. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4727>.
4. Vybir materialu dlia 3D-druku: vid plastyku do metalu. Retrieved from <https://easy3dprint.com.ua/uk/yakij-material-vikoristovuye-3d-printer/> (accessed: 15.10.2025) (in Ukrainian).
5. Bahatomaterialnyi 3D-druk. Retrieved from <https://monofilament.com.ua/ua/blog-novini-3d-druku-ta-additivnih-tehnologij/bagatomaterialnij-3d-druk> (accessed: 27.10.2025) (in Ukrainian).
6. Poiasnennia tekhnolohii strumynnoho 3D-druku ta porivniannia z DLP, MSLA ta SLA. Retrieved from <https://www.liqcreate.com/uk/supportarticles/jetting-3dprinting-versus-dlp-sla/> (accessed: 01.11.2025) (in Ukrainian).
7. *Transfer of knowledge about basics of 3D printing concepts to the VET teachers*. Retrieved from <https://www.e3dplusvet.eu/wp-content/docs/O1A1-EN.pdf> (accessed: 02.11.2025) (in English).
8. *The free beginner's guide to 3D printing*. Retrieved from <https://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2014/07/3D-Printing-Guide.pdf> (accessed: 03.11.2025) (in English).
9. Holubnyk, T. S., Maik, L. Ya., & Snihur, N. S. (2023). Analiz protsesu stvorennia 3D-modelei. *Kvalilohiia knyhy*, 1(43), 56–62. <https://doi.org/10.32403/2411-3611-2023-1-43-56-62> (in Ukrainian).
10. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Retrieved from [https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Materials%20Science%20and%20Engineering%20An%20Introduction%20by%20William%20D.%20Callister,%20Jr.,%20David%20G.%20Rethwish%20\(z-lib.org\).pdf](https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Materials%20Science%20and%20Engineering%20An%20Introduction%20by%20William%20D.%20Callister,%20Jr.,%20David%20G.%20Rethwish%20(z-lib.org).pdf) (accessed: 12.11.2025) (in English).
11. Mohanavel, V., Ali, K. A., Ranganathan, K., Jeffrey, J. A., Ravikumar, M. M., & Rajkumar, S. (2021). The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector. *Materials Today: Proceedings*, 47, 405–409. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.596> (in English).

doi: 10.32403/2411-3611-2026-1-49-177-185

ANALYSIS OF MATERIALS AND TECHNOLOGIES IN MODERN ADDITIVE MANUFACTURING

V. Slobodianyuk¹, T. Holubnyk²

¹ Lviv Polytechnic National University, 19 Pid Holoskom St., Lviv, 79020, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-6982-7194>,
e-mail: valentyna.h.slobodianyuk@lpnu.ua

² Lviv Polytechnic National University, 12 Stepan Bandera St., Lviv, 79013, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-8325-9813>,
e-mail: tetiana.s.holubnyk@lpnu.ua

Additive manufacturing (AM) has become a key technology for producing geometrically complex components with reduced material consumption and enhanced design flexibility. The growing industrial demand for AM has intensified the focus on material development, as the properties of feedstock directly determine the functional performance and durability of printed parts. This article provides an analytical overview of the current state of AM processes and materials used for single- and multimaterial fabrication.

The paper highlights differences between the most widely applied AM technologies, including material extrusion, vat photopolymerization, and powder bed fusion, emphasizing how polymer and composite feedstocks influence product strength, chemical resistance, and operational stability. A special focus is given to multimaterial additive manufacturing (MMAM), which allows combining materials with distinct functions inside one component. This approach enables graded structures, improved performance under dynamic loads, and reduced need for mechanical joints.

The review identifies both advantages and challenges of MMAM technologies. Benefits include weight reduction, integration of flexible and rigid zones, and extended application in aerospace, automotive, biomedical, and customized product manufacturing. Key limitations are linked to material compatibility, interlayer bonding, thermal mismatch, and the complexity of ensuring accuracy and process control.

The study confirms the importance of further development of material systems, interfacial bonding methods, and hybrid manufacturing approaches. Expanding MMAM capabilities will contribute to the broader industrial adoption of functional, reliable, and resource-efficient additively manufactured components, highlighting AM's growing role in the design of next-generation high-performance structures.

Keywords: *additive manufacturing; multimaterial printing; polymers; composites; material compatibility; interlayer adhesion; functional structures.*

Стаття надійшла до редакції 01.03.2026.

Submitted: 01.03.2026.

Прийнято до друку: 19.04.2026.

Accepted: 19.04.2026.

Опубліковано: 20.05.2026.

Published: 20.05.2026.