

**В.М. Орел, к.т.н.**

*Кременчуцький льотний коледж*

*Харківського національного університету внутрішніх справ*

**О.Ф. Саленко, д.т.н., проф.**

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

**П.П. Мельничук, д.т.н., проф.**

*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## **Інноваційні адитивні технології в створенні конструкційних елементів літальних і космічних апаратів**

*У сучасному аерокосмічному виробництві адитивні технології набули великого значення через їх потенціал для швидкого та ефективного виготовлення складних конструкційних елементів. Ця стаття присвячена дослідженню та аналізу різних аспектів використання адитивних технологій у створенні літальних та космічних апаратів. Зокрема, розглянуто різні методи адитивного виробництва, враховуючи топологічну оптимізацію конструкційних елементів, використання композитних матеріалів та дослідження процесів формування шарів. Особлива увага приділяється аналізу рентабельності та ефективності виробництва, а також розробці нових матеріалів для адитивного виробництва. Загальний обзор та інтеграція адитивних технологій у виробничі процеси сприяють подальшому розвитку цієї сфери та впровадженню інноваційних рішень у виробництво літальних і космічних апаратів.*

**Ключові слова:** композитні матеріали; адитивні технології; авіація; літакобудування; 3D-друк; прототипування; ефективність; інновації.

**Актуальність теми.** У сучасному світі авіаційна та космічна промисловість стикаються з постійно зростаючими вимогами до ефективності, надійності та економічності виробництва [1]. Традиційні методи виготовлення конструкційних елементів часто не відповідають цим вимогам, оскільки вони є тривалими, дорогими та потребують значних матеріальних і трудових ресурсів. У зв'язку з цим, застосування адитивних технологій, відомих як 3D-друк [2], стає дедалі актуальнішим.

Адитивні технології дозволяють значно скоротити час і витрати на виробництво, забезпечуючи при цьому високу точність та якість виготовлених деталей. Це особливо важливо для створення складних конструкційних елементів літальних і космічних апаратів, де кожен грам ваги та кожна мілісекунда виробничого циклу мають значення. Додатково адитивні методи дозволяють виробляти деталі з матеріалів, які важко або неможливо обробляти традиційними способами, що відкриває нові можливості для інженерних рішень.

Впровадження інноваційних адитивних технологій у виробничі процеси авіаційної та космічної галузей [3] сприяє підвищенню конкурентоспроможності компаній, зменшенню витрат на виготовлення та ремонт обладнання, а також прискоренню впровадження нових технологій і матеріалів. Таким чином, дослідження та розвиток адитивних технологій є надзвичайно актуальними для забезпечення сталого розвитку та технологічного прогресу у сфері літальних і космічних апаратів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** Останні дослідження та публікації на тему інноваційних адитивних технологій у створенні конструкційних елементів літальних і космічних апаратів вказують на значний прогрес у цій галузі [4–6]. Дослідження зосереджені на вдосконаленні процесів адитивного виробництва, розробці нових матеріалів для друку, а також застосуванні цих технологій у виробництві конструкційних елементів для авіаційної та космічної промисловості.

Одним із ключових напрямів досліджень є розширення матеріальної бази для адитивного виробництва, з вивченням нових полімерних, металевих та композитних матеріалів можуть бути використані для створення конструкційних елементів з високою міцністю та стійкістю [7, 8]. Крім того, зосереджуються на розробці більш продуктивних і точних друкарських систем, які дозволяють отримувати складніші та більш функціональні деталі.

Інші дослідження спрямовані на використання адитивних технологій у створенні різноманітних елементів літальних та космічних апаратів, таких як двигуни, обтічники, конструкційні складові та інші [9]. Вони досліджуються як окремо, так і в комплексі з традиційними методами виробництва для досягнення оптимальних результатів у вигляді зменшення ваги, підвищення міцності та ефективності апаратів.

**Метою статті** є дослідження та аналіз інноваційних адитивних технологій, їх застосування у створенні конструкційних елементів літальних і космічних апаратів, а також визначення їх переваг і

викликів порівняно з традиційними методами виробництва. Вивчення сучасних тенденцій у цій галузі, оцінка ефективності та економічності використання адитивних технологій, а також надання рекомендацій щодо їх впровадження в авіаційно-космічному секторі.

**Викладення основного матеріалу.** Різні модифікації адитивного виробництва (AB) (таб. 1) та їх поєднання з іншими методами виробництва відкривають нові можливості для створення багатоматеріальних або композитних виробів. Ці процеси враховують не лише адаптацію існуючих методів для впровадження багатоматеріалів, але й розробку нових, інноваційних технологій [10], що дозволяють поєднувати різні матеріали в одному виробі. Такі підходи дають змогу створювати вироби з унікальними властивостями, які раніше були недосяжні традиційними методами виробництва.

Переваги адитивного виробництва є численними. Серед них – можливість швидкого прототипування [11], зменшення витрат на матеріали завдяки оптимізації використання сировини, зниження ваги виробів без втрати їхньої міцності, а також можливість створення складних внутрішніх структур, що недосяжні іншими методами. Крім того, AB дозволяє значно скоротити виробничі цикли.

Переваги та потенціал адитивного виробництва детально проілюстровані на рисунку 1, що надає візуальне уявлення про можливості цієї технології.

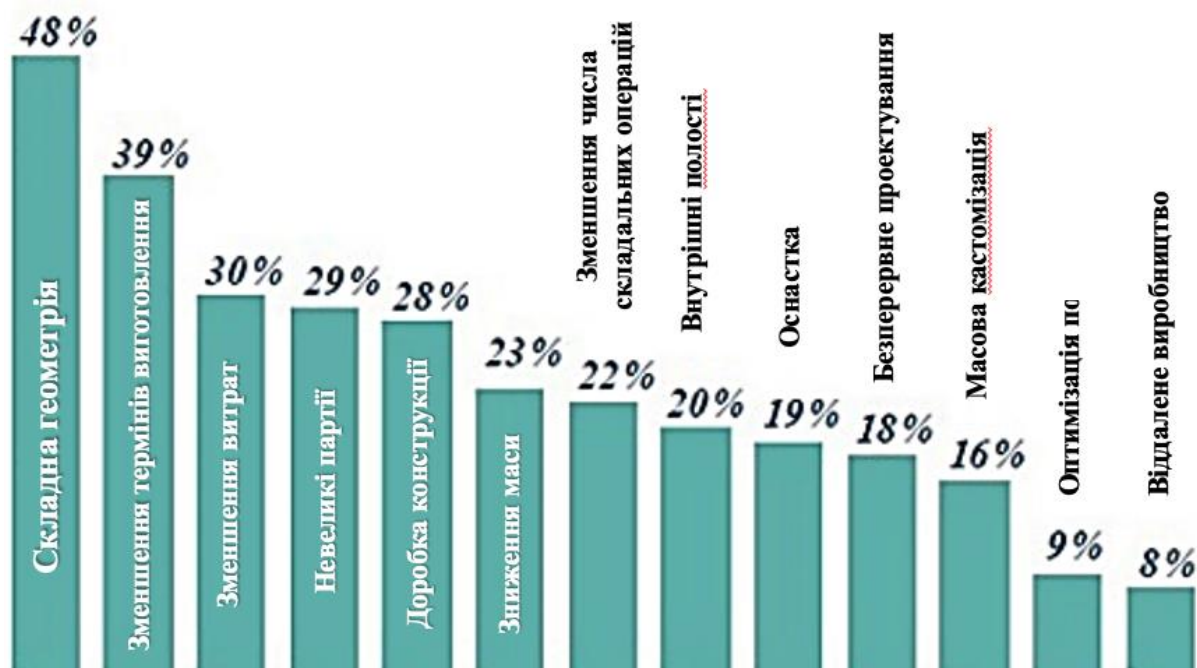


Рис. 1. Переваги процесів АВ

Методи адитивного виробництва, які застосовуються для створення прототипів, макетів та елементів конструкцій, на сьогоднішній день вважаються одними з найбільш перспективних у сфері формоутворення [12]. Вони можуть бути безпосередньо застосовані в «розумному виробництві», спрямованому на створення зовсім нових виробів, матеріалів та заготовок з мінімальним використанням сировини та максимальною уніфікацією обладнання.

Незважаючи на активний пошук сфер застосування адитивних технологій та дослідження особливостей формування шарів та виробів в цілому, інформація про ці технології залишається недостатньо дослідженою [13, 14]. Однак потенційні можливості, які вони відкривають у сфері виробництва, настільки широкі, що науковці активно працюють над збільшенням обсягу досліджень у цій галузі. Вони працюють над відкриттям нових методів, способів та матеріалів для ефективного промислового використання адитивних технологій.

У таблиці 1 представлено основні методи адитивного виробництва [15], а їхня ефективність (рентабельність або доцільність використання) проілюстрована на рисунку 2.

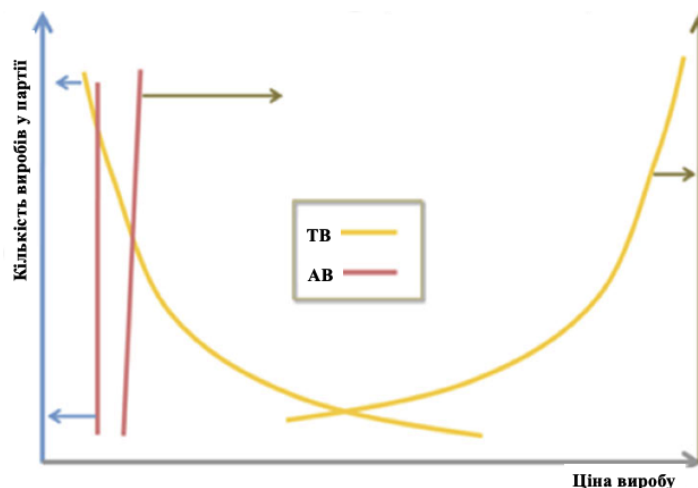


Рис. 2. Ефективність застосування адитивних процесів (AB) порівняно із процесами традиційними (ТВ)

Таблиця 1

Методи адитивного синтезу

| Тип                                     | Технологія   | Спільний друк кількома матеріалами | Кольоровий друк | Опис  |
|---|--|------------------------------------|-----------------|---|
| 1                                       | 2  | 3                                  | 4               | 5   |
| Екструзія                               | Моделювання методом наплавлення (англ. Fused Deposition Modeling, FDM)   | Можливо                            | Можливо         | Застигання матеріалу при охолодженні – друкувальна головка видавлює на охолоджену платформу-основу краплі розігрітого термопластика. Краплі швидко застигають і злипаються, формуючи шари майбутнього об'єкта |
|   | Робокастинг (англ. Robocasting, або Direct Ink Writing, DIW)             | Можливо                            | Можливо         | «Чорнило» (зазвичай керамічний шлам) виходить з сопла в рідкому стані, але відразу ж приймає потрібну форму завдяки псевдопластичній рідині   |
| Фотополімеризація                       | Лазерна стереолітографія (англ. Laser Stereo Lithograph, SLA)            | Неможливо                          | Неможливо       | Ультрафіолетовий лазер засвічує рідкий фотополімер (через фотошаблон, або поступово, піксель за пікселем)   |
| Фотополімеризація                       | SLA-DLP  | Неможливо                          | Неможливо       | DLP-проектор засвічує фотополімер   |
| Формування шару на рівному шарі порошку | (англ. 3D-Printing, 3DP)   | Неможливо                          | Неможливо       | Склеювання порошку шляхом нанесення рідкого клею за допомогою струменевого друку  |
|   | Електронно-променева плавка (англ. Electron-beam melting, EBM)           | Неможливо                          | Неможливо       | Плавлення металевого порошку електронним променем у вакуумі   |
|   | Селективне лазерне спікання (англ. Selective laser sintering, SLS)       | Неможливо                          | Неможливо       | Плавлення порошку під дією лазерного випромінювання   |
|   | Пряме лазерне спікання металу (англ. Direct metal laser sintering, DMLS) | Неможливо                          | Неможливо       | Плавлення металевого порошку під дією лазерного випромінювання  |
|   | Вибіркове теплове спікання (англ. Selective heat sintering, SHS)         | Неможливо                          | Неможливо       | Плавлення порошку нагрівальною головкою   |

Закінчення табл. 1

| 1                                | 2   | 3       | 4       | 5  |
|----------------------------------|---|---------|---------|--|
| Подача матеріалу у вигляді дроту | (англ. Electron Beam Freeform Fabrication, EBF)   | Можливо | Можливо | Плавлення дрогоного матеріалу під дією електронного випромінювання   |
| Ламінування                      | Виготовлення об'єктів з використанням ламінування (англ. Laminated Object Manufacturing, LOM) | Можливо | Можливо | Деталь створюється з великої кількості шарів робочого матеріалу, які поступово накладаються один на одного і склеюються, при цьому лазер (або різальний інструмент) вирізає в кожному контурі перетину майбутньої деталі |
| Точкова подача порошку           | Directed Energy Deposition  | Можливо | Можливо | Порошок, що подається, плавиться під дією лазерного або електронного променя   |
| Струменевий друк                 | Метод багатоструменевого моделювання (Multi Jet Modeling, MJM)                                | Можливо | Можливо | Робочий матеріал наноситься за допомогою струменевого друку  |

Для комплексної оцінки адитивних процесів пропонується використовувати зведений бал якості, що дозволяє провести зіставлення ефективності різних методів [15], які зазначені у таблиці 2. Аналіз цієї таблиці свідчить про те, що процеси FDM є найбільш простими та перспективними з точки зору економічності та якості виготовлення. Для формування деталей використовується різноманітність методів позиціонування робочого органу (головки):

- деякі системи використовують рух у декартовій системі координат, де головка або основа моделі переміщується вздовж трьох перпендикулярних напрямків;
- інші використовують три паралелограмів для координування руху основи моделі;
- існують автономні системи, де друкувальна головка розташована на власному шасі і переміщується за допомогою зовнішнього рушія;
- деякі пристрої, як наприклад 3D-принтери з обертовим столиком, використовують обертання для переміщення матеріалу на вісь замість прямолінійного руху;
- ще один підхід – ручна друкувальна головка, яка дозволяє користувачу самостійно підносити її до потрібного місця у просторі та наносити матеріал.

Ці методи дозволяють ефективно використовувати ресурси та максимально оптимізувати процеси виготовлення деталей з використанням адитивних технологій.

Таблиця 2

Зведені дані якості технологій

| Місце рейтингу | Технологія | Точність | Якість дрібних деталей | Міцність | Умовна шорстк. поверхні | Функціональність | Підсумковий бал |
|----------------|------------|----------|------------------------|----------|-------------------------|------------------|-----------------|
| 1              | PJET       | 1        | 1                      | 2,5      | 1                       | 1,5              | 7               |
| 2              | SLA        | 1,33     | 1                      | 2,66     | 1                       | 2                | 7,99            |
| 3              | 3DP        | 1        | 2,33                   | 1,33     | 3                       | 1                | 8,66            |
| 4              | SLS        | 2        | 3                      | 1        | 3                       | 1                | 10              |
| 5              | FDM        | 1        | 2                      | 3        | 2                       | 3                | 11              |

Практичне застосування цих технологій відзначається майже у всіх провідних компаніях авіаційної галузі:

- компанія «Stratasys» пропонує рішення для виготовлення пластикових деталей для авіаційних систем, постачаючи високоякісні 3D-принтери, які здатні виробляти деталі з різних видів пластиків, таких як ABS, ULTEM і Nylon. Ці матеріали відповідають вимогам авіаційного виробництва [16];
- компанія «Airbus» використовує пластиковий тривимірний друк для створення прототипів та окремих деталей кабіни літаків. Наприклад, це можуть бути вентиляційні канали, кріплення для сидінь або пластикові панелі для інтер'єру літака [17];

- компанія «Boeing» також використовує пластиковий тривимірний друк для виготовлення деяких деталей кабіни та обтічників літаків. Компанія може створювати дрібні компоненти, які вимагають високої точності та деталізації, використовуючи різні типи пластиків [18];

- «GE Aviation» використовує пластиковий тривимірний друк для виробництва деяких компонентів у двигунах літаків, наприклад, пластикові втулки або кріплення для датчиків, що застосовуються у внутрішніх системах двигуна [19].

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Проведене дослідження дозволило констатувати низку важливих моментів:

- вирішення проблеми якісного і швидкого виготовлення елементів літальних апаратів доцільно вирішувати шляхом реалізації концепції функціонального відтворення виробу, який формується як композиційний виріб складної форми, із оптимізованою топологією руху адитивного інструменту відносно субстрату;

- формування багат шарової оболонки доцільно виконувати у вигляді шаруватої структури (композиційної); при цьому матеріали можуть мати значно відмінні властивості та характеристики. Отже, концепція формування виробу у вигляді основи (яка може також бути видаленою) із нанесенням певної кількості шарів, є прийнятною;

- адитивний процес тепер постає основою для подальших технологічних дій, які кінцево формують його фізико-механічні властивості та є універсальним процесом, який може значно модифікуватися для отримання різного роду моделей, зокрема, специфічного (біомедичного) призначення. Тобто FDM-процес є основою гібридного способу формування виробів;

- засоби АВ, що працюють на основі струменевих технологій, можуть мати достатньо високу роздільну здатність;

- форма виробу, спосіб його вирощування безпосередньо визначають характеристики міцності, які, поряд із орієнтуванням відносно руху друкувальної головки та температурними режимами, мають раціонально забезпечуватися при FDM-процесі.

#### References:

1. Janaki Ram, G., Yang, Y. and Stucker, B. (2006), «Effect of process parameters on bond formation during ultrasonic consolidation of aluminum alloy 3003», *J Manuf Syst*, Vol. 25, Issue 3, pp. 221–238.
2. White, D. and Carmein, D.E. (2002), *Patent US 6,463,349 Ultrasonic object consolidation system and method*.
3. Ram, G.J., Robinson, C., Yang, Y. and Stucker, B. (2007), «Use of ultrasonic consolidation for fabrication of multi-material structures», *Rapid Prototyp J*, Vol. 13, Issue 4, pp. 226–235.
4. Kumar, S. (2010), «Development of functionally graded materials by ultrasonic consolidation», *CIRP J Manuf Sci Technol*, Vol. 3, Issue 1, pp. 85–87.
5. Johnson, T. (2018), «History of composites. The evolution of lightweight compositematerials», [Online], available at: <https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404>
6. Sanjay, M.R., Arpitha, G.R., Naik, L.L. et al. (2016), «Applications of natural fibers and itscomposites: An overview», *NaturalResources*, Vol. 37, pp. 108–114, doi: 10.4236/nr.2016.730 (2).
7. Atwood, C., Ensz, M., Greene, D. et al. (1998), «Laser engineered net shaping (LENS (tm)): A tool for direct fabrication of metal parts», Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, Livermore, CA.
8. Griffith, M.L., Harwell, L.D., Romero, J.T. et al. (1997), «Multi-material processing by lenstm», *In: Proceedings of the 1997 solid freeform fabrication symposium*, pp. 3–11.
9. Griffith, M.L., Ensz, M.T., Puskar, J.D. et al. (2000), «Understanding the microstructure and properties of components fabricated by laser engineered net shaping (LENS)», *In: MRS proceedings*, Vol. 625, 9 p.
10. Smugeresky, J., Keicher, D. and Romero, J. (1997), «Laser engineered net shaping(LENS) process: optimization of surface finish and microstructural properties», *Adv Powder Metall Part Mater*, Vol. 3, Issue 21, [Online], available at: <http://www.sciaky.com/>
11. Taminger, K.M. and Hafley, R.A. (2006), *Electron beam free form fabrication forcost effective near-net shape manufacturing*, NATO, AVT 139.
12. Wilson, J.M., Piya, C., Shin, Y.C. et al. (2014), «Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis», *J Cleaner Prod*, Vol. 80, pp. 170–178.
13. Kathuria, Y. (1997), «Laser-cladding process: a study using stationary and scanning CO2 laser beams», *Surf Coat Technol*, Vol. 97, pp. 442–447.
14. Tuominen, J., Honkanen, M., Hovikorpi, J. et al. (2003), «Corrosion resistant nickel superalloy coatings laser-clad with a 6 kW high power diode laser (hpdl)», *International Society for Optics and Photonics*, International congress on laser advanced materials processing, LAMP, p. 59–64.
15. [Online], available at: <https://calvarybaptistshsv.org/wiki/3D-%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80>
16. Zhong, M., Yao, K., Liu, W. et al. (2001), «High-power laser cladding stellite 6+ wc with various volume rates», *J Laser Appl*, Vol. 13, Issue 6, pp. 247–251.
17. Gedda, H., Powell, J., Wahlström, G. et al. (2002), «Energy redistribution during co2 laser cladding», *J Laser Appl*, Vol. 14, Issue 2, pp. 78–82.

18. Kobenko, S., Dejus, D., Jātnieks, J. et al. (2022), «Structural integrity of the aircraft interior spare parts produced by additive manufacturing», *Polymers*, Vol. 14, Issue 8.
19. Kalender, M., Kılıç, S.E., Ersoy, S. et al. (2019), «Additive manufacturing and 3D printer technology in aerospace industry», *In 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, IEEE, pp. 689–694.
20. Fu, X., Lin, Y., Yue, X.J. et al. (2022), «A review of additive manufacturing (3D printing) in aerospace: Technology, materials, applications, and challenges», *In Mobile Wireless Middleware, Operating Systems and Applications*, 10th International Conference on Mobile Wireless Middleware, Operating Systems and Applications (MOBILWARE 2021), Springer International Publishing, Cham, pp. 73–98.
21. Behera, A. (2020), «Processes and Application in Additive Manufacturing: Practices in Aerospace, Automobile, Medical, and Electronic Industries», *In Additive Manufacturing applications for metals and composites*, IGI Global, pp. 25–47.

**Орел** Вадим Миколайович – кандидат технічних наук, завідувач відділення фахової підготовки Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ.

<https://orcid.org/0000-0002-8775-3253>.

Наукові інтереси:

- адитивні технології;
- обробка композиційних матеріалів.

**Саленко** Олександр Федорович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-5685-6225>.

Наукові інтереси:

- обробка високоенергетичними методами;
- функціонально орієнтований підхід.

**Мельничук** Петро Петрович – доктор технічних наук, професор Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0003-0361-756X>.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проектування різальних інструментів.

**Orel V.M., Salenko O.F., Melnychuk P.P.**

#### **Innovative additive technologies in the creation of structural elements of aircraft and spacecraft**

In modern aerospace manufacturing, additive technologies have become very important because of their potential for fast and efficient production of complex structural elements. This article is devoted to the study and analysis of various aspects of the use of additive technologies in the creation of aircraft and spacecraft. In particular, various methods of additive manufacturing are considered, including topological optimization of structural elements, the use of composite materials, and the study of layer formation processes. Special attention is paid to the analysis of profitability and efficiency of production, as well as the development of new materials for additive manufacturing. General review and integration of additive technologies into production processes contribute to the further development of this area and the introduction of innovative solutions in the production of aircraft and spacecraft.

**Keywords:** composite materials; additive technologies; aviation; aircraft construction; 3D printing; prototyping; efficiency; innovation.

Стаття надійшла до редакції 28.05.2024.