

doi: 10.32620/oikit.2020.88.09

УДК 629.7.02

А. С. Полупан

## Дослідження питання впровадження адитивних технологій в авіабудівну галузь

*Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»*

Розглянуто питання підвищення якості, скорочення термінів, вартості виготовлення літаків вітчизняного виробництва і зменшення їх маси шляхом модернізації технологічних процесів з урахуванням широкого спектра функціональних можливостей використання адитивних технологій для виробництва елементів конструкції літаків із титанових сплавів. Визначено, що титан та його сплави завдяки своїм унікальним хімічним і механічним характеристикам залишається актуальним і затребуваним металом, що використовують у конструкціях сучасних літаків. Але традиційні способи виготовлення деталей з титану є високовартісними і не дозволяють використання цього металу у широкому обсязі. Пропонованим рішенням такої проблеми є використання технологій адитивного виробництва для виготовлення елементів конструкції літаків з титану. Наведено приклади використання титанових сплавів в авіаційно-космічній промисловості завдяки відмінному поєднанню міцності, низькій густині, а також дуже високій корозійній стійкості і втомній міцності. Відзначено ефективність використання титанових сплавів для виготовлення елементів конструкції літальних апаратів (ЛА) в аспектах зниження загальної маси літака та високої надійності конструкції в цілому на прикладі провідних авіабудівних компаній світу. Описано інформацію про адитивні технології у машинобудуванні. Наведено огляд робіт іноземних науковців щодо дослідження відмінностей в механічних характеристиках, мікроструктурі та макроструктурі зразків, виготовлених за допомогою адитивних технологій, зазначено їх переваги та недоліки. Перелічено переваги адитивних технологій в машинобудуванні, які обумовлюють економічну ефективність від їх використання. Акцентовано увагу на найпоширеніших методах адитивного виробництва: синтез на підкладці (PBF), пряме підведення енергії і матеріалу (DED). Визначено завдання дослідження та запропоновано рішення, яке полягає в оптимізації технології виготовлення елементів конструкції ЛА літаків. Дослідження дозволять у подальшому вдосконалити технологію виробництва літаків.

**Ключові слова:** підвищення якості; титанові сплави; адитивні технології; 3D-друк; синтез на підкладці (PBF); пряме підведення енергії і матеріалу (DED); технологія виробництва.

### Вступ

Авіакосмічне машинобудування внаслідок високих вимог, що пред'являють до літальних апаратів, завжди було двигуном науки, техніки і освіти. Одним із напрямків підвищення тактико-технічних характеристик літальних апаратів є зниження їх маси, підвищення ресурсу, надійності і технологічності завдяки застосуванню титанових матеріалів, які за питомою міцністю, корозійною стійкістю, жароміцністю і демпфівувальними властивостям перевершують всі традиційні конструкційні матеріали [1].

Титанові сплави, зокрема Ti-6Al-4V, широко застосовують не лише в авіаційно-космічному виробництві, але й в автомобільній, біомедичній та хімічній промисловості завдяки відмінному поєднанню міцності і в'язкості руйнуванню, низькій густині, а також дуже високій корозійній стійкості і втомній міцності [2]. Титанову продукцію широко використовують в авіабудуванні завдяки своїм хімічним і механічним властивостям, і вона становить від 15 до 20 відсотків сучасної цивільної авіації [3].

Сучасні авіалайнери стають ще більш титаноємними. Це також пов'язано з тим, що в нових літаках збільшується частка композиційних матеріалів, з якими алюміній активно взаємодіє і кородує. Титан не здатний до таких процесів, у зв'язку з чим суттєво збільшується ресурс комплектуючих виробів.

Титанові сплави, які можуть працювати при температурах від нуля до 600°C, використовують у двигунах для дисків, лопатей, валів і кожухів від переднього вентилятора до останнього ступеня компресора високого тиску, а також у задній частині двигуна для легко навантажених конструкцій [7]. Крім того, із титанових сплавів у літаках виготовляють: елерони, гідросистеми, панелі та поворотні вузли крил, рулі, панелі, кронштейни, шпангоути, стінки лонжеронів, трубопроводи, предкрилки і закритки, канали повітрозабірників, кріплення і ряд інших деталей.

У той же час традиційні способи виготовлення деталей з титанових сплавів, є високовартісними. Цей чинник визначається високою матеріаломісткістю при механічній обробці, поганою оброблюваністю, викликаними низькою теплопровідністю і високою хімічною реактивністю з матеріалами різального інструменту, що перешкоджає титановим сплавам широко використовуватися. Застосування адитивних технологій (АТ) дозволяє знизити витрати при виробництві виробів із титанових сплавів [4] за рахунок виготовлення високоточних заготовок, які в подальшому потребують мінімальної механічної обробки. При цьому ключовою вимогою при виготовленні таких заготовок є збереження високих механічних характеристик як самого вихідного матеріалу, так і деталі, що виготовляють у цілому [5].

### Основна частина

У дослідженні механічних властивостей, твердості, макроструктури [6] доведені високі характеристики і раціональність використання титанового порошку як матеріалу для виготовлення деталей конструкції ЛА. У роботі вказано перевагу зразків, виготовлених DMLS-методом 3D-друку над зразками, виготовленими традиційним способом (показники міцності матеріалу, межі текучості і модуля пружності вище).

У ряді досліджень проаналізовано статичні властивості при розтягуванні і при високій втомі зразків, виготовлених з дротяного та порошкового титану [7] та [8] дослідження щільності, мікротвердості, шорсткості поверхні та мікроструктури зразків. При аналізі, було встановлено, що в загальному випадку конструкції, виготовлені різними методами адитивного виробництва, можуть набувати властивостей, відповідних для застосування в аерокосмічній промисловості і порівнянними з конструкціями, виготовленими традиційними методами виробництва.

Адитивне виробництво (АВ, 3D-друк) – це створення об'єкта методом його шарового вирощування на основі тривимірної CAD-моделі (моделі, розробленої в системі автоматизованого проектування) [9].

Суть даного виду виробництва полягає в додавання матеріалу шар за шаром. Цим пояснюється відмінність 3D-друку від традиційного методу виробництва виробів (Рисунок 1), який є субтрактивним і при ньому зайвий матеріал видаляється із заготовки за допомогою механічної обробки [10].

Такі авіабудівні компанії, як Boeing Inc, General Electric, заявляють про досягнення зниження ваги та зростання довговічності елементів конструкції планера літака та двигунів, використовуючи 3D-друк титаном [7].

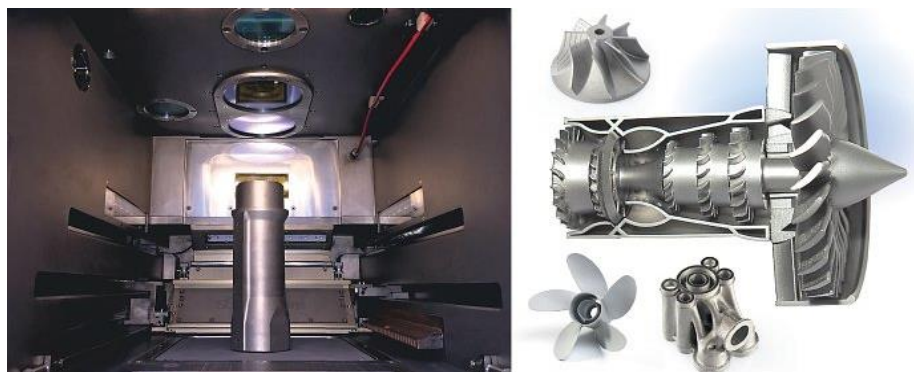


Рис. 1. Адитивне виробництво деталей із титанових сплавів

Адитивне виробництво виникло як спосіб автоматизації завдань щодо формування прототипів і спочатку було відомо під терміном «швидке прототипування». Зараз істотний спектр завдань, для яких використовують подібні технології, знаходиться в області швидкого виконання прототипів виробів і деталей.

Оскільки процес створення деталей оснований на цифрових комп'ютерних моделях, то для опису технологій 3D-друку виробів існує ще один термін – «цифрове виробництво». 3D-принтер вирощує виріб пошарово, а розбивка та геометрія шарів описується в STL-файлі. Для отримання пошарового STL-файлу зазвичай застосовують конвертор CAD-формату, вбудований в систему автоматизованого проектування, яку використовують інженерно-технічні працівники підприємства [11]. Алгоритм виготовлення деталі за допомогою адитивних технологій показано на рисунку 2.

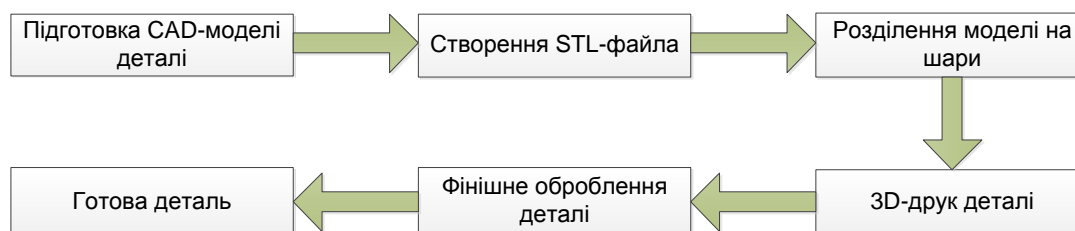


Рис. 2. Алгоритм виготовлення деталі адитивним методом

Спільне дослідження European Aeronautic Defense and Space Company (Брістоль, Великобританія) і EOS Innovation Center (Уорвік, Великобританія) показало, що економія сировини при АВ може досягати 75%. Завдяки всім цим якостям АВ порівняно з традиційними виробничими технологіями має значний потенціал в тому, що стосується скорочення витрат, енергозбереження та зниження шкідливих викидів в атмосферу [12].

Унікальні можливості АВ забезпечують такі переваги:

- скорочення термінів і вартості запуску виробу у виробництво завдяки відсутній необхідності в спеціалізованому інструментальному оснащенні;
- можливість і економічна доцільність дрібносерійного виробництва;
- оперативні зміни в проекті на етапі виробництва;
- функціональна оптимізація продукції (наприклад, реалізація оптимальної форми каналів охолодження);
- економічна доцільність виробництва кастомізованої продукції;
- скорочення втрат і відходів виробництва;

- можливості для спрощення логістики, скорочення часу поставок, зменшення обсягів складських запасів;
- персоналізація дизайну [13].

У той же час існують стримуючі чинники для більш швидкого впровадження адитивних технологій, а саме:

- низька продуктивність, підвищення якої призводить до погіршення якості виробів;
- погана шорсткість поверхні виробів;
- низька точність виготовлення, зумовлена викривленням виробів внаслідок виникнення залишкових температурних напружень;
- висока вартість обладнання та сировини;
- відсутність відпрацьованих методів неруйнівного контролю якості кінцевої продукції [14].

Для виробництва деталей з титану використовують сплави, які поділяються на чотири категорії:

1. Альфа-сплави (Ti-5Al-2Sn-ELI, Ti-8Al-1Mo-1V).
2. Сплави, близькі до альфи (Ti-5Al-5Sn-2Zr-2Mo, IMI 685 і Ti-1100).
3. Альфа і бета (Ti-6Al-4V, Ti-6Al-4V-ELI і Ti-6Al-6V-2Sn).
4. Бета і близькі до бети сплави (Ti-13V-11Cr-3Al, Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al, бета-С і Ti-15-3).

Серед цих сплавів Ti-6Al-4V альфа-бета є більш популярним для 3D-друку [15].

Більш високою актуальністю на ринку користуються методи адитивного виробництва титаном, які згруповані у дві основні категорії: синтез на підкладці (PBF) і пряме підведення енергії і матеріалу (DED) [16].

У процесах PBF наносять шари порошку, а джерело тепла (лазерний або електронний промінь) вибірково розплавляє нанесений порошок. Потім опорна плита переміщується вниз і наноситься новий шар порошку. У процесах DED додавання матеріалу (порошку або дроту) безпосередньо подається у ванну розплаву. На рисунку 3, а, б показані основні принципи роботи, а в таблиці 1 порівнюються їх основні характеристики [17].

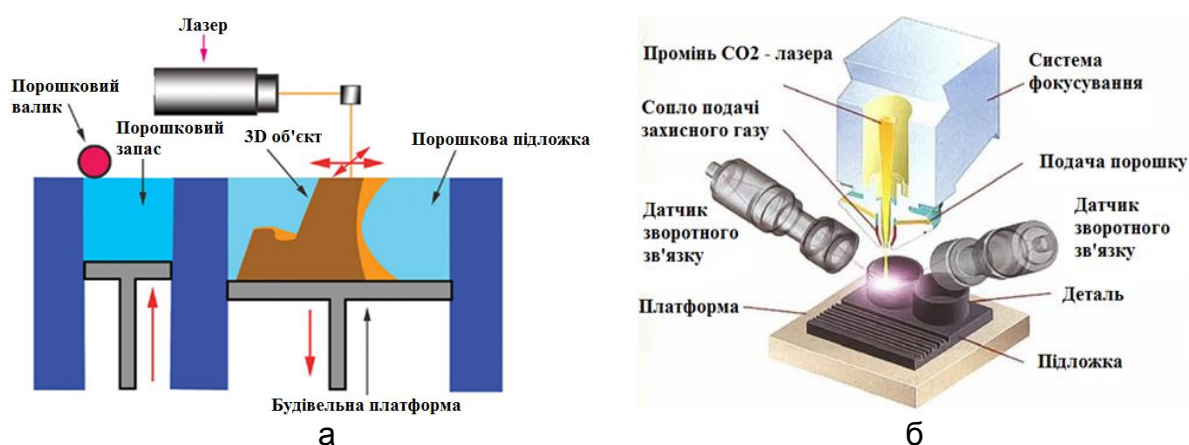


Рис. 3. Загальний принцип роботи категорій 3D-друку PBF і DED

Процеси PBF використовують переваги сфокусованого джерела енергії, який вибірково плавить або спікає шар порошку. Доступні різні процеси, як показано в таблиці 2. Основними джерелами енергії є лазер і електронний промінь

для процесів селективного лазерного спікання/плавлення (SLS або SLM) і електронно-променевого плавлення (EBM), відповідно. EBM складається з потужного скануючого електронного мікроскопа (SEM), а SLS/SLM складається з набору лінз, дзеркала і гальванометра для позиціонування лазерного променя [18].

Таблица 1

Загальне порівняння PBF и DED процесів [17]

Критерій	Powder Bed Fusion (PBF)	Direct Energy Deposition (DED)
Швидкість складання, см <sup>3</sup> /год	до 170	до 2000
Макс. розмір збірки (X; Y; Z), мм	(0.8; 0.4; 0.5)	(4.0; 2.0; 1.0)
Точність	0.05/25	0.25/25
Мін. товщина, мм	0.2	1.0
Якість поверхні, μm	Ra 10	Ra 20
Свобода дизайну	Висока	Низька
Використання	Швидке прототипування Високоякісні деталі	Ремонт деталей Додаткові функції (тобто ребра і виступи)

Таблица 2

Порівняння процесів PBF [17]

Технологія	Переваги	Недоліки	Виробники
Загальні характеристики	Економічно ефективні	Точки виходу порошку	Arcan (Швеція) EOS (Німеччина) Concept laser Cusing (Німеччина)
	Геометричні складності	Якість, що залежить від порошку	
	Високе розширення	Кількість порошку	
EBM	Мінімальна залишкова напруга	Швидкість складання	MTT (Німеччина) Phoenix System Group (Франція) Renishaw (Великобританія) Realizer (Німеччина) 3D Systems (США)
	Без термічної обробки	Різноманітність порошку	
	Механічна міцність	Вакуумна атмосфера	
	Тягучість	Чистота поверхні Вартість	
SLM	Механічна міцність Чистота поверхні	Швидкість збірки	Matsuura (Японія) Trumpf (Німеччина) Voxeljet (Німеччина) ExOne (США)
		Залишкова напруга	
		Зняття напруги / HIP	
		Тягучість Інертна атмосфера	
SLS	Швидкість складання	Полімерне сполучення	
	Відбиток стопи	Термічна обробка Механічна сила	
DMLS	Швидкість збірки	Механічна міцність Низька щільність	

У процесі DED підводять енергію у вузьку сфокусовану область, щоб розплавити підкладку і одночасно додати матеріал у плавильну ванну підкладки. На відміну від процесів PBF DED обробляє розплавлений матеріал у міру його осадження. Матеріал може бути порошком або дротом, а джерелом його енергії є лазер, електронний промінь або плазма (Таблиця 3) [19].

Що стосується лазерних систем, кілька компаній розробляють машини DED. Вони припускають різні назви залежно від компанії, такі, як плавлення

шляхом створення форми лазером (LENS), пряме світлодіодне виготовлення (DLF), пряме нанесення металу (DMD), лазерне багатоспрямоване осадження металів (LBMD), лазерне виготовлення у вільній формі (LFF), та інші [19]. У всіх цих випадках необхідна контрольована атмосфера (тобто аргон), що отримується за допомогою камери інертного газу (тобто об'єктива) або потоку захисного газу тобто (3D-лазерна оболонка) [20]. Ці технології дозволяють отримувати деталі, близькі до форми, які необхідно піддавати подальшому обробленню, і забезпечують відмінний контроль над виникаючими мікроструктурами.

Проте, залишкова напруга накопичується, потрібно зняти напругу і тому рекомендується гаряче ізостатичне пресування (HIP).

Що стосується систем на основі електронних пучків DED, NASA розробило електронно-променеє виробництво (EBF3) для виготовлення або ремонту деталей як наземних, так і майбутніх космічних систем. Система використовує дріт як вихідний матеріал замість порошку, оскільки оброблення порошку в умовах невагомості являє собою серйозну проблему. Ці електронно-променеві машини DED вбудовані в масивні вакуумні камери. Подібно EBM, EBF3 виробляє готові до використання деталі в заводському стані. Кінцеві залишкові напруги є низькими, і майже повністю отримують густі тіла. Процеси DED обмежені з точки зору геометричної свободи [20].

Таблиця 3

Порівняння процесів DED [17]

Технології	Переваги	Недоліки	Виробники
LENS/DLF/ DMD LBDM/LFF	Швидкість складання	Чистота поверхні	Optomec (США) InssTek (США) Ipera Laser (Франція) Trumpf (Німеччина) Sciaky (США) BeAM (США)
	Відбиток стопи	Геометрична складність	
	Контроль мікроструктури	Розширення	
	Механічна міцність	Контрольована атмосфера	
	Інструмент для ремонту	Сорт металу	
	Інструмент для нанесення покриттів	Залишкова напруга Зняття напруги/HIP	
EBAM	Висока швидкість складання	Чистота поверхні	
	Відбиток стопи	Геометрична складність	
	Контроль мікроструктури	Погане розширення	
	Механічна міцність	Вакуумна атмосфера	
	Залишкова напруга Без термічної обробки	Сорт металу	
Плазма	Дуже висока швидкість складання	Контроль мікроструктури	Ramlab (Нідерланди)
	Вартість	Геометрична складність Розширення Термічна обробка Точність Чистота поверхні	

Що стосується систем на основі плазми, то це просто газо-металевий апарат для дугового зварювання в поєднанні з багатоосьовими платформами або роботизованими рукавами з низькою вартістю і прийнятною швидкістю нарощування. Проте поганий контроль над зонами схильними до нагрівання, мікроструктурами або дефектами були основними недоліками, які перешкоджали поши-

ренню цих підходів [18]. Ця технологія потребує зняття напруги і обробки печі для поліпшення мікроструктурних властивостей і зменшення дефектів [21].

### Висновок

Авіабудування є однією з найбільш складних і наукоємних галузей машинобудування України. Високі темпи технічного прогресу авіаційної техніки на основі новітніх наукових досягнень приводять до постійного вдосконалення конструкцій. Застосування адитивних технологій дозволить не тільки підвищити технічні характеристики ЛА, але й оптимізувати процес проектування і виробництва, зменшити кількість відходів і терміни виконання робіт, використовуючи економічні підходи до виробництва.

Зниження енергоспоживання, краща механічна ефективність, менші втрати матеріалу і більш короткі терміни проектування і виготовлення є типовими характеристиками в порівняно з традиційними методами виготовлення. Точкова або пошарова консолідація також забезпечує кращу гнучкість проектування, більш високий рівень настройки, менший час виконання робіт і можливі поліпшені рішення для ланцюжка поставок. Можливість виготовлення складних тривимірних форм безпосередньо з цифрових даних, усуваючи необхідність у складних інструментальних засобах і спеціалізованих рухах робочого інструмента, а також сили, що виникають між ними, дозволяють скоротити терміни виробництва і можливе локалізоване виробництво, сприяючи створенню більш ефективних систем ланцюжка поставок.

Але будь-які нові аерокосмічні конструкції, створювані з унікальних матеріалів на основі технологічних процесів адитивного виробництва, мають забезпечувати високу надійність, довговічність і безпеку їх застосування. Різні методи отримання деталей адитивними технологіями необхідно вивчати та досліджувати, тестувати і оцінити широкою сукупністю методів контролю та діагностики. Саме цей чинник є стримуючим на шляху більш широкого впровадження розглянутих технологій на практиці. При цьому необхідно враховувати, що вартість і оперативність впровадження інновацій мають вирішальне значення для підтримки конкурентної переваги [14].

Таким чином, актуальним завданням є підвищення якості та конкурентоспроможності продукції авіабудування шляхом модернізації технологічних процесів виробництва з урахуванням широкого спектра функціональних можливостей використання адитивних технологій для виготовлення елементів конструкції літаків з титанових сплавів.

У питаннях використання адитивного виробництва в авіабудівній галузі варто відзначити роботи P.A. Kobryn, N.R. Ontko, B. Barroqueiro, E. Uhlmann, R. Kersting, M. F. Cruz, A. V. Borille, Ikuhiro Inagakl, Tsutomu Takechi, Yoshihisa Shirai, Christo Dordlofva, Angelica Lindwall, Peter Törlind і інші.

Завдання дослідження:

- дослідження міцнісних властивостей виробів з титану, виготовлених за допомогою адитивних технологій;
- аналіз елемента конструкції ЛА;
- створення математичної моделі деталі для виготовлення за допомогою адитивних технологій;
- опис технології виготовлення елемента конструкції;
- виробництво вибраного елемента конструкції із титану за розробленою технологією за допомогою адитивних технологій;

- дослідження механічних властивостей елемента конструкції;
- визначення економічної ефективності модернізації;
- порівняння отриманого елемента конструкції (виробленого за допомогою 3D-друку) зі штатним.

### Список літератури

1. Баулин, А.В. Металловедение и технология специализированного производства высокоресурсных титановых деталей авиакосмической техники/А.В. Баулин // Авиационные материалы и технологии, №. 1. 2007. р. 53-58.
2. Banerjee D., Williams J.C. Perspectives on titanium science and technology. Acta Materialia, 2013, vol. 61, iss. 3, pp. 844–879. doi: 10.1016/J.ACTAMAT.2012.10.043
3. РФ Additive Manufacturing of Titanium Aircraft Parts URL:<https://rscf.ru/news/en-media/additive-manufacturing-of-titanium-aircraft-parts/>
4. Singh S., Ramakrishna S., Singh R. Material issues in additive manufacturing: a review. Journal of Manufacturing Processes, 2017, vol. 25, pp. 185–200. doi: 10.1016/j.jmapro.2016.11.006.
5. Savchenko, Nickolai & Vorontsov, Andrey & Утяганова, Вероника & Eliseev, Alexander & Рубцов, Валерий & Kolubaev, Evgeny. (2018). Особенности структурно-фазового состояния сплава Ti-6Al-4V при формировании изделий с использованием электронно-лучевой проволочной аддитивной технологии Features of the Structural-Phase State of the Alloy Ti-6Al-4V in the Formation of Products using Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing. 20. 60-71. 10.17212/1994-6309-2018-20.4-60-71.
6. Karolina Karolewska, Bogdan Ligaj, Mateusz Wirwicki, Grzegorz Szala, Strength analysis of Ti6Al4V titanium alloy produced by the use of additive manufacturing method under static load conditions, Journal of Materials Research and Technology, Volume 9, Issue 2,2020.
7. Eckart Uhlmann, Robert Kersting, Tiago Borsoi Klein, Marcio Fernando Cruz, Anderson Vicente Borille, Additive Manufacturing of Titanium Alloy for Aircraft Components, Procedia CIRP, Volume 35, 2015.
8. Brandl, Erhard & Leyens, C. & Palm, Frank. (2011). Mechanical Properties of Additive Manufactured Ti-6Al-4V Using Wire and Powder Based Processes. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 26. 012004. 10.1088/1757-899X/26/1/012004.
9. Третья промышленная революция. Аддитивные технологии 3D-печати в наукоемких отраслях промышленности [Электронный ресурс] / А. Зубков // Технологии в электронной промышленности.— 2015 .— №7(83) .— С. 75-80 .— Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/451418>
10. Аддитивные технологии (3D-печать) -цифровое производство [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. В. А. Михеев. – Электрон. текстовые и граф. дан. (0,42 Мбайт). - Самара, 2016. - 13 с.
11. Аддитивные технологии 3D-печати и 3D-сканирование URL [https://www.dipaul.ru/upload/iblock/287/dipaul\\_3d\\_2017\\_final.pdf](https://www.dipaul.ru/upload/iblock/287/dipaul_3d_2017_final.pdf)
12. Аддитивное производство (АП) Additive Manufacturing (AM) [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Аддитивное\\_производство\\_\(Additive\\_Manufacturing\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Аддитивное_производство_(Additive_Manufacturing))



13. Бизнес-план. Завод мехатронных изделий URL: <https://vtsconsult.ru/uploads/files/2017-09/zavod-meh-izdeliy-demo.pdf>

14. Аддитивные технологии в производстве изделий аэрокосмической техники: учебное пособие для вузов / А. Л. Галиновский, Е. С. Голубев, Н. В. Коберник, А. С. Филимопов; под общей редакцией А. Л. Галиновского. — М: Издательство Юрайт, 2020. — 115 с. — (Высшее образование). — Текст: непосредственный.

15. Ahsan, Md Manjurul. (2016). 3D Printing and Titanium Alloys: A Paper Review Md MANJURUL AHSAN. European Academic Research. 3.

16. Tofail, S.A.; Koumoulos, E.P.; Bandyopadhyay, A.; Bose, S.; O'Donoghue, L.; Charitidis, C. Additive manufacturing: Scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. Mater. Today 2018, 21, 22–37.

17. Barroqueiro, Bruno & Andrade-Campos, A. & Valente, Robertt & Neto, Victor. (2019). Metal Additive Manufacturing Cycle in Aerospace Industry: A Comprehensive Review. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 3. 10.3390/jmmp3030052.

18. Körner, C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting—A review. Int. Mater. Rev. 2016, 61, 361–377.

19. Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies; Springer: New York, NY, USA, 2015; pp. 107–145.

20. Shamsaei, N.; Yadollahi, A.; Bian, L.; Thompson, S.M. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control. Addit. Manuf. 2015, 8, 12–35.

21. Szost, B.A.; Terzi, S.; Martina, F.; Boisselier, D.; Prytuliak, A.; Pirling, T.; Hofmann, M.; Jarvis, D.J. A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti–6Al–4V components. Mater. Des. 2016, 89, 559–567.

## References

1. Baulin A.V. "Metallovedenie i tehnologiya spetsializirovannogo proizvodstva vyisokoresursnyih titanovyih detaley aviakosmicheskoy tehniki" Aviatsionnyie materialyi i tehnologii, no. 1, 2007, pp. 53-58.

2. Banerjee D., Williams J.C. Perspectives on titanium science and technology. Acta Materialia, 2013, vol. 61, iss. 3, pp. 844–879. doi: 10.1016/J.ACTAMAT.2012.10.043

3. RNF Additive Manufacturing of Titanium Aircraft Parts URL:[https://rscf.ru/news/en-media/additive\\_manufacturing\\_of\\_titanium\\_aircraft\\_parts/](https://rscf.ru/news/en-media/additive_manufacturing_of_titanium_aircraft_parts/)

4. Singh S., Ramakrishna S., Singh R. Material issues in additive manufacturing: a review. Journal of Manufacturing Processes, 2017, vol. 25, pp. 185–200. doi: 10.1016/j.jmapro.2016.11.006.

5. Savchenko, Nickolai & Vorontsov, Andrey & Utyaganova, Veronika & Eliseev, Alexander & Rubtsov, Valeriy & Kolubaev, Evgeny. (2018). Osobennosti strukturno-fazovogo sostoyaniya splava Ti-6Al-4V pri formirovanii izdeliy s ispolzovaniem elektronno-luchevoy provolochnoy additivnoy tehnologii Features of the Structural-Phase State of the Alloy Ti-6Al-4V in the Formation of Products using Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing. 20. 60-71. 10.17212/1994-6309-2018-20.4-60-71.

6. Karolina Karolewska, Bogdan Ligaj, Mateusz Wirwicki, Grzegorz Szala, Strength analysis of Ti6Al4V titanium alloy produced by the use of additive manufacturing method under static load conditions, Journal of Materials Research and Technology, Volume 9, Issue 2, 2020.

7. Eckart Uhlmann, Robert Kersting, Tiago Borsoi Klein, Marcio Fernando Cruz, Anderson Vicente Borille, Additive Manufacturing of Titanium Alloy for Aircraft Components, Procedia CIRP, Volume 35, 2015.

8. Brandl, Erhard & Leyens, C. & Palm, Frank. (2011). Mechanical Properties of Additive Manufactured Ti-6Al-4V Using Wire and Powder Based Processes. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 26. 012004. 10.1088/1757-899X/26/1/012004.

9. Tretya promyshlennaya revolyutsiya. Additivnyie tehnologii 3D-pechati v naukoemkih otraslyah promyshlennosti [Elektronniy resurs] / A. Zubkov // Tehnologii v elektronnoy promyshlennosti.— 2015.— #7(83).— S. 75-80.— Rezhim dostupa: <https://rucont.ru/efd/451418>

10. Additivnyie tehnologii (3D-pechat) -tsifrovoe proizvodstvo [Elektronniy resurs]: elektron. metod. ukazaniya / Minobrnauki Rossii, Samar. gos. aerokosm. un-t im. S. P. Koroleva (nats. issled. un-t); avt.-sost. V. A. Miheev. – Elektron. tekstovyye i graf. dan. (0,42 Mbayt). - Samara, 2016. - 13 s.

11. Additivnyie tehnologii 3D-pechati i 3D-skanirovanie URL [https://www.dipaul.ru/upload/iblock/287/dipaul\\_3d\\_2017\\_final.pdf](https://www.dipaul.ru/upload/iblock/287/dipaul_3d_2017_final.pdf)

12. Additivnoe proizvodstvo (AP) Additive Manufacturing (AM) [http://www.tadviser.ru/index.php/Statya:Additivnoe\\_proizvodstvo\\_\(Additive\\_Manufacturing\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Statya:Additivnoe_proizvodstvo_(Additive_Manufacturing))

13. Biznes-plan. Zavod mehatronnyih izdeliy URL: <https://vtsconsult.ru/uploads/files/2017-09/zavod-meh-izdeliy-demo.pdf>

14. Additivnyie tehnologii v proizvodstve izdeliy aerokosmicheskoy tehniki: uchebnoe posobie dlya vuzov / A. L. Galinovskiy, E. S. Golubev, N. V. Kobernnk, A. S. Filimopov; pod obschey redaktsiyey A. L. Galnnovskogo. — Moskva: Izdatelstvo Yurayt, 2020. — 115 s. — (Vyisshee obrazovanie). — Tekst: neposredstvenniy.

15. Ahsan, Md Manjurul. (2016). 3D Printing and Titanium Alloys: A Paper Review Md MANJURUL AHSAN. European Academic Research. 3.

16. Tofail, S.A.; Koumoulos, E.P.; Bandyopadhyay, A.; Bose, S.; O'Donoghue, L.; Charitidis, C. Additive manufacturing: Scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. Mater. Today 2018, 21, 22–37.

17. Barroqueiro, Bruno & Andrade-Campos, A. & Valente, Robertt & Neto, Victor. (2019). Metal Additive Manufacturing Cycle in Aerospace Industry: A Comprehensive Review. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 3. 10.3390/jmmp3030052.

18. Körner, C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting—A review. Int. Mater. Rev. 2016, 61, 361–377.

19. Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies; Springer: New York, NY, USA, 2015; pp. 107–145.

20. Shamsaei, N.; Yadollahi, A.; Bian, L.; Thompson, S.M. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control. Addit. Manuf. 2015, 8, 12–35.

21. Szost, B.A.; Terzi, S.; Martina, F.; Boieslier, D.; Prytuliak, A.; Pirling, T.; Hofmann, M.; Jarvis, D.J. A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti–6Al–4V

components. Mater. Des. 2016, 89, 559–567.

Надійшла до редакції 26.06.2020, розглянута на редколегії 27.06.2020

## **Analysis of Introduction of Additive Production in Aircraft Industry**

The article deals the issues of improving the quality, reducing time, cost of manufacturing domestic aircraft and reducing their weight by modernizing technological processes taking into account a wide range of functionalities for the use of additive technologies for the production of structural elements of aircraft from titanium alloys. The article provides is determined that titanium and its alloys, due to their unique chemical and mechanical characteristics, continue to be relevant and in demand metal used in the construction of modern aircraft. But traditional methods of manufacturing parts made of titanium are high cost and do not allow the use of this metal in large quantities. The solution proposed to this problem is the use of additive manufacturing technologies for the manufacture of aircraft structural elements from titanium. Data are given about of the use of titanium alloys in the aerospace, automotive, biomedical and chemical industries due to the excellent combination of strength, low density, as well as very high corrosion resistance and fatigue strength are given. The efficiency of using titanium alloys for the manufacture of structural elements of aircraft in terms of reducing the total weight of the aircraft and high reliability of the structure as a whole. The article provides descriptive information about additive technologies in mechanical engineering. The review of works of foreign scientists concerning research of differences in mechanical characteristics, microstructure and macrostructure of samples made by means of additive technologies is resulted, their advantages and lacks are noted. The list of advantages of additive technologies in mechanical engineering which cause economic efficiency from their use is resulted. Attention is drawn to the most common methods of additive production: substrate synthesis (PBF), direct energy and material supply (DED). It is given the tasks of research are defined and the decision of optimization of technology of manufacturing of elements of a design of aircraft. Research will further improve the technology of aircraft production.

**Keywords:** quality improvement, titanium alloys, additive technologies, 3D printing, powder bed fusion (PBF), direct energy deposition (DED).

### **Відомості про авторів:**

**Полупан Антон Сергійович** – аспірант кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна, [antonpolupan@ukr.net](mailto:antonpolupan@ukr.net), ORCID 0000-0002-0158-7312.

### **Information about the authors:**

**Polupan Anton** - post-graduate student of the Department of technology of production of aircraft, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, [antonpolupan@ukr.net](mailto:antonpolupan@ukr.net), ORCID 0000-0002-0158-7312.