

Особливості виготовлення деталей адитивними технологіями з металевих сплавів. Аналітичний огляд

О. В. Сонец¹ • Б. С. Воронцов¹

Received: 13 April 2025 / Revised: 30 May 2025 / Accepted: 9 June 2025

Анотація. У цій статті розглянуто сучасні наукові дослідження процесу механічної обробки деталей, що виготовлені за допомогою адитивних технологій. В роботі наведено коротку класифікацію металевих сплавів які застосовуються в галузі адитивних технологій та класифікацію технологій 3-D друку, що відомі на сьогодні. Наведено можливості, що відкривають адитивні технології. Розглянуто переваги та недоліки адитивних технологій загалом і найпоширеніших методів виготовлення зокрема. Проаналізовано результати наукових робіт із визначення впливу напрямків шарів друку та анізотронії мікроструктури виробу на процес механічної обробки. Зверталася увага на ступінь оброблюваності деталей. Виявлено недостатність досліджень фрезерування деталей, виготовлених окремими методами друку. Обґрунтовано необхідність проведення наукового дослідження механічної обробки виробів виготовлених адитивними технологіями з титанового сплаву Ti6Al4V. 3-D друк відкриває нові підходи до проектування та виготовлення виробів. Замінити або виключити повністю фінішну механічну обробку з технологічного ланцюжка на даному етапі розвитку неможливо, як через недоліки, пов'язані з термічними і механічними процесами під час плавлення та/або спікання матеріалу, так і через високі вимоги до шорсткості, точності розмірів та геометричної форми відповідальних поверхонь. Залишаються суттєві аспекти, які потребують розвитку, оптимізації, вдосконалення, вивчення. Показовим прикладом цього є те, що провідні університети світу впроваджують кредитні модулі вивчення гібридного адитивно-субтрактивного виробництва в свої освітні програми для всіх рівнів вищої освіти.

Ключові слова: механічна обробка; адитивні технології; оброблюваність; анізотронія мікроструктури; електронно-променево плавлення; Ti6Al4V.

Вступ

Огляд наукової літератури дає повне розуміння того, що у даній сфері залишається багато невирішених питань. 3-D друк сприяє зменшенню коефіцієнту використання матеріалу, як при отриманні заготовки так і при виготовленні готової деталі, оскільки шляхом 3-D друку можна отримати майже готову деталь. Це досягається в тому числі і завдяки оптимізації топології макроструктури. В науковій літературі наведено багато прикладів оптимізації топології. Оптимізація топології макроструктури особливо корисна в аерокосмічній та автомобільній промисловості. Дані технології активно впроваджуються в сучасне машинобудування,

проте, залишаються недослідженими такі важливі питання, як вплив АТ на властивості матеріалів і вимог до обробки матеріалів за допомогою різних методів АМ; нові виклики і вимоги, пов'язані з метрологією та контролем якості; вимоги протягом усього терміну експлуатації, а саме технічне обслуговування, ремонт і переробка; зовнішні фактори, включаючи нормативне середовище. Низька трудомісткість вважається однією з ключових переваг АМ. Однак етапи попередньої та постобробки часто включають такі дії як проектування опорної конструкції, збірка макета камери, очищення, видалення опори, спікання або термообробка, і обробка поверхні. Оскільки механічну постобробку виключити з технологічного ланцюжка неможливо, це спонукає нас до проведення досліджень з вивчення впливу отриманої мікроструктури та інших фізико-механічних характеристик деталі на процес різання. Тому, ще залишаються суттєві аспекти, які потребують розвитку, оптимізації, вдосконалення, вивчення. Провідні

✉ О. В. Сонец
oles.sonets@ukr.net

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

університети світу, займаючись вирішенням таких питань, впроваджують кредитні модулі вивчення гібридного адитивно-субтрактивного виробництва в свої освітні програми для всіх рівнів вищої освіти. Серед них: Університет Берклі [58], Норвезький університет науки і техніки [59], Кембріджський університет [60]. Окрім того, команда Формули студент “Revolve” до складу якої входять студенти вище згаданого Норвезького університету у 2019 році виготовила та успішно випробувала одну із деталей шасі свого боліду, яка була виготовлена за гібридною адитивно-субтрактивною технологією.

За даними Wohlers Report 2023 галузь адитивних технологій (АТ) у 2022 році досягла у відмітки \$18 млрд. у сфері послуг і перевищила \$7 млрд. у сфері виробництва. Також слід відзначити, що починаючи з 2012 року галузь АТ стала швидко розвиватися. Якщо порівняти попередні роки за тими ж даними Wohlers Report 2023, то у 2008 році галузь оцінювалася у менш ніж \$2 млрд. у сфері послуг і лише в 2012 році перетнула відмітку у \$2 млрд., а вже у 2013 році та наступних роках щорічне зростання складало не менш ніж \$1 млрд. Нині існує велика кількість досліджень в яких вивчається проблематика постобробки деталей, що виготовлені адитивними технологіями. Серед українських науковців, що досліджували постобробку надрукованих деталей можна виділити: Б. Довгого [1], А. І. Ткачука [2], Д. О. Пірогова, В.О Цибуленко, Б. С. Воронцова [3], А. В. Калініна, А. В. Кашенкова [4] та ін. Мікроструктуру та її вплив на фізико-механічні властивості виробів виготовлених адитивними технологіями досліджували: Jiahua Zhang, Yi Yang, Sheng Cao, Zhiqiang Cao, Dmytro Kovalchuk, Songquan Wu, Enquan Liang, Xi Zhang, Wei Chen, Fan Wu, Aijun Huang [5], Chen Zhang, Dongyi Zou, Maciej Mazur, John P. T. Mo, Guangxian Li, Songlin Ding [6], Beth E. Carroll, Todd A. Palmer, and Allison M. Beese [7] та ін. Вплив мікроструктури на оброблюваність вивчали: Alessandro Fortunato, Amarildo Lulaja, Shreyes Melkoteb, Erica Liverania, Alessandro Ascaria Domenico Umbrellac [8], Peng Guo, Bin Zou, Chuazhen Huang, Huabing Gao [9] та ін.

Мета статті

Вивчення проблематики механічної обробки деталей виготовлених адитивними технологіями та визначення перспективних напрямків подальших досліджень.

Класифікація конструкційних матеріалів в адитивному виробництві

Матеріали, що використовуються для 3-D друку металевих виробів мають достатньо широкий перелік. Так як і в класичному, відомому до теперішнього часу

машинобудуванні, для 3-D друку використовуються різні конструкційні матеріали. Вони підбираються відповідно до умов роботи деталі, а також фізико-механічних властивостей, які необхідно забезпечити, виходячи з конструкційних особливостей. Тобто незалежно від того як утворена заготовка – аналіз технологічності деталі є ключовою ланкою проектування технологічного процесу і при застосуванні адитивних технологій. Поки що спектр використовуваних для друку матеріалів не такий широкий, як для субтрактивних технологій. Можна відмітити, що багато сплавів, які використовуються для 3-D друку, такі ж як і для звичних технологій. При механічній обробці та при виготовленні деталей за АТ існують метали та їх сплави, які є відносно легкими в обробці та важкооброблюваними.

Розглянемо основні матеріали, які використовуються при виготовленні деталей 3-D друком.

Одним із найбільш поширених матеріалів є сталі: нержавіючі, аустенітні, мартенситні, інструментальні. Зокрема відомо про використання таких марок сталей, як 34CrNiMo6, AISI420, AISI304 L [10], 300M [11], AISI316 L [12], Fe19Ni5Ti [13], SAF2705, 17-4PH, 18Ni-300, H13, PM2000 [14], 1.2709 [15] та інші. Всі ці матеріали добре відомі у машинобудуванні та інших сферах промисловості. Вони мають властивості, що задовольняють вимогам пред’явленим до конструкційних матеріалів. Проте, для друкування деталей, необхідно нагріти або розплавити конструкційний матеріал, що призводить до фазових переходів у розплаві. Через високу швидкість нагрівання з подальшим охолодженням змінюється мікроструктура та механічні властивості матеріалу, утворюються дефекти поверхні [16], [17].

Останнім часом все ширше у виробництві використовуються титанові сплави. Вони підходять як для субтрактивних технологій, так і для технологій 3-D друком. Сплави титану мають дуже добрі механічні і хімічні властивості, що є привабливим для розробників у багатьох галузях. Наразі найбільш цікавими для дослідників є сплави Ti6Al4V, Ti8Al1Er, TC11, TC21 і Ti5553. Одним з найпоширеніших титанових сплавів для друку є Ti6Al4V. Проте він не є універсальним. Різні титанові сплави при охолодженні і затвердінні під час друку утворюють різну мікроструктуру, що суттєво впливає на міцність, пластичність та інші властивості [10]. В літературі недостатньо відомостей про характерні особливості титанових сплавів, що ускладнюють друк.

Існує немало алюмінієвих сплавів, що використовуються для друку. В науковій літературі описано використання таких сплавів: 6061 [18], AlSi10, AlSi12, 2024 [10], Al7Si0.6Mg, AA2219, AA7075 [61] та інші. Серед недоліків використання алюмінієвих сплавів можна виділити утворення оксидної плівки Al₂O₃, [19] та високу відбивальну здатність, що ускладнює процес плавлення. Можливе утворення тріщин, стовпчастих

зерен великого розміру та неправильна мікроструктура [10].

Іншим матеріалом для виготовлення деталей 3-D друком є магнієві сплави таких марок: Mg-3Zn, AZ31 [10], WE43, ZK60, ZK30, AZ91, AZ61 та інші. Такі сплави широко використовуються у медицині, проте мають ряд недоліків, що ускладнюють процес виготовлення деталей. Наприклад, висока хімічна реакційна здатність, що провокує горіння [20].

В адитивних технологіях використовують, також, сплави кольорових металів, такі як: CuZn28 [21], Cu-10Sn [22], CuAl9Mn2 [23], CuZn42 [24] та інші латуні та бронзи. Ці матеріали, так само як і мідь складно використовувати для 3-D друку, оскільки мідь, що входить до складу сплаву має високу теплопровідність, що затрудняє процес нагріву і плавлення. Таким чином, даний процес вимагає більшої потужності. Цинк, що міститься у сплаві має низьку температуру плавлення та кипіння, через що отримана мікроструктура і як наслідок фізико-механічні властивості готового виробу не задовольняють вимогам [25].

Також використовуються суперсплави на основі Нікелю. Найвідоміші Ni-Cr сплави Inconel625, Inconel718 використовуються для друку деталей до газотурбінних двигунів та компресорів через їх високі механічні властивості та жароміцність, стійкість до окиснення та ін. [26]. Сплави на основі Co та Cr використовуються для друку біомедичних імплантатів [10], [27]. Найчастіше для друку з цих матеріалів використовують метод SLM (Selective Laser Melting). При друці Inconel718 методами SLM та EBM існує проблема, через яку процес отримання оптимальної мікроструктури є затруднений. Цією проблемою є перехід розплаву від рідкої фази до твердої, при якому утворюються зерна небажаної форми та інші структури, а також пори, які є недопустимими. Пошуки шляхів вирішення цих недоліків тривають [62],[63].

В адитивному виробництві використовуються високоентропійні сплави. Це сплави, до складу яких входять 5 або більше металевих елементів у рівних пропорціях. Наприклад, суперсплави CoCrCuFeNiAl, CoCrCuFeNiAlTi, AlCoCrFeNi, ZrTiVCrFeNi та TiZrNbMoV [10]. Такі сплави зазвичай мають краще співвідношення міцності до ваги. Залежно від складу вони можуть мати ті чи інші покращені механічні властивості хімічну і корозійну стійкість. Досліджень про складність виготовлення виробів з таких сплавів адитивними методами в літературі знайти не вдалося.

Ще одним класом матеріалів в адитивному виробництві є магнітні сплави. Вони, як правило, використовуються для функціональних компонентів, мають широкий спектр застосування в різних галузях, таких як автомобільна, аерокосмічна, біомедична, електротехнічна та електронна, у сфері інформаційних технологій тощо. Методи друку також були вивчені для виготовлення магнітних сплавів, таких як: Ni-Fe-V,

Ni-Fe-Mo [28], Fe-30%Ni [29] і Fe-Si-B-Cu-Nb [30]. Такі сплави використовують для створення складних геометрій в енергетичній сфері.

В адитивному виробництві також використовуються аморфні металічні сплави. Залежно від того, на основі якого металу був створений сплав можна досягати потрібної твердості, міцності, пластичності, електропровідності, магнітної проникності та інших властивостей. Головною умовою для отримання аморфного сплаву є швидке (близько 100 К/с) охолодження. Це, також, є основною проблемою при виготовленні деталей з цих матеріалів шляхом 3-D друку [10].

Сьогодні відомо і про менш тривіальні матеріали у адитивному виробництві. Зокрема існують публікації про 3-D друк керамікою та композитними матеріалами з металевою, керамічною або полімерною матрицею [10].

Методи адитивного виробництва

Відповідно до стандарту ISO/ASTM 52900:2015 існують такі категорії виробничого процесу:

1. Binder jetting (BJT) – процес в якому рідкий сполучний агент вибірково наноситься для з'єднання порошкових матеріалів;
 2. Directed energy deposition (DED) – процес, при якому сфокусована теплова енергія використовується для сплавлення матеріалів шляхом плавлення під час їх осадження;
 3. Material extrusion (MEX) – процес, при якому матеріал вибірково дозується через сопло або отвір;
 4. Material jetting (MJT) – процес, при якому краплі вихідного матеріалу вибірково осаджуються;
 5. Powder bed fusion (PBF) – процес, при якому теплова енергія вибірково сплавляє ділянки порошкового шару;
 6. Sheet lamination (SHL) – процес, при якому листи матеріалу склеюються, утворюючи деталь;
 7. Vat photopolymerization (VPP) – процес, при якому рідкий фотополімер вибірково стає твердим шляхом полімеризації, активованої світлом.
- Технологіями, що найбільш активно досліджуються є DMD (Direct metal deposition), FDM (Fused deposition modeling), SLM/DMLS (Selective Laser Melting/Direct Metal Laser Sintering) [31].

Технологічні недоліки адитивних технологій

Незважаючи на відмінність принципу подачі та нагрівання робочого матеріалу на 3-D принтерах, всі технології, які застосовуються для 3-D друку мають схожий принцип: новий шар матеріалу склеюється, спікається або сплавляється з попереднім. Це означає,

що під час друку виникає локальна зона нагріву, яка призводить до утворення залишкових напружень і як наслідок, виникнення дефектів на поверхні та нерівномірності структури сплаву готового виробу. Такі наслідки є основним недоліком технологій 3-D друку, що підтверджено низкою великої кількості досліджень. Це справедливо для всіх адитивних технологій для металу, незалежно від їх типу та конструкційного матеріалу.

Процес плавлення порошкоподібного середовища за допомогою концентрованого лазера дає різні мікроструктурні дефекти (пористість, недостатнє зливання отворів, тріщини), які можуть згубно вплинути на загальну функціональність і міцність виготовленої деталі. Існують дослідження щодо вивчення дефектів мікроструктури, що виникають при друці за технологією SLM (Selective laser melting). SLM технологія відноситься до категорії Powder Bed Fusion (PBF).

Пористість виникає тому, що газ, присутній між частинками порошку, може розчинитися в розплавленій ванні. Через високу швидкість охолодження, під час процесу затвердіння розчинений газ не може вийти з поверхні розплавленої ванни до того, як відбудеться затвердіння. Таким чином, пори утворюються і залишаються у виготовленій деталі. Пористість також може виникати при використанні металевих порошків порожнистої структури. З іншого боку, температура розплавленого басейну, як правило, висока через інтенсивну потужність лазера. При такій температурі розчинність газу в рідкому металі висока. Крім того, під час процесу підготовки порошкових матеріалів газ неодмінно потрапляє у порошкові матеріали, особливо у порошки, які знаходяться під захистом інертного газу, такого як аргон або гелій. [32]

Недостатнє зливання отворів, також відомі як дефекти відсутності зливання (LOF), переважно виникають через недостатню енергію під час процесу плавлення. Формування дефектів LOF відбувається через те, що металеві порошки не повністю розплавляються при нанесенні нового шару на попередній шар з достатнім перекриттям [33], [34]. Дефект LOF може містити численні нерозплавлені металеві порошки. Існують два типи дефектів LOF: дефекти слабкого зв'язку через недостатню кількість розплавленого металу під час процесу затвердіння, та дефекти з нерозплавленими металевими порошками. [35]

Тріщини. У процесі SLM металеві порошки зазнають швидкого плавлення та швидкого затвердіння під дією високої місцевої лазерної енергії. Швидкість охолодження розплавленої ванни досягає 108 К/с [36], що створює великий градієнт температур і, відповідно, велику залишкову теплову напругу у виготовленій деталі. Високий температурний градієнт у поєднанні з великою залишковою напругою часто спричиняє зародження та поширення тріщин у виготовленій деталі.

Вище перераховані дефекти зустрічаються також і в інших технологіях які використовують порошковий матеріал.

До недоліків адитивних технологій можна віднести залишкові напруження та деформації. Вони хоч і присутні під час друку порошковим матеріалом, але більшою мірою проявляють себе в тих деталях, що виготовлені за допомогою технологій 3-D друку дротом. Найбільш поширеним носієм енергії при адитивному виробництві дротом є електронний промінь. Через високу енергію електронного променя при малому радіусі фокусування створюється великий градієнт температури, що і викликає високі залишкові напруження і як наслідок призводить до деформації. Особливо це проявляється під час друку тонкостінних елементів [37]. Іншою технологією є друк дротом з використанням дуги. Проте ситуація із залишковими напруженнями аналогічна [38]. Ця особливість є характерною для технологій, в яких використовується дріт.

Спільною характерною особливістю для більшості адитивних технологій з металу, незалежно від того використовується порошок чи дріт є *анізотропія мікроструктури*. [39], [40], [41], [42]

Можливості адитивних технологій

Випробовуючи концепцію машини SLM NXG XII 600, компаній SLM Solutions і Porsche, успішно надрукувало повний корпус E-drive (рис. 1 а) з інноваційним дизайном. У цьому корпусі реалізовані всі переваги адитивного виробництва, такі як оптимізація топології за допомогою ґратчастих структур для зменшення ваги, функціональна інтеграція охолоджуючих каналів, більш висока жорсткість і скорочення часу складання за рахунок інтеграції деталей, а також поліпшення якості деталей. Інша деталь (рис. 1 б), була надрукована і встановлена на всіх автомобілях з моменту поставки першого Bugatti Chiron з виробничого підприємства в Мольсхаймі. Складна геометрія виготовлена з меншими витратами, ніж традиційними методами. На рис. 1 в представлено кронштейн з шасі від компанії Liebherr. Звісно адитивні технології відкривають нові можливості і в біомедицині (рис. 1 г).

Хоча адитивні технології є новою можливістю для виготовлення як і заготовок, так і готових деталей, проте цим деталям все ж таки необхідна механічна обробка для утворення таких поверхонь, по яких деталі у вузлі базуються або спрягаються під час складання. Причиною є низька точність та шорсткість отриманої поверхні під час друку [43]. Навіть під час візуальної оцінки поверхонь, які утворюються на деталях під час друку, можна констатувати той факт, що дискретна природа утворення шарів матеріалу суттєво впливає на шорсткість.

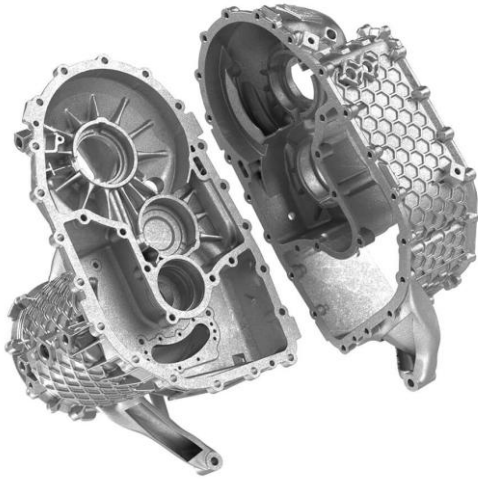
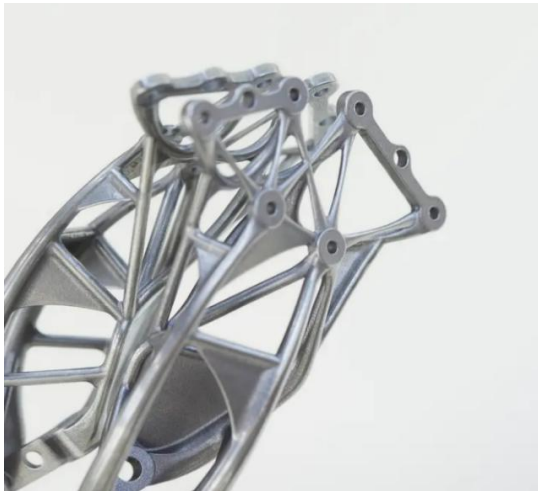
*a**б**в**г*

Рис. 1. Деталі виготовлені за технологією SLM: *a* – корпус E-Drive від Porsche [64], *б* – кронштейн двигуна Bugatti Chiron [64], *в* – кронштейн Liebherr виготовлений з нікелевого сплаву IN718, який підходить для машин EOS M 300-4 [65], *г* – імпланти чашки кульшового суглобу, надруковані на EOS M 300-4 [65]

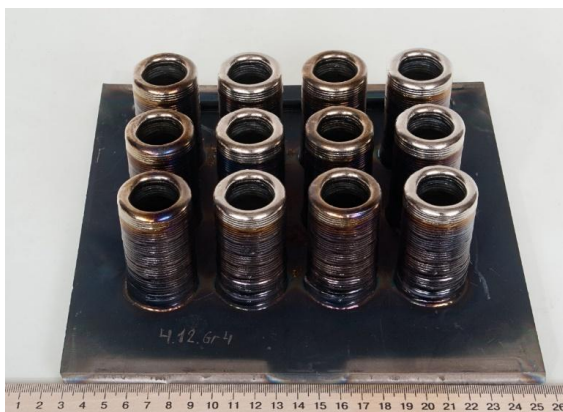


Рис. 2. Деталі виготовлені технологією “xBeam3D” [https://xbeam3d.com/xbeamtechnology/]

Механічна обробка

В 2023 році в журналі “Sage Journals” було опубліковано статтю [44] про дослідження ультраточіння (ultra-precision machining) дослідних зразків надрукованих методом селективного лазерного спікання з порошку Ti-6Al-4V. Показовим дослідження глибин різання. В рамках цієї роботи проведено операції точіння з глибиною різання від 1 до 10 мкм. Процес утворення стружки змодельовано методом скінченних елементів за допомогою програмного забезпечення, а потім практично перевірено адекватність моделювання. Існування таких досліджень вказують на те, що механічна обробка в своєму традиційному розумінні передбачає процес, коли лезвийним інструментом спочатку знімається великий припуск і коли технологічні переходи діляться на чорновий та чистовий, а в гібридному адитивно-субтрактивному технологічному процесі зводиться лише до чистової обробки поверхонь з малим шаром припуску, що необхідно видалити. Чистова механічна обробка доцільна і в аспекті зменшення коефіцієнту використання матеріалу та витрат на утилізацію стружки, оскільки переробка стружки особливо титанових сплавів вимагає багато ресурсів [45].

Процес різання під час механічної обробки ускладнюється не тільки твердістю, міцністю, хімічною активністю та іншими характеристиками матеріалу, що оброблюється. Також вагомий вплив на оброблюваність має і мікроструктура, що утворилася під час друку.

Під час шліфування друкованих деталей важливу роль грає напрямок друку шарів. При шліфуванні горизонтальних поверхонь шорсткість поверхні (R_a) зменшується з 12 мкм до 4 мкм, а на вертикальних поверхнях з 15 мкм до 13 мкм в нікелево-залізо-мідних деталях. Це наочно ілюструє важливість орієнтації та спрямованості шарів друку [46].

Під час механічної обробки лезовим ріжучим інструментом сила різання також сильно залежить від напрямку розташування шарів друку.

Механічна анізотропія, отримана в результаті мікроструктурної анізотропії, була вивчена для різних металевих сплавів, таких як нержавіюча сталь [47], суперсплав на основі нікелю-хрому [48], чистий тантал [49], алюмінієвий сплав [50]. Дослідженнями встановлено, що наявність стовпчастих зерен сильно впливає на місцеві механічні властивості кожного металевого сплаву. Однак жодне з вищезгаданих досліджень не дало детального пояснення, яке б підтверджувало кореляцію між мікроструктурною та локальною механічною анізотропією та оброблюваністю. Fernandez-Zelaia та інші [51] оцінили оброблюваність сплаву CoCrMo з лазерним порошковим шаром (LPBF), обмеживши їх вивчення реакцією сили обробки. Вони показали, що сила різання чутлива до механічної анізотропії деталі, обумовленої як морфологією мікроструктури, так і кристалографічною текстурою.

Нојаті та інші [52] досліджували оброблюваність електронно-променевого розплавленого (EBM) титанового сплаву марки 5. Крім сил різання, враховувалася морфологія задирок і якість поверхні, але остання була обмежена двома параметрами шорсткості, а саме S_a і S_z , без будь-якого уявлення про мікроструктуру.

Іншими вченими встановлено, що межі стовпчастих зерен сплаву LPBF Ti6Al4V, які, як відомо, виступають як переважні шляхи руйнування [53], [54] сприяли зняттю матеріалу під час різання при сприятливій орієнтації по відношенню до ріжучої кромки інструменту як при фрезерних, так і при токарних операціях [55], [56]. Оцінено оброблюваність сплаву LPBF Ti6Al4V з точки зору ресурсу інструменту та досліджено вплив зносу інструменту на якість заготовки та морфологію стружки. Для подальшого вивчення впливу АМ-індукованої анізотропії на оброблюваність, вчені

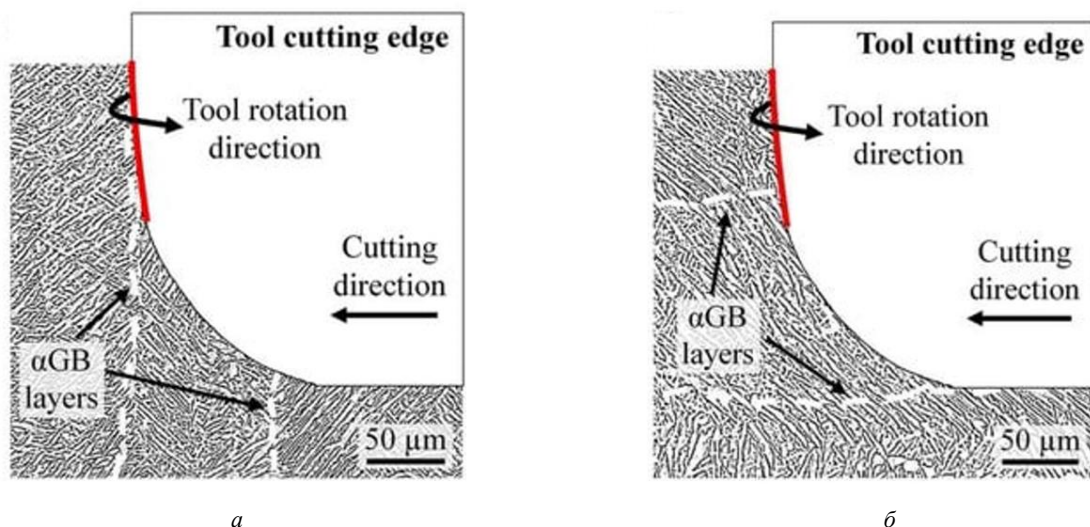


Рис. 3. Мікроструктурна взаємодія при фрезеруванні 0 град (а) і 90 град (б) орієнтованих зразків PBF-LB Ti-6Al-4V [57]

зосередилися на якості заготовки та морфології стружки, уникаючи впливу зносу інструменту.

Також є дослідження, в якому визначено, що вплив анізотропії на оброблену поверхню був пов'язаний із взаємодією між шарами α -фази та ріжучою кромкою інструменту. Зразки під кутом 0 і 90° мали схожу мікротвердість (максимальна різниця становила 2 %). Шари α GB позитивно орієнтовані відносно ріжучого краю при фрезеруванні зразків Ti під кутом 0, як показано на рис. 3 а. Навпаки, на рис. 3 б, взаємодія між шарами α GB та ріжучим краєм відсутня в зразках Ti під кутом 90°. Шари α GB сприяли зменшенню руху дислокацій та утворенню стружки. Аналізуючи морфологію стружки, виявлено, що при фрезеруванні зразків Ti під кутом 0° генерується менше сили різання/потужності, ніж при фрезеруванні зразків Ti під кутом 90°. Це явище було більш вираженим за умов вищої швидкості різання, що спричинило пластичний потік матеріалу та призвело до утворення стружок з більшим радіусом кругової кривої [57].

Отже, анізотропія у деталях виготовлених адитивними технологіями грає свою роль в процесах механічної постобробки і ігнорувати її при проектуванні технологічного процесу не можна. Тому проводяться дослідження для зменшення цього явища під час друку, а також впливу анізотропії на процес різання.

Висновки

У сучасному машинобудуванні нові технології стрімко розвиваються. Однією з таких технологій є адитивне виробництво. Великий асортимент матеріалів

дозволяє впроваджувати адитивні технології у багатьох сферах науки і техніки. Проте через особливості для кожної групи сплавів хімічні та фізичні властивості викликають технологічні проблеми, які наразі активно досліджуються. Також аналіз наукової літератури показав, що існує велика кількість публікацій на тему проблем механічної постобробки друкованих деталей. Таким чином впливає висновок, що на даний час адитивні технології для металів у поєднанні з механічним обробленням активно досліджуються. Незважаючи на те, що 3-D друк відкриває нові підходи до проектування та виготовлення виробів, замінити або виключити повністю фінішну механічну обробку з технологічного ланцюжка на даному етапі розвитку неможливо, як через недоліки, пов'язані з термічними і механічними процесами під час плавлення та/або спікання матеріалу, так і через високі вимоги до шорсткості, точності розмірів та геометричної форми відповідальних поверхонь.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що вони не мають жодного конфлікту інтересів щодо цього дослідження, включаючи фінансові, особисті, авторські або будь-якого іншого характеру, які могли б вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

References

- [1] B. Dovguy, Assessing the printability of alloys in fusion-based additive manufacturing: towards criteria for alloy selection. Diss. Imperial College London, 2022, doi: <https://doi.org/10.25560/98163>.
- [2] A. Tkachuk, "Study of hybrid additive technologies as an important component of educational disciplines on technologies of processing materials," *Academic notes. Series: Pedagogical Sciences*, 210, pp. 181–187, 2023, doi: <https://doi.org/10.36550/2415-7988-2023-1-210-181-187>.
- [3] D. Pirhov, V. Tsybulenko and B. Vorontsov, "Machining of Titanium Blanks Produced by Additive Manufacturing. Heavy Engineering. Challenges and Development Prospects," in *Proc. of the 20th International Scientific and Technical Conference*, Sep. 1–3, 2022, V. D. Kovalov Ed., Kramatorsk–Ternopil: DDMA, pp. 177–178, 2022.
- [4] O. Kalinin and A. Kashenkova, "Study of the structure and mechanical properties of AlSi 316L alloy produced by selective laser sintering of powder components," *Mechanical Engineering, Transport, Machinery Equipment*, № 1, pp. 30–33, 2018, doi: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.240418.30.102>.
- [5] J. Zhang et al., "Fine equiaxed β grains and superior tensile property in Ti–6Al–4V alloy deposited by coaxial electron beam wire feeding additive manufacturing," *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 33, pp. 1311–1320, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s40195-020-01073-5>.
- [6] C. Zhang et al., "The State of the Art in Machining Additively Manufactured Titanium Alloy Ti-6Al-4V," *Materials*, 16, 2583, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/ma16072583>.
- [7] Beth E. Carroll, Todd A. Palmer and Allison M. Beese, "Anisotropic tensile behavior of Ti–6Al–4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing," *Acta Materialia*, 87, pp. 309–320, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.054>.
- [8] A. Fortunato et al., "Milling of maraging steel components produced by selective laser melting," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 94, pp. 1895–1902, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0922-9>.

- [9] P. Guo, B. Zou, C. Huang and H. Gao, "Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 240, pp. 12–22, Feb. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.09.005>.
- [10] M. B. Kumar and P. Sathiya, "Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges," *Thin-Walled Structures*, Vol. 159, 107228, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107228>.
- [11] G. Jing and Z. Wang, "Defects, densification mechanism and mechanical properties of 300M steel deposited by high power selective laser melting," *Addit Manuf.*, Vol. 38, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101831>.
- [12] P. Kürsteiner et al., "High-strength Damascus steel by additive manufacturing," *Nature*, 582, 7813, pp. 515–519, 2020, doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2409-3>.
- [13] P. Bajaj et al., "Steels in additive manufacturing: A review of their microstructure and properties," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 772, 138633, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138633>.
- [14] M. Skrzyniarz, L. Nowakowski and S. Blasiak, "Geometry, structure and surface quality of a maraging steel milling cutter printed by direct metal laser melting," *Materials*, 15(3), 773, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15030773>.
- [15] H. Chunping, L. Xin, L. Fencheng, C. Jun, L. Fenggang, H. Weidong, "Effects of cooling condition on microstructure and mechanical properties in laser rapid forming of 34CrNiMo6 thin-wall component," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 82 (5–8), pp. 1269–1279, 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7453-z>.
- [16] F. Liu, X. Lin, H. Yang, X. Wen, Q. Li, F. Liu, W. Huang, "Effect of microstructure on the fatigue crack growth behavior of laser solid formed 300M steel," *Mater. Sci. Eng.: A*, Vol. 695, pp. 258–264, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.04.001>.
- [17] C. E. Roberts, D. Bourell, T. Watt and J. Cohen "A novel processing approach for additive manufacturing of commercial aluminum alloys," *Physics Procedia*, Vol. 83, pp. 909–917, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.095>.
- [18] D. Bourell "Materials for additive manufacturing," *CIRP annals*, 66(2), pp. 659–681 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>.
- [19] R. Karunakaran, "Additive manufacturing of magnesium alloys," *Bioactive materials*, 5(1), pp. 44–54, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2019.12.004>.
- [20] Z. Szakál, A. Kári-Horváth, T. Pataki, M. Odobina, "The Mechanical Properties of 3D Printed CuZn28 Brass Specimens with Different Orientations," *Int. J. Eng. Manag. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 253–259, 2019, doi: <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2019.1.32>.
- [21] S. Scudino et al., "Additive manufacturing of Cu–10Sn bronze," *Materials Letters*, 156, pp. 202–204, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.05.076>.
- [22] A. Zykova et al., "In-situ dispersion hardened aluminum bronze/steel composites prepared using a double wire electron beam additive manufacturing," *Progress in Additive Manufacturing*, Vol. 8(5), pp. 1067–1082, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00378-4>.
- [23] A. Gatto et al., "Influence of laser powder bed fusion process parameters on the properties of CuZn42 components: case study of the laser surface energy density," *Prog Addit Manuf.*, Vol. 8, pp. 843–855, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00361-z>.
- [24] S. Zhang et al., "Selective Laser Melting of Cu10Zn alloy powder using high laser power", *Powder Technology*, Vol. 342, pp. 613–620, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.10.002>.
- [25] X. Wang et al., "Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts", in *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 231(11), pp. 1890–1903, 2017, doi: <https://doi.org/10.1177/0954405415619883>.
- [26] S. Acharya et al., "Additive manufacturing of Co–Cr alloys for biomedical applications: A concise review," *Journal of Materials Research*, Vol. 36, pp. 3746–3760, 2021, doi: <https://doi.org/10.1557/s43578-021-00244-z>.
- [27] C. Mikler et al., "Laser additive manufacturing of magnetic materials", *JOM (J. Occup. Med.)*, Vol. 69, pp. 532–543, 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2257-2>.
- [28] B. Zhang et al., "Studies of magnetic properties of permalloy (Fe–30% Ni) prepared by SLM technology", *J. Magn. Magn Mater.*, Vol. 324 (4), pp. 495–500, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.08.030>.
- [29] R. Conteri et al., "Laser additive processing of Fe-Si-B-Cu-Nb magnetic alloys", *J. Manuf. Process.*, Vol. 29, pp. 175–181, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.07.029>.
- [30] W. Grzesik, "Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: A review," *Journal of Machine Engineering*, 18(4), pp. 5–24, 2018, doi: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.7629>.
- [31] Bi Zhang et al., "Defect Formation Mechanisms in Selective Laser Melting: A Review," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 30 (3), pp. 515–527, 2017. Bibcode:2017ChJME.30.515Z, doi: <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0121-5>.
- [32] T. Vilaro, C. Colin and J. D. Bartout, "As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti6Al4 V alloy processed by selective laser melting", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42(10): 3190–3199, 2011, doi: <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0731-y>.
- [33] H. J. Gong et al., "Analysis of defect generation in Ti6Al4 V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes," *Additive Manufacturing*, 1–4, pp. 87–98, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.002>.

- [34] D. Gu et al., “Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium”, *Acta Materialia*, Vol. 60(9), pp. 3849–3860, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.04.006>.
- [35] Z. Chen, H. Ye, H. Xu, “Distortion control in a wire-fed electron-beam thin-walled Ti-6Al-4V freeform,” *Journal of Materials Processing Technology*, 258, pp. 286–295, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.008>.
- [36] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri and H. Li, “Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 81, pp. 465–481, 2015, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>.
- [37] B. E. Carroll, T. A. Palmer and A. M. Beese, “Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing,” *Acta Materialia*, Vol. 87, pp. 309–320, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.054>.
- [38] Y. Kok, et al., “Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review,” *Materials & Design*, 139, pp. 565–586, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.021>.
- [39] J. Allum, A. Moetazedian, A. Gleadall and V. V. Silberschmidt, “Discussion on the microscale geometry as the dominant factor for strength anisotropy in material extrusion additive manufacturing,” *Additive Manufacturing*, Vol. 48, 102390, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102390>.
- [40] E. V. Melnikov et al., “Anisotropy of the tensile properties in austenitic stainless steel obtained by wire-feed electron beam additive growth”, *Letters on Materials*, 9(4), 460–464, 2019, doi: <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2019-4-460-464>.
- [41] T. Lieneker et al., Systematical determination of tolerances for additive manufacturing by measuring linear dimensions. In: 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, USA, p. 371–384, 2015, <https://repositories.lib.utexas.edu/items/2abbbba1-f4c1-4b90-95cc-5441e9e30793>.
- [42] K. Manjunath et al., “Simulation-based investigation on ultra-precision machining of additively manufactured Ti-6Al-4V ELI alloy and the associated experimental study”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 238, 2023, doi: <https://doi.org/10.1177/0954405423119692>.
- [43] Qi. Shi, *Recycling of titanium alloys from machining chips using equal channel angular pressing*. 2015. PhD Thesis. Loughborough University, <https://core.ac.uk/download/288374302.pdf>.
- [44] S. Rossi, F. Deflorian, and F. Venturini, “Improvement of surface finishing and corrosion resistance of prototypes produced by direct metal laser sintering”, *Journal of materials processing technology*, Vol. 148(3), pp. 301–309, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.02.001>.
- [45] E. Liverani, S. Toschi, L. Ceschini, A. Fortunato, “Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 249, pp. 255–263, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042>.
- [46] K. N. Amato et al., “Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting”, *Acta Materialia*, Vol. 60(5), pp. 2229–2239, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.12.032>.
- [47] L. Thijs et al., “Strong morphological and crystallographic texture and resulting yield strength anisotropy in selective laser melted tantalum”, *Acta Materialia*, Vol. 61(12), pp. 4657–46689, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.04.036>.
- [48] E. Segebade, M. Gerstenmeyer, S. Dietrich, F. Zanger, V. Schulze. “Influence of anisotropy of additively manufactured AlSi10Mg parts on chip formation during orthogonal cutting,” *Procedia CIRP*, Vol. 82, pp. 113–118, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.043>.
- [49] P. Fernandez-Zelaia, V. Nguyen and H. Zhang, “The effects of material anisotropy on secondary processing of additively manufactured CoCrMo,” *Addit Manuf.*, Vol. 29, 100764, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.06.015>.
- [50] F. Hojati, A. Daneshi, B. Soltani, B. Azarhoushang and D. Biermann, “Study on machinability of additively manufactured and conventional titanium alloys in micro-milling process,” *Precision Engineering*, Vol. 62, pp. 1–9, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.11.002>.
- [51] M. Simonelli, Y. Y. Tse, C. Tuck (2014). “Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V,” *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 616, pp. 1–11, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.07.086>.
- [52] B. E., Carroll, T. A. Palmer, A. M. Beese, “Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing,” *Acta Materialia*, Vol. 87, pp. 309–320, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.054>.
- [53] L. Lizzul, M. Sorgato, R. Bertolini, A. Ghiotti and S. Bruschi, “Influence of additive manufacturing-induced anisotropy on tool wear in end milling of Ti6Al4V,” *Tribology International*, Vol. 146, 106200, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106200>.
- [54] L. Lizzul, R. Bertolini, A. Ghiotti and S. Bruschi, “Effect of AM-induced anisotropy on the surface integrity of laser powder bed fused Ti6Al4V machined parts,” *Procedia Manufacturing*, Vol. 47, pp. 505–510, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.149>.
- [55] L. Lizzul, M. Sorgato, R. Bertolini, A. Ghiotti, S. Bruschi, “Anisotropy effect of additively manufactured Ti-6Al-4V titanium alloy on surface quality after milling,” *Precis. Eng.*, Vol. 67, pp. 301–310, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.10.003>.

- [56] H. Taylor, Engineering 27 – Introduction to Manufacturing and Tolerancing. Course information. [Online]. Accessed: Apr. 04, 2025. Available: <https://jacobsinstitute.berkeley.edu/wp-content/uploads/2017/05/E27-Spring-2017-syllabus-and-schedule.pdf>.
- [57] Course - Production Systems and Processes - TØL4012 Sustainable Manufacturing Technology. Norwegian University of Science and Technology - NTNU [Online]. Accessed: Apr. 04, 2025. Available: <https://www.ntnu.edu/studies/courses/T%C3%98L4012/2018#tab=omEmnet>.
- [58] Examination in Ultra Precision Engineering for the degree of Master of Research, 2018–19. Notices by Faculty Boards, etc. - Cambridge University Reporter 6516 [Online]. Accessed: Apr. 04, 2025. Available: <https://www.admin.cam.ac.uk/reporter/2017-18/weekly/6516/section5.shtml#heading2-29>.
- [59] S. Dixit, S. Liu, “Laser additive manufacturing of high-strength aluminum alloys: challenges and strategies,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(6), 156, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/jmmp6060156>.
- [60] P. Nandwana, et al., “Powder bed binder jet 3D printing of Inconel 718: Densification, microstructural evolution and challenges☆,” *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 21(4), pp. 207–218, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2016.12.002>.
- [61] A. Kurdi et al., “Investigation into the microstructure and hardness of additively manufactured (3D-Printed) Inconel 718 Alloy,” *Materials*, 16(6), 2383, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/ma16062383>.
- [62] E-Drive housing printed on NXG XII 600. ANNUAL REPORT 2020. [Online]. Accessed: Apr. 04, 2025. Available: <https://nikon-slm-solutions.com/wp-content/uploads/2024/10/Annual-Report-SLM-2020.pdf>.
- [63] S. Käfer, “EOS stellt neue Core- und Premiumprodukte vor,” *MM MaschinenMarkt*. [Online]. Accessed: Apr. 04, 2025. Available: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/eos-stellt-neue-core-und-premiumprodukte-vor-a-951728/#>.
- [64] R. Frohwerk, “The casting industry meets the future with integrated 3d printing,” *Nikon SLM Solutions – Innovating the Future with Precision Metal 3D Printing*. 2025. [Online]. Accessed: Apr. 04, 2025. Available: <https://nikon-slm-solutions.com/additive-additive/the-casting-industry-meets-the-future-with-integrated-3d-printing/>.
- [65] M 300-4 - Medical 3D printer by EOS GmbH Electro Optical Systems | MedicalExpo. [Online]. Accessed: Apr. 04, 2025. Available: <https://www.medicaexpo.com/prod/eos-gmbh-electro-optical-systems/product-72628-871437.html>.

Features of Manufacturing Parts Using Additive Technologies from Metal Alloys. An Analytical Review

Oles Sonets¹ • Boris Vorontsov¹

¹ National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

Abstract. This article explores current scientific research on the machining process of parts manufactured using additive technologies. The paper presents a brief classification of metal alloys used in the field of additive manufacturing, as well as a classification of 3D printing technologies known to date. The opportunities provided by additive technologies are outlined. The advantages and disadvantages of additive manufacturing in general, and of the most common production methods in particular, are discussed. The results of scientific studies on the influence of printing layer orientation and anisotropy of the product’s microstructure on the machining process are analyzed. Attention is given to the machinability of parts. The lack of research on milling of parts produced by specific printing methods is highlighted. The necessity of conducting scientific research on the machining of titanium alloy Ti6Al4V parts produced by additive technologies is substantiated. 3D printing offers new approaches to the design and manufacturing of products. At this stage of technological development, it is impossible to replace or completely eliminate finish machining from the production chain due to drawbacks associated with thermal and mechanical processes during melting and/or sintering of the material, as well as due to high requirements for surface roughness, dimensional accuracy, and geometric precision of critical surfaces. There remain significant aspects that require further development, optimization, improvement, and investigation. A telling example of this is that leading universities around the world are incorporating credit-bearing modules on hybrid additive-subtractive manufacturing into their educational programs at all levels of higher education.

Keywords: machining, additive manufacturing, machinability, anisotropy of the microstructure, electron beam melting; Ti6Al4V.