

УДК 621.9

## Особливості застосування та оброблення заготовок із титанового сплаву Ti-6Al-4V отриманих за технологією xBeam 3D metal printing

Д.О. Пірогов, Б.С. Воронцов

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

***Анотація.** Титановий сплав Ti-6Al-4V має широке застосування у перспективних галузях промисловості, через поєднання в собі міцності, легкості та високої стійкості до корозії, демонструючи гарну оброблюваність, високу корозійну стійкість, хорошу втому на міцність і прийнятну в'язкість до руйнування. Разом з тим, є найпоширенішим серед титанових сплавів, для використання в якості витратного матеріалу в новітніх адитивних технологіях, що дозволяє значно спростити отримання заготовок із сплаву Ti-6Al-4V, уникнути багатьох технологічних проблем, отримати заготовки із максимальною точністю і якістю, а також мінімізувати процес подальшого механічного оброблення. В роботі представлено унікальність використання титанових сплавів в сфері адитивних технологій, наведено позитивні та негативні властивості та явища, які супроводжують процес різання. Проведено аналіз оброблюваності та огляд підходів для уникнення неефективного оброблення.*

***Ключові слова:** титановий сплав; оброблюваність; адитивні технології.*

На сьогоднішній день галузь виробництва титанових сплавів є досить розвиненою, але нові технології та застосування цих сплавів продовжують зростати. В останні десятиліття спостерігається значення використання титанових сплавів для виготовлення авіаційних та автомобільних деталей, газових турбін в енергетиці, імплантів в медицині та складових частин в інших галузях промисловості. Потреба в титанових сплавах пов'язана із їх особливими механічними та термічними властивостями.

Межа міцності для титанового сплаву Ti-6Al-4V становить в діапазоні від 900 до 1200 МПа. Теплопровідність варіюється в межах від 6,6 до 6,8 Вт/(м·К) при кімнатній температурі та приблизно від 16 до 19 Вт/(м·К) при температурі 800° С. Аерокосмічна та авіаційні галузі є основними сферами застосування титанових матеріалів, близько 70–80 % усіх запитів на титан призначені для аерокосмічної промисловості, що і дало поштовх до розробки нових сплавів із покращеною міцністю та вищою температурою експлуатації. Основними причинами застосування в аерокосмічній промисловості титанових сплавів є зменшення ваги і заміна алюмінієвих сплавів і низьколегованих сталей на більш температурно витривалі, корозійно стійкі титанові сплави. Так як міцність титанових сплавів значно вища ніж алюмінієвих, відповідно поперечний переріз менший і вага нижча. Титанові сплави використовуються в газотурбінних двигунах для статичних і обертових компонентів включаючи усі секції літака: фюзеляж, мотогондоли, крило та оперення, опорні конструкції підлоги [1].

У автомобільних деталях, титанові сплави використовуються в основному для зниження ваги, а також потребують сплавів з вищою робочою температурою і покращеною поверхнею для зносостійкості. Титановий сплав Ti-6Al-4V має здатність замінити більш важку сталь у деяких компонентах дизельних двигунів, що мають важливе значення для тертя та зносу, таких як шатуни, впускні клапани, рухомі лопатки турбокомпресора та поршні. Однак, через високу вартість титану, їх використання обмежене і застосовується лише для гоночних або спеціальних автомобілів де необхідна легкість, паливна ефективність та продуктивність. В біомедичній галузі необхідні титанові сплави без токсичних елементів із модулем пружності подібним до модуля пружності реальної кістки, тому сплав Ti-6Al-4V, завдяки своїй біосумісності у поєднанні з хорошими механічними і корозійними властивостями, є найпопулярнішим матеріалом на основі титану у виробництві біомедичних компонентів, у тому числі зубних імплантатів, протезів, хірургічних інструментів, колінних і стегнових

суглобі, серцеві клапани, кардіостимулятори, штучні серця. Через низьку зносостійкість тертя, наприклад для колінних суглобів, необхідні додаткові покриття або обробки поверхонь, а також надмірна кількість ванадію і алюмінію в сплавах негативно впливає на організм людини [1].

У класичному сплаві Ti-6Al-4V теплопровідність збільшується більш ніж у 3 рази при зміні температури від 10° С до 1200° С, тоді як твердість швидко зростає при зниженні температури, а зміни температури від кімнатної до температури рідкого азоту впливають на міцність на розрив цього сплаву від 1000 до 1700 МПа. Модуль Юнга з підвищенням температури зменшується, але ці зміни температури виражені при температурі вище 500° С. Межа міцності на розрив сплавів знижується майже на 50 % при збільшенні температур [1].

Даний сплав також демонструє гарну оброблюваність, високу корозійну стійкість, хорошу втому на міцність і прийнятну в'язкість до руйнування, а також сплав Ti-6Al-4V було переведено на стандарт, з яким мають порівнюватись нові сплави, звичайно такий титановий сплав має і погані характеристики ковзаності поверхонь, через високі і не стабільні показники коефіцієнтів тертя, що також призводить до задирів. Для усунення негативних характеристик використовується безліч додаткових покращень, по типу різних хімічних поверхонь та плівок, які дозволяють зменшити вплив негативних характеристик на експлуатаційні властивості сплаву. Також, титан забезпечує достатню стійкість до корозії, тому додаткове фарбування не потрібне, за деяких випадків, наприклад контакту із алюмінієм, де необхідне додаткове фарбування або нанесення герметиків для запобігання гальванічної корозії і кращої довговічності конструкції.

На підставі вищесказаного можна зробити висновок про те, що титанові сплави мають великий потенціал, що дозволить прискорити розвиток ключових технологій в різних галузях промисловості, але взаємозв'язок між отриманням заготовки і подальшим обробленням також повинен бути оптимізований і прискорений та замість традиційних методів отримання заготовок із титану, литтям порошку під тиском, плазмового спікання, лазерним легуванням, штампування або витягування, використовувати новітні адитивні технології отримання заготовок, що дозволить скоротити терміни та вартість виготовлення.

Адитивне виробництво – це створення об'єктів способом пошарового формування заготовки, додаванні матеріалу для кожного шару на основі тривимірних CAD-моделей (моделей, розроблених за допомогою систем автоматизованого проектування). Це пояснює різницю між 3D-друком і традиційними методами виготовлення виробів. Технологія є субтрактивною і дозволяє видаляти надлишки матеріалу з заготовки шляхом механічної обробки. Адитивне виробництво дозволяє автоматизувати завдання по прототипуванню виробів і деталей і забезпечує такі переваги: скорочення термінів створення заготовки і зниження вартості її отримання завдяки мінімізації спеціалізованого інструментального оснащення, а також у мінімізації спеціальних рухів інструмента, економічна доцільність дрібносерійного виробництва, функціональна оптимізація або друк важкооброблюваних конфігурацій, гнучкість проектування, скорочення втрат і відходів на виробництво, але в той же час наявні негативні чинники, такі як погана шорсткість, залишкова пористість, неоднорідна структура, точність виготовлення може варіюватися від температурних напружень, висока вартість обладнання і низька частка досліджень по контролю якості кінцевого виробу і його подальшої механічної обробки, що в кінцевому виробі призводить до високої собівартості [2].

Одним із перспективних методів отримання заготовок є адитивна технологія xBeam 3D metal printing, яка відрізняється від вже існуючих тим, що метод заснований на застосуванні електронного променя як джерела тепла і титанового дроту у якості розхідного матеріалу. Ключовим є використання низьковольтної газорозрядної електронної гармати з вбудованою по осі направляючою для подачі дроту. Порожнистий промінь, який генерується такою гарматою, створює позитивні фізичні умови, завдяки камері, яка контролює потужність для

плавлення витратного матеріалу і його пошарового осадження, дозволяючи точно і контрольовано отримувати заготовки. Дана технологія спрощує наявні технологічні проблеми, дозволяючи отримувати заготовки із максимально високою точністю, продуктивністю, запобігає пористості на непроплавлені матеріалу, дозволяє отримувати тонкостінні і точні заготовки. Дослідження показали, що титановий сплав Ti-6Al-4V має високі експлуатаційні показники, шари матеріалу не мають дефектів і вартість нанесеного матеріалу є нижчою серед усіх доступних на даний момент технологій, а кінцеве механічне оброблення заготовки вимагає зняття матеріалу не більше 1 мм на кожній стінці [3].

Титан та його сплави важко обробляти і фрезерування титанових сплавів отриманих адитивними технологіями не є виключенням. Оброблюваність матеріалу може бути оцінена довговічністю інструменту, граничною швидкістю зняття металу, силою різання, якістю оброблення поверхні та утворенням стружки. Оброблюваність титану вважається поганою через, як правило, високі температури різання та швидкий знос інструменту, титан є поганим теплопровідником у результаті чого, тепло, яке виділяється під час оброблення не може швидко розсіюватися, залишається на кромці різального інструмента. Тенденція титану до легування або хімічної реакції із інструментом при робочих температурах спричиняє задирання, зварювання та злипання, що спричиняє викришування поверхонь ріжучих інструментів, швидкий знос і поломки. Під час точіння або фрезерування титанових сплавів виникає нестабільна пластична та термічна нестійкість, яка призводить до виникнення нерівномірних деформацій при зсуву стружки, яка утворює зубчасту стружку. Однакова швидкість та глибина різання під час контакту інструмента із титановою заготовкою зосереджена лише на початку заготовки, в якій зосереджені висока температура і напруга різання. Сила різання завжди коливається, високий вібраційний фон в поєднанні із високою температурою викликають втому ріжучого інструмента. Хімічні реакції між заготовкою та інструментом під час обробки призводять до сколів і передчасного виходу інструмента із ладу. Крім того висока міцність при високій температурі погіршують оброблення [4].

Ріжучий інструмент надзвичайно важливий параметр для забезпечення якісної обробки, його характеристики повинні протистояти високим навантаженням, мати високу твердість при високих температурах, гарну теплопровідність, міцність на стиск, розтяг і зсув, а також стійкість до втоми. Найкращі результати в обробці титанових сплавів досягались із використанням високолегованих швидкорізальних інструментальних сталей, сталі із високим вмістом кобальту. Інструменти із нітридом титану (TiN) або карбонітриду (TiCN) не рекомендовано до застосування через можливі хімічні реакції і подальший швидкий знос ріжучої частини інструменту. Однак нітрид титану алюмінію (TiAlN) більш перспективний при обробці титанових сплавів. Цементований карбід (WC) також демонструє більший рівень зношуваності, ніж інструменти з прямого твердого сплаву. Надтверді покриття, такі як кубічний нітрид бору (CBN) та полікристалічний алмаз мають хороші показники швидкості зношування, але їх використання обмежено високою ціною [4], [5].

Отже, для високої продуктивності зняття матеріалу при обробці титанових сплавів найефективнішим способом є збільшення швидкості різання із використанням інструментів, які можуть зберігати твердість і міцність при вищих температурах, які придатні для високих швидкостей. Знижується сила різання, збільшується точність і покращується продуктивність використання верстата, видалення стружки відбувається краще, зменшуються задири на ріжучому інструменті. Додатково, щоб подолати високі температури, не виключено, застосування охолоджуючих рідин під високим тиском для запобігання високій температурі в зоні контакту, яка може вплинути на якість поверхні і термін служби інструменту, а також значно зменшується коефіцієнт тертя і відповідно сила різання. Ефект охолодження усуває зварювання інструменту та стружки та покращує термін служби інструмента, а також якість поверхні. Збільшення глибини різання та подачі призведе до високої сили різання і вплине на



якість отриманої поверхні. Наявні дослідження оброблюваності титанових сплавів направлені на роботу із традиційними заготовками, тому майбутні дослідження необхідно спрямовувати на заготовки, які отримані адитивними технологіями використовуючи наявні, базові підходи, які забезпечують стабільність та високі параметри оброблюваності, отримуючи зворотній зв'язок, який дозволить вивести нові критерії, підходи та рекомендації до ефективного оброблення.

### Список літератури

1. C. Veiga, J. P. Davim, A. J. R. Loureiro. Properties and applications of titanium alloys: a brief review. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2012. № 32(2), С. 133–148.
2. А. С. Полупан. Дослідження питання впровадження адитивних технологій в авіабудівну галузь. *Open Information and Computer Integrated Technologies.* 2020. № 88. С. 112–122.
3. D. V. Kovalchuk та ін. New possibilities of additive manufacturing using Xbeam 3D metal printing technology (Review). *The Paton Welding Journal.* 2017. № 12. С. 16–22.
4. M. Rahman, Y. S. Wong, A. R. Zareena. Machinability of Titanium Alloys. *JSME International Journal Series C.* 2003. 46, № 1(46). С. 107–115.
5. Я. Козяр, Н. Балицька, Л. Полонський. Аналітичний огляд особливостей фрезерування жароміцних сплавів. *Вісник Хмельницького національного університету.* 2023. №6. С. 166–171.

## Specifics of the use and processing of titanium alloy ti-6al-4v blanks produced by xbeam 3d metal printing technology

**D. Pirohov, B. Vorontsov**

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** *Titanium alloy Ti-6AL-4V is widely used in high-potential industries due to its combination of strength, lightness and high corrosion resistance, demonstrating good machinability, high corrosion resistance, good tensile fatigue and acceptable fracture toughness. At the same time, it is the most common among titanium alloys for use as a consumable in the modern additive technologies, which makes it possible to significantly simplify the production of Ti-6AL-4V alloy blanks, avoid many technological problems, obtain blanks with maximum accuracy and quality, and minimize the process of further machining. The paper presents the uniqueness of the use of titanium alloys in the field of additive technologies, describes the positive and negative properties and phenomena that accompany the cutting process. An analysis of machinability and an overview of approaches to avoid inefficient machining are provided.*

**Keywords:** *titanium alloy; machinability; additive technologies.*