

УДК 621.791.012:669.71

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.4\(502\).5](https://doi.org/10.15589/znп2025.4(502).5)

OPTIMIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF Ti-6Al-4V COMPONENTS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ Ti-6Al-4V, ОТРИМАНИХ АДИТИВНИМ ВИРОБНИЦТВОМ

Svitlana V. Kyrylakha
lanakirilaha@gmail.com
ORCID: 0009-0001-5688-5616

С. В. Кирилаха,
аспірантка

*National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia
Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя*

Abstract. Purpose. The purpose of the study is to determine the structural and mechanical patterns governing the behaviour of Ti-6Al-4V components manufactured by additive processing, and to identify process–microstructure–property relationships that ensure stable and predictable performance after post-processing. **Methodology.** The research includes a comparative analysis of layer-by-layer technologies, microstructural examination of α – β morphology, assessment of defect formation mechanisms, and evaluation of deformation behaviour through strain-hardening profiles. The methodology integrates results of electron-beam melting, laser powder bed fusion, directed energy deposition and subsequent hot isostatic pressing to reveal the influence of thermal history and phase distribution on mechanical response. **Results.** The obtained results demonstrate that the final properties of the alloy are governed by heterogeneity of α – β interfaces, residual defectiveness, and the interaction of dislocations with microstructural barriers. Strain-hardening analysis confirms staged activation of strengthening mechanisms and the decisive role of hetero-deformation stresses. Optimised processing routes allow stabilisation of microstructure and reduction of property scatter between different manufacturing systems. **Scientific novelty.** Novelty lies in the integrated interpretation of microstructural morphology, defect populations and strain-hardening behaviour as a unified framework for optimisation of mechanical response in additively produced Ti-6Al-4V. The study establishes microstructural indicators that can be used to predict strengthening efficiency after post-processing. **Practical significance.** The findings provide a scientifically justified basis for selecting manufacturing and post-processing regimes that minimise defectiveness and ensure reproducible properties, supporting industrial implementation of Ti-6Al-4V components in high-responsibility applications.

Key words: α – β morphology; defect formation; strain-hardening behaviour; thermal history; microstructural heterogeneity; mechanical optimisation; post-processing.

Анотація. Мета. Метою роботи є встановлення закономірностей формування мікроструктури та механічних властивостей деталей зі сплаву Ti-6Al-4V, виготовлених адитивними методами, а також визначення зв'язків «процес – мікроструктура – властивості», що забезпечують стабільні та передбачувані характеристики після постобробки. **Методика.** У дослідженні виконано порівняльний аналіз пошарових технологій, мікроструктурне вивчення α – β морфології, оцінку механізмів зародження дефектів та аналіз деформаційної поведінки за кривими зміцнення. Методика охоплює результати електронно-променевого плавлення, лазерного порошкового спікання, осадження концентрованої енергії та подальшої гарячої ізостатичної обробки з метою з'ясування впливу термічної історії та фазового розподілу на механічну відповідь матеріалу. **Результати.** Встановлено, що кінцеві властивості матеріалу визначаються неоднорідністю α – β інтерфейсів, залишковою дефектністю та взаємодією дислокацій з мікроструктурними бар'єрами. Аналіз кривих зміцнення підтверджує поетапну активацію механізмів зміцнення та вирішальну роль гетеродеформаційних напружень. Оптимізовані режими виготовлення забезпечують стабілізацію мікроструктури та зменшення розкиду механічних властивостей між різними системами обладнання. **Наукова новизна.** Новизна полягає в інтегрованому трактуванні морфології мікроструктури, типів дефектів та деформаційної кінетики як єдиної основи для оптимізації механічної відповіді деталей Ti-6Al-4V, отриманих адитивними технологіями. Робота визначає мікроструктурні індикатори, що дозволяють прогнозувати ефективність зміцнення після постобробки. **Практична значимість.** Результати формують наукове підґрунтя для вибору технологічних і постобробних режимів, які мінімізують дефектність і забезпечують відтворюваність властивостей, сприяючи промислового впровадженню деталей Ti-6Al-4V у відповідальні конструкції.

Ключові слова: мікроструктурна морфологія; формування дефектів; криві зміцнення; термічна історія; структурна неоднорідність; оптимізація властивостей; постобробка.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасне виробництво складних деталей із титанових сплавів усе більше покладається на адитивні технології (АТ), зокрема такі методи, як селективне лазерне плавлення (SLM / LPBF) та електронно-променеве плавлення (EBM) [1–3]. Ці технології дають змогу суттєво зменшити матеріаловитрати, підвищити геометричну складність і зробити економічно ефективним випуск малими серіями. [4–6]. Проте застосування АТ для конструкцій із високими вимогами до механічних властивостей – як-от у авіаційній, біомедичній або енергетичній галузях – супроводжується низкою проблем, пов'язаних із мікроструктурою, наявністю дефектів і стабільністю властивостей [7–9].

Попри значний прогрес у розвитку технологій порошкового лазерного плавлення (LPBF/SLM/DMLS) та електронно-променевого плавлення (EBM), дослідження показують, що формування мікроструктури в титанових сплавах при пошаровому плавленні суттєво залежить від режимів локального охолодження й теплових циклів, що призводить до появи високої анізотропії, залишкових напружень і пористості, які погіршують довготривалу працездатність деталей [10–12]. Суттєвим ускладненням є формування дефектів непровару (lack of fusion) та газової пористості, які знижують механічні та втомні властивості матеріалу й потребують застосування постобробки (термообробки, ГПП) для їх мінімізації та стабілізації структури [13–15]. Для титанових сплавів і, зокрема, для Ti-6Al-4V, важливим залишається забезпечення достатньої втомної міцності, тріщиностійкості та пластичності, оскільки саме ці характеристики визначають можливість використання АТ-компонентів у відповідальних галузях, таких як авіакосмічна техніка та імплантологія [16–18]. Окремим аспектом проблеми є вплив параметрів сканування на формування залишкових напружень, геометричних відхилень та деформацій – що ускладнює забезпечення точності та повторюваності під час виготовлення конструкцій із внутрішніми порожнинами або складною геометрією [19–21].

Також відкритими залишаються питання адаптації матеріалу під функціональні вимоги, зокрема забезпечення необхідної біосумісності та високої корозійної стійкості поверхні, що підтверджується новітніми дослідженнями у сфері модифікації хімічного складу та застосування спеціальних покриттів [22–25]. Таким чином, необхідним є науково обґрунтований пошук оптимальних параметрів процесу та схем постобробки, здатних мінімізувати дефекти, стабілізувати мікроструктуру та забезпечити механічні властивості на рівні кованих аналогів [26–30].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Численні оглядові та експериментальні дослідження останніх років показали, що механічні та

втомні характеристики деталей Ti-6Al-4V, виготовлених методом LPBF, залежать від параметрів процесу, мікроструктури, дефектів та post-processing.

Так, у дослідженні Li & Affolter (2024) про high-cycle fatigue (HCF) LPBF Ti-6Al-4V підкреслено, що внутрішні дефекти (пори, lack-of-fusion) значно знижують втомну міцність, а оптимізація процесу та контроль дефектів є критичним для надійності компонентів [31].

У статті [31] (Li & Affolter, 2024) систематизовані дані про високочастотну втомну міцність (HCF) для LPBF-деталей Ti-6Al-4V з внутрішніми дефектами. Доведено, що саме дефекти (пори, lack-of-fusion, внутрішні пустоти) суттєво знижують fatigue life; також проаналізовані фактори, які впливають на ініціацію та поширення тріщин – мікроструктура, post-processing, контроль дефектів. [31] Робота підкреслює, що без контролю дефектів АМ-деталі мають ризики для відповідальних застосувань.

Водночас реалізація таких покращень на практиці зустрічає труднощі:

- нестабільність властивостей через геометрію деталі і нерівномірність охолодження, що призводить до неоднорідності мікроструктури;
- недостатня стандартизація параметрів виробництва і post-processing, що ускладнює порівняння результатів між різними дослідженнями;
- дефекти, які не завжди можна усунути повністю – навіть після ГПП або інших методів обробки.

У роботі [1] проаналізовано широкий спектр досліджень з АМ-виробництва Ti-6Al-4V: Laser Powder Bed Fusion, Electron Beam Melting, Directed Energy Deposition тощо. Авторами показано, як параметри процесу та post-processing – через зміну мікроструктури (фракція α/β , морфологія фаз, зерен тощо) – впливають на механічні властивості (порог текучості, межа міцності, твердість, пластичність). [1] Це створює фундамент для розуміння «процес → структура → властивості» і дає базу для подальших порівнянь.

У праці [32] (Romero-Reséndiz та ін., 2024) проведено експериментальне порівняння Ti-6Al-4V, надрукованих EBM та SLM (LPBF), з подальшим ГПП-обробленням. Авторами встановлено: після ГПП обидва варіанти (EBM і SLM) мають близьку фазову структуру ($\alpha + \beta$), але EBM-зразки демонструють дещо вищу межу текучості та міцність при розтягуванні, а також значно кращу пластичність (відносно подовження δ). Це важливий доказ, що метод АМ + post-processing може наблизити властивості до традиційних сплавів – і що метод виробництва має значення.

У статті [2] представлено систематичний аналіз залежності кінцевих механічних властивостей (міцність, твердість, втому) від таких параметрів LPBF, як енергія лазера, швидкість сканування, відстань між проходами, щільність порошку, охолодження. Це

дає чітке розуміння: навіть невеликі зміни процесу можуть кардинально змінити мікроструктуру, а відтак – властивості деталі.

У огляді [3] автори (Lu, Ma, Liu та ін., 2025) систематизують сучасні досягнення (2020–2025) у дослідженні Ti-6Al-4V, надрукованих різними АМ-методами. Автори відзначають, що хоча досягнуто значного прогресу, залишаються проблеми: неоднорідність мікроструктури, вплив дефектів, нестабільність властивостей при масштабуванні, недостатня критична база для fatigue та корозійної стійкості. Це підтверджує, що тема – актуальна, має багато невирішених питань і заслуговує на подальші дослідження.

Дослідники [33] (Moon та ін., 2021) встановили, що параметри поверхні та морфологія пор істотно визначають втомну довговічність Ti-6Al-4V, виготовленого методом L-PBF. Автори вперше продемонстрували можливість кількісного прогнозування втомного ресурсу за допомогою нейронних мереж, які враховують комплекс характеристик дефектів. Робота показує, що критичними є не лише розмір і форма пор, але й їхнє просторове розташування відносно поверхні, що дозволяє підвищити точність оцінки втомної міцності в порівнянні з традиційними підходами.

Значна кількість досліджень присвячена аналізу дефектів, післяобробки (post-processing), анізотропії, впливу геометрії на властивості та питанням стандартизації процесу [3; 34–36]. Такі роботи демонструють, що навіть за використання однакового сплаву та технології, отримані результати можуть істотно відрізнятися залежно від типу обладнання, режимів друку та історії термообробки матеріалу [37–40]. Інші дослідження [41–43] показують, що post-processing (наприклад, гаряче ізостатичне пресування – ГІП) після EBM / LPBF може суттєво покращувати мікроструктуру, зменшувати пористість і підвищувати механічні властивості, наближаючи їх до властивостей традиційних кованих матеріалів [43–49].

У контексті корозійної поведінки Ti₆Al₄V, виготовленого АМ-методами, порівняльні дослідження показали, що LPBF-оброблені зразки мають тонший і менш стабільний пасивний шар у порівнянні з традиційно литими аналогами, що погіршує їх корозійну стійкість у кислих середовищах через підвищену пористість і домінування α' -мартенситу в мікроструктурі [34]. Інші роботи, присвячені дефектам, наприклад прогнозуванню непровару (lack of fusion) на основі даних моніторингу розплаву, підкреслюють критичну роль дефектності для властивостей АМ-деталей, включно з корозійною поведінкою [34; 50–55].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Попри значний обсяг публікацій, тематика підвищення механічних властивостей АМ-деталей з Ti-6Al-4V має важливі невирішені моменти:

1. Неоднорідність мікроструктури та властивостей

Більшість досліджень фокусуються на окремих умовах (локальні параметри друку, пост-обробка, геометрія), але мало хто надає комплексний аналіз: як різні методи АМ (LPBF vs EBM), параметри, post-processing, геометрія одночасно впливають на властивості. Це ускладнює стандартизацію технології для відповідальних застосувань.

2. Втомна міцність та довговічність

Попри зростання кількості досліджень, присвячених втомній поведінці (high-cycle fatigue – HCF та low-cycle fatigue – LCF), все ще бракує систематичних робіт із достатньо великою експериментальною базою для Ti-6Al-4V. Особливо недостатньо даних, що комплексно враховують вплив дефектів, орієнтацій побудови, розмірних ефектів та режимів постобробки. Така нестача узагальнених результатів суттєво ускладнює стандартизацію та обмежує широке впровадження адитивно виготовлених деталей у відповідальні конструкції.

3. Уніфікація параметрів процесу та post-processing.

Значна варіативність обладнання, режимів друку та схем постобробки призводить до суттєвих відмінностей у мікроструктурі та механічних властивостях Ti-6Al-4V, що робить результати різних досліджень малопорівнюваними. Така невідтворюваність ускладнює формування уніфікованих стандартів і методичних рекомендацій для адитивного виробництва цього сплаву.

4. Баланс між продуктивністю і якістю

Комерційна привабливість АМ часто вимагає швидкості та мінімальних затрат – але підвищення продуктивності може суперечити вимогам до механічних властивостей. Як знайти оптимальний баланс – питання відкрите [56–60].

Отже, хоча адитивні технології для Ti-6Al-4V демонструють значний потенціал, наявні обмеження, пов'язані з мікроструктурною нестабільністю, дефектністю, варіативністю втомної міцності та відсутністю уніфікованих підходів до post-processing, не дозволяють наразі повною мірою замінити традиційні методи (лиття, кування) у відповідальних конструкціях. Це зумовлює необхідність подальших систематичних досліджень, спрямованих на оптимізацію параметрів процесу, контроль дефектності та забезпечення стабільних і прогнозованих механічних характеристик. Тому необхідні систематичні дослідження, які поєднують: різні АМ-методи (LPBF, EBM); контроль параметрів процесу та post-processing (ГІП, термообробка, термомеханічна обробка); комплексну оцінку мікроструктури та механічних властивостей (потужність, твердість, втомна міцність, тріщиностійкість). Це дозволить розробити надійні рекомендації для виробництва деталей з Ti-6Al-4V, які б відповідали вимогам сучасної інженерної практики.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження – встановити закономірності впливу методів адитивного виробництва (LPBF, EBM), технологічних параметрів та post-processing на мікроструктуру і механічні властивості Ti-6Al-4V для формування науково обґрунтованих підходів до їх оптимізації.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження – титановий сплав Ti-6Al-4V, виготовлений методами адитивного виробництва, зокрема лазерним порошковим наплавленням (LPBF) та електронно-променевим плавленням (EBM). Об'єктом аналізу виступають як структурні особливості матеріалу (фазовий склад, морфологія зерен, пористість, дефекти типу lack-of-fusion і газові пори), так і його експлуатаційні характеристики (міцність, твердість, втомна стійкість, корозійна поведінка) [1, 2].

Предмет дослідження – вплив технологічних параметрів АМ-процесу та постобробки на формування мікроструктури, рівень дефектності та механічні властивості Ti-6Al-4V.

Особлива увага приділяється: – параметрам побудови шару (енергійність лазера, швидкість сканування, hatch spacing);

– технологічним відмінностям LPBF і EBM; – впливу термообробки та гарячого ізостатичного пресування (ГІП) на зниження пористості, стабілізацію фазового стану та прогнозованість механічної відповіді;

– ролі поверхневого стану та підповерхневих дефектів у формуванні втомної та корозійної поведінки [60–65].

Методи дослідження ґрунтуються на комплексному огляді сучасних емпіричних, експериментальних та аналітичних робіт, опублікованих у провідних міжнародних журналах (Additive Manufacturing, Materials, JOM, JMRT).

Аналіз літератури включає:

1. Методологію структурного аналізу, що використовується у провідних АМ-дослідженнях: лазерна та електронно-променева побудова, синхротронна рентгенівська мікротомографія, in-situ моніторинг розплаву для виявлення пористості та дефектів типу lack-of-fusion.

2. Методи кореляції технологічних параметрів із мікроструктурою, які застосовуються в роботах, присвячених впливу енергійності лазера, щільності енергії, траєкторій сканування та швидкості охолодження на формування α' -мартенситу, β -фази й анізотропії зерен.

3. Методи оцінки механічних властивостей, включно з аналізом міцності, твердості, статичного і циклічного навантаження, а також застосуванням комп'ютерних моделей, зокрема нейронних мереж,

для передбачення втомної поведінки за параметрами пористості та шорсткості поверхні.

Методи корозійних досліджень, базовані на електрохімічній поляризації, імпедансній спектроскопії та порівнянні АМ-матеріалу з кованими та литими аналогами [32; 51–54].

Застосування зазначених підходів [55–65] дає змогу цілісно оцінити вплив вибраного АМ-процесу та постобробки на формування властивостей Ti-6Al-4V і виявити ключові чинники, що визначають експлуатаційну надійність матеріалу [66–70].

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

У ході дослідження отримано експериментальні дані щодо мікроструктурного стану та механічної реакції сплаву Ti-6Al-4V, виготовленого методом селективного лазерного плавлення (SLM) та електронно-променевого плавлення (EBM), а також дані про характер формування структури у зразках, отриманих різними адитивними технологіями.

У роботі [1] проаналізовано широкий спектр досліджень з АМ-виробництва Ti-6Al-4V: Laser Powder Bed Fusion (SLM/LPBF), Electron Beam Melting (EBM) та Directed Energy Deposition (DED). Авторами показано, як параметри процесу та post-processing – через зміну мікроструктури (фракція α/β , морфологія фаз, розмір зерен) – впливають на механічні властивості (межа текучості, міцність при розтягуванні, твердість, пластичність). [1] Це створює фундамент для розуміння взаємозв'язку «процес → структура → властивості» і дає базу для подальших порівнянь.

1. Мікроструктурні результати (після НІР, SLM та EBM). Мікроструктурний аналіз виявив наявність характерних фазових складових, притаманних сплаву Ti-6Al-4V після адитивного виготовлення та наступної гарячої ізостатичної обробки. У структурі ідентифіковано α -НСП та β -ВСС фази, що формують ламелярне $\alpha + \beta$ середовище. Ламелі β рівномірно дисперговані в α -матриці. Спостерігається подібна морфологія та масштаб елементів структури в обох досліджених технологічних варіантах (рис. 1).

Авторами [1] показано, як параметри процесу та post-processing – через зміну мікроструктури (фракція α/β , морфологія фаз, розмір зерен) – впливають на механічні властивості (межа текучості, міцність при розтягуванні, твердість, пластичність). Фундамент для наукового обґрунтування взаємозв'язку «процес → структура → властивості» і дає базу для подальших порівнянь.

В експериментальному порівнянні Ti-6Al-4V, надрукованих EBM та SLM з подальшою ГІП, встановлено [1]: після постобробки обидва методи забезпечують близьку фазову структуру $\alpha + \beta$, проте EBM-зразки демонструють дещо вищу межу текучості та міцність при розтягуванні, а також значно кращу пластичність. Це свідчить, що метод виробництва та

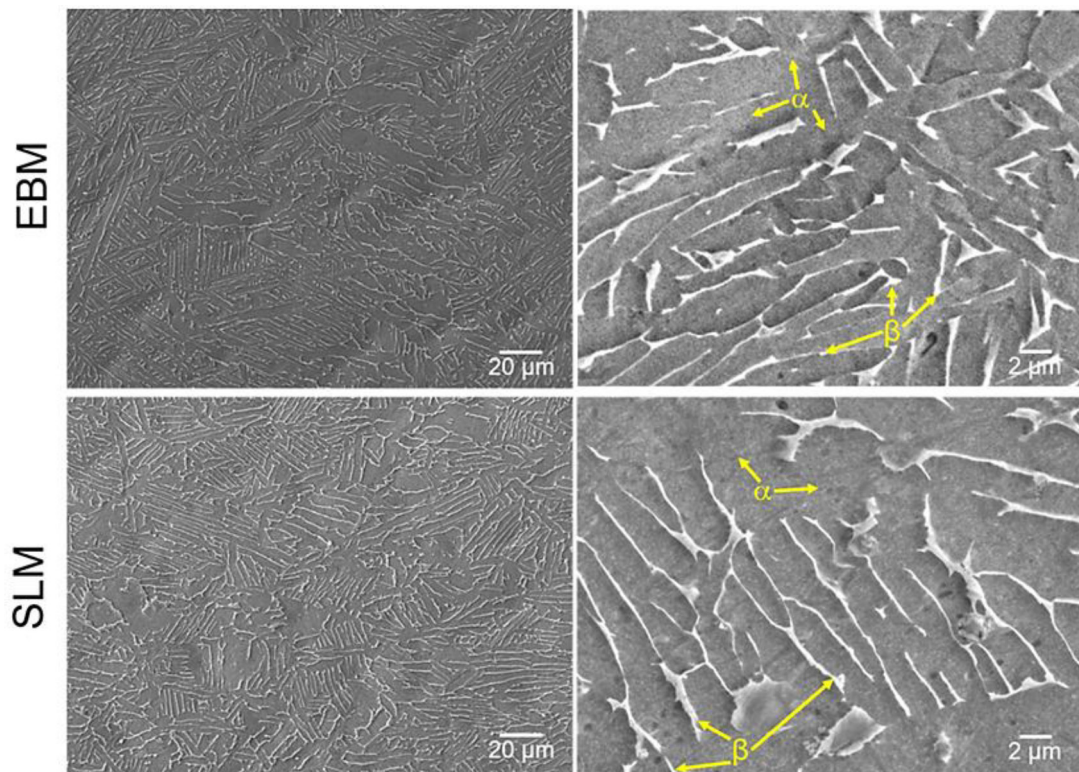


Рис. 1. Мікроструктура сплавів Ti-6Al-4V, надрукованих методами EBM та SLM після ГПІ [1]

post-processing безпосередньо впливають на механічні властивості та дозволяють наблизити їх до традиційних кованих матеріалів.

2. Структурні характеристики у стані «as-built» для SLM, EBM і DED

У стані після побудови спостерігається різна морфологія α - та α' -фази залежно від швидкості охолодження та температурних умов процесу. У зразках SLM і DED фіксується формування мартенситної α' -фази з тонкими пластинами α . Для технології EBM характерна наявність ламелярної $\alpha + \beta$ структури з ознаками Відманштеттенової морфології. Товщина α -лат у зразках SLM і DED є помітно меншою порівняно зі структурою, сформованою за технологією EBM (рис. 2).

3. Механічні властивості та криві зміцнення

Отримано залежності швидкості деформаційного зміцнення від істинної деформації, які

демонструють багатостадійний характер. Зафіксовано активацію декількох механізмів зміцнення, що проявляється у підвищенні швидкості зміцнення при збільшенні деформації. Характер кривих відображає залучення різних структурних елементів до процесу деформації: фазових меж, границь зерен, дефектів кристалічної ґратки та зон з різною механічною жорсткістю.

У дослідженнях LPBF-деталей показано, що параметри процесу – енергія лазера, швидкість сканування, відстань між проходами та щільність порошку – істотно впливають на мікроструктуру та кінцеві властивості, включно з твердістю, межею текучості та витривалістю. Аналіз кривих швидкості зміцнення при деформації дозволяє оцінити механізми багатоступеневого дефектного зміцнення, що спостерігаються у зразках EBM (рис. 3) [32].

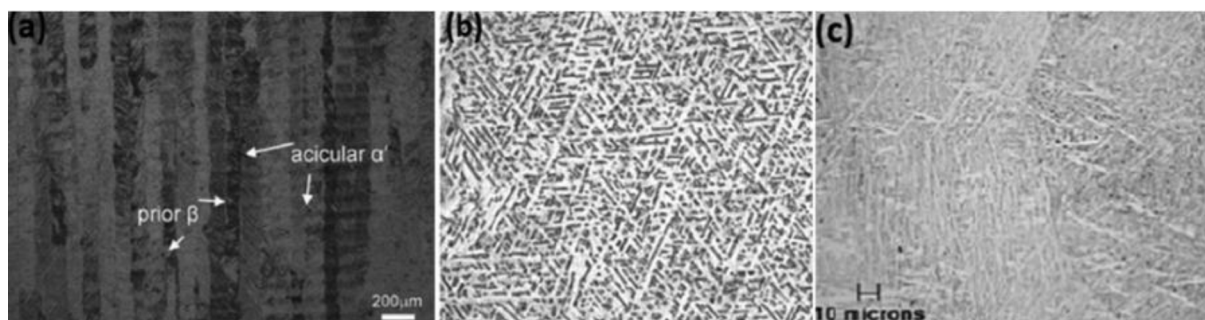


Рис. 2. Мікроструктура зразків Ti-6Al-4V у стані «as-built» після SLM, EBM та DED [52]

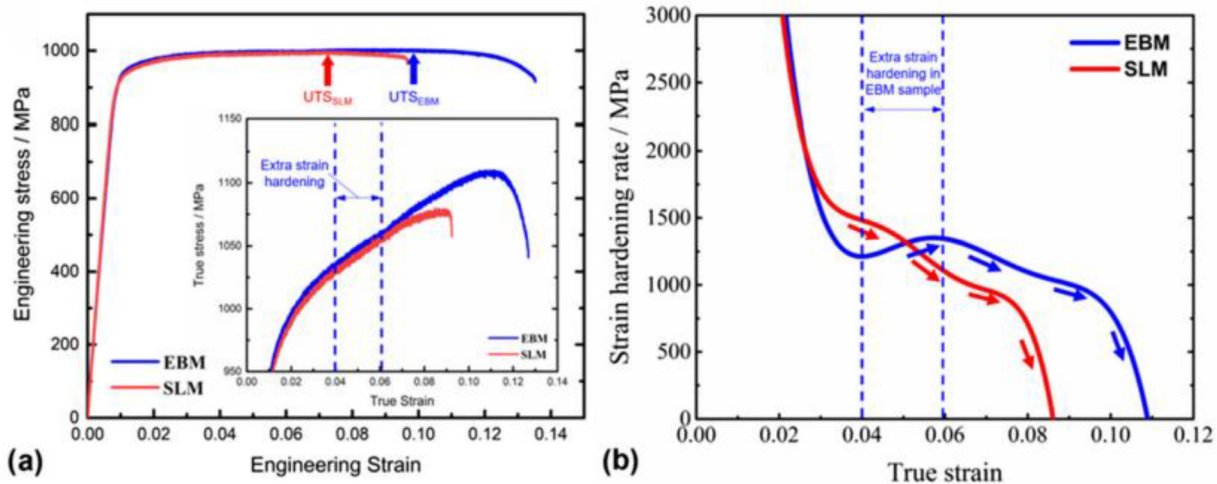


Рис. 3. Криві швидкості зміцнення при деформації для сплавів Ti-6Al-4V, надрукованих EBM та SLM [32]

НАУКОВА НОВИЗНА

На основі отриманих результатів визначено такі положення, що становлять наукову новизну:

1. Установлено особливості формування рівноважної $\alpha + \beta$ мікроструктури після HIP у зразках, виготовлених різними АМ-методами, із фіксацією відсутності відмінностей у морфології після високо-температурного вирівнювання структури.

2. Вперше зафіксовано узгоджений характер параметрів α - та β -фаз у зразках, отриманих SLM та EBM, що свідчить про повну термодинамічну стабілізацію структури після HIP.

3. Експериментально визначено багатостадійний характер деформаційного зміцнення та встановлено залежність інтенсивності зміцнення від конфігурації структурних дефектів, масштабу ламелярності та зон з механічним контрастом.

4. Виявлено структурні чинники, що визначають послідовність включення різних механізмів зміцнення при збільшенні деформації, а також взаємодію структурних зон, що формують неоднорідне напружено-деформоване поле.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані результати свідчать, що вибір методу адитивного виробництва (SLM або EBM) та режими післяобробки визначають характер формування мікроструктури Ti-6Al-4V, що, у свою чергу, зумовлює зміну його механічних властивостей. Після гарячої ізостатичної обробки (HIP) було проведено мікроструктурний аналіз зразків Ti-6Al-4V, виготовлених методом адитивного виробництва. Мікроструктурний аналіз показав формування α -HCP та β -BCC фаз у ламелярному $\alpha + \beta$ середовищі, причому ламелі β рівномірно дисперговані в α -матриці, що свідчить про стабілізацію мікроструктури після HIP. Механічна поведінка, оцінена через криві зміцнення та strain hardening, вказує на активацію багатоступеневих

механізмів зміцнення, зумовлених дислокаціями, межами зерен та фазовими інтерфейсами. EBM-зразки демонструють більш рівномірне накопичення GND і вищу пластичність у порівнянні зі SLM, що корелює з морфологією фаз і швидкістю охолодження.

Спостережувана варіативність механічних властивостей підкреслює критичність контролю параметрів процесу та післяобробки для забезпечення повторюваності результатів. Також виявлено, що дефекти типу пористості та lack-of-fusion суттєво впливають на втомну міцність, що підтверджує необхідність їх мінімізації через оптимізацію процесу та HIP. Отже, комплексний підхід, що включає вибір методу АМ, контроль технологічних параметрів та post-processing, дозволяє значно наблизити властивості АМ-деталей Ti-6Al-4V до показників традиційно кованих сплавів, підтверджуючи наукову новизну роботи та практичну цінність отриманих результатів.

Отримані дані узгоджуються з результатами попередніх досліджень, демонструючи вплив параметрів АМ і post-processing на мікроструктуру та механічні властивості Ti-6Al-4V. Це підтверджує правомірність гіпотез, обґрунтованих у розділі «Постановка проблеми і аналіз літератури», щодо критичності контролю дефектності та оптимізації технологічних параметрів для забезпечення стабільних властивостей матеріалу.

ВИСНОВКИ

1. Показано, що методи адитивного виробництва (SLM – *Selective Laser Melting*, EBM – *Electron Beam Melting*) у поєднанні з подальшою післяобробкою істотно впливають на мікроструктуру та механічні характеристики сплаву Ti-6Al-4V. Встановлено, що методи адитивного виробництва (SLM, EBM) у поєднанні з гарячим ізостатичним пресуванням забезпечують формування стабільної ламелярної $\alpha + \beta$ мікроструктури Ti-6Al-4V, близької

до рівноважної, що позитивно впливає на механічні властивості.

2. Показано, що технологічні параметри процесу та post-processing істотно визначають межу текучості, твердість, втомну міцність і пластичність сплаву, підтверджуючи критичність контролю дефектності та температурної історії для надійності компонентів.

3. Виявлено механізми багатоступінчастого зміцнення, включно з hetero-deformation induced (HDI) стресом, що пояснює спостережувану криву зміцнення та поведінку під навантаженням.

4. Результати узгоджуються з попередніми роботами і підтверджують роль дефектів, анізотропії та фазових взаємодій у формуванні механічних характеристик, водночас демонструючи, що АМ-методи у поєднанні з постобробкою можуть наблизити властивості до кованих аналогів.

5. Напрямки подальших досліджень включають оптимізацію технологічних параметрів АМ та post-processing для зниження варіативності властивостей, контроль дефектності та комплексну оцінку втомної стійкості й тріщиностійкості для відповідальних конструкцій.

REFERENCES

- [1] Nguyen, H. D., Pramanik, A., Basak, A. K., Dong, Y., Prakash, C., Debnath, S., Shankar, S., Jawahir, I. S., Dixit, S., Buddhi, D. (2022). A critical review on additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 18, pp. 4641–4661. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.055>
- [2] Bartolomeu, F., Gasik, M., Samuel, S. F., Miranda, G. (2022). Mechanical Properties of Ti6Al4V Fabricated by Laser Powder Bed Fusion: A Review Focused on the Processing and Microstructural Parameters Influence on the Final Properties. *Metals*, 12(6), pp. 986. <https://doi.org/10.3390/met12060986>
- [3] Lu, F., Ma, Q., Liu, E., Wei, R., Bai, J., Gao, Q., Qi, J. (2025). Advancements in understanding the microstructure and properties of additive manufacturing Ti-6Al-4V alloy: A comprehensive review. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 1027, pp. 180543. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.180543>
- [4] Brunette, D. M., Tenvall, P., Textor, M., Thomsen, P. (2001). Titanium in medicine (engineering materials). Springer-Verlag Berlin Heidelberg pp. 1029. Retrieved from: <http://www.titaniuminmedicine.com/>
- [5] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2015). Additive manufacturing technologies. New York : Springer
- [6] Dutta, B., Froes, F. H. (2016). Additive manufacturing of titanium alloys: state of the art, challenges and opportunities. pp. 1e84. 128. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/309117132_Additive_Manufacturing_of_Titanium_Alloys_State_of_the_Art_Challenges_and_Opportunities
- [7] Leyens, C., Peters, M. (2003). Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications. <https://doi.org/10.1002/3527602119>
- [8] Pramanik, A. (2014). Problems and solutions in machining of titanium alloys. *Int J Adv Manuf Technol*, no. 70(5), pp. 919e28. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5326-x>
- [9] Parry, L., Ashcroft, I. A., Wildman, R. D. (2016). Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation. *Addit Manuf.*, no. 12, pp. 1e15. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.014>
- [10] Kalkal, A., Ahmad, N., Packirisamy, G., Vinogradov, A. (2019). Chapter 1 – 3D printing in medicine: current challenges and potential applications. In: Ahmad N, Gopinath P, Dutta R, editors. 3D printing technology in nanomedicine. Elsevier, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815890-6.00001-3>
- [11] 3D Systems. Retrieved from: <https://www.3dsystems.com/> (accessed 14th March, 2020).
- [12] Xu, X., Lu, Y., Li, S., Guo, S., He, M., Luo, K., Lin, J. (2018). Copper-modified Ti6Al4V alloy fabricated by selective laser melting with proangiogenic and anti-inflammatory properties for potential guided bone regeneration applications. *Mater Sci Eng C*, no. 90, pp. 198e210. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.04.046>
- [13] Atzeni, E., Salmi, A. (2012). Economics of additive manufacturing for end-useable metal parts. *Int J Adv Manuf Technol*, no. 62(9), pp. 1147e55. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3878-1>
- [14] Bartolomeu, F., Buciumeanu, M., Pinto, E., Alves, N., Silva, F. S., Carvalho, O., Miranda, G. (2016). Ti6Al4V biomedical alloy wear behavior – A comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, no. 27, pp. 829–838. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60060-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60060-8)
- [15] Bartolomeu, F., Faria, S., Carvalho, O., Pinto, E., Alves, N., Silva, F., Miranda, G. (2016). Predictive models for physical and mechanical properties of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting. *Mater. Sci. Eng. A*, no. 663, pp. 181–192. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.113>
- [16] Chastand, V., Tezenas, A., Cadoret, Y., Quaegebeur, P., Maia, W., Charkaluk, E. (2016). Fatigue characterization of Titanium Ti-6Al-4V samples produced by Additive Manufacturing. *Procedia Struct. Integr*, 2, 3168–3176. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.395>
- [17] Khorasani, M., Ghasemi, A. H., Rolfe, B., & Gibson, I. (2022). Additive manufacturing a powerful tool for the aerospace industry. *Rapid prototyping journal*, 28(1), 87–100. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2021-0009>
- [18] Nicoletto, G. (2016). Anisotropic high cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V obtained by powder bed laser fusion. *Int. J. Fatigue* 94, 255–262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.04.032>

- [19] Montalbano, T., Briggs, B. N., Waterman, J. L., Nimer, S., Peitsch, C., Sopcisak, J., Trigg, D., Storck, S. (2021). Uncovering the coupled impact of defect morphology and microstructure on the tensile behavior of Ti-6Al-4V fabricated via laser powder bed fusion. *J. Mater. Process. Technol.* 294, 117113. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117113>
- [20] Bartolomeu, F., Costa, M., Alves, N., Miranda, G., Silva, F. (2020). Additive manufacturing of NiTi-Ti6Al4V multi-material cellular structures targeting orthopedic implants. *Opt. Lasers Eng.*, 134, 106208. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106208>
- [21] Bandyopadhyay, A., Espana, F., Balla, V. K., Bose, S., Ohgami, Y., Davies, N. M. (2010). Influence of porosity on mechanical properties and in vivo response of Ti6Al4V implants. *Acta Biomater.* 6, 1640–1648. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.11.011>
- [22] Giganto, S., Martínez-Pellitero, S., Cuesta, E., Zapico, P., Barreiro, J. (2022). Proposal of design rules for improving the accuracy of selective laser melting (SLM) manufacturing using benchmarks parts. *Rapid Prototyp. J.* ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2021-0130>
- [23] de Formanoir, C., Michotte, S., Rigo, O., Germain, L., Godet, S. (2016). Electron beam melted Ti-6Al-4V: Microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-treated material. *Mater. Sci. Eng. A*, 652, 105–119. Retrieved from: 10.1016/j.msea.2015.11.052ff. fhal-01515327f
- [24] Holoch, J., Lenhardt, S., Revfi, S., Albers, A. (2022). Design of Selective Laser Melting (SLM) Structures: Consideration of Different Material Properties in Multiple Surface Layers Resulting from the Manufacturing in a Topology Optimization. *Algorithms*, 15, 99. <https://doi.org/10.3390/a15030099>
- [25] Vaithilingam, J., Goodridge, R.D., Hague, R.J., Christie, S.D., Edmondson, S. (2016), The effect of laser remelting on the surface chemistry of Ti6Al4V components fabricated by selective laser melting. *J. Mater. Process. Technol.*, 232, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.022>
- [26] Sterling, A. J., Torries, B., Shamsaei, N., Thompson, S. M., Seely, D. W. (2016). Fatigue behavior and failure mechanisms of direct laser deposited Ti-6Al-4V. *Mater. Sci. Eng. A*, 655, 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.12.026>
- [27] Manoj A., Rao M. A., Basha M. M., Basha S. M., Sankar M. R. (2020). State of art on wire feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 26, Part 2, pp. 2608–2615. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.551>
- [28] Shrestha, S., Panakarajupally, R. P., Kannan, M., Morscher, G., Gyekenyesi, A. L., & Scott-Emuakpor, O. E. (2021). Analysis of microstructure and mechanical properties of additive repaired Ti-6Al-4V by Direct Energy Deposition. *Materials Science and Engineering: A* Vol. 806, pp. 140604. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140604>
- [29] Lin Z., Song K., Yu X. (2021). A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 70, pp. 24–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.018>
- [30] Usha Rani, S., Kesavan, D., Kamaraj, M. (2023). Evaluation of influence of microstructural features of LPBF Ti-6Al-4 V on mechanical properties for an optimal strength and ductility. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 960, pp. 170575. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170575>
- [31] Li, Z., Affolter, C. (2024). High-Cycle Fatigue Performance of Laser Powder Bed Fusion Ti-6Al-4V Alloy with Inherent Internal Defects: A Critical Literature Review. *Metals*, 14(9), pp. 972; <https://doi.org/10.3390/met14090972>
- [32] Romero Reséndiz, L., Sánchez Cano, T., Naeem, M., Ur Rehman, A., Salamci, E., Torres Mendoza, V., Degalez Duran, E., Bazán Díaz, L., & Salamci, M. U. (2024). Mechanical and Electrochemical Properties Comparison of Additively Manufactured Ti-6Al-4V Alloys by Electron Beam Melting and Selective Laser Melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 33 (17), pp. 9028–9038. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09486-4>
- [33] Moon, S., Ma, R., Attardo, R., Tomonto, C., Nordin, M., Wheelock, P., Glavicic, M., Layman, M., Billo, R., & Luo, T. (2021). Impact of Surface and Pore Characteristics on Fatigue Life of Laser Powder Bed Fusion Ti-6Al-4V Alloy Described by Neural Network Models. *Materials Science*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.09655>
- [34] Coeck, S., Bisht, M., Plas, J. & Verbist, F. (2019). Prediction of lack of fusion porosity in selective laser melting based on melt pool monitoring data. *Additive Manufacturing*, 25, 347–356. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.015>
- [35] Cunningham, R., Narra, S. P., Montgomery, C., Beuth, J. & Rollett, A. (2017). Synchrotron-based X-ray microtomography characterization of the effect of processing variables on porosity formation in laser power-bed additive manufacturing of Ti-6Al-4V. *JOM* 69, 479–484 <https://doi.org/10.1007/s11837-016-2234-1>
- [36] Mierzejewska, Ż. A. (2019). Effect of laser energy density, internal porosity and heat treatment on mechanical behavior of biomedical Ti6Al4V alloy obtained with DMLS technology. *Materials*, 12, 2331 <https://doi.org/10.3390/ma12142331>
- [37] DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Prog. Mater Sci.* 92, 112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- [38] Murakami, Y. (2012). Material defects as the basis of fatigue design. *Int. J. Fatigue* 41, 2–10 <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.12.001>
- [39] Bagehorn, S., Wehr, J. & Maier, H. (2017). Application of mechanical surface finishing processes for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts. *Int. J. Fatigue* 102, 135–142 <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2017.05.008>
- [40] Olakanmi, E. O., Cochrane, R. & Dalgarno, K. (2015). A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Prog. Mater Sci.* 74, 401–477 <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.03.002>

- [41] Cao, S., Zou, Y., Lim, C. V. S., & Wu, X. (2021). Review of laser powder bed fusion (LPBF) fabricated Ti-6Al-4V: process, post-process treatment, microstructure, and property. *Light: Advanced Manufacturing*, 2(3), pp. 313–332. <https://doi.org/10.37188/lam.2021.020>
- [42] Edwards, P. & Ramulu, M. (2014). Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A* 598, 327–337 doi:10.1016/j.msea.2014.01.041
- [43] Brandt, M. (2017). The role of lasers in additive manufacturing. in *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications* (ed Brandt, M.) (Amsterdam: Elsevier, 2017). doi: 10.1016/b978-0-08-100433-3.02001-7
- [44] Kruth, J. P., Merckelis, P., Vaerenbergh, J. V., Froyen, L. Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* 11, 26–36. doi: 10.1108/13552540510573365
- [45] Sing, S. L. & Yeong, W. Y. (2020). Laser powder bed fusion for metal additive manufacturing: perspectives on recent developments. *Virtual and Physical Prototyping* 15, 359–370. doi: 10.1080/17452759.2020.1779999
- [46] Strondl, A., Lyckfeldt, O., Brodin, H., Ackelid, U. (2015). Characterization and control of powder properties for additive manufacturing. *JOM* 67, 549–554 doi: 10.1007/s11837-015-1304-0
- [47] Shipley, H., McDonnell, D., Culleton, M., Coull, R., Lupoi, R., O'Donnell, G., & Trimble, D. (2018). Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 128, 1–20. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2018.01.003
- [48] Liu, H., Huang, X., Huang, S., Qiao, L., Yan, Y. (2023). Anisotropy of wear and tribocorrosion properties of L-PBF Ti6Al4V. *J. Mater. Res. Technol.*, 25, 2690–2701. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.128>
- [49] Carroll, B. E., Palmer, T. A., & Beese, A. M. (2015). Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Materialia*, Vol. 87, pp. 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.054>
- [50] Zhan, Z., Zhang, Q., Wang, S., Liu, X., Zhang, H., Sun, Z., Ge, Y., & Du, N. (2024). Comparison on the Electrochemical Corrosion Behavior of Ti6Al4V Alloys Fabricated by Laser Powder Bed Fusion and Casting. *Materials*, 17(13), 3322. <https://doi.org/10.3390/ma17133322>
- [51] Sheng, K., Liu, W., Wang, N., Li, B., Chen, L., Liu, B., Ren, D., Zhu, J., & Yin, M. (2025) Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by electron beam powder bed fusion regulated via hot isostatic pressing. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 39, pp. 782–791. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.09.075>
- [52] Hao, Y. L., Li, S.-J., Yang, R. (2016). Biomedical titanium alloys and their additive manufacturing. *Rare Met.*, 35. <https://doi.org/10.1007/s12598-016-0793-5>
- [53] García-Hernández, C., García-Cabezón, C., González-Diez, F., Ampudia, M., Juanes-Gusano, D., Rodríguez-Cabello, J. C., & Martín-Pedrosa, F. (2025). Effect of processing on microstructure, mechanical properties, corrosion and biocompatibility of additive manufacturing Ti-6Al-4V orthopaedic implants. *Scientific Reports*. Vol. 15, pp. 14087. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98349-6>
- [54] Qiu, W., Wei, Y., Chen, A., Deng, H., Zhou, L., Zuo, H.-S., Chen, L., Xia, Z., Wang, H., & Tang, J. (2021). Corrosion behavior of additive manufactured Ti-6Al-4V in sulfamic acid cleaning solution. *New J. Chem.*, 45, 2967–2973. https://doi.org/10.1039/D0NJ05731B?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- [55] Abd-Elaziz, W., Darwish, M. A., Hamada, A. & Daoush, W. M. (2024). Titanium-based alloys and composites for orthopedic implants applications: A comprehensive review. *Mater. Des.*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112850>
- [56] Veiga, C., Davim, J. P. & Loureiro, A. J. R. (2012). Properties and Applications of Titanium Alloys: A Brief Review. Retrieved from: <https://www.researchgate.net/publication/283863116>
- [57] Leyens, C. & Peters, M. (2003). *Titanium Alloys: Fundamentals and Applications* (Wiley-VCH, 2003). pp. 532. <https://doi.org/10.1002/2F3527602119.fmatter>
- [58] Zhou, Y. et al. (2020). A review on the applications of titanium and its alloys in biomedical implants. *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, 31, 21–35. <https://doi.org/10.1007/s10856-020-06580-0>
- [59] Delpazir, M. H., Asherloo, M., Nasiri Khalil Abad, S., Thompson, A., Guma, V., Bagi, S. D., Sreenivas, K. K., Paliwal, M., Terry, J., Rollett, A. D., & Mostafaei, A. (2023). Microstructure and corrosion behavior of differently heat-treated Ti-6Al-4V alloy processed by laser powder bed fusion of hydride-dehydride powder. *Corros. Sci.*, 224. doi:10.1016/j.corsci.2023.111495
- [60] Emmelmann, C., Scheinmann, P., Munsch, M. & Seyda, V. (2011). Laser additive manufacturing of modified implant surfaces with osseointegrative characteristics. *Phys. Procedia*. 12, 375–384. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.048>
- [61] Jardini, A. L. et al. (2014). Customised titanium implant fabricated in additive manufacturing for craniomaxillofacial surgery: this paper discusses the design and fabrication of a metallic implant for the reconstruction of a large cranial defect. *Virtual Phys. Prototyp.*, 9(2), 115–125. https://doi.org/10.1080/17452759.2014.900857?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- [62] Mower, T. M. & Long, M. J. (2016). Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Mater. Sci. Engineering: A*. 651, 198–213. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.068>
- [63] Huang, Q., Liu, X., Yang, X., Zhang, R., Shen, Z., & Feng, Q. (2015). Specific heat treatment of selective laser melted Ti-6Al-4V for biomedical applications. *Front. Mater. Sci.*, 9, 373–381. <https://doi.org/10.1007/s11706-015-0315-7>
- [64] Galarraga, H., Warren, R. J., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kirka, M. M., & Nandwana, P. (2017). Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). *Mater. Sci. Engineering: A*. 685, 417–428. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.019>

- [65] Longhitano, G. A., Arenas, M. A., Conde, A., Larosa, M. A., Jardini, A. L., de Carvalho Zavaglia, C. A., & Damborenea, J. J. (2018). Heat treatments effects on functionalization and corrosion behavior of Ti-6Al-4V ELI alloy made by additive manufacturing. *J. Alloys Compd.* 765, 961–968. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.319>
- [66] Roudnicka, M., Mertova, K., & Vojtech, D. (2019). Influence of hot isostatic pressing on mechanical response of as-built SLM titanium alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 629, 012045. (Institute of Physics Publishing, 2019). https://doi.org/10.1088/1757-899X/629/1/012034?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- [67] Leon, A., Levy, G. K., Ron, T., Shirizly, A. & Aghion, E. (2020). The effect of hot isostatic pressure on the corrosion performance of Ti-6Al4V produced by an electron-beam melting additive manufacturing process. *Addit. Manuf.*, 33, Article 101039. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101039>
- [68] Galarraga, H., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kirka, M. M. & Nandwana, P. (2016). Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). *Addit. Manuf.*, 10, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.02.003>
- [69] Cvijović-Alagić, I., Cvijović, Z., Bajat, J. & Rakin, M. (2014). Composition and processing effects on the electrochemical characteristics of biomedical titanium alloys. *Corros. Sci.*, 83(6), 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.02.017>
- [70] Vilaro, T., Colin, C. & Bartout, J. D. (2011). As-Fabricated and Heat-Treated Microstructures of the Ti-6Al-4V Alloy Processed by Selective Laser Melting. *Metall Mater Trans A*, 42, 3190–3199. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0731-y>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Nguyen, H. D., Pramanik, A., Basak, A. K., Dong, Y., Prakash, C., Debnath, S., Shankar, S., Jawahir, I.S., Dixit, S., Buddhi, D. (2022). A critical review on additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*. Vol. 18. pp. 4641-4661. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.055>
- [2] Bartolomeu, F., Gasik, M., Samuel, S. F., Miranda, G. (2022). Mechanical Properties of Ti6Al4V Fabricated by Laser Powder Bed Fusion: A Review Focused on the Processing and Microstructural Parameters Influence on the Final Properties. *Metals*. 12(6). pp. 986. <https://doi.org/10.3390/met12060986>
- [3] Lu, F., Ma, Q., Liu, E., Wei, R., Bai, J., Gao, Q., Qi, J. (2025). Advancements in understanding the microstructure and properties of additive manufacturing Ti-6Al-4V alloy: A comprehensive review. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 1027. pp. 180543. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.180543>
- [4] Brunette, D. M., Tenvall, P., Textor, M., Thomsen, P. (2001). Titanium in medicine (engineering materials). Springer-Verlag Berlin Heidelberg pp. 1029. URL: <http://www.titaniuminmedicine.com/>
- [5] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2015). Additive manufacturing technologies. New York : Springer
- [6] Dutta, B., Froes, F. H. (2016). Additive manufacturing of titanium alloys: state of the art, challenges and opportunities. pp. 1e84. 128. URL: https://www.researchgate.net/publication/309117132_Additive_Manufacturing_of_Titanium_Alloys_State_of_the_Art_Challenges_and_Opportunities
- [7] Leyens, C., Peters, M. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications. 2003. <https://doi.org/10.1002/3527602119>
- [8] Pramanik, A. (2014). Problems and solutions in machining of titanium alloys. *Int J Adv Manuf Technol.* no. 70(5). pp. 919e28. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5326-x>
- [9] Parry, L., Ashcroft, I. A., Wildman, R. D. (2016). Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation. *Addit Manuf.* no. 12. pp. 1e15. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.014>
- [10] Kalkal A., Ahmad, N., Packirisamy, G., Vinogradov, A. (2019). Chapter 1 – 3D printing in medicine: current challenges and potential applications. In: Ahmad N, Gopinath P, Dutta R, editors. 3D printing technology in nanomedicine. *Elsevier*. pp. 1–22. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815890-6.00001-3>
- [11] 3D Systems. URL: <https://www.3dsystems.com/> (accessed 14th March, 2020).
- [12] Xu, X., Lu, Y., Li, S., Guo, S., He, M., Luo, K., Lin, J. (2018). Copper-modified Ti6Al4V alloy fabricated by selective laser melting with proangiogenic and anti-inflammatory properties for potential guided bone regeneration applications. *Mater Sci Eng C*. no. 90. pp.198e210. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.04.046>
- [13] Atzeni, E., Salmi, A. (2012). Economics of additive manufacturing for end-useable metal parts. *Int J Adv Manuf Technol.* no. 62(9). pp.1147e55. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3878-1>
- [14] Bartolomeu, F., Buciumeanu, M., Pinto, E., Alves, N., Silva, F.S., Carvalho, O., Miranda, G. (2016). Ti6Al4V biomedical alloy wear behavior – A comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. no.27. pp. 829–838. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60060-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60060-8)
- [15] Bartolomeu, F., Faria, S., Carvalho, O., Pinto, E., Alves, N., Silva, F., Miranda, G. (2016). Predictive models for physical and mechanical properties of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting. *Mater. Sci. Eng. A*, no. 663. pp. 181–192. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.113>
- [16] Chastand, V., Tezenas, A., Cadoret, Y., Quaegebeur, P., Maia, W., Charkaluk, E. (2016). Fatigue characterization of Titanium Ti-6Al-4V samples produced by Additive Manufacturing. *Procedia Struct. Integr.* 2. 3168–3176. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.395>
- [17] Khorasani, M., Ghasemi, A. H., Rolfe, B., & Gibson, I. (2022). Additive manufacturing a powerful tool for the aerospace industry. *Rapid prototyping journal*. 28(1). 87-100. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2021-0009>

- [18] Nicoletto, G. (2016). Anisotropic high cycle fatigue behavior of Ti–6Al–4V obtained by powder bed laser fusion. *Int. J. Fatigue*. 94. 255–262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.04.032>
- [19] Montalbano, T., Briggs, B. N., Waterman, J. L., Nimer, S., Peitsch, C., Sopcisak, J., Trigg, D., Storek, S. (2021). Uncovering the coupled impact of defect morphology and microstructure on the tensile behavior of Ti-6Al-4V fabricated via laser powder bed fusion. *J. Mater. Process. Technol.* 294. 117113. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117113>
- [20] Bartolomeu, F., Costa, M., Alves, N., Miranda, G., Silva, F. (2020). Additive manufacturing of NiTi-Ti6Al4V multi-material cellular structures targeting orthopedic implants. *Opt. Lasers Eng.* 134. 106208. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106208>
- [21] Bandyopadhyay, A., Espana, F., Balla, V. K., Bose, S., Ohgami, Y., Davies, N. M. (2010). Influence of porosity on mechanical properties and in vivo response of Ti6Al4V implants. *Acta Biomater.* 6. 1640–1648. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.11.011>
- [22] Giganto, S., Martínez-Pellitero, S., Cuesta, E., Zapico, P., Barreiro, J. (2022). Proposal of design rules for improving the accuracy of selective laser melting (SLM) manufacturing using benchmarks parts. *Rapid Prototyp. J.* ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2021-0130>
- [23] de Formanoir, C., Michotte, S., Rigo, O., Germain, L., Godet, S. (2016). Electron beam melted Ti–6Al–4V: Microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-treated material. *Mater. Sci. Eng. A*, 652, 105–119. URL:10.1016/j.msea.2015.11.052ff. fhal-01515327f
- [24] Holoch, J., Lenhardt, S., Revfi, S., Albers, A. (2022). Design of Selective Laser Melting (SLM) Structures: Consideration of Different Material Properties in Multiple Surface Layers Resulting from the Manufacturing in a Topology Optimization. *Algorithms*. 15, 99. <https://doi.org/10.3390/a15030099>
- [25] Vaithilingam, J., Goodridge, R. D., Hague, R. J., Christie, S. D., Edmondson, S. (2016). The effect of laser remelting on the surface chemistry of Ti6Al4V components fabricated by selective laser melting. *J. Mater. Process. Technol.* 232, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.022>
- [26] Sterling, A. J., Torries, B., Shamsaei, N., Thompson, S. M., Seely, D. W. (2016). Fatigue behavior and failure mechanisms of direct laser deposited Ti–6Al–4V. *Mater. Sci. Eng. A*. 655, 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.12.026>
- [27] Manoj A., Rao M. A., Basha M. M., Basha S. M., Sankar M. R. (2020). State of art on wire feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 26. Part 2. pp. 2608–2615. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.551>
- [28] Shrestha, S., Panakarajupally, R. P., Kannan, M., Morscher, G., Gyekenyesi, A. L., & Scott-Emuakpor, O. E. (2021). Analysis of microstructure and mechanical properties of additive repaired Ti–6Al–4V by Direct Energy Deposition. *Materials Science and Engineering: A* Vol. 806. pp. 140604. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140604>
- [29] Lin Z., Song K., Yu X. (2021). A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 70. pp. 24–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.018>
- [30] Usha Rani, S., Kesavan, D., Kamaraj, M. (2023). Evaluation of influence of microstructural features of LPBF Ti-6Al-4 V on mechanical properties for an optimal strength and ductility. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 960. pp. 170575. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170575>
- [31] Li, Z., Affolter, C. (2024). High-Cycle Fatigue Performance of Laser Powder Bed Fusion Ti-6Al-4V Alloy with Inherent Internal Defects: A Critical Literature Review. *Metals*, 14(9). pp. 972; <https://doi.org/10.3390/met14090972>
- [32] Romero Reséndiz, L., Sánchez Cano, T., Naeem, M., Ur Rehman, A., Salamci, E., Torres Mendoza, V., Degalez Duran, E., Bazán Díaz, L., & Salamci, M. U. (2024). Mechanical and Electrochemical Properties Comparison of Additively Manufactured Ti-6Al-4V Alloys by Electron Beam Melting and Selective Laser Melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol. 33 (17). pp. 9028–9038. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09486-4>
- [33] Moon, S., Ma, R., Attardo, R., Tomonto, C., Nordin, M., Wheelock, P., Glavicic, M., Layman, M., Billo, R., & Luo, T. (2021). Impact of Surface and Pore Characteristics on Fatigue Life of Laser Powder Bed Fusion Ti-6Al-4V Alloy Described by Neural Network Models. *Materials Science*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.09655>
- [34] Coeck, S., Bisht, M., Plas, J. & Verbist, F. (2019). Prediction of lack of fusion porosity in selective laser melting based on melt pool monitoring data. *Additive Manufacturing*, 25, 347–356. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.015>
- [35] Cunningham, R., Narra, S. P., Montgomery, C., Beuth, J. & Rollett, A. (2017). Synchrotron-based X-ray microtomography characterization of the effect of processing variables on porosity formation in laser power-bed additive manufacturing of Ti-6Al-4V. *JOM* 69, 479–484 <https://doi.org/10.1007/s11837-016-2234-1>
- [36] Mierzejewska, Ż. A. (2019). Effect of laser energy density, internal porosity and heat treatment on mechanical behavior of biomedical Ti6Al4V alloy obtained with DMLS technology. *Materials*. 12, 2331 <https://doi.org/10.3390/ma12142331>
- [37] DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Prog. Mater Sci.* 92, 112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- [38] Murakami, Y. (2012). Material defects as the basis of fatigue design. *Int. J. Fatigue*. 41, 2–10 <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.12.001>
- [39] Bagehorn, S., Wehr, J. & Maier, H. (2017). Application of mechanical surface finishing processes for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts. *Int. J. Fatigue*. 102, 135–142 <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2017.05.008>

- [40] Olakanmi, E. O., Cochrane, R. & Dalgarno, K. (2015). A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Prog. Mater. Sci.* 74, 401–477 <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.03.002>
- [41] Cao, S., Zou, Y., Lim, C. V. S., & Wu, X. (2021). Review of laser powder bed fusion (LPBF) fabricated Ti-6Al-4V: process, post-process treatment, microstructure, and property. *Light: Advanced Manufacturing.* 2(3). pp. 313–332. <https://doi.org/10.37188/lam.2021.020>
- [42] Edwards, P. & Ramulu, M. (2014). Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A* 598, 327–337 [doi:10.1016/j.msea.2014.01.041](https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.01.041)
- [43] Brandt, M. (2017). The role of lasers in additive manufacturing. in *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications* (ed Brandt, M.) (Amsterdam: Elsevier, 2017). [doi: 10.1016/b978-0-08-100433-3.02001-7](https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100433-3.02001-7)
- [44] Kruth, J. P., Mercelis, P., Vaerenbergh, J. V., Froyen, L. Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal.* 11, 26–36. [doi: 10.1108/13552540510573365](https://doi.org/10.1108/13552540510573365)
- [45] Sing, S. L. & Yeong, W. Y. (2020). Laser powder bed fusion for metal additive manufacturing: perspectives on recent developments. *Virtual and Physical Prototyping,* 15, 359–370. [doi: 10.1080/17452759.2020.1779999](https://doi.org/10.1080/17452759.2020.1779999)
- [46] Strondl, A., Lyckfeldt, O., Brodin, H., Ackelid, U. (2015). Characterization and control of powder properties for additive manufacturing. *JOM* 67, 549–554 [doi: 10.1007/s11837-015-1304-0](https://doi.org/10.1007/s11837-015-1304-0)
- [47] Shipley, H., McDonnell, D., Culleton, M., Coull, R., Lupoi, R., O'Donnell, G., & Trimble, D. (2018). Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* 128, 1–20. [doi: 10.1016/j.ijmachtools.2018.01.003](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.01.003)
- [48] Liu, H., Huang, X., Huang, S., Qiao, L., Yan, Y. (2023). Anisotropy of wear and tribocorrosion properties of L-PBF Ti6Al4V. *J. Mater. Res. Technol.* 25, 2690–2701. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.128>
- [49] Carroll, B. E., Palmer, T. A., & Beese, A. M. (2015). Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Materialia.* Vol. 87. pp. 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.054>
- [50] Zhan, Z., Zhang, Q., Wang, S., Liu, X., Zhang, H., Sun, Z., Ge, Y., & Du, N. (2024). Comparison on the Electrochemical Corrosion Behavior of Ti6Al4V Alloys Fabricated by Laser Powder Bed Fusion and Casting. *Materials.* 17(13), 3322. <https://doi.org/10.3390/ma17133322>
- [51] Sheng, K., Liu, W., Wang, N., Li, B., Chen, L., Liu, B., Ren, D., Zhu, J., & Yin, M. (2025) Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by electron beam powder bed fusion regulated via hot isostatic pressing. *Journal of Materials Research and Technology.* Vol. 39. pp. 782–791. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.09.075>
- [52] Hao, Y. L., Li, S.-J., Yang, R. (2016). Biomedical titanium alloys and their additive manufacturing. *Rare Met.* 35. <https://doi.org/10.1007/s12598-016-0793-5>
- [53] García-Hernández, C., García-Cabezón, C., González-Diez, F., Ampudia, M., Juanes-Gusano, D., Rodríguez-Cabello, J. C., & Martín-Pedrosa, F. (2025). Effect of processing on microstructure, mechanical properties, corrosion and biocompatibility of additive manufacturing Ti-6Al-4V orthopaedic implants. *Scientific Reports.* Vol. 15. pp. 14087. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98349-6>
- [54] Qiu, W., Wei, Y., Chen, A., Deng, H., Zhou, L., Zuo, H.-S., Chen, L., Xia, Z., Wang, H., & Tang, J. (2021). Corrosion behavior of additive manufactured Ti-6Al-4V in sulfamic acid cleaning solution. *New J. Chem.* 45, 2967–2973. https://doi.org/10.1039/D0NJ05731B?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- [55] Abd-Elaziem, W., Darwish, M. A., Hamada, A. & Daoush, W. M. (2024). Titanium-based alloys and composites for orthopedic implants applications: A comprehensive review. *Mater. Des.* 241. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112850>
- [56] Veiga, C., Davim, J. P. & Loureiro, A. J. R. (2012). Properties and Applications of Titanium Alloys: A Brief Review. URL: <https://www.researchgate.net/publication/283863116>
- [57] Leyens, C. & Peters, M. (2003). *Titanium Alloys: Fundamentals and Applications* (Wiley-VCH, 2003). pp. 532. <https://doi.org/10.1002%2F3527602119.fmatter>
- [58] Zhou, Y. et al. (2020). A review on the applications of titanium and its alloys in biomedical implants. *J. Mater. Sci. Mater. Med.* 31, 21–35. <https://doi.org/10.1007/s10856-020-06580-0>
- [59] Delpazir, M. H., Asherloo, M., Nasiri Khalil Abad, S., Thompson, A., Guma, V., Bagi, S. D., Sreenivas, K. K., Paliwal, M., Terry, J., Rollett, A. D., & Mostafaei, A. (2023). Microstructure and corrosion behavior of differently heat-treated Ti-6Al-4V alloy processed by laser powder bed fusion of hydride-dehydride powder. *Corros. Sci.* 224. [doi:10.1016/j.corsci.2023.111495](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111495)
- [60] Emmelmann, C., Scheinermann, P., Munsch, M. & Seyda, V. (2011). Laser additive manufacturing of modified implant surfaces with osseointegrative characteristics. *Phys. Procedia.* 12, 375–384. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.048>
- [61] Jardini, A. L. et al. (2014). Customised titanium implant fabricated in additive manufacturing for craniomaxillofacial surgery: this paper discusses the design and fabrication of a metallic implant for the reconstruction of a large cranial defect. *Virtual Phys. Prototyp.* 9(2), 115–125. https://doi.org/10.1080/17452759.2014.900857?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- [62] Mower, T. M. & Long, M. J. (2016). Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Mater. Sci. Engineering: A.* 651, 198–213. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.068>
- [63] Huang, Q., Liu, X., Yang, X., Zhang, R., Shen, Z., & Feng, Q. (2015). Specific heat treatment of selective laser melted Ti-6Al-4V for biomedical applications. *Front. Mater. Sci.* 9, 373–381. <https://doi.org/10.1007/s11706-015-0315-7>

- [64] Galarraga, H., Warren, R. J., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kirka, M. M., & Nandwana, P. (2017). Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). *Mater. Sci. Engineering: A*. 685, 417–428. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.019>
- [65] Longhitano, G. A., Arenas, M. A., Conde, A., Larosa, M. A., Jardini, A. L., de Carvalho Zavaglia, C. A., & Damborenea, J. J. (2018). Heat treatments effects on functionalization and corrosion behavior of Ti-6Al-4V ELI alloy made by additive manufacturing. *J. Alloys Compd.* 765, 961–968. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.319>
- [66] Roudnicka, M., Mertova, K., & Vojtech, D. (2019). Influence of hot isostatic pressing on mechanical response of as-built SLM titanium alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 629, 012045. (Institute of Physics Publishing, 2019). https://doi.org/10.1088/1757-899X/629/1/012034?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- [67] Leon, A., Levy, G. K., Ron, T., Shirizly, A. & Aghion, E. (2020). The effect of hot isostatic pressure on the corrosion performance of Ti-6Al4V produced by an electron-beam melting additive manufacturing process. *Addit. Manuf.* 33, Article 101039. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101039>
- [68] Galarraga, H., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kirka, M. M. & Nandwana, P. (2016). Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). *Addit. Manuf.* 10, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.02.003>
- [69] Cvijović-Alagić, I., Cvijović, Z., Bajat, J. & Rakin, M. (2014). Composition and processing effects on the electrochemical characteristics of biomedical titanium alloys. *Corros. Sci.* 83(6), 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.02.017>
- [70] Vilaro, T., Colin, C. & Bartout, J. D. (2011). As-Fabricated and Heat-Treated Microstructures of the Ti-6Al-4V Alloy Processed by Selective Laser Melting. *Metall Mater Trans A*. 42, 3190–3199. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0731-y>

© С. В. Кирилах,

Дата надходження статті до редакції: 20.11.2025

Дата затвердження статті до друку: 12.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0