

УДК 669.715:539.375:620.17
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).1.4](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).1.4)

ROLE OF CRITICAL ADDITIVE MANUFACTURING DEFECTS IN MICROSTRUCTURE FORMATION AND MECHANICAL BEHAVIOR OF Ti-6Al-4V ALLOY

РОЛЬ КРИТИЧНИХ ДЕФЕКТІВ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА У ФОРМУВАННІ МІКРОСТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ СПЛАВУ Ti-6Al-4V

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.* This study provides a systematic synthesis and critical analysis of the role of critical additive manufacturing defects (porosity, lack of fusion, microcracks, and residual stresses) in the microstructure formation and mechanical behavior of Ti-6Al-4V alloy, with particular emphasis on fatigue life and reliability of AM components. *Methodology.* Recent studies on mechanical testing, fractography, μCT , and heat treatment of Ti-6Al-4V are reviewed, focusing on the relationship between defect characteristics and fatigue behavior. *Results.* Gas porosity and lack-of-fusion defects were identified as the primary critical defects, controlling crack initiation sites, reducing fracture toughness and geometric accuracy. The combined effect of internal defects significantly reduces fatigue life, whereas post-processing heat treatment, including annealing and hot isostatic pressing (HIP), improves the microstructure and enhances resistance to crack growth. S-N data confirm the key role of defect-controlled material behavior. Fractographic analysis demonstrated that fatigue crack initiation predominantly occurs at subsurface gas pores and lack-of-fusion defects acting as stress concentrators under cyclic loading. Fatigue life variability at constant stress levels correlates with effective defect size, morphology, and spatial distribution, indicating the statistical nature of defect-controlled fatigue behavior. In the very-high-cycle fatigue regime, crack initiation shifts to internal regions of the material, where defect population and microstructural heterogeneity jointly govern crack growth kinetics. *Scientific novelty.* A comprehensive analysis of the interactions between process-induced defects, microstructural parameters, and post-processing on the fatigue life of Ti-6Al-4V has been conducted, enabling a quantitative assessment of each factor's contribution to defect-controlled fatigue and providing a rationale for the effectiveness of post-processing strategies. *Practical significance.* The results are relevant for the design of AM Ti-6Al-4V components in critical applications, particularly in marine and shipbuilding, where defects govern operational reliability and fatigue life. **Key words:** additive manufacturing; Ti-6Al-4V; critical defects; microstructure; defect-controlled fatigue; μCT ; shipbuilding.

Анотація. *Мета.* У роботі здійснено системне узагальнення та критичний аналіз ролі критичних дефектів адитивного виробництва (пористість, lack-of-fusion, мікротріщини, залишкові напруження) у формуванні мікроструктури та механічної поведінки сплаву Ti-6Al-4V з акцентом на втомну довговічність і надійність АМ-деталей. *Методика.* Проведено огляд сучасних досліджень механічних випробувань, фрактографії, μCT та термічної обробки Ti-6Al-4V із аналізом зв'язку дефектності з втомною поведінкою сплаву. *Результати.* Встановлено, що основними критичними дефектами є газова пористість та lack-of-fusion, які визначають локалізацію зародження тріщин, знижують тріщиностійкість і точність геометрії деталей. Комбінований вплив внутрішніх дефектів значно погіршує втомну довговічність, тоді як післяпроцесна термічна обробка, зокрема відпал (annealing) та гарячий ізостатичний пресинг (ГІП), покращує мікроструктуру та підвищує стійкість до росту тріщин. Узгоджені дані S-N випробувань підтверджують ключову роль дефект-контрольованої поведінки матеріалу. Фрактографічний аналіз засвідчив, що ініціація втомних тріщин переважно відбувається у підповерхневих газових порах та дефектах типу lack-of-fusion, які виступають концентраторами напружень за циклічного навантаження. Варіабельність втомної довговічності при сталих рівнях напруження корелює з ефективним розміром, морфологією та просторовим розподілом дефектів, що свідчить про статистичний характер дефект-контрольованої втомної поведінки. У діапазоні надвисокої циклічної втоми ініціація тріщин

зміщується у внутрішні області матеріалу, де дефектна популяція та мікроструктурна неоднорідність спільно визначають кінетику росту тріщин. *Наукова новизна.* Проведено комплексний аналіз взаємодії процес-індукованих дефектів, мікроструктурних параметрів та постобробки на втомну довговічність Ti–6Al–4V, що дозволяє кількісно оцінити внесок кожного фактору у defect-controlled fatigue і обґрунтувати ефективність післяпроцесингових стратегій. *Практична значимість.* Отримані результати важливі для проєктування АМ-деталей зі сплаву Ti–6Al–4V у відповідальних конструкціях, зокрема для морських та суднобудівних компонентів, де дефекти визначають експлуатаційну надійність та довговічність.

Ключові слова: адитивне виробництво; Ti–6Al–4V; критичні дефекти; мікроструктура; дефект-керована втома; μCT ; суднобудування.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Аддитивне виробництво (АМ, Additive Manufacturing – АМ) деталей зі сплаву Ti–6Al–4V забезпечує статичні механічні властивості, що у багатьох випадках порівнянні або перевищують показники матеріалів, отриманих традиційними технологіями. Водночас широке промислове впровадження АМ-компонентів у відповідальні конструкції обмежується не рівнем міцності, а наявністю критичних дефектів, зумовлених особливостями пошарового формування матеріалу [1, 2].

Сучасні дослідження показують, що пористість, дефекти типу *lack-of-fusion*, мікротріщини, залишкові напруження та мікроструктурна неоднорідність відіграють визначальну роль у формуванні механічної поведінки матеріалу, насамперед у режимах втомного навантаження. Саме ці дефекти визначають механізми ініціювання та росту пошкоджень, обмежуючи реалізацію потенціалу високої міцності АМ-сплавів. У сукупності зазначені дефекти формують домінуючі механізми деградації матеріалу та визначають граничні характеристики втомної довговічності, суттєво обмежуючи реалізацію потенціалу високої статичної міцності сплавів, виготовлених адитивними методами, у критичних конструкціях [2].

Попри значну кількість публікацій, присвячених впливу технологічних параметрів адитивного виробництва на мікроструктуру та механічні властивості Ti–6Al–4V, систематизований аналіз ролі дефектів як первинних чинників, що керують механічною поведінкою та втомною довговічністю матеріалу, залишається фрагментарним. У більшості робіт дефекти розглядаються як супутній результат технологічних режимів, а не як самостійні обмежувальні фактори експлуатаційної надійності [3].

Дефекти адитивного виробництва розглянуто не лише як технологічні недоліки, а як структуроутворювальні та деформаційно-активні елементи, просторово корельовані з тепловою історією процесу. Такий підхід дозволяє інтерпретувати механічну поведінку матеріалу у межах дефект-контрольованого підходу, у якій саме розподіл, морфологія та ієрархія дефектів визначають анізотропію властивостей і механізми деградації [4].

На відміну від дефектів у деформованих сплавах, дефекти, сформовані в умовах пошарового синтезу,

є просторово упорядкованими відносно траєкторії джерела енергії та динаміки плавної ванни, що зумовлює їх анізотропний характер та ієрархічну організацію [5].

Формування локальних теплових і напружених полів навколо дефектів впливає на кінетику фазових перетворень, розвиток текстури та локалізацію пластичної деформації, що зумовлює дефект-індуковану еволюцію мікроструктури та властивостей.

Завданням є критичний аналіз сучасних досліджень, спрямованих на виявлення критичних дефектів адитивного виробництва та їхнього впливу на мікроструктуру і механічну поведінку сплаву Ti–6Al–4V, з оцінкою внеску у втомну довговічність та надійність АМ-деталей. Дефект-контрольована поведінка матеріалу визначає експлуатаційну надійність деталей, що працюють під високими циклічними навантаженнями.

Через поєднання високої питомої міцності, корозійної стійкості та можливості формування складної геометрії, АМ-деталі зі сплаву Ti–6Al–4V розглядаються як перспективні для корпусних елементів малих і середніх суден, підводних вузлів у корозійно-активному середовищі та компактних конструктивних компонентів з високими циклічними навантаженнями (кріплення, клапани, елементи рулевого управління).

Таким чином, систематизація сучасних досліджень у межах дефект-контрольованої концепції формує теоретичну основу для обґрунтування ефективності стратегій післяпроцесної обробки з урахуванням еволюції дефектної структури та її взаємодії з мікроструктурою.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасних дослідженнях з адитивного виробництва сплаву Ti–6Al–4V увага зміщується від аналізу впливу технологічних параметрів до defect-driven behavior, де критичні дефекти розглядаються як ключові чинники, що визначають defect-controlled mechanical response та fatigue performance матеріалу. Саме critical defects limiting performance формують механізми зародження пошкоджень і визначають експлуатаційну надійність АМ-компонентів.

У роботі [6] проаналізовано вплив атмосфери процесу та конструктивних особливостей компонентів на рівень залишкових напружень і пористість у деталях Ti–6Al–4V, виготовлених методом laser powder bed

fusion. Встановлено, що рівень залишкових напружень і розподіл пористості значною мірою залежать від параметрів процесу та геометрії компонентів, що впливає на формування мікроструктури та локальні концентрації дефектів.

У роботі [7] досліджено вплив якості порошку (feedstock) і режимів постобробки на формування мікроструктури та дефектної популяції в адитивно виготовлених деталях зі сплаву Ti-6Al-4V. Показано, що різні типи порошку та обробок суттєво змінюють пористість і дефекти типу *lack-of-fusion* (LoF), що, в свою чергу, впливає на локальні механічні властивості матеріалу, включно з твердою фазою та пружними характеристиками.

Попередні дослідження [8] зосереджувалися на взаємозв'язку process-induced porosity та механічних властивостей сплаву Ti-6Al-4V. З'ясовано, що дефектна популяція безпосередньо корелює з критеріями втомної міцності, а розподіл пористості визначає локалізацію зародження втомних тріщин.

У статті [9] здійснено огляд впливу різних методів постобробки, зокрема annealing, hot isostatic pressing та stress relief, на мікроструктуру та механічні властивості АМ Ti-6Al-4V. Встановлено, що зазначені обробки ефективно знижують залишкові напруження, зменшують мікроструктурну неоднорідність і підвищують загальну міцність матеріалу, тоді як втомна довговічність частково залишається обмеженою.

У дослідженні [10] показано, що поєднання пористості та мікроструктурної неоднорідності визначає fatigue fracture behavior АМ-деталей. Вперше продемонстровано чіткий зв'язок між дефектною популяцією та локалізацією зародження тріщин, що підтверджує роль критичних дефектів як обмежувачів продуктивності матеріалу.

У публікації [11] досліджено вплив пористості, викликаної процесом, на втомну поведінку деталей Ti-6Al-4V. Встановлено, що наявність навіть незначних дефектів призводить до зниження втомної довговічності, а їхня форма та розмір визначають механізми зародження та росту втомних тріщин. Робота підкреслює, що critical defects limiting fatigue performance є ключовим фактором при проектуванні АМ-компонентів.

Дослідження [6,11] показують, що пористість та lack-of-fusion найбільш критичні для вузлів, які зазнають циклічних навантажень, що характерні для суднових компонентів.

Останні дослідження [5, 21] зосереджені на впливі внутрішніх дефектів на втомну поведінку та мікроструктуру сплаву Ti-6Al-4V, виготовленого методом Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). У літературі здійснено критичні огляди щодо ролі inherent internal defects у формуванні механізмів зародження тріщин і обмеженні втомної довговічності, а також аналізовано ефект постобробки термічною обробкою

на мікроструктуру та fatigue performance, показано покращення властивостей за рахунок модифікації мікроструктури та зменшення залишкових напружень. Ці результати формують контекст для оцінки дефект-контрольованої поведінки АМ-сплавів і підкреслюють важливість кількісного аналізу дефектів у прогнозуванні експлуатаційної надійності деталей.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Попри значні досягнення у дослідженнях адитивного виробництва Ti-6Al-4V, зберігається низка невіршених питань, що обмежують прогнозованість і надійність АМ-компонентів. Недостатньо узагальнено взаємозв'язок між критичними дефектами (пористість, дефекти типу *lack-of-fusion*, мікротріщини, залишкові напруження) та локальною мікроструктурною неоднорідністю, яка визначає механізми зародження пошкоджень. Водночас відсутні систематизовані дані щодо комбінованого впливу різних типів дефектів на втомну поведінку сплаву та його втомну довговічність. Крім того, хоча відомо, що постпроцесинг (annealing, гаряче ізостатичне пресування, *stress relief*) змінює мікроструктуру та рівень залишкових напружень, залишається недостатньо з'ясованим, яким чином ці обробки модифікують взаємодію дефектів і механічних властивостей на різних структурних масштабах.

Таким чином, актуалізується необхідність системного аналізу defect-driven механізмів формування пошкоджень та їхнього впливу на *fatigue performance* АМ-сплаву Ti-6Al-4V, що залишає простір для подальших досліджень. Водночас у сучасній науковій літературі відсутній інтегрований концептуальний підхід, який би комплексно описував взаємодію різних типів дефектів та їхній сукупний внесок у механічну поведінку матеріалу на мікро, мезо- та макрорівнях.

Багатомасштабний характер дефектної структури істотно ускладнює прогнозування втомної довговічності АМ-деталей і зумовлює необхідність системного узагальнення та критичного аналізу наявних експериментальних і теоретичних результатів [5,10,11,21].

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є системне узагальнення та критичний аналіз ролі критичних дефектів адитивного виробництва у формуванні мікроструктури та механічної поведінки сплаву Ti-6Al-4V. Дослідження охоплює ідентифікацію ключових типів дефектів, визначення механізмів їх впливу на мікроструктуру та властивості, а також оцінку внеску у *fatigue performance* та експлуатаційну надійність АМ-компонентів.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є деталі зі сплаву Ti-6Al-4V, виготовлені адитивними технологіями. Предметом дослідження – критичні дефекти адитивного

виробництва (пористість, lack-of-fusion, мікротріщини, залишкові напруження) та їхній вплив на формування мікроструктури, механічні властивості й втомну довговічність матеріалу.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Проаналізовано результати мікроструктурних досліджень, представлених у сучасних публікаціях, з оцінкою морфології фаз α/β , текстурних особливостей і параметрів дефектної популяції (тип, розмір, форма, просторове розташування).

Узагальнено дані фрактографічних досліджень поверхонь руйнування, наведені в літературі, з метою ідентифікації осередків ініціації тріщин. Проаналізовано публікації, у яких рентгенівська мікрокомп'ютерна томографія (μCT) застосовувалася для кількісної оцінки внутрішніх дефектів (пористості, LoF-дефектів), їх морфології та положення відносно поверхні, а також для встановлення кореляцій між характеристиками дефектної популяції та втомною довговічністю.

Систематизовано результати механічних випробувань, представлені у наукових роботах, зокрема дані щодо твердості, міцності на розтяг (tensile strength), тріщиностійкості та втомної поведінки зразків виготовлених адитивними методами.

Здійснено порівняльний аналіз впливу типів дефектів і методів постобробки (annealing, HIP, stress-relief) на стабілізацію мікроструктури, зниження дефектності та підвищення механічних і втомних характеристик сплаву Ti–6Al–4V [5–7, 11].

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

1. Критичні дефекти адитивного виробництва та їх вплив на механічну поведінку Ti–6Al–4V

Морфологічна різноманітність і просторовий розподіл критичних дефектів у АМ-сплавах створюють складну структуру, що визначає механічну поведінку та втомну довговічність Ti–6Al–4V і потребує системного аналізу для прогнозування надійності АМ-деталей.

Критичні дефекти адитивного виробництва, що визначають механізми зародження втомних тріщин і обмежують експлуатаційну надійність АМ-деталей, включають понад п'ять типів внутрішніх дефектів: пористість, lack-of-fusion (LOF), газові пори, keyhole-дефекти, α -фазові фасети, замкові щілини та мікротріщини [12–14].

Основними факторами, що знижують тріщиностійкість і геометричну стабільність деталей, є пористість, LOF, мікротріщини та залишкові напруження. Їхня синергетична взаємодія має суттєвий вплив на надійність компонентів, що працюють у корозійно-активному середовищі, і є визначальною для морських та суднобудівних застосувань [15–17].

LOF-дефекти є критичними для зон із великим ефективним об'ємом матеріалу або складною геометрією, де вони формують протяжні дефектні області, що сприяють швидкому зародженню та нестабільному

росту втомних тріщин. Мікротріщини, що виникають унаслідок термічних градієнтів і повторних термічних циклів під час АМ-процесу, навіть за мікроскопічних розмірів можуть бути осередками раннього зародження тріщин і обмежувати довговічність матеріалу. Залишкові напруження, зумовлені високими тепловими градієнтами, впливають не лише на механічну стабільність, а й на точність розмірів і геометричну стабільність АМ-компонентів [18–20].

Поряд із зазначеними дефектами, у структурі АМ-сплавів формуються рідкісні, але структурно значущі дефектні особливості, які локально модифікують механізми пошкодження. Хоча їхня об'ємна частка є меншою порівняно з пористістю та LOF-дефектами, саме ці структурні особливості можуть визначати локальний характер напружено-деформованого стану та ініціювати передчасне руйнування в умовах циклічного або корозійно-втомного навантаження. Їх аналіз є необхідним для комплексного розуміння механізмів деградації АМ-матеріалів [17–20].

2. Особливості рідкісних дефектів

Keyhole-дефекти формуються внаслідок нестабільності глибокого проплавлення та колапсу парової порожнини, що призводить до утворення замкнених пор із високим коефіцієнтом концентрації напружень; у режимах циклічного навантаження вони виступають ефективними осередками ініціювання тріщин.

α -фазові фасети, що утворюються за умов високих швидкостей охолодження, створюють кристалографічно орієнтовані площини зниженого опору зсуву, що зумовлює локалізацію пластичної деформації та прискорює зародження втомних тріщин.

Замкові щілини (incomplete interlayer bonding) формуються при недостатньому проплавленні між шарами та спричиняють анізотропію механічних властивостей, посилюючи градієнти напружень у напрямку пошарового нарощування [15–20].

В умовах корозійно-активного середовища зазначені дефекти проявляють синергетичну дію: електрохімічна активація поверхні пор і тріщин сприяє локалізації напружено-деформованого стану та прискорює корозійно-втомне пошкодження, що визначає експлуатаційну довговічність і надійність деталей, виготовлених адитивними методами, у морських і суднобудівних конструкціях. Зокрема, у вузлах кріплення палубних елементів або корпусних стінок суден локалізовані LOF-дефекти і газові пори можуть виступати осередками передчасного розвитку тріщин, що обмежує ресурси роботи компонентів під впливом циклічних навантажень і агресивного середовища [21].

3. Мікроструктура та її вплив на механічні властивості

У численних дослідженнях показано, що мікроструктура Ti–6Al–4V, отриманого методом селективного лазерного плавлення (SLM), суттєво визначає його механічні характеристики та поведінку при

циклічному навантаженні. За оптимальної енергії лазера досягається відносна щільність $\sim 99,86\%$, при цьому мікроструктурний аналіз виявляє поверхневі та внутрішні пори, що впливають на розподіл мікротвердості та формування α' -фазної морфології [10].

Характерні для процесу SLM високі швидкості охолодження обмежують ріст кристалів і зумовлюють формування дрібнодисперсної мартенситної α' -фази, що модифікує механічні властивості сплаву. Крім того, встановлено, що втомні тріщини переважно ініціюються з поверхнево-сполучених порових дефектів, що підтверджує кореляцію між мікроструктурними особливостями, пористістю та втомною довговічністю Ti-6Al-4V.

У межах аналізу втомної поведінки сплаву Ti-6Al-4V виготовленого адитивними методами основну увагу зосереджено на двох домінуючих типах внутрішніх дефектів – газових порах та дефектах типу lack-of-fusion (LOF) (рис. 1). Зазначені дефекти є типовими для технології L-PBF та залишаються складними для повного усунення шляхом оптимізації параметрів процесу або стандартної післяобробки. За даними літератури, вони найчастіше виступають осередками ініціації втомних тріщин і визначають граничні характеристики довговічності матеріалу [5, 11, 19].

Причинно-наслідковий зв'язок між внутрішніми дефектами та механізмами деградації проявляється у локальному концентруванні напружень поблизу газових пор і LOF-дефектів, що сприяє ранній ініціації тріщин. Така дефект-керована структура визначає напрямок росту втомних тріщин і формує граничні характеристики довговічності матеріалу, підкреслюючи необхідність контролю розподілу та морфології дефектів для забезпечення стабільності механічних властивостей АМ-сплавів.

Рисунок 1 демонструє розподіл газових пор та LOF-дефектів, які переважно локалізуються у підповерхневих зонах і виступають домінуючими осередками ініціації втомних тріщин, що підтверджує їхню визначальну роль у формуванні дефект-керованої втомної поведінки матеріалу [5].



Рис. 1. Два основні типи внутрішніх дефектів на поверхні руйнування сплаву Ti-6Al-4V, виготовленого методом LPBF (SEM-аналіз) [5]

Виявлена просторово-морфологічна специфіка дефектів формує передумови для статистично зумовленого зниження втомної довговічності, що кількісно відображено на S-N-залежності, представлений на рисунку 2.

Зі зростанням загальної пористості підвищується ймовірність формування великих внутрішніх дефектів, що призводить до істотного зниження втомної довговічності (рис. 2). При цьому ініціація тріщин зазвичай відбувається не з найбільшого дефекту, а з дефекту, розмір якого перевищує критичний пороговий рівень, визначаючи початок локальної деградації матеріалу [17].

Представлена S-N-крива демонструє систематичне зміщення донизу зі зростанням рівня пористості, що свідчить про зниження меж витривалості та скорочення кількості циклів до руйнування при заданому рівні напружень. Така тенденція підтверджує, що пористість виконує роль ефективного концентратора напружень, формуючи локальні зони підвищеної інтенсивності напружено-деформованого стану та прискорюючи перехід від стадії зародження до стадії стабільного росту втомної тріщини. Водночас вирішальним параметром є не лише об'ємна частка пор, а їхній ефективний розмір та розташування відносно вільної поверхні, що визначає локальний коефіцієнт концентрації напружень та критичні умови ініціації пошкодження [5, 17].

Отже, втомна довговічність АМ-деталей визначається статистичною ймовірністю наявності дефектів критичного розміру, а не лише середнім рівнем пористості. Це свідчить про необхідність переходу від інтегральних характеристик (загальна пористість) до параметрів, що описують дефектну популяцію – розподіл за розмірами, морфологією та глибиною залягання.

Для внутрішніх дефектів у сплаві Ti-6Al-4V, виготовленому методом L-PBF, у низці робіт запропоновано критичне порогове значення параметра $\sqrt{area} \approx 0,2 \text{ мм}$, перевищення якого супроводжується різким скороченням втомної довговічності. Кількісна оцінка параметра $\sqrt{area}$ для внутрішніх дефектів у сучасних роботах все частіше ґрунтується на даних μCT -аналізу, що дозволяє враховувати реальний розмір, форму та просторовий розподіл дефектів. Важливу роль відіграє також морфологія дефектів: витягнуті та нерегулярні пори створюють більш інтенсивні локальні концентрації напружень і сприяють ранній ініціації тріщин [5,10,11,17,18,19].

Вплив термічної післяобробки на втомну поведінку LPBF-зразків ілюструє рис. 3, а,б, де наведено зміну середньої втомної довговічності відносно стану as-built. Усі режими термічної обробки забезпечують покращення втомних характеристик за напруження 500 МПа, однак найбільш виражений

ефект спостерігається після обробки при температурі 850 °С. Зокрема, для зразків із пічним охолодженням при 850 °С (Furnace Cooling, FC) зафіксовано зростання довговічності майже на два порядки, тоді як для режимів із охолодженням водою та повітрям при 850 °С (Water-Air Cooling, WAC) – приблизно у 60 разів. Підвищення втомної стійкості пов'язують з гомогенізацією мікроструктури та зменшенням залишкових напружень [21].

Разом з тим, навіть після оптимальних режимів термічної обробки втомна довговічність сплаву Ti-6Al-4V виготовленого АМ, суттєво поступається показникам деформованих (wrought) титанових сплавів. Основною причиною цього залишається висока чутливість втомної поведінки до наявності внутрішніх дефектів, які є технологічно неминучими для процесу L-PBF і зберігають свій вплив навіть за умови повторного переплавлення та післяобробки.

Для систематизації впливу процес-індукованих дефектів адитивного виробництва на механічну поведінку сплаву Ti-6Al-4V узагальнено ключові типи дефектів, відповідні механічні властивості, що є найбільш чутливими до їх присутності, а також експлуатаційні умови, за яких їхній вплив є критичним (табл. 1). Узагальнення виконано на основі сучасних літературних джерел [5, 11, 19, 21]. Основні результати наведено в таблиці 1.

4. Роль внутрішніх дефектів у формуванні втомної довговічності та механізмів руйнування сплаву Ti-6Al-4V

Кількісна оцінка внутрішніх дефектів у сучасних дослідженнях широко базується на методі рентгенівської мікрокомп'ютерної томографії (μ СТ), що дає змогу визначати розмір, морфологію та просторове розташування пор і LOF-дефектів без руйнування зразків.

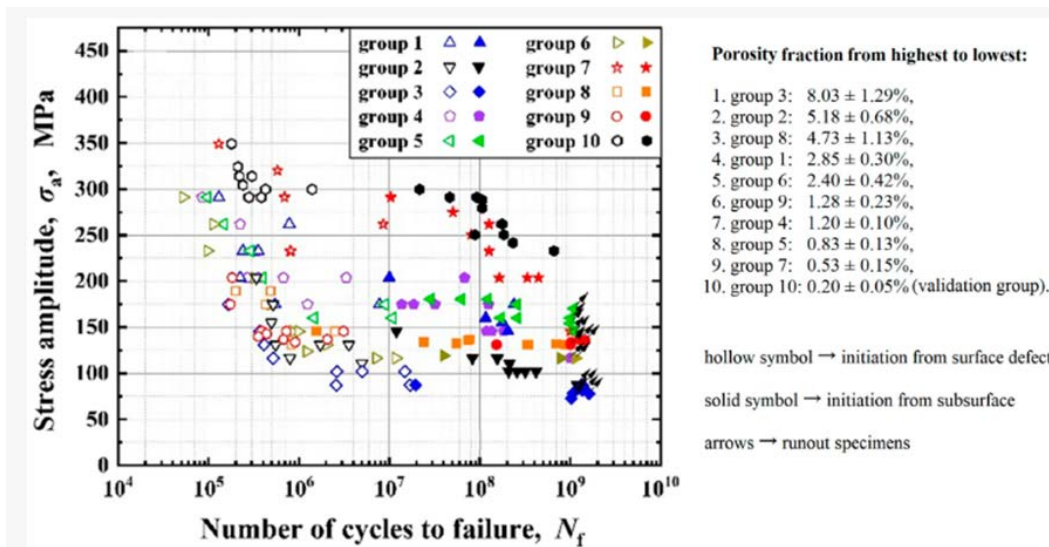
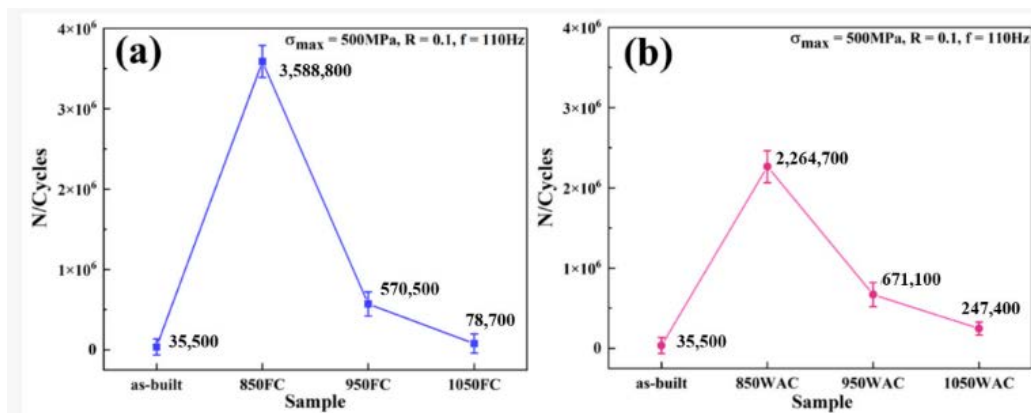


Рис. 2. S-N діаграми зразків Ti-6Al-4V, виготовлених методом LPBF, з різним рівнем пористості [17]



(a) АВ – адитивно виготовлений стан (as-built), (b) СТО – стан після стандартної термічної обробки (stress relieving / standard annealing):

Рис. 3. Зміна середньої втомної довговічності зразків Ti-6Al-4V після різних режимів термічної обробки [21]

Встановлено [5] чітку кореляцію між характеристиками пористості, формою дефектів і втомною довговічністю на основі поєднання μCT -аналізу та S-N випробувань. Показано, що збільшення ефективного розміру дефектів та їх розташування у підповерхневих зонах зумовлює суттєве зниження втомної довговічності.

Подібні підходи також поєднуються з чисельним моделюванням (FEA) для аналізу напружено-деформованого стану матеріалу навколо внутрішніх дефектів, що дозволяє глибше інтерпретувати експериментальні результати.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані результати узгоджуються з сучасними уявленнями про домінуючу роль процес-індукованих дефектів у формуванні втомної поведінки сплаву Ti-6Al-4V виготовленого АМ. Як показано в роботах [5, 11, 19], основними осередками ініціації втомних тріщин є внутрішні дефекти у вигляді газової пористості та дефектів типу lack-of-fusion, які переважно локалізуються у підповерхневих зонах.

Спостережувана варіабельність втомної довговічності при фіксованих напруженнях відповідає літературним даним, де показано, що крім об'ємної частки пор, ймовірність ранньої ініціації тріщин визначають ефективний розмір, форма та просторове розташування дефектів [10, 11]. Згідно з результатами, [5] критичним параметром для внутрішніх дефектів є порогове значення площі дефекту $\sqrt{area} \approx 0,2 \text{ мм}$, перевищення якого зумовлює суттєве зниження втомної довговічності.

Встановлено сприятливий вплив термічної обробки при 850 °C на втомну довговічність, що підтверджується результатами [21], де показано, що оптимізація морфології α -ламелей і співвідношення фаз α/β сприяє зростанню кількості циклів до руйнування. Водночас, як зазначено [19], навіть за

оптимізованої мікроструктури повне усунення негативного впливу внутрішніх дефектів є неможливим, що зумовлює нижчу втомну довговічність порівняно з деформованими титановими сплавами.

Фрактографічні спостереження свідчать, що після термічної обробки механізм зародження тріщин зміщується від виключно внутрішніх дефектів до комбінованого впливу підповерхневих дефектів і мікроструктурних неоднорідностей, що також підтверджується результатами [10]. У стадії стабільного росту тріщини виявлено формування ділянок, характерних для стадії II (Парижового режиму), що свідчить про застосовність класичних підходів лінійної механіки руйнування до аналізу росту втомних тріщин в АМ-матеріалах [11].

Таким чином, результати обговорення підтверджують висунуту в огляді літератури гіпотезу, що поєднання процес-індукованих дефектів і мікроструктурного стану, сформованого під час та після L-PBF, є визначальним фактором, який обмежує втомну довговічність і експлуатаційну надійність АМ-деталей зі сплаву Ti-6Al-4V. Це потребує порівняльного аналізу впливу теплової історії та параметрів енергетичної густини на формування дефектної популяції Ti-6Al-4V.

Порівняльний аналіз впливу адитивних технологій та мікроструктури на формування дефектної популяції і втомну поведінку Ti-6Al-4V. Технологія лазерного плавлення в порошковому шарі (L-PBF/SLM) Ti-6Al-4V характеризується високими швидкостями охолодження, значними температурними градієнтами та об'ємною густиною енергії (volumetric energy density, VED), що визначає механізми формування дефектної популяції та еволюцію мікроструктури. Встановлено, що втомна поведінка сплаву має переважно дефект-керований характер.

Показано, що [22] параметри процесу безпосередньо контролюють формування дефектів типу

Таблиця 1. Критичні дефекти АМ у сплаві Ti-6Al-4V та їх вплив на механічні властивості [5, 11, 19, 21]

Тип дефекту	Характерні особливості	Критичні механічні властивості	Умови, за яких вплив є критичним
Газова пористість	Сферичні або квазі-сферичні пори, випадково розподілені в об'ємі	Втомна довговічність, тріщиностійкість	Високоциклічна втома, змінні навантаження
Lack-of-fusion (LOF)	Непроварені міжшарові області, витягнута форма дефектів	Міцність, втомна міцність	Складна геометрія, великі ефективні об'єми
Мікротріщини	Тріщини кристалізаційного або термічного походження	Раннє зародження втомних тріщин	Циклічні навантаження, залишкові напруження
Залишкові напруження	Неоднорідний розподіл напружень після виготовлення	Геометрична стабільність, втомна поведінка	Тонкостінні деталі, постобробка
Комбіновані дефекти	Комбінований ефект пористості, LOF та залишкових напружень	Синергетичне зниження втомної довговічності	Корозійно-втомні умови, суднобудування

lack-of-fusion (LoF) та газової пористості. Недостатня об'ємна густина енергії сприяє утворенню нерегулярних LoF-дефектів, які є домінуючими осередками ініціації тріщин за умов згинальної втоми. Довговічність матеріалу корелює з морфологією, розміром та локалізацією дефектів.

Встановлено, що [23] у режимі дуже високої циклічної втоми (VHCF) за підвищених температур ($N > 10^7$ циклів) місця ініціації тріщин зміщуються у підповерхневі області, де внутрішня пористість та мікроструктурна неоднорідність стають визначальними чинниками деградації довговічності.

Показано, що [24] L-PBF супроводжується підвищеною часткою LoF-дефектів та газових пор через локальні коливання енергетичного внеску та неповне переплавлення суміжних доріжок сканування. Водночас електронно-променеве плавлення (EBM), завдяки підігріву порошкового шару та більшій глибині ванни розплаву, демонструє нижчу схильність до LoF-дефектів, але може формувати keyhole-порожнини та варіації фазового складу β -фази.

Доведено, що [10] за оптимізованих параметрів енергетичної густини SLM Ti-6Al-4V досягає відносної щільності ~99,86%. Мікроструктура представлена дрібнодисперсною α' -мартенситною фазою, сформованою в умовах надвисоких швидкостей охолодження. Виявлено поверхнево-зв'язані та внутрішні пори, які зумовлюють локальні варіації мікротвердості та виступають концентраторами напружень.

Порівняння результатів [22, 23] свідчить про узгоджений механізм: у діапазоні високих і надвисоких циклів втоми основним фактором залишається дефектна популяція, тоді як морфологія α' -фази та зернова дисперсність модифікують механізм росту тріщин.

Таким чином, механічні властивості та втомна довговічність SLM/L-PBF Ti-6Al-4V визначаються поєднаним впливом мікроструктурних особливостей і дефектної популяції.

ВИСНОВКИ

Критичні внутрішні дефекти сплаву Ti-6Al-4V, виготовленого адитивними технологіями, – пористість, LoF-дефекти (lack-of-fusion), мікротріщини та залишкові напруження – визначають механізми ініціації та росту втомних тріщин, суттєво обмежуючи втомну довговічність і структурну цілісність АМ-деталей. В корозійно-активних середовищах їхній вплив посилюється через корозійно-втомні механізми (corrosion-fatigue mechanisms).

Узагальнення літературних даних свідчить про те, що внутрішні дефекти зумовлюють значну варіабельність і зниження втомної довговічності за однакових рівнів напруження, що узгоджується з концепцією defect-controlled fatigue для АМ Ti-6Al-4V.

Термічна обробка модифікує мікроструктурний стан α/β -фаз та морфологію α -ламель, підвищуючи середню втомну довговічність і частково нейтралізуючи негативний вплив внутрішніх дефектів.

Інтеграція μCT -аналізу з підходами механіки руйнування забезпечує кількісну оцінку ролі внутрішніх дефектів у процесах ініціації тріщин і дозволяє прогнозувати втомну поведінку АМ-компонентів, формуючи підґрунтя для стандартизації адитивних технологій.

Порівняльний аналіз технологій L-PBF/SLM та EBM показує, що відмінності у тепловій історії процесу та параметрах енергетичної густини визначають дефектну популяцію і мікроструктурний стан сплаву, що впливає на механізми ініціації тріщин і рівень втомної довговічності Ti-6Al-4V.

Систематизовані висновки визначають напрями подальших досліджень, спрямованих на зниження дефектності та керування мікроструктурним станом шляхом оптимізації режимів термічної обробки з метою мінімізації дефект-керованих механізмів ініціації тріщин і підвищення втомної довговічності АМ-компонентів зі сплаву Ti-6Al-4V.

REFERENCES

- [1] Hopkinson, N., Hague, R.J.M., Dickens, P.M. (2006). *Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age*. Wiley, New York. DOI:10.1002/0470033991
- [2] 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, 4641–4661. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.055>
- [3] Zhai Y., Galarraga H., & Lados D.A. (2016). Microstructure, static properties, and fatigue crack growth mechanisms in Ti-6Al-4V fabricated by additive manufacturing: LENS and EBM. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 69, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.05.036>
- [4] Squillaci, L., Neikter, M., Hansson, T., Pederson, R., & Moverare, J. (2025). Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated using powder bed fusion – laser beam additive manufacturing process: Effect of hot isostatic pressing. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 931, 148226. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.148226>
- [5] 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*, Vol. 14(9), 972. <https://doi.org/10.3390/met14090972>
- [6] Pazon, C., Mishurova, T., Evsevlev, S., Dubiez-Le Goff, S., Murugesan, S., Bruno, G., & Hryha, E. (2021). Residual stresses and porosity in Ti-6Al-4V produced by laser powder bed fusion as a function of process atmosphere and component design. *Additive Manufacturing*, Vol. 47, 102340. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102340>
- [7] Pegues, J. W., Shao, S., Shamsaei, N., Sanaei, N., Fatemi, A., Warner, D. H. Li, P. & Phan, N. (2020). Fatigue of additive manufactured Ti-6Al-4V, Part I: The effects of powder feedstock, manufacturing, and post-process conditions on the

- resulting microstructure and defects. (2019). *International Journal of Fatigue*, Vol. 132, 105358. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105358>
- [8] Lv, H., Zhang, Z., Li, J., Liu, Y., Chen, H., He, H., Cheng, J., & Chen, Y. (2022). The Effect of Process-Induced Porosity on Fatigue Properties of Ti6Al4V Alloy via High-Power Direct Energy Deposition. *Coatings*, Vol. 12(6), 822. <https://doi.org/10.3390/coatings12060822>
- [9] Qian, M., Xu, W., Brandt, M., & Tang, H. P. (2016). Additive manufacturing and postprocessing of Ti-6Al-4V for superior mechanical properties. *MRS Bulletin*, Vol. 41, 775–784. <https://doi.org/10.1557/mrs.2016.215>
- [10] Gencalp Irizalp, S., Saklakoglu, N., Apaydin, C. & Ayan, K. (2025). Effects of porosity and microstructure on the fatigue fracture properties of ti6al4v alloy produced through selective laser melting. *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 138, 2573–2589. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15630-8>
- [11] Akgun, E., Zhang, X., Lowe, T., Zhang, Y., & Doré, M. (2022). Fatigue of laser powder-bed fusion additive manufactured Ti-6Al-4V in presence of process-induced porosity defects. *Eng. Fract. Mech.* Vol. 259, 108140. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.108140>
- [12] Sanaei, N., & Fatemi, A. (2021). Defects in additive manufactured metals and their effect on fatigue performance: A state-of-the-art review. *Prog. Mater. Sci.* Vol. 117, 100724. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100724>
- [13] Singla, A.K., Banerjee, M., Sharma, A., Singh, J., Bansal, A., Gupta, M.K., Khanna, N., Shahi, A.S., & Goyal, D.K. (2021). Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: Process parameters, defects and post-treatments. *J. Manuf. Process.* Vol. 64, 161–187. <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2021.01.009>
- [14] Wanhill, R., & Barter, S. (2012). Fatigue of beta processed and beta heat-treated titanium alloys. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2524-9?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- [15] Hagiwara, M., Kitaura, T., Ono, Y., Yuri, T., Ogata, T., & Kanou, O. (2012). High cycle fatigue properties of a minor boron-modified Ti–6Al–4V alloy. *Mater. Trans.* 53, 1486–1494. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2012104>
- [16] Hagiwara, M., Kaieda, Y., Kawabe, Y., & Miura, S. (1991). Fatigue property enhancement of α - β titanium alloys by blended elemental P/M approach. *ISIJ Int.* 31, 922–930. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.31.922>
- [17] Du, L., Qian, G., Zheng, L., Hong, Y. (2021). Influence of processing parameters of selective laser melting on high-cycle and very-high-cycle fatigue behaviour of Ti-6Al-4V. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 44, 240–256. DOI: 10.22541/au.159385503.37544580
- [18] Hu, Y.N., Wu, S.C., Withers, P.J., Zhang, J., Bao, H.Y.X., Fu, Y.N., (2020). Kang, G.Z. The effect of manufacturing defects on the fatigue life of selective laser melted Ti-6Al-4V structures. *Mater. Des.* 192, 108708. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108708>
- [19] Moquin, E., Letenneur, M., Kreitzberg, A., Poulin-Masson, J.-R., & Brailovski, V. (2023). High cycle fatigue resistance of laser powder bed fused Ti–6Al–4V alloys with processing-induced porosity: Towards damage-tolerant design of printed components. *Materials Science and Engineering: A*, 884, 145509. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145509>
- [20] Gao, X., Tao, C., Wu, S., Chen, B., Wu, S. (2022). X-ray imaging of defect population and the effect on high cycle fatigue life of laser additive manufactured Ti6Al4V alloys. *Int. J. Fatigue*, 162, 106979. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106979>
- [21] Yang, Y., Zhao, M., Wang, H., Zhou, K., He, Y., Mao, Y., Xie, D., Lv, F., & Shen, L. (2023). Microstructure and fatigue performance of Ti6Al4V produced by laser powder bed fusion after post-heat treatment. *Applied Sciences*, Vol. 13(3), 1828. <https://doi.org/10.3390/app13031828>
- [22] Ramirez, B., Banuelos, C., De La Cruz, A., Nabil, S. T., Arrieta, E., Murr, L. E., Wicker, R. B., & Medina, F. (2024). Effects of Process Parameters and Process Defects on the Flexural Fatigue Life of Ti-6Al-4V Fabricated by Laser Powder Bed Fusion. *Materials (Basel)*. 17(18), 4548. doi: 10.3390/ma17184548
- [23] Peng, H., Liu, F., Chen, Y., He, C., Li, L., Zhang, H., Wang, C., Wang, Q., & Liu, Y. (2023). Very high cycle fatigue behavior of laser powder bed fusion additively manufactured Ti6Al4V alloy at elevated temperature *International Journal of Fatigue*. 171, 107599. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107599>
- [24] Grasso, M., & Colosimo, B.M. (2017). Process defects and In-situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review. *Measurement Science and Technology*. 28(4), 1-25. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa5c4f>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Hopkinson, N., Hague, R.J.M., Dickens, P.M. (2006). *Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age*. Wiley, New York. DOI:10.1002/0470033991
- [2] 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, 4641–4661. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.055>
- [3] Zhai Y., Galarraga H., & Lados D.A. (2016). Microstructure, static properties, and fatigue crack growth mechanisms in Ti-6Al-4V fabricated by additive manufacturing: LENS and EBM. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 69, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.05.036>
- [4] Squillaci, L., Neikter, M., Hansson, T., Pederson, R., & Moverare, J. (2025). Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated using powder bed fusion – laser beam additive manufacturing process: Effect of hot isostatic pressing. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 931, 148226. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.148226>

- [5] 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*, Vol. 14(9), 972. <https://doi.org/10.3390/met14090972>
- [6] Pazon, C., Mishurova, T., Evsevlev, S., Dubiez-Le Goff, S., Murugesan, S., Bruno, G., & Hryha, E. (2021). Residual stresses and porosity in Ti-6Al-4V produced by laser powder bed fusion as a function of process atmosphere and component design. *Additive Manufacturing*, Vol. 47, 102340. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102340>
- [7] Pegues, J. W., Shao, S., Shamsaei, N., Sanaei, N., Fatemi, A., Warner, D. H. Li, P. & Phan, N. (2020). Fatigue of additive manufactured Ti-6Al-4V, Part I: The effects of powder feedstock, manufacturing, and post-process conditions on the resulting microstructure and defects. (2019). *International Journal of Fatigue*, Vol. 132, 105358. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105358>
- [8] Lv, H., Zhang, Z., Li, J., Liu, Y., Chen, H., He, H., Cheng, J., & Chen, Y. (2022). The Effect of Process-Induced Porosity on Fatigue Properties of Ti6Al4V Alloy via High-Power Direct Energy Deposition. *Coatings*, Vol. 12(6), 822. <https://doi.org/10.3390/coatings12060822>
- [9] Qian, M., Xu, W., Brandt, M., & Tang, H. P. (2016). Additive manufacturing and postprocessing of Ti-6Al-4V for superior mechanical properties. *MRS Bulletin*, Vol. 41, 775–784. <https://doi.org/10.1557/mrs.2016.215>
- [10] Gencalp Irizalp, S., Saklakoglu, N., Apaydin, C. & Ayan, K. (2025). Effects of porosity and microstructure on the fatigue fracture properties of ti6al4v alloy produced through selective laser melting. *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 138, 2573–2589. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15630-8>
- [11] Akgun, E., Zhang, X., Lowe, T., Zhang, Y., & Doré, M. (2022). Fatigue of laser powder-bed fusion additive manufactured Ti-6Al-4V in presence of process-induced porosity defects. *Eng. Fract. Mech.* Vol. 259, 108140. <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2021.108140>
- [12] Sanaei, N., & Fatemi, A. (2021). Defects in additive manufactured metals and their effect on fatigue performance: A state-of-the-art review. *Prog. Mater. Sci.* Vol. 117, 100724. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100724>
- [13] Singla, A.K., Banerjee, M., Sharma, A., Singh, J., Bansal, A., Gupta, M.K., Khanna, N., Shahi, A.S., & Goyal, D.K. (2021). Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: Process parameters, defects and post-treatments. *J. Manuf. Process.* Vol. 64, 161–187. <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2021.01.009>
- [14] Wanhill, R., & Barter, S. (2012). *Fatigue of beta processed and beta heat-treated titanium alloys*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2524-9?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- [15] Hagiwara, M., Kitaura, T., Ono, Y., Yuri, T., Ogata, T., & Kanou, O. (2012). High cycle fatigue properties of a minor boron-modified Ti-6Al-4V alloy. *Mater. Trans.* 53, 1486–1494. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2012104>
- [16] Hagiwara, M., Kaieda, Y., Kawabe, Y., & Miura, S. (1991). Fatigue property enhancement of α - β titanium alloys by blended elemental P/M approach. *ISIJ Int.* 31, 922–930. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.31.922>
- [17] Du, L., Qian, G., Zheng, L., Hong, Y. (2021). Influence of processing parameters of selective laser melting on high-cycle and very-high-cycle fatigue behaviour of Ti-6Al-4V. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 44, 240–256. DOI: 10.22541/au.159385503.37544580
- [18] Hu, Y.N., Wu, S.C., Withers, P.J., Zhang, J., Bao, H.Y.X., Fu, Y.N., (2020). Kang, G.Z. The effect of manufacturing defects on the fatigue life of selective laser melted Ti-6Al-4V structures. *Mater. Des.* 192, 108708. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108708>
- [19] Moquin, E., Letenneur, M., Kreitchberg, A., Poulin-Masson, J.-R., & Brailovski, V. (2023). High cycle fatigue resistance of laser powder bed fused Ti-6Al-4V alloys with processing-induced porosity: Towards damage-tolerant design of printed components. *Materials Science and Engineering: A*, 884, 145509. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145509>
- [20] Gao, X., Tao, C., Wu, S., Chen, B., Wu, S. (2022). X-ray imaging of defect population and the effect on high cycle fatigue life of laser additive manufactured Ti6Al4V alloys. *Int. J. Fatigue*, 162, 106979. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106979>
- [21] Yang, Y., Zhao, M., Wang, H., Zhou, K., He, Y., Mao, Y., Xie, D., Lv, F., & Shen, L. (2023). Microstructure and fatigue performance of Ti6Al4V produced by laser powder bed fusion after post-heat treatment. *Applied Sciences*, Vol. 13(3), 1828. <https://doi.org/10.3390/app13031828>
- [22] Ramirez, B., Banuelos, C., De La Cruz, A., Nabil, S. T., Arrieta, E., Murr, L. E., Wicker, R. B., & Medina, F. (2024). Effects of Process Parameters and Process Defects on the Flexural Fatigue Life of Ti-6Al-4V Fabricated by Laser Powder Bed Fusion. *Materials (Basel)*. 17(18), 4548. doi: 10.3390/ma17184548
- [23] Peng, H., Liu, F., Chen, Y., He, C., Li, L., Zhang, H., Wang, C., Wang, Q., & Liu, Y. (2023). Very high cycle fatigue behavior of laser powder bed fusion additively manufactured Ti6Al4V alloy at elevated temperature *International Journal of Fatigue*. 171, 107599. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107599>
- [24] Grasso, M., & Colosimo, B.M. (2017). Process defects and In-situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review. *Measurement Science and Technology*. 28(4), 1-25. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa5c4f>

© Кирилах С. В.

Дата першого надходження статті до видання: 22.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)