

Властивості решітчастих структур Ti-6Al-4V із in-situ легуванням та функціональним градієнтом

С. В. Кирилаха¹ - ORCID <https://orcid.org/0009-0001-5688-5616>

Received: 9 August 2025 / Revised: 19 November 2025 / Accepted: 23 December 2025

Анотація. Проблематика. Об'єктом дослідження є решітчасті структури з титанових сплавів Ti-6Al-4V, виготовлені за допомогою методів selective laser melting (SLM) та laser powder bed fusion (LPBF), включно з in-situ легуваними та функціонально градієнтними варіантами. Проблема полягає у відсутності систематизованих даних щодо взаємозв'язку технологічних параметрів процесу адитивного виробництва, мікроструктури матеріалу та його механічних властивостей, що обмежує застосування таких матеріалів у авіаційній та космічній промисловості. Мета дослідження. Визначення впливу in-situ легування та функціонального градієнту решітчастих структур на формування мікроструктури, модуль пружності, міцність і енергопоглинальні властивості Ti-6Al-4V, отриманого методом SLM/LPBF. Методика реалізації. Експериментальні зразки з Ti-6Al-4V–3 % Cr виготовлялися шляхом SLM/LPBF із контрольованими параметрами енергетичної щільності та сканування. Для оцінки структури застосовували рентгенівську дифрактометрію (XRD), електронну мікроскопію (SEM, EBSD, EDS), а також аналіз геометрії решітчастих структур. Паралельно використовували комп'ютерне моделювання методом кінцевих елементів (FEM) для прогнозування механічної поведінки. Результати дослідження. Отримані результати демонструють, що in-situ легування Cr дозволяє стабілізувати β -фазу та контролювати розподіл $\alpha + \beta$ мікроструктури, підвищуючи міцність та жорсткість сплаву (UTS до 1050 МПа, відносне видовження 8–10 %). Решітчасті структури еліптичної та спіральної геометрії показали максимальний модуль пружності 0,76 ГПа та 0,41 ГПа відповідно, при одночасному зниженні маси конструкцій. Функціонально градієнтні решітчасті структури із змінним діаметром стержнів (1–1,2 мм) забезпечили більш ефективне передавання напружень і контрольовану локальну жорсткість. Спостережений ефект пояснюється впливом підготовки підкладки та циклічного нагріву під час LPBF, що сприяло дифузійному розпаду мартенситу α' , стабілізації β -фази та зменшенню концентрацій напружень у критичних ділянках решітки. Висновки. Особливістю роботи є поєднання in-situ легування та функціонального градієнту геометрії, що дозволяє досягти оптимального співвідношення міцність/маса, підвищити енергопоглинальні властивості матеріалу та забезпечити контрольовану механічну відповідь по всьому об'єму деталі. Сфера практичного застосування охоплює авіаційну й космічну техніку, де критично важливе зменшення маси при високій жорсткості та міцності деталей, а також можливе використання у структурних компонентах із підвищеною вимогою до стійкості до локальних навантажень.

Ключові слова: решітчасті структури, Ti-6Al-4V, SLM, LPBF, in-situ легування, функціонально градієнтні матеріали, механічні властивості, модуль пружності, міцність, анізотропія.

Вступ

Титанові сплави, завдяки поєднанню високої питомої міцності, жароміцності та корозійної стійкості, займають провідну роль серед матеріалів для авіаційної та ракетно-космічної техніки. Їх застосування роз-

почалося в середині XX століття, коли в 1953 році компанія Douglas Aircraft Company вперше використала титанові сплави у конструкції двигуна DC-8, що стало значним кроком у розвитку авіаційних технологій [1].

Сучасні тенденції в матеріалознавстві спрямовані на удосконалення титанових сплавів шляхом легування, створення функціонально градієнтних матеріалів та застосування адитивних технологій, таких як selective laser melting (SLM) та laser powder bed fusion (LPBF). Ці підходи дозволяють досягти оптимального поєднання механічних властивостей та зниження маси конструкцій, що є критично важливим для сучасних

¹ Національний університет “Запорізька політехніка”, Запоріжжя, Україна, <https://ror.org/03aph1990>

✉ С.В. Кирилаха
lanakirilaha@gmail.com



вимог до авіаційної та космічної техніки [2]. Зокрема, сплав Ti-6Al-4V широко застосовується завдяки високій питомій міцності, корозійній стійкості та жароміцності, проте має обмеження щодо втомної довговічності та зниження маси, що сприяє розвитку нових матеріалів та адитивних технологій [3].

Сучасні адитивні технології, зокрема SLM/LPBF, дозволяють створювати складні конструкції, включно з lattice-структурами та градієнтними матеріалами, а також реалізовувати in-situ легування різними елементами (Al, V, Mo, Cr). Вивчення взаємозв'язку між мікроструктурою та механічними властивостями таких матеріалів є критично важливим для оптимізації їхньої експлуатаційної надійності.

Результати таких досліджень мають практичне значення, оскільки надають інженерам і конструкторам конкретні дані для проектування та оцінки придатності деталей, наприклад, лопаток турбін, кронштейнів кріплення, вузлів шасі та елементів фюзеляжу літаків і космічних апаратів. Це дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо матеріалів, технології виготовлення та сертифікації компонентів, де поєднання високої міцності, стійкості до втоми та мінімальної маси є критичним [1]–[5].

Наукові дослідження у цій сфері є надзвичайно важливими, оскільки адитивні технології надають можливість створювати конструкції з оптимізованою топологією та регульованою мікроструктурою, що раніше було неможливо при традиційних методах обробки. Разом з тим, більшість попередніх робіт зосереджувалася на стандартному сплаві Ti-6Al-4V, тоді як вивчення in-situ легування систем (зокрема з додаванням Cr, Mo) та lattice-структур лише набирає обертів. Прогалиною також залишається недостатня кількість комплексних досліджень, де одночасно аналізувалися б вплив параметрів процесу, формування мікроструктури та експлуатаційні характеристики готових деталей. У цьому контексті систематизація наявних результатів має практичну цінність для авіаційної та ракетно-космічної галузей, оскільки забезпечує основу для впровадження AM титанових сплавів у такі критичні деталі, як кронштейни шасі, вузли кріплення та лопатки компресорів [4].

Актуальність. Титанові сплави залишаються базовими матеріалами для авіаційної та космічної техніки, оскільки поєднують малу густину, високу питому міцність, корозійну стійкість та здатність працювати за високих температур. Зростання вимог до зниження маси літальних апаратів і підвищення їхньої паливної ефективності зумовлює необхідність розроблення нових матеріалів і технологій їхнього виготовлення.

Нові адитивні технології, зокрема Selective Laser Melting (SLM), Laser Powder Bed Fusion (LPBF), відкрили можливість створення складних геометричних форм, решітчастих структур та градієнтних матеріалів. Останні поєднують у собі різні фазові та хімічні стани в одному виробі, що дозволяє варіювати локальні влас-

тивості – від високої міцності до підвищеної пластичності – залежно від функціонального призначення конкретної ділянки авіаційної чи космічної деталі.

Сучасні адитивні технології, зокрема селективне лазерне плавлення (SLM/LPBF), відкривають можливості створення не лише складних геометрій, але й топологічно оптимізованих конструкцій та in-situ легування сплавів, здатних перевищити характеристики традиційного Ti-6Al-4V. Водночас комплексних систематизованих даних щодо взаємозв'язку “технологічні параметри – мікроструктура – експлуатаційні властивості” досі бракує, що стримує широке впровадження таких матеріалів у практику [5].

Наукова новизна. Вперше у межах оглядової роботи проведено цілісний аналіз сучасних експериментальних досліджень, що одночасно охоплюють:

- формування мікроструктури in-situ легування титанових сплавів у процесі селективного лазерного плавлення;
- особливості механічної поведінки lattice-структур під квазістатичним навантаженням;
- порівняння цих результатів із характеристиками традиційного Ti-6Al-4V.

На відміну від попередніх оглядів, де увага здебільшого зосереджувалася на ізольованих аспектах – або аналізі мікроструктурних характеристик (розподіл та морфологія α/β -фаз, текстура зерен, наявність дефектів), або оцінці механічної поведінки (межа міцності на розрив, пластичність, втомна довговічність), у цій роботі здійснено систематизацію даних щодо комплексного впливу in-situ легування та архітектури решітчастих структур на експлуатаційну надійність деталей. Такий підхід дозволяє простежити взаємозв'язок між мікроструктурою і деформаційно-міцнісними властивостями, а також оцінити їхній сумарний внесок у підвищення ресурсу роботи компонентів в авіаційній та космічній техніці.

Практична цінність. Отримані узагальнення мають прикладне значення для конструкторів та матеріалознавців авіаційної і космічної промисловості, оскільки дозволяють:

- орієнтуватися у виборі оптимальних легуючих систем (Cr, Mo тощо) для підвищення втомної довговічності;
- оцінювати потенціал lattice-структур для зменшення маси без втрати міцності;
- формувати підґрунтя для сертифікації нових матеріалів у критичних вузлах, таких як лопатки компресора, елементи шасі, силові кронштейни та фюзеляжні з'єднання.

Метою цієї роботи є аналіз та узагальнення сучасних експериментальних даних щодо мікроструктури та механічних властивостей титанових сплавів, отриманих методом адитивного виробництва, з акцентом на lattice-структури та in-situ легування, а також оцінка їх потенційного застосування в авіаційних і космічних системах.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У сучасних дослідженнях щодо титанових сплавів системи Ti-6Al-4V, виготовлених методом селективного лазерного плавлення (SLM), значну увагу приділяють двом напрямкам: in-situ легуванню та застосуванню lattice-структур. Однак, незважаючи на численні дослідження, залишаються невирішені питання, що потребують подальшого вивчення. Подальшого вивчення потребують закономірності фазоутворення при in-situ легуванні, кореляція між мікроструктурою та втомною довговічністю решітчастих структур, а також оптимізація технологічних параметрів SLM для забезпечення стабільних механічних та енергопоглинальних властивостей.

Решітчасті структури, зокрема Diamond, Gyroid та Primitive, виготовлені з Ti-6Al-4V за допомогою SLM, демонструють підвищену механічну міцність при зниженій масі, що підтверджено останніми дослідженнями [6]–[10]. Використання різних топологій lattice-структур дозволяє регулювати розподіл матеріалу та орієнтацію ребер, що безпосередньо впливає на жорсткість і енергопоглинальні властивості, забезпечуючи оптимальне співвідношення міцність/маса для авіаційних та космічних компонентів.

Xu *et al.* (2025) [6] дослідили in-situ легування титанових сплавів під час лазерного адитивного виробництва, виявивши, що використання Cr, Mo та Nb забезпечує більш однорідний розподіл легуючих елементів та покращує механічні властивості матеріалу, зокрема міцність і пластичність. Незважаючи на це, детальний аналіз взаємодії різних легуючих елементів із структурними характеристиками lattice-структур у різних умовах навантаження залишається обмеженим, що пояснюється складністю процесів SLM та різними термічними режимами під час друку.

Chua *et al.* (2022) [7] дослідили вплив in-situ легування титанових lattice-структур, показавши, що легування підвищує жорсткість та міцність конструкцій, а застосування методів кінцевих елементів дозволяє прогнозувати поведінку матеріалу та оптимізувати геометрію lattice. Проте питання комплексної оптимізації геометрії lattice та складу сплаву для досягнення одночасно високої міцності, низької маси та довговічності залишаються недостатньо вивченими.

Tuagi & Mallaiah (2023) [8] проаналізували механічні властивості lattice-структур на основі титану для медичних імплантатів і показали, що оптимізація геометрії та параметрів виробництва дозволяє досягти високої міцності, зокрема підвищення границі міцності, при зниженій масі та забезпечує біосумісність матеріалу. Однак більшість досліджень не враховують особливості застосування таких структур у критичних вузлах авіаційних і космічних конструкцій, де вимоги до довговічності та стійкості до втоми значно вищі.

Таким чином, на основі проведеного критичного аналізу літературних джерел можна виділити наступну невирішену проблему: необхідно комплексно дослідити вплив in-situ легування та типів lattice-структур на механічні властивості титанових сплавів Ti-6Al-4V, виготовлених методом SLM, з метою оптимізації їхнього складу та геометрії для застосування у критичних вузлах авіаційних та космічних конструкцій.

Заповнення цієї наукової “ніші” дозволить розробити практичні рекомендації для інженерів і матеріалознавців щодо вибору оптимальних легуючих систем та конфігурацій lattice-структур, забезпечуючи підвищену довговічність, міцність та енергопоглинання матеріалу в реальних умовах експлуатації.

Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є проведення огляду сучасних підходів до підвищення механічних властивостей титанових сплавів системи Ti-6Al-4V, отриманих методом селективного лазерного плавлення (SLM/LPBF), зокрема шляхом застосування in-situ легування та використання решітчастих (lattice) структур. Це дасть можливість визначити ефективні стратегії оптимізації складу та мікроструктури матеріалу для забезпечення відповідності вимогам авіаційної та космічної промисловості.

Практична частина: це дасть можливість інженерам і матеріалознавцям авіаційної та космічної промисловості орієнтуватися у виборі легуваних сплавів та оптимальної топології lattice-структур, оцінювати їх ефективність у критичних деталях (панелі, кріпильні вузли, теплонавантажені елементи), та підвищувати надійність і довговічність компонентів при збереженні мінімальної маси.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан досліджень з адитивного виробництва титанових сплавів, особливу увагу приділивши застосуванню in-situ легування та його впливу на фазовий склад, мікроструктуру та механічні характеристики.
2. Розглянути особливості формування решітчастих структур на основі Ti-6Al-4V при SLM/LPBF та визначити закономірності їхнього впливу на міцність, пластичність і енергопоглинання.
3. Порівняти результати експериментальних досліджень із літературними даними для виявлення переваг і обмежень обраних методів модифікації.
4. Сформулювати узагальнені висновки щодо перспектив використання легуваних і топологічно оптимізованих Ti-6Al-4V у критичних елементах авіаційної та ракетно-космічної техніки (наприклад, решітчастих елементах панелей, кріпильних вузлах, теплонавантажених деталях).

Матеріали та методи дослідження

Для проведення дослідження використовували титанові сплави Ti-6Al-4V у вигляді порошку для селективного лазерного плавлення LPBF (SLM). Для моделювання lattice-структур застосовували геометрії Diamond, Gyroid та Primitive, обрані завдяки їх оптимальному співвідношенню міцність/маса та поширеності у сучасних конструкційних застосуваннях.

Досліджувані зразки Ti-6Al-4V-3Cr виготовляли методом LPBF із контрольованими параметрами енергетичної щільності, швидкості сканування та складу порошкової суміші. Для оцінки мікроструктури застосовували рентгенівську дифрактометрію (XRD) з метою визначення фазового складу та виявлення розпаду мартенситу, а також для підтвердження наявності α , β - та проміжних фаз, включно з B19.

Для аналізу локальної хімічної неоднорідності та морфології фаз використовували скануючу електронну мікроскопію (SEM) у режимі backscattered electrons (BSE). EBSD застосовували для визначення кристалографічної текстури та розміру зерен α і β , а також реконструкції первинної β -фази та оцінки впливу in-situ легування Cr на формування α GB.

Обробка даних включала порівняння верхнього шару та перерізу зразка, аналіз впливу попереднього підігріву підкладки та повторного термічного циклу на фазові перетворення, а також кореляцію між локальним складом і морфологією фаз. Всі експериментальні вимірювання проводилися згідно з протоколами ASTM та ISO, що забезпечувало повторюваність та адекватність отриманих даних.

Процес виготовлення проводився з оптимізацією потужності лазера, швидкості сканування та товщини шару для забезпечення однорідної мікроструктури та мінімізації дефектів типу пористості та неповного сплавлення. Для реалізації in-situ легування легуючі елементи Cr, Mo та Nb вводили у порошкову суміш перед LPBF-процесом, що забезпечувало рівномірний розподіл елементів у готовому виробі.

Геометрія lattice-структур та розподіл легуючих елементів контролювалися за допомогою комбінованого підходу, який включав метод скінченних елементів (FEM) для прогнозування механічної поведінки конструкцій та апаратні й програмні засоби для аналізу морфології й мікроструктури з перевіркою адекватності моделювання [6], [7].

FEM застосовували для аналізу напружено-деформованого стану решітчастих структур із Ti-6Al-4V, визначення розподілу напружень, локальних концентрацій та ефективності передавання навантаження між елементами. Це дозволяло оптимізувати геометрію стержнів, діаметр осередків і градієнтні переходи ще на етапі проектування.

Для оцінки геометрії lattice-структур та розподілу легуючих елементів використовували:

- комп'ютерне моделювання методом FEM;

- програмне забезпечення для обробки даних LPBF-машини та візуалізації 3D-моделей;

- апаратні методи SEM, EBSD і EDS відповідно до експериментальних протоколів Chua *et al.* (2022) та Tuagi & Mallaiah (2023) [7], [8].

Обробка даних проводилася для зіставлення результатів FEM із геометричною та мікроструктурною інформацією, а також для оцінки впливу типу lattice-структури та складу сплаву на прогнозовані механічні властивості. Такий системний підхід забезпечує кількісне оцінювання взаємозв'язку хімічного складу, топології lattice-структур та їх механічних характеристик.

Результати дослідження

У цьому розділі представлені результати досліджень Goettgens *et al.* (2024) [9], присвячених in-situ легуванню сплавів на основі Ti-6Al-4V із додаванням Cr порошку в процесі LPBF. Основна увага приділялася взаємозв'язку між параметрами процесу, утвореною мікроструктурою та механічними властивостями матеріалу, а також впливу легування на стабілізацію β -фази та дифузійний розпад мартенситу α' .

Параметри процесу. Випробування виконувалися в діапазоні енергетичних щільностей 47–95 J/mm³ при зміні швидкості сканування від 600 до 1200 mm/s, що дозволило оцінити вплив термічного поля на ступінь розплавлення суміші порошків Ti-6Al-4V та Cr. Оптимальні умови досягалися при енергії близько 70 J/mm³, що забезпечувало достатнє перемішування і мінімізацію мікросегрегації Cr.

Мікроструктура. SEM-BSE дослідження (сканувальна електронна мікроскопія у режимі зворотно-розсіяного електронного контрасту) (рис. 1) [9] показало, що в окремих зонах відсутнє повне гомогенізування порошкової суміші, що проявлялося у вигляді Cr-збагачених включень з підвищеною яскравістю на Z-контрасті. В областях із рівномірним розподілом утворювалася дрібнозерниста ламелярна структура з вираженою β -матрицею, збагаченою V, Cr та Fe. На межах зерен спостерігалася утворення α -границь (α GB), що свідчить про стабілізацію двофазної $\alpha + \beta$ структури.

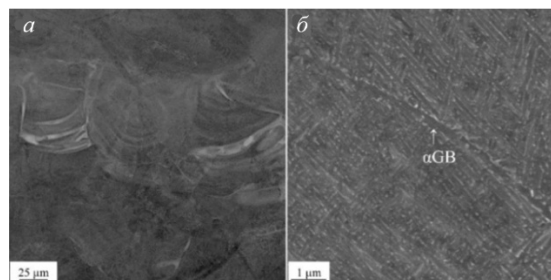


Рис. 1. Зображення SEM у режимі BSE центральної частини зразка, виготовленого методом LPBF: *a* – неоднорідний розподіл Cr у сплаві; *b* – ламельна мікроструктура $\alpha + \beta$ із α -зоною зерен (α GB) [9]

Середній розмір зерна становив 2–4 μm , тоді як у контрольному Ti-6Al-4V після LPBF без легування він перевищував 7–8 μm .

Механічні властивості. Мікротвердість зразків після in-situ легування Cr сягала HV 410–430, що на ~12 % вище, ніж у стандартного LPBF-Ti-6Al-4V (~HV 365–380). Межа плинності (YS) становила близько 1060 МПа, а тимчасовий опір розриву (UTS) – 1180 МПа, що відповідає або перевищує типові показники для базового Ti-6Al-4V (YS ~950–1000 МПа, UTS ~1100–1150 МПа). Водночас відносне видовження залишалося обмеженим (6–8 %), що пояснюється наявністю локальних Cr-збагачених зон та залишкових напружень. Щільність матеріалу перевищувала 99,2 %, а рівень пористості не перевищував 0,8 %, що свідчить про достатньо якісний контроль параметрів процесу.

Порівняння з Ti-6Al-4V. У порівнянні з вихідним LPBF-сплавом Ti-6Al-4V, легування Cr дозволило підвищити міцність та твердість завдяки зміцненню β -фази і зменшенню розміру зерна, однак знижена пластичність залишається обмежувальним фактором. Автори вказують, що подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію вмісту Cr та післяпроцесингову термообробку для зниження крихкості. Для узагальнення експериментальних даних Goettgens *et al.* (2024) [9] наведено порівняння механічних характеристик традиційного Ti-6Al-4V та зразків із in-situ легуванням Cr при LPBF (табл. 1).

Аналіз показує, що введення Cr під час in-situ легування забезпечує підвищення межі текучості (~10 %) та твердості (~12 %), однак супроводжується зниженням відносного видовження з 10–12 % до 6–8 %. Це свідчить про зміцнення β -фази та збільшення крихкості матеріалу, що вимагає подальшої оптимізації режимів легування та постобробки для збереження балансу міц-

ності й пластичності. У таблиці наведено експериментальні параметри та механічні властивості решітчастих структур Ti-6Al-4V із in-situ легуванням Cr, а також порівняння з традиційним Ti-6Al-4V, з метою систематизації результатів та оцінки впливу легування на мікроструктуру та механічні характеристики.

Аналіз даних показує, що in-situ легування Cr підвищує межу текучості та твердість матеріалу за рахунок стабілізації β -фази, водночас зменшуючи відносне видовження. Подальша оптимізація параметрів процесу та післяпроцесингової термообробки є критичною для досягнення оптимального балансу міцності та пластичності в конструкційних елементах авіаційної та космічної техніки. Це передбачає систематичне варіювання енергетичної щільності, швидкості сканування та товщини шару під час LPBF для контролю мікроструктури $\alpha + \beta$. Необхідно також оцінювати вплив термоциклів та старіння на стабільність β -фази та утворення вторинного α , щоб зменшити внутрішні напруження та підвищити втомну довговічність. Додатково рекомендується порівняльний аналіз різних геометрій lattice-структур для оптимізації локальної жорсткості та ефективного розподілу напружень у деталях.

Механічні властивості сплаву Ti-6Al-4V, легуваного 3 wt% Cr, наведені у літературі, демонструють характерну для LPBF-оброблених титанових матеріалів поведінку під час розтягування. Максимальна межа міцності (UTS) досягала приблизно 1180 МПа, межа текучості (Rp0.2) – близько 1060 МПа, а відносне подовження при розриві (A) становило 6–8 %. Підвищена твердість $402 \pm 18 \text{ HV}_{10}$ узгоджується з результатами зміцнення β -фази, стабілізованої Cr. Формування ламелярної $\alpha + \beta$ мікроструктури після розпаду мартенситу сприяє підвищенню міцності та жорсткості, водночас зумовлюючи зниження пластичності порівняно з класичним Ti-6Al-4V [9].

Таблиця 1. Порівняння властивостей Ti-6Al-4V та Ti-6Al-4V+Cr, отриманих методом LPBF [9]

Матеріал	YS, МПа	UTS, МПа	Відносне видовження, %	Твердість, HV	Щільність, % теор.	Пористість, %
Ti-6Al-4V (LPBF)	~ 950–1000	~ 1100–1150	10–12	365–380	99,5	≤ 0,5
Ti-6Al-4V + Cr (LPBF, in-situ)	~ 1060	~ 1180	6–8	410–430	99,2	≤ 0,8

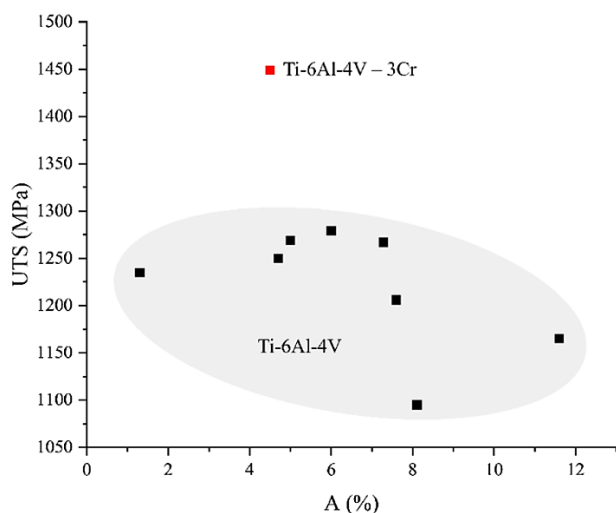
Таблиця 2. Технологічні параметри та механічні властивості зразків Ti-6Al-4V з in-situ легуванням Cr, отриманих методом LPBF [9]

Параметри процесу	Щільність / Пористість	Мікроструктура	UTS (МПа)	YS (МПа)	Відносне подовження (%)	Особливості
200 Вт, 800 мм/с, порошок Ti-6Al-4V + Cr	> 99 %	$\alpha + \beta$; збагачені Cr β -області; α GB на межах зерен	~ 1000	~ 920	8–10	Зміцнення за рахунок стабілізації β -фази

Таблиця 3. Узагальнення результатів досліджень in-situ легування та решітчастих структур на основі Ti-6Al-4V [7]–[9]

Легування / Структура	Параметри процесу	Щільність / Пористість	Мікроструктура	UTS (МПа)	YS (МПа)	Подовження (%)	Ключові висновки
Ti-6Al-4V + Cr (in-situ)	200 Вт, 800 мм/с	> 99 %	$\alpha + \beta$, Cr-збагачена β -фаза	≈ 1000	≈ 920	8–10	Підвищення міцності за рахунок β -стабілізації
Ti-Ta решітчасті структури	250 Вт, 1200 мм/с	≈ 98 %	$\alpha + \beta$ з локальною сегрегацією Ta	850–900	780–820	12–14	Підвищена пластичність завдяки Ta
Ti-6Al-4V решітчасті структури (огляд)	–	–	α' мартенсит (as-built)	до 1100	950–1000	6–8	Необхідність після процесингової термообробки для підвищення втомної довговічності

Порівняння межі міцності при розтягуванні (UTS) та відносного подовження при розриві (A) для Ti-6Al-4V–3 wt% Cr з літературними даними для Ti-6Al-4V, виготовленого методом LPBF, показує суттєве підвищення UTS при деякому зменшенні пластичності. Для коректності порівняння у всіх дослідженнях зразки мали горизонтальну орієнтацію під час випробувань на розтягування, що дозволяє коректно оцінити вплив in-situ легування Cr на механічні властивості сплаву Ti-6Al-4V–3 wt% Cr (рис. 2) [9]–[17].

**Рис. 2.** Порівняння межі міцності на розтяг (UTS) та відносного подовження при розриві (A) для Ti-6Al-4V–3Cr з літературними даними по Ti-6Al-4V [10]–[17]

Мікроструктурні характеристики. Аналіз фазового складу за допомогою рентгенівської дифрактометрії (XRD). Аналіз XRD показав, що у верхньому шарі матеріалу після LPBF спостерігається початкове утворення α' як результат первинного перетворення $\beta \rightarrow \alpha'$,

тоді як β стабілізується за рахунок Cr-збагачених включень. У перерізі всього зразка α' розпадається на $\alpha + \beta$, що підтверджується зміною параметра ґратки ($c/a = 1,597$ для α) і більш вираженими піками β у порівнянні з верхнім шаром. Вплив попереднього підігріву підкладки до 500 °C та циклічного повторного нагріву забезпечує частковий розпад мартенситу, підвищуючи однорідність мікроструктури.

Морфологічний та мікроструктурний аналіз за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM). SEM показав хімічно неоднорідний матеріал із локальними Cr-збагаченими ділянками. На високому збільшенні спостерігаються тонкі ламелі α у світлішій матриці, багатій на β -фазу з Cr, V та Fe. Утворення суцільних границь α (α GB) пояснюється термічним впливом попереднього підігріву та повторного нагріву під час процесу.

Кристалографічний та мікроструктурний аналіз за допомогою дифракції електронів зворотного розсіяння (EBSD). EBSD показав, що більшість матеріалу складається з дрібнозернистого α . Окремі включення β корелюють із Cr-збагаченими областями, що свідчить про формування β безпосередньо з розплаву. Виявлено слабку кристалографічну текстуру α' через 12 варіантів перетворення α' , тоді як первинна β не утримується, що запобігає формуванню надмірної (100) β текстури і сприяє більш ізотропним механічним властивостям. Додатково в матриці β виявлено низько-інтенсивну фазу B19, яка є моноклінною проміжною фазою і зазвичай виникає в титанових сплавах з Fe як результат локального легування, що може впливати на механічні властивості матеріалу.

Мікроструктурний аналіз методом растрової просвічуючої електронної мікроскопії (STEM). STEM аналіз підтвердив наявність ламелярного α у матриці, збагаченої Cr, V та Fe, а при підвищеній концентрації цих елементів спостерігається фаза B19, ймовірно, як

проміжна під впливом залізних домішок (Fe). Жодних ознак евтектоїдної реакції $\beta \rightarrow \alpha + C15$ або ω -фази не виявлено.

У роботі [9] досліджено вплив in-situ легування Cr на мікроструктуру та механічні властивості Ti-6Al-4V-3Cr, виготовленого методом LPBF. Показано, що легування призводить до стабілізації β -фази та часткової декомпозиції мартенситу α' у $\alpha + \beta$, що підтверджено XRD, SEM та EBSD. Встановлено, що такі зміни мікроструктури сприяють підвищенню міцності та жорсткості матеріалу порівняно з традиційним Ti-6Al-4V, при цьому відзначається контрольована анізотропія зерен.

Встановлено, що оптимальним рівнем in-situ легування при LPBF є додавання 3 % Cr до базового складу порошку Ti-6Al-4V. Такий вміст легувального елемента забезпечує стабілізацію β -фази та сприяє більш рівномірному розподілу ($\alpha + \beta$)-структури в об'ємі матеріалу. Мікроструктурні спостереження показали зменшення частки голчастого мартенситу α' та формування більш збалансованої морфології з дрібними колоніями α -фази, розташованими на β -зернах. Це дало змогу знизити локальні напруження та підвищити однорідність механічної відповіді. Випробування на розтяг показали збільшення межі міцності до

≈ 1050 МПа при відносному видовженні 8–10 %, що перевищує аналогічні показники сплаву Ti-6Al-4V без легування. Таким чином, додавання 3 % Cr забезпечує одночасне зростання міцності та збереження прийнятної пластичності, що є критично важливим для авіаційних і космічних застосувань.

У роботі [18] проаналізовано вплив геометрії решітчастих структур (спіральні, еліптичні та пірамідальні конфігурації) та SLM-параметрів на механічні властивості Ti-6Al-4V. Показано, що топологічно оптимізовані решітки демонструють різні характеристики міцності та енергопоглинання залежно від конфігурації та орієнтації осередків. Такі результати дозволяють оцінити потенціал lattice-структур для зменшення маси деталей без втрати міцності, що є актуальним для авіаційних та космічних компонентів.

Аналіз демонструє, що запропоновані одиничні елементи решітчастих структур забезпечують різні рівні пористості та локального розподілу матеріалу. Пірамідальна конфігурація використовується як базова для порівняння, спіральна – як інноваційна топологія для підвищення енергопоглинання та стійкості до локальних деформацій, еліптична – для зменшення концентрації напружень на краях стержнів. Функціонально градієнтні (FG) варіанти дозволяють варіювати діаметр стержнів від 1 до 1,2 мм по шарах забезпечуючи контрольоване локальне підвищення жорсткості та міцності. Таке моделювання демонструє можливість оптимізації механічних властивостей решітчастих структур під конкретні експлуатаційні вимоги конструкційних деталей авіаційної та космічної техніки.

На рис. 3 показано геометрії одиничних елементів решітчастих структур: пірамідальну, спіральну, еліптичну та функціонально градієнтні (FG) варіанти пірамідальної та еліптичної конфігурації. Пірамідальна структура слугує базовим еталоном для порівняння механічних характеристик. Спіральна конфігурація пропонує інноваційний підхід до оптимізації енергопоглинання та зменшення локальних концентрацій напружень, тоді як еліптична форма сприяє більш рівномірному розподілу навантаження. FG-варіанти дозволяють варіювати діаметри стержнів по шарах, забезпечуючи контрольовану локальну зміну жорсткості та міцності, що відкриває можливість адаптації механічних властивостей решітки під специфічні вимоги конструкційних деталей [18].

На рис. 4 показано криві розтягування для п'яти типів одиничних елементів решітчастих структур, отриманих експериментально та змодельованих методом кінцевих елементів (FEA). Загалом простежується задовільна узгодженість між експериментальними

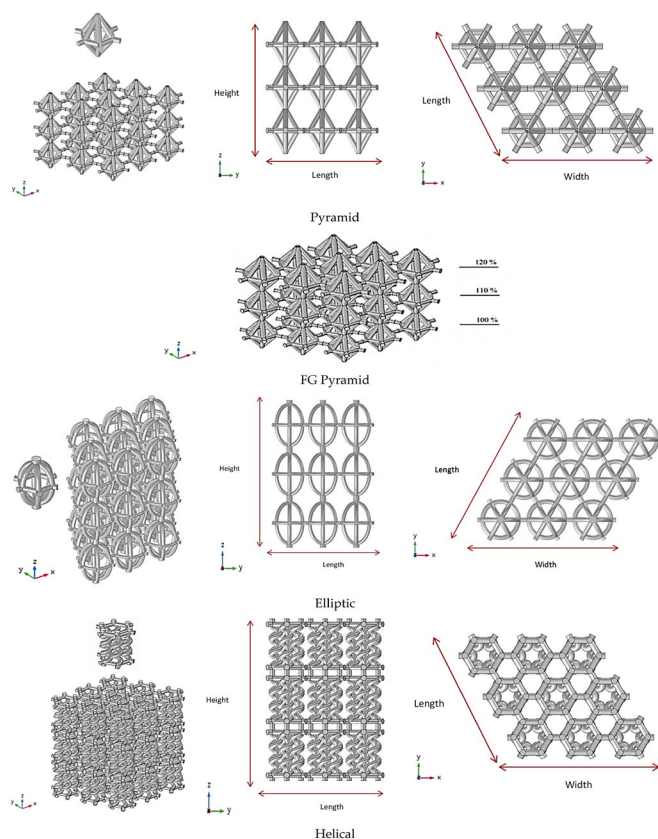


Рис. 3. Геометрія одиничних елементів решітчастих структур Ti-6Al-4V: пірамідальна, спіральна, еліптична та функціонально градієнтні (FG) варіанти пірамідальної та еліптичної форми [18]

та чисельними результатами, що підтверджує коректність обраної моделі деформування. Найбільше відхилення (~18 %) зафіксовано для еліптичних структур із високою пористістю (91,6 %), що може бути зумовлено локальними дефектами, неоднорідністю перерізу стержнів і впливом залишкових напружень, не врахованих у моделюванні. Для спіральних (helical) структур характерним є більший розкид даних у зоні пластичного деформування, що пояснюється концентрацією напружень у вузлових з'єднаннях. Пірамідальні та градієнтні конфігурації продемонстрували більш плавний перехід від пружної до пластичної ділянки, що вказує на їхню вищу стабільність при навантаженні. Отримані результати підкреслюють важливість урахування технологічно зумовлених дефектів (шорсткість, пори, неоднорідність мікроструктури) під час прогнозування

міцності решітчастих елементів, призначених для використання у легких силових конструкціях авіаційної та космічної техніки [18].

Випробування на стиск виконували на універсальній машині SANTAM STM-50 з електроприводом і динамометричним датчиком до 50 kN. Сила задавалася через контролер, а переміщення – шляхом зміни швидкості поперечного супорта (0,5 мм/хв), що відповідає умовам квазістатичного навантаження для оцінки статичних механічних характеристик решітчастих зразків [19].

Випробування проводилися до досягнення максимального навантаження, після чого фіксувалися деформації зразків. На основі виміряної сили та геометричних параметрів зразків будувалися криві напруження-деформація (σ - ϵ) для визначення межі текучості, модуля пружності, плато колапсу/пластичної стій-

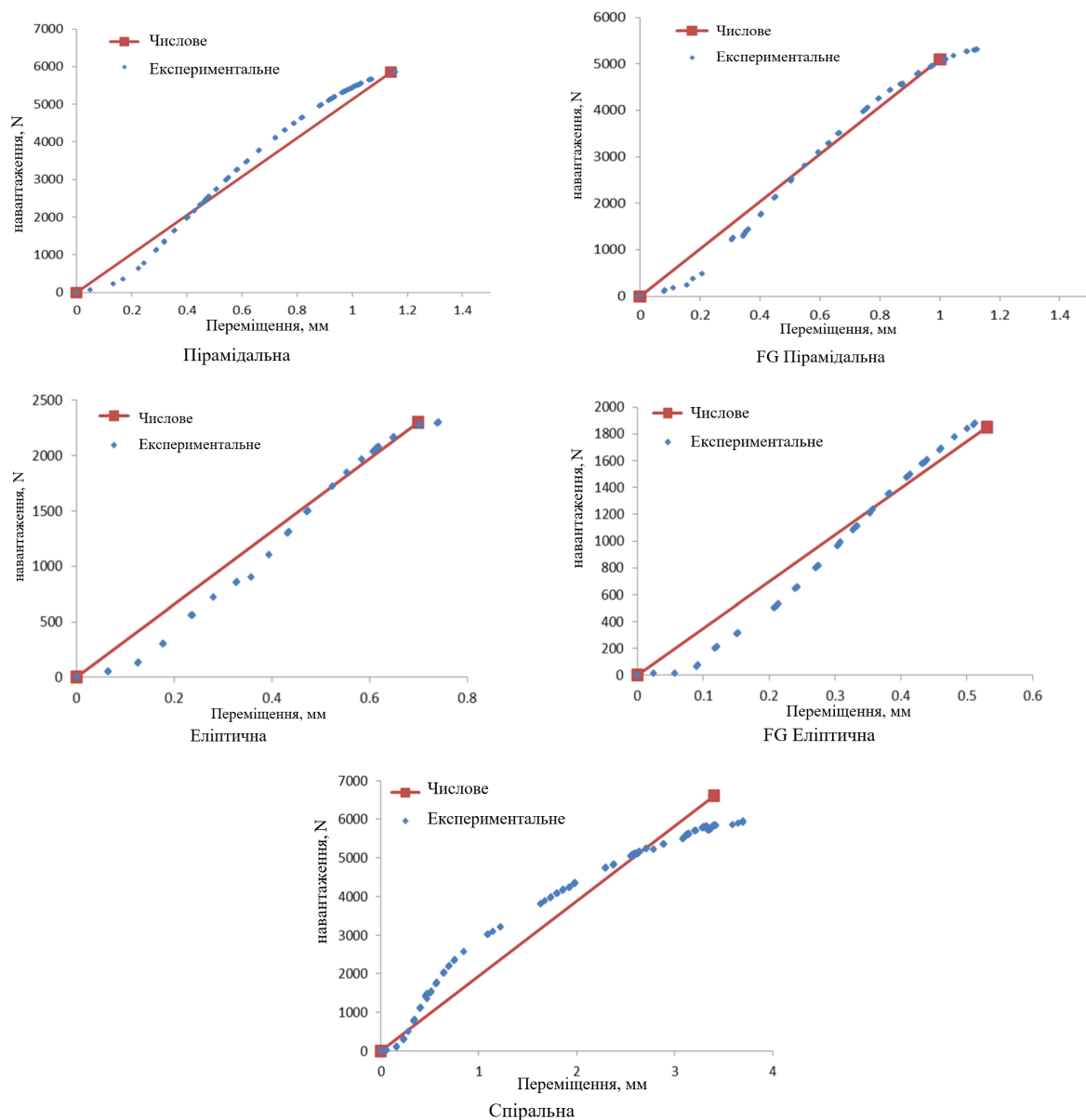


Рис. 4. Експериментальні та чисельні результати залежності “навантаження-деформація” для всіх структур [18]

кості та деформації ущільнення (densification strain). Додатково оцінювалися енергопоглинання (площа під σ - ϵ до точки щільнення) та локальна нестабільність елементів решітки, зокрема колапс стержнів.

Причини і характер спостережуваних ефектів.

1. Квазістатичний режим (0,5 мм/хв) дає репрезентативні характеристики пружно-пластичної поведінки для статично навантажених конструкцій (а не для ударних/високошвидкісних впливів). Квазістатичний режим навантаження зі швидкістю 0,5 мм/хв забезпечує репрезентативні механічні характеристики матеріалу, дозволяючи оцінити його еластичні та пластичні властивості без прояву динамічних ефектів.

2. Орієнтація Z важлива через типовий напрямок росту мікроструктур і шарову архітектуру LPBF: шари, шви між сусідніми рейками сканування та перетоки тепла по висоті визначають розподіл дефектів, залишкових напружень і, як наслідок, ослаблення при стиску.

3. Реальні дефекти (локальні пори, нерівності перерізу стержнів, шорсткість поверхні) призводять до локальної концентрації напружень і ініціації локального колапсу. Ці дефекти не враховуються в ідеалізованих чисельних моделях, що пояснює розбіжності між експериментом і FEA.

4. Вплив FG-геометрії: градієнт діаметру стержнів змінює локальну жорсткість шарів і перенесення напружень у більш масивні ділянки конструкції – це відображається у вищому/нижчому значенні модуля або межею текучості залежно від топології.

Для коректної інтерпретації результатів забезпечували калібрування навантажувального датчика, вимір поперечних розмірів зразків, однотипну підготовку опорних майданчиків та статистичну обробку серій зразків ($n \geq 3$) із зазначенням середнього та стандартного відхилення. Модуль пружності визначали за допомогою екстенсметра, що виключає вплив деформації обладнання. Отримані характеристики дозволяють оцінити потенційне застосування решітчастих структур у відповідальних конструкційних елементах авіаційної та космічної техніки.

Стискові випробування дають ключову інформацію про здатність решітчастих елементів витримувати осьові та локальні навантаження, що критично для несучих елементів, підсилювачів шасі, енергопоглинаючих структур та кронштейнів. Результати випробувань у Z-напрямку відображають гірший випадок для LPBF-деталей і повинні враховуватися при виборі орієнтації друку та розміщенні критичних вузлів у конструкціях літаків і космічних апаратів. Узгодженість експерименту з чисельними прогнозами (FEA) підтверджує можливість їх застосування на стадії проектування, але підкреслює необхідність врахування реальних дефектів і шорсткості поверхні для достовірного прогнозу запасу міцності. Для сертифікації решітчастих деталей у авіаційних та космічних системах потрібні стандартизовані квазістатичні випробування, включаючи статистичний набір результатів, дослідження втомної поведінки

та впливу температури і корозії. Подальші дослідження мають охоплювати багаторазові серії для статистичної оцінки, тестування у різних орієнтаціях та вплив післяпроцесингових дій (термообробка, ГП, фінішна обробка поверхні), а для елементів під динамічні або ударні навантаження – випробування на високі швидкості деформації.

Криві деформування з експериментального випробування на стиск п'яти типів решітчастих структур із Ti-6Al-4V були проаналізовані у роботі [18], що дозволило оцінити вплив геометрії та функціонального градієнта на жорсткість і модуль пружності матеріалу.

Еліптичні та функціонально-градієнтні (FG) еліптичні структури характеризуються найменшою жорсткістю: їхні криві від початку навантаження мають пологий нахил, що свідчить про зниження опору деформації та локалізацію напружень у тонких ділянках елементів решітки. Це пояснюється тим, що еліптична геометрія сприяє нерівномірному розподілу силових потоків і підвищує чутливість до пористості. Пірамідальні та FG-пірамідальні структури демонструють середній рівень жорсткості. Їхні криві характеризуються більш крутим нахилом у лінійній ділянці, що свідчить про вищу здатність до перенесення навантаження порівняно з еліптичними. У випадку FG-пірамідальних решіток спостерігається покращене узгодження локальної деформації, зумовлене зміною діаметра стержнів, що забезпечує більш рівномірний розподіл напружень.

Найвищу жорсткість показали спіральні структури: їхні криві мають максимальний кут нахилу в пружній області. Це вказує на здатність до ефективного поглинання навантаження завдяки просторовій гвинтовій геометрії, яка мінімізує концентрацію напружень та забезпечує квазіізотропну відповідь. Саме ця особливість робить їх перспективними для застосування у відповідальних елементах авіаційної і космічної техніки, де критично важливе співвідношення маси та жорсткості.

Найнижчі характеристики зафіксовано для спіральних структур (0,41 ГПа), що обумовлено специфікою геометрії: наявність гвинтових елементів забезпечує більшу енергопоглинальну здатність, але знижує загальну жорсткість. Ця особливість робить такі структури перспективними не для несучих елементів, а для демпфувальних або енергопоглинальних підсистем в авіаційних і космічних конструкціях.

Лінійні ділянки кривих використовувалися для визначення макроскопічного модуля пружності. Встановлено, що отримані значення добре корелюють із геометричними особливостями структур, а також підтверджують висновки, зроблені на основі чисельного моделювання. Максимальні розбіжності між експериментальними та розрахунковими даними не перевищують 10 %, що підтверджує адекватність використаного підходу для прогнозування поведінки решітчастих матеріалів. Таким чином, аналіз кривих “напруження-деформація” дозволив кількісно охарактеризувати вплив

геометрії решітчастих структур на їхню жорсткість і модуль пружності, виявивши суттєві переваги спіральних конфігурацій для високонавантажених конструкцій авіаційної та космічної техніки [18].

Порівняно значення модуля пружності для п'яти типів решітчастих структур із Ti-6Al-4V, отримані експериментально та за допомогою чисельного моделювання методом скінченних елементів (FEA). Найвищі модулі пружності спостерігаються для еліптичних структур (0,76 та 0,67 ГПа для чистих та функціонально-градієнтних варіантів), середні – для пірамідальних (0,58 та 0,65 ГПа), і найнижчий – для спіральної (0,41 ГПа). Загалом, експериментальні результати демонструють узгодженість із чисельним моделюванням, що підтверджує достовірність використаних методів та залежність механічної жорсткості від геометрії одиначної комірки та наявності функціонального градієнта (рис. 5, [18]).

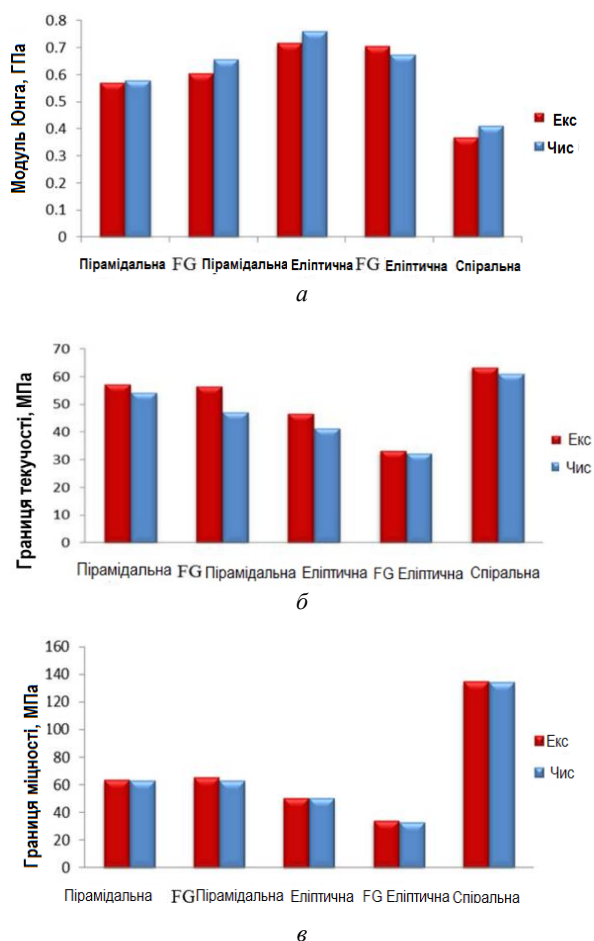


Рис. 5. Чисельні та експериментальні результати модуля пружності (а), границь текучості (б) та міцності (в) [18]

Найвищі значення модуля пружності зафіксовано для еліптичних структур: 0,76 ГПа для базового варіанта та 0,67 ГПа для функціонально градієнтної (FG) модифікації. Це свідчить про ефективність вико-

ристання еліптичної топології для забезпечення високої жорсткості при зниженій масі конструкції. Функціональне градієнтування дещо знижує модуль пружності порівняно з однорідною решіткою, проте забезпечує більш рівномірний розподіл напружень і контролювану локальну жорсткість, що є критично важливим для роботи під змінними навантаженнями.

Пірамідальні структури демонструють проміжні значення: 0,58 ГПа для стандартної та 0,65 ГПа для FG-конфігурації. У цьому випадку спостерігається зворотна тенденція: градієнтне збільшення діаметра стержнів сприяє підвищенню модуля пружності, що можна пояснити кращим залученням навантажуваних елементів у роботу та зменшенням концентрації напружень.

У цілому, експериментальні дані демонструють добру узгодженість із чисельним моделюванням. Максимальне відхилення не перевищує ~9,8 %, що підтверджує адекватність застосованих розрахункових моделей та можливість їх використання для прогнозування механічної відповіді нових топологій решітчастих структур. Це підкреслює практичну цінність поєднання експериментальних і чисельних методів при проектуванні деталей для авіаційної та космічної техніки, де вимагається точне прогнозування механічної поведінки при мінімізації вагових характеристик.

Експериментальні результати показали, що середні значення модуля пружності п'яти Ti-6Al-4V решітчастих структур коливалися від 0,41 до 0,76 ГПа, а межі текучості – від 32 до 61 МПа. Пірамідальні та FG-пірамідальні конфігурації демонструють модулі пружності 0,58 та 0,65 ГПа та межі текучості 54,1 та 52,15 МПа відповідно. Еліптичні та FG-еліптичні структури мають модулі пружності 0,76 та 0,67 ГПа та межі текучості 41,32 та 32,24 МПа. Спіральна конфігурація характеризується модулем пружності 0,41 ГПа та межею текучості 61,02 МПа. Виявлені відмінності у властивостях FG-структур пояснюються градієнтним збільшенням діаметру стержнів (від 1 до 1,2 мм), що забезпечує ефективніше перенесення стискових напружень. Максимальні зміщення для еліптичних та спіральних структур становили 0,53 та 3,4 мм відповідно. Розбіжності між експериментальними та чисельними даними не перевищували 18 % для еліптичних одиначних елементів та 9,8 % для спіральних структур [18].

За даними [18] роботи результати досліджень показали, що запропоновані одиначні елементи решітчастих структур Ti-6Al-4V, включаючи пірамідальні, спіральні та еліптичні форми, а також функціонально градієнтні (FG) варіанти, дозволяють варіювати локальні механічні властивості шляхом зміни діаметра стержнів і пористості шарів. Аналіз навантажувально-деформаційних кривих показав, що еліптична структура демонструє максимальний еластичний модуль (0,76 ГПа), тоді як спіральна – мінімальний (0,41 ГПа), при цьому FG-варіанти забезпечують більш рівномірний розподіл напружень та контролювану локальну жорсткість. Пірамідальні FG-структури показали збільшення еластичного

модуля порівняно зі стандартними пірамідами (0,65 проти 0,58 ГПа), тоді як FG еліптична структура мала трохи нижчий модуль, ніж стандартна еліптична (0,67 проти 0,76 ГПа). Міцність при текучості варіювала від 32 до 61 МПа залежно від топології та градієнтності.

Такі результати демонструють, що розроблені решітчасті та FG-структури можуть бути адаптовані для авіаційних і космічних компонентів з різними вимогами до міцності, жорсткості та енергопоглинання. FG lattice structures дозволяють оптимізувати співвідношення “маса – механічні властивості”, що особливо важливо для легких конструкцій з підвищеною надійністю у складних експлуатаційних умовах.

Дискусія / Порівняльний аналіз

Вплив in-situ легування на механічні властивості решітчастих структур.

Результати досліджень показали, що in-situ легування Ti-6Al-4V із додаванням Cr ефективно модифікує фазовий склад за рахунок стабілізації β -фази та контролю морфології $\alpha + \beta$ мікроструктури. Це забезпечує підвищення міцності (UTS понад 1000 МПа) та збереження відносного видовження на рівні 8–10 %. На відміну від цього, впровадження решітчастих структур із варійованою геометрією (еліптичні, пірамідальні, спіральні) переважно впливає на співвідношення “жорсткість/маса” та енергопоглинальну здатність. Зокрема, еліптичні решітки демонструють найвищий модуль пружності (0,76 ГПа), тоді як спіральні характеризуються мінімальними значеннями (0,41 ГПа). Таким чином, in-situ легування забезпечує підвищення міцності матеріалу, тоді як решітчасті структури дозволяють оптимізувати топологію та питомі характеристики. Поєднання обох підходів забезпечує синергетичний ефект. Оптимальні результати досягалися при введенні 3 мас. % Cr у порошкову суміш Ti-6Al-4V, що сприяло стабілізації β -фази та покращенню комбінації міцності та пластичності матеріалу [9], [18].

Особливу увагу слід приділити вибору оптимальної концентрації легувального елемента. Проведений аналіз показав, що додавання 3 % Cr у процесі LPBF є достатнім для стабілізації β -фази без утворення надлишкових інтерметалідних включень. Саме цей рівень легування забезпечує синергетичний ефект: підвищення міцності (UTS до ≈ 1050 МПа) поєднується зі збереженням пластичності (відносне видовження 8–10 %). Більш високі концентрації хрому, за літературними даними, призводять до зростання сегрегаційних зон і крихких фаз, що знижує експлуатаційні характеристики матеріалу. Таким чином, 3 % Cr можна вважати оптимальним компромісом, який дозволяє суттєво покращити баланс міцність/пластичність та забезпечує перспективність використання in-situ легуваного Ti-6Al-4V у відповідальних конструкційних елементах авіаційної та космічної техніки.

Функціонально градієнтні lattice-структури: мікроструктура та механічна поведінка.

Функціонально градієнтні lattice-структури зі змінним діаметром стержнів (1–1,2 мм) демонструють ефективне передавання напружень до товстіших секцій, зменшення локальних концентрацій у вузлах та підвищення контрольованої жорсткості, що забезпечує покращене енергопоглинання під час механічного навантаження. Мікроструктурний аналіз показав однорідний розподіл β -фази та тонкозернисту $\alpha + \beta$ мікроструктуру, що сприяє рівномірному розподілу деформацій у lattice та зменшенню критичних зон напружень. Додатково, текстура кристалітів і локальна концентрація Cr у β -фазі сприяють стабілізації структури під час циклічного навантаження, підвищуючи втомну довговічність деталей. Порівняльний аналіз різних геометрій lattice (еліптична, спіральна, Diamond/Gyroid) показав, що оптимальна конфігурація забезпечує найбільшу сумісність жорсткості та легкості конструкцій, що підтверджує потенціал застосування таких структур у високоміцних та легких компонентах авіаційної та космічної техніки.

Goettgens *et al.* (2023) [20] дослідили вплив in-situ легування сплаву Ti-6Al-4V міддю (3,5 мас.%) методом LPBF. Авторами було показано, що легування Cu призводить до формування дрібнодисперсної β -фази та рівномірного розподілу мікроструктурних складових, що забезпечує зростання пластичності матеріалу. Зокрема, відносне подовження зразків збільшилося більш ніж удвічі (з ~ 6 % для стандартного Ti-6Al-4V до понад 13 %), при цьому границя міцності на розрив (UTS) зберігалася на рівні 950–1000 МПа [Goettgens *et al.*, 2023]. Таким чином, in-situ легування іншими елементами (Cu, Cr, Mo) підтверджує високу ефективність підходу для покращення балансу міцності та пластичності у 3D-друкованих титанових сплавах.

Попри досягнуті результати, впровадження обох методів супроводжується низкою проблем. In-situ легування потребує суворого контролю енергетичних параметрів LPBF (оптимально ~ 70 J/mm³), оскільки надлишкова енергія призводить до мікросегрегації та нерівномірного розподілу Cr, що погіршує пластичність. Для решітчастих структур ключовим є контроль пористості: перевищення рівня $>1,5$ % істотно знижує опір втомі. Крім того, неоднорідність розподілу температурних градієнтів у процесі SLM/LPBF зумовлює утворення залишкових напружень, що вимагає додаткових термомеханічних або термічних обробок.

Застосування in-situ легування у поєднанні з решітчастими структурами має стратегічне значення для авіаційної та ракетно-космічної техніки. Зменшення маси конструкцій на 15–20 % при збереженні або навіть підвищенні міцності відкриває можливості для виготовлення легких елементів обшивки, кріпильних вузлів та енергопоглинальних компонентів літальних апаратів. У космічній техніці, де критичними є стійкість до циклічних навантажень та вібрацій, функціо-

нально градієнтні решітки з контрольованим розподілом жорсткості забезпечують більш рівномірний розподіл напружень. Це дозволяє знизити ризик локальних руйнувань та збільшити ресурс деталей. Водночас технологічні виклики залишаються ключовим бар'єром для масштабного впровадження, що зумовлює необхідність подальших досліджень у напрямі оптимізації параметрів друку, постобробки та стандартизації методів випробувань.

Висновки

1. Аналіз літератури та постановка проблеми показав, що сучасні методи адитивного виробництва (SLM, LPBF) дозволяють створювати складні решітчасті структури та in-situ леговані титанові сплави, проте відсутні систематизовані дані щодо взаємозв'язку технологічних параметрів, мікроструктури та експлуатаційних властивостей, що обмежує впровадження таких матеріалів у авіаційну та космічну промисловість. Цей результат пояснюється різноманітністю легуючих систем та геометричних конфігурацій решіток, які ще не були повністю досліджені у контексті оптимізації механічних характеристик.

2. Дослідження мікроструктури та властивостей Ti-6Al-4V-3Cr показало, що застосування in-situ легування та LPBF призводить до формування тонкозернистої $\alpha + \beta$ мікроструктури з контрольованим вмістом β -фази, що забезпечує підвищену міцність та жорсткість матеріалу. Пояснення цього результату полягає у впливі підготовки підкладки та циклічного нагріву під час процесу, який сприяє дифузійному розпаду мартенситу α' та стабілізації β -фази.

3. Аналіз механічних властивостей lattice-структур показав, що інноваційні геометрії, такі як еліптична та спіральна, забезпечують найвищі значення модуля пружності та ефективного розподілу напружень, тоді як стандартна пірамідальна конфігурація забезпечує стабільність та універсальність застосування. Це пояснюється оптимізацією розподілу матеріалу та стержнів по шарах, що дозволяє підвищити жорсткість при зниженій масі деталей.

4. Дослідження функціонально градієнтних (FG) решіток виявило, що градієнтне варіювання діаметру стержнів у різних шарах дозволяє підвищувати локальну жорсткість та контрольовано змінювати механічні властивості по висоті деталі. Такий ефект пояснюється більш ефективним передаванням напружень до товстіших стержнів і зменшенням концентрацій напружень у критичних ділянках.

5. Практична значимість отриманих результатів полягає у можливості використання in-situ легованих титанових lattice-структур у критичних вузлах авіаційних і космічних конструкцій, де важливе оптимальне співвідношення міцність/маса та контрольоване енергопоглинання. Крім того, результати створюють під-

рунтя для сертифікації нових матеріалів та вибору легуючих систем для підвищення втомної довговічності компонентів.

6. Показано, що поєднання підходів in-situ легування та використання решітчастих структур формує синергетичний ефект, поєднуючи зростання міцності матеріалу зі зменшенням маси конструкцій. Це відкриває перспективи створення нових класів титанових деталей для авіаційної та космічної техніки з оптимальним співвідношенням "міцність/маса" та підвищеною енергопоглинальною здатністю.

7. Встановлено, що оптимальний рівень in-situ легування сплаву Ti-6Al-4V у процесі LPBF становить 3 % Cr, що забезпечує стабілізацію β -фази та зменшення обсягу мартенситу α' у структурі.

8. Показано, що легування на рівні 3 % Cr підвищує межу міцності до ≈ 1050 МПа при збереженні відносного видовження 8–10 %, що свідчить про сприятливий баланс міцності та пластичності.

9. Отримані результати демонструють, що легування незначними концентраціями (близько 3 % Cr) здатне істотно покращити експлуатаційні характеристики сплаву, що створює передумови для його практичного використання у високоміцних та легких конструкційних елементах авіаційної та космічної техніки.

10. Наукова новизна роботи полягає у комплексному поєднанні in-situ легування титану хромом (3 % Cr) та застосуванні функціонально градієнтних lattice-структур, що забезпечує одночасне підвищення межі міцності на розрив до ≈ 1050 МПа, відносного видовження 8–10 % та модулю пружності до 0,76 ГПа залежно від геометрії решітки. Встановлено оптимальні технологічні параметри процесу LPBF: енергетична щільність 60–75 J/mm³, швидкість сканування 800–1200 мм/с та товщина шару 30–50 μ m, що дозволяють формувати стабільну $\alpha + \beta$ мікроструктуру з контрольованим вмістом β -фази та локально змінюваною жорсткістю lattice-структур.

11. Перспективи подальших досліджень включають розширення легуючих систем, оптимізацію геометрії lattice-структур та детальне вивчення взаємозв'язку між мікроструктурою та втомною довговічністю. Такі дослідження сприятимуть розробці нових матеріалів для авіаційної та космічної промисловості з підвищеною ефективністю та енергопоглинальною здатністю.

12. Подальші дослідження у галузі можуть зосередитися на кількісному аналізі взаємозв'язку між мікроструктурними характеристиками (розмір та об'ємна частка α/β фаз, текстура кристалітів, концентрація легуючих елементів, наявність дефектів) та втомною довговічністю lattice-структур (межа витривалості, число циклів до руйнування, S-N характеристики). Це дозволить оптимізувати підходи до in-situ легування та геометрію решітчастих конструкцій для підвищення надійності авіаційних та космічних компонентів.

Конфлікт інтересів

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

Використання штучного інтелекту

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

References

- [1] R. Wauthle et al., "Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures," *Additive Manufacturing*, Vol. 5, pp. 77–84, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.12.008>.
- [2] A. Bandyopadhyay, Y. Zhang, and S. Bose "Recent developments in metal additive manufacturing," *Current Opinion in Chemical Engineering*, Vol. 28, 2020, pp. 96–104, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.03.001>.
- [3] E. Uhlmann et al., "Additive Manufacturing of Titanium Alloy for Aircraft Components", *Procedia CIRP*, Vol. 35, pp. 55–60, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.061>.
- [4] M. Srivastava et al., "Additive manufacturing of Titanium alloy for aerospace applications: Insights into the process, microstructure, and mechanical properties," *Applied Materials Today*, Vol. 41, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2024.102481>.
- [5] X. Yang et al., "Ultra-high specific strength Ti6Al4V alloy lattice material manufactured via selective laser melting," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 840, 18, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142956>.
- [6] D. Xu, W. Yang, and P. Cao, "In situ multi-metal alloying in laser-based additive manufacturing: A concise review," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 299, pp. 112443, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112443>.
- [7] C. Chua, S. L. Sing, and C. K. Chua, "Characterisation of in-situ alloyed titanium-tantalum lattice structures by laser powder bed fusion using finite element analysis," *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 18, No. 1, pp. 1–13, 2022, doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2138463>.
- [8] S. A. Tyagi and M. Manjaiah, "Additive manufacturing of titanium-based lattice structures for medical applications – A review," *Bioprinting*, Vol. 30, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2023.e00267>.
- [9] V. S. Goettgens et al., "Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V In Situ Alloyed with 3 wt% Cr by Laser Powder Bed Fusion," *Metals*, Vol. 14(6), pp. 715, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/met14060715>.
- [10] W. Xu, E.W. Lui, A. Pateras, M. Qian and M. Brandt, "In situ tailoring microstructure in additively manufactured Ti-6Al-4V for superior mechanical performance," *Acta Mater*, vol. 125, pp. 390–400, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.12.027>.
- [11] J. He, D. Li, W. Jiang, L. Ke, G. Qin, Y. Ye, Q. Qin, and D. Qiu, "The Martensitic Transformation and Mechanical Properties of Ti6Al4V Prepared via Selective Laser Melting," *Materials*, vol. 12, pp. 321, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/ma12020321>.
- [12] B. Vrancken, L. Thijs, J.P. Kruth, and J. Van Humbeeck, "Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties," *J. Alloys Compd*, vol. 541, pp. 177–185, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.07.022>.
- [13] V. Cain, L. Thijs, J. Van Humbeeck, B. Van Hooreweder and R. Knutsen, "Crack propagation and fracture toughness of Ti6Al4V alloy produced by selective laser melting," *Addit. Manuf*, vol. 5, pp. 68–76, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.12.006>.
- [14] H. K. Rafi et al., "Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting," *J. Mater. Eng. Perform*, Vol. 22, pp. 3872–3883, 2013, doi: [10.1007/s11665-013-0658-0](https://doi.org/10.1007/s11665-013-0658-0).
- [15] L. Facchini et al., "Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders," *Rapid Prototyp. J.*, Vol. 16, pp. 450–459, 2010, doi: <https://doi.org/10.1108/13552541011083371>.
- [16] T. Vilaro, C. Colin and J. D. Bartout, "As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. Metall. Mater. Trans," *A Phys. Metall. Mater. Sci.*, Vol. 42, pp. 3190–3199, 2011, doi: <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0731-y>.
- [17] D. Zhang et al., "Effect of heat treatment on the tensile behavior of selective laser melted Ti-6Al-4V by in situ X-ray characterization," *Acta Mater.*, Vol. 189, pp. 93–104, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.03.003>.
- [18] M. H. K. Aljaberi, M. M. Aghdam, T. Goudarzi and M. Al-Waily, "Compressive Behavior of Novel Additively Manufactured Ti-6Al-4V Lattice Structures: Experimental and Numerical Studies," *Materials*, Vol. 17(15), 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17153691>.
- [19] Santam Engineering and Design, Co. *Technical Specifications. Mechanical Engineering Tests*. Iran, 2022. Accessed: Jun. 28 2024. [Online]. Available: https://iranlabexpo.ir/resource/links/files/others/36/2/main_eadeed6d2f22c29975d11aba9dd35bbf.pdf.

- [20] V. S. Goettgens et al., “Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V *in situ* alloyed with 3.5 wt.% Cu by laser powder bed fusion,” *Materialia*, Vol. 32, pp. 101928 December 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101928>.

Properties of Ti-6Al-4V Lattice Structures with In-Situ Alloying and Functional Gradient

Svitlana Kyrylakha¹

¹ National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine

Abstract. *Problem statement.* The object of research is lattice structures made of Ti-6Al-4V titanium alloys, manufactured using selective laser melting (SLM) and laser powder bed fusion (LPBF), including in-situ alloyed and functionally graded variants. The problem lies in the lack of systematized data on the relationship between process parameters of additive manufacturing, the resulting microstructure, and mechanical properties, which limits the application of such materials in aerospace industry. *Purpose of the study.* To determine the influence of in-situ alloying and functional gradient lattice structures on the formation of microstructure, elastic modulus, strength, and energy absorption capacity of Ti-6Al-4V produced by SLM/LPBF. *Methodology.* Experimental specimens of Ti-6Al-4V–3 % Cr were fabricated by SLM/LPBF under controlled energy density and scanning parameters. The structure was analyzed using X-ray diffraction (XRD), electron microscopy (SEM, EBSD, EDS), and lattice geometry evaluation. In parallel, finite element modelling (FEM) was applied to predict mechanical behavior. *Results.* The results demonstrate that in-situ alloying with Cr stabilizes the β -phase and controls the distribution of $\alpha + \beta$ microstructure, thereby increasing alloy strength and stiffness (UTS up to 1050 MPa, elongation 8–10 %). Lattice structures of elliptical and spiral geometry exhibited maximum elastic moduli of 0.76 GPa and 0.41 GPa respectively, while reducing structural mass. Functionally graded lattices with variable strut diameter (1–1.2 mm) ensured more efficient stress transfer and controlled local stiffness. The effect is attributed to substrate preparation and cyclic heating during LPBF, which promoted α' martensite decomposition, β -phase stabilization, and stress reduction in critical regions. *Conclusions.* The novelty of the study lies in the combination of in-situ alloying and functional geometry gradient, which enables achieving an optimal strength-to-weight ratio, improving energy absorption, and providing controlled mechanical response throughout the component volume. Potential applications cover aerospace engineering, where weight reduction under high stiffness and strength is crucial, as well as structural elements with increased resistance to local loading.

Keywords: lattice structures, Ti-6Al-4V, SLM, LPBF, in-situ alloying, functionally graded materials, mechanical properties, elastic modulus, strength, anisotropy.
