

МАШИНОБУДУВАННЯ (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЯМИ)

УДК 621.791:621.785

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-2-70.33>

Кирилах С. В., здобувачка вищої освіти кафедри
«Інтегровані технології зварювання та моделювання конструкцій»
Національного університету «Запорізька політехніка»
ORCID: 0009-0001-5688-5616

ВПЛИВ ФРИКЦІЙНО-ЗМІШУВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ (FRICTION STIR PROCESSING) НА МІКРОСТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АДИТИВНО ВИГОТОВЛЕНОГО Ti-6Al-4V

У роботі досліджено вплив фрикційно-змішувальної обробки (Friction Stir Processing, FSP) на мікроструктуру та механічні властивості адитивно виготовленого титаново-алюмінієвого сплаву Ti-6Al-4V. Розглянуто гібридний технологічний маршрут «адитивне виробництво + FSW», який включає процес електронно-променевого плавлення (EBM) для виготовлення вихідних зразків та подальше фрикційно-змішувальне зварювання (FSW) з детальним аналізом зон шва: зона перемішування (SZ), термомеханічно впливова зона (TMAZ) та зона, що не зазнала впливу тепла (HAZ). Проведено мікроструктурну характеристику із визначенням орієнтації зерен, рекристалізації β -фази та градієнту деформації, а також оцінено механічні властивості швів, включно з межею міцності на розрив і пластичністю. Порівняльний аналіз з результатами FSW чистого титану дозволив виділити специфічні особливості адитивно виготовленого Ti-6Al-4V, такі як вплив початкової колонної структури та дефектів плавленої мікроструктури на формування дрібнозернистої SZ і механічну стабільність шва. Висновки підкреслюють, що оптимізація параметрів FSW критично впливає на мікроструктурну однорідність та підвищення експлуатаційних властивостей, що робить технологію перспективною для авіаційної та транспортної галузей. Результати дослідження створюють наукову основу для подальшого вдосконалення гібридних маршрутів AM + FSW і прогнозування механічної поведінки адитивно виготовлених деталей під високим навантаженням.

Ключові слова: Friction Stir Processing, адитивне виробництво, Ti-6Al-4V, мікроструктура, зона перемішування (SZ), термомеханічно впливова зона (TMAZ), зона термічного впливу (HAZ), β -фаза, механічні властивості, гібридні технологічні маршрути, електронно-променеве плавлення (EBM), фрикційно-змішувальне зварювання (FSW), авіаційні конструкційні деталі.

Kyrylakha S. V. Effect of Friction Stir Processing (FSP) on the Microstructure and Mechanical Properties of Additively Manufactured Ti-6Al-4V

This study investigates the influence of Friction Stir Processing (FSP) on the microstructure and mechanical properties of additively manufactured Ti-6Al-4V alloy. A hybrid technological route, “additive manufacturing + friction stir welding (AM + FSW),” was employed, involving electron beam melting (EBM) for the fabrication of initial samples, followed by FSP to enhance structural integrity. The research focuses on the detailed characterization of weld zones, including the stir zone (SZ), thermomechanically affected zone (TMAZ), and heat-affected zone (HAZ). Microstructural analysis was conducted to evaluate grain orientation, β -phase recrystallization, and deformation gradients, while mechanical testing assessed ultimate tensile strength and plasticity. Comparative analysis with conventional FSW of pure titanium highlighted specific features of additively manufactured Ti-6Al-4V, such as the influence of the initial columnar grain structure and intrinsic melting-induced defects on the formation of a fine-grained SZ and the overall mechanical performance of the joints. Results indicate that optimization of FSP parameters, particularly tool rotational speed and traverse rate, critically affects microstructural homogeneity, defect elimination, and enhancement of mechanical properties. The findings demonstrate that the hybrid AM + FSW route can effectively compensate for typical additive manufacturing defects, improving isotropy, tensile strength, and ductility of structural components. This research provides a scientific basis for the further development and optimization of hybrid manufacturing routes, allowing for the prediction and control of mechanical behavior in high-performance Ti-6Al-4V components intended for aerospace and transport applications. The integration of additive manufacturing with friction stir processing represents a promising strategy to produce reliable, high-quality titanium alloy components with enhanced durability and mechanical resilience.

Key words: Friction Stir Processing, additive manufacturing, Ti-6Al-4V, microstructure, stir zone (SZ), thermomechanically affected zone (TMAZ), heat-affected zone (HAZ), β -phase, mechanical properties, hybrid manufacturing routes, electron beam melting (EBM), friction stir welding (FSW), aerospace structural components.

© С. В. Кирилах, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми. У сучасному машинобудуванні та авіаційній галузі зростає потреба у високоміцних, легких та довговічних конструкційних матеріалах. Титановий сплав Ti-6Al-4V завдяки поєднанню високої міцності, корозійної стійкості та низької щільності є одним із пріоритетних матеріалів для виготовлення відповідальних деталей літаків, космічної та транспортної техніки. Однак традиційні методи виготовлення та зварювання цього сплаву обмежені низькою продуктивністю та високою ймовірністю дефектів, таких як пористість, тріщини та неоднорідність мікроструктури, що негативно впливає на механічні властивості виробів.

Адитивні технології (AM), зокрема електронно-променеве плавлення (EBM), дозволяють виготовляти складні геометричні конструкції, але створюють специфічні дефекти та колонну морфологію зерен, які зумовлюють анізотропію механічних властивостей. У цьому контексті фрикційно-змішувальне зварювання (FSW) виступає ефективним методом модифікації мікроструктури, усунення дефектів AM-деталей і підвищення механічної продуктивності.

Аналіз останніх досліджень (Singh, 2020; Rubino, 2019) показує, що поєднання адитивного виробництва з FSW (гібридний технологічний маршрут «AM + FSW») дозволяє значно поліпшити мікроструктурні та механічні характеристики деталей Ti-6Al-4V. Проте досі залишаються невирішеними питання:

- точне визначення впливу параметрів FSW на градієнт деформації та β -фазу в зоні перемішування (SZ);
- механізми формування термомеханічно впливової зони (TMAZ) і її взаємозв'язок із вихідною колонною структурою AM-матеріалу;
- оптимізація швидкості обертання та переміщення інструмента для досягнення балансу між міцністю та пластичністю без утворення дефектів.

Таким чином, існує потреба у комплексному дослідженні мікроструктурної еволюції та механічних властивостей Ti-6Al-4V, виготовленого AM і обробленого FSW, що дозволить сформулювати рекомендації щодо оптимізації гібридних технологічних маршрутів для авіаційних та транспортних застосувань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиліття вивчення мікроструктурних та механічних характеристик титанових сплавів, зокрема Ti-6Al-4V, виготовлених за допомогою адитивних технологій та оброблених методом фрикційно-змішувального зварювання (FSW), стало предметом численних досліджень. Ці роботи спрямовані на вдосконалення технологічних процесів, підвищення якості з'єднань та розширення застосування таких матеріалів у високонавантажених конструкціях.

1. Вплив параметрів FSW на мікроструктуру та механічні властивості Ti-6Al-4V

У статті автори Rajath et al. (2024) [1] здійснили всебічний огляд параметрів FSW, що впливають на мікроструктуру та механічні властивості Ti-6Al-4V. Автори відзначають, що оптимізація швидкості обертання інструмента та швидкості переміщення може значно покращити механічні характеристики, зокрема міцність на розрив та втомну міцність, завдяки утворенню дрібнозернистої структури в зоні перемішування (SZ) [1].

2. Мікроструктурні зміни в адитивно виготовлених зразках Ti-6Al-4V після FSW

Досліджено Singh et al. (2020) [2] мікроструктурні зміни в адитивно виготовлених зразках Ti-6Al-4V після FSW. Вони виявили, що колонна структура, характерна для зразків, виготовлених методом електронно-променевого плавлення (EBM), руйнується під час FSW, що призводить до формування дрібнозернистої структури в SZ та часткової рекристалізації в термомеханічно впливовій зоні (TMAZ) [2].

3. Використання віртуального FSW для оптимізації процесу

У статті, [3] опублікованій у 2024 році, розглянуто використання віртуального FSW (VFSW) для оптимізації параметрів процесу при зварюванні Ti-6Al-4V. Цей підхід дозволяє моделювати процес зварювання та прогнозувати мікроструктурні зміни, що сприяє більш точному налаштуванню параметрів процесу.

4. Вплив швидкості обертання інструмента на мікроструктуру

Дослідження, проведене Brayden Terry et al. (2024), [4] встановило, що швидкість обертання інструмента має значний вплив на мікроструктуру та механічні властивості Ti-6Al-4V при FSW. Збільшення швидкості обертання призводить до підвищення температури в зоні зварювання, що сприяє кращій пластичній деформації та утворенню дрібнозернистої структури.

5. Використання нових технологій FSW

У роботі, опублікованій у 2023 році, розглянуто використання нових технологій FSW, таких як Additive Friction Stir Deposition (AFSD), для виготовлення частин у твердому стані без досягнення температури плавлення. Цей підхід дозволяє створювати складні геометричні форми з високою точністю та мінімізацією теплових деформацій [5].

6. Дослідниками Liu H та інші було продемонстровано [6] вплив параметрів фрикційно-змішувального зварювання (FSW) на мікроструктуру та механічні властивості чистого титану. Було встановлено:

Мікроструктура: утворюється чітка зональна структура шва – SZ, TMAZ, HAZ. У SZ спостерігається дрібнозерниста структура через інтенсивну пластичну деформацію; TMAZ характеризується частковою деформацією та нагрівом без повного перемішування; HAZ зберігає початкову структуру.

Механічні властивості: підвищення швидкості обертання інструмента покращує міцність на розрив та пластичність шва.

Текстура та орієнтація зерен: FSW руйнує колонну орієнтацію зерен, сприяючи більш ізотропній структурі.

Мета статті – метою цієї роботи є аналіз впливу фрикційно-змішувальної обробки (Friction Stir Processing, FSP) на мікроструктуру та механічні властивості адитивно виготовленого титаново-алюмінієвого сплаву Ti-6Al-4V, а також оцінка ефективності гібридного технологічного маршруту «адитивне виробництво + FSW» для підвищення механічної стабільності та якості зварних з'єднань у конструкційних матеріалах авіаційного та транспортного призначення.

Виклад основного матеріалу. Фрикційно-змішувальна обробка (FSP) є перспективною технологією для удосконалення механічних властивостей матеріалів, особливо в контексті адитивного виробництва. Цей метод дозволяє значно покращити характеристики матеріалу, зокрема його міцність, твердість та витривалість, шляхом локального змішування та рекристалізації мікроструктури. Особливо актуальним є застосування FSP до титанових сплавів, таких як Ti-6Al-4V, які широко використовуються в аерокосмічній та медичній промисловості завдяки своїй високій міцності та корозійній стійкості [7, 8, 9, 10, 11].

Фрикційно-змішувальна обробка (FSP) – це технологія обробки металів у твердому стані, яка була розроблена на основі методу фрикційного зварювання. Вона полягає у зануренні обертового інструмента в заготовку та його переміщенні уздовж неї при значущому осьовому навантаженні. У результаті генерується локальний нагрів, матеріал пластично деформується, відбувається перемішування та рекристалізація мікроструктури, що сприяє тоншому зерну і покращеним механічним властивостям (міцність, твердість, витривалість) [10, 11].

Сучасні дослідження у галузі обробки титанових сплавів, зокрема Ti-6Al-4V, демонструють ефективність гібридних технологічних маршрутів «AM + FSW», що поєднують переваги адитивного виробництва (Additive Manufacturing, AM) та фрикційного зварювання з перемішуванням (Friction Stir Welding, FSW). Такий підхід дає змогу не лише усунути дефекти, характерні для адитивних процесів (пори, неоднорідна мікроструктура, залишкові напруження), а й сформувати дрібнозернисту рекристалізовану структуру з підвищеною міцністю та пластичністю. У результаті гібридна схема «AM + FSW» розглядається як перспективна технологічна стратегія для виготовлення високоміцних з'єднань і зміцнених поверхонь титанових деталей, призначених для авіаційного та транспортного машинобудування.

Відповідно до дослідження Singh et al. (2020) [2, с. 392–397], мікроструктура адитивно виготовленого сплаву Ti-6Al-4V, обробленого методом фрикційно-змішувального зварювання, характеризується чітко вираженою зональною будовою – зоною перемішування (SZ), термомеханічно деформованою зоною (TMAZ) та зоною термічного впливу (HAZ). У вихідному адитивному матеріалі спостерігалася колонна морфологія зерен, орієнтованих уздовж напрямку нарощування шарів, що зумовлювало значну анізотропію властивостей. Після FSW така орієнтація повністю руйнується внаслідок інтенсивної динамічної рекристалізації у SZ, де формується дрібнозерниста $\alpha+\beta$ -структура з розміром зерен 3–5 мкм. У межах α -пластин фіксується залишкова β -фаза, яка утворюється внаслідок швидкого охолодження та сприяє підвищенню в'язкості й зниженню схильності до крихкого руйнування. На межі SZ і TMAZ спостерігається градієнт деформації, що виявляється у поступовій зміні морфології зерен від рівномірної в зоні перемішування до витягнутої в TMAZ. У TMAZ α -пластини частково орієнтовані за напрямком обертання інструмента, що зумовлює локальну текстуру. Структура HAZ при цьому залишається близькою до вихідної $\alpha+\beta$ -морфології, зазнаючи лише незначного видовження пластин під дією теплового впливу. Для всіх зон характерна відсутність пор і тріщин, що свідчить про високу ефективність FSW як методу ущільнення адитивних матеріалів. Підвищення швидкості обертання інструмента (від 400 до 700 об/хв) інтенсифікує процес рекристалізації, сприяючи утворенню дрібнозернистої рівномірної структури та покращенню поєднання міцності й пластичності матеріалу [2].

У порівнянні з традиційними плавленими процесами, FSP дозволяє зменшити дефекти, властиві металургії плавлення (пори, тріщини, крупні зерна), що робить її особливо актуальною для адитивного виробництва, де ці дефекти часто присутні [1, 2].

Згідно з роботою [2, с. 392–401], на рисунку 1 представлено інтегрований процес виготовлення та з'єднання зразків із Ti-6Al-4V, а також подальшу механічну характеристику:

1. Технологічна схема (ліворуч):

Показано процес електронно-променевого плавлення (EBM) для виготовлення пластин із Ti-6Al-4V. Заготовки формуються у вигляді порошкової подушки, яка під дією електронного променя плавиться і ущільнюється шар за шаром. Цей процес дозволяє отримати деталі зі складною геометрією, однак у матеріалі можуть залишатися дефекти, такі як пористість та неоднорідність мікроструктури.

2. Мікроструктурна характеристика (центр):

Далі зразки піддаються фрикційному зварюванню з перемішуванням (FSW). Мікрофотографії показують три основні зони зварного шва:

– Зона перемішування (SZ) – зона інтенсивної пластичної деформації та рекристалізації, де формуються дрібні, пластинчасті зерна.

- Термомеханічно впливова зона (TMAZ) – область, де відбувається часткова деформація та нагрівання без повного перемішування.
- Зона, що не зазнала впливу тепла (HAZ) – структура залишається аналогічною вихідному матеріалу.

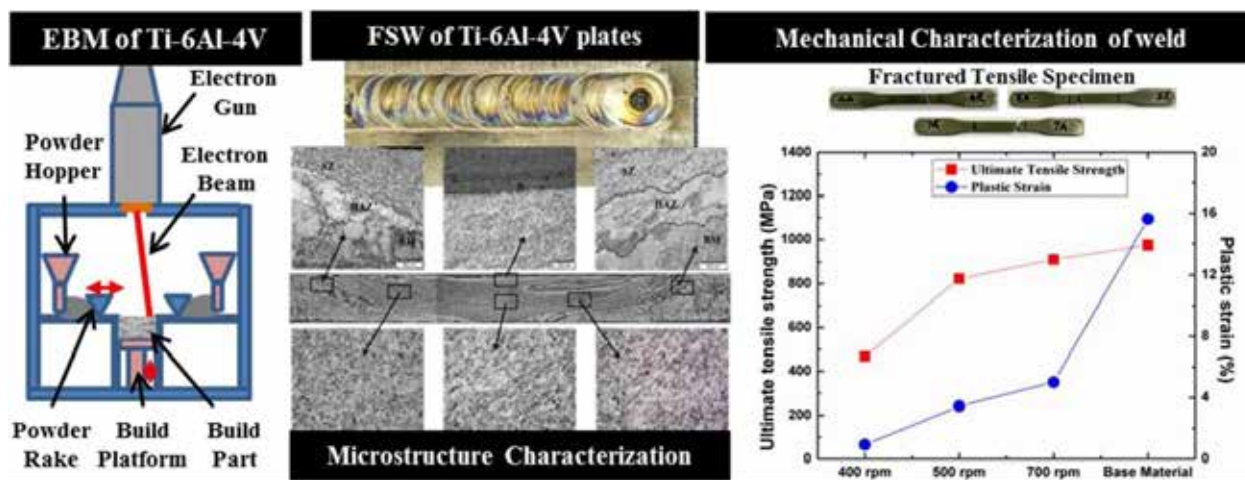


Рис. 1. Схема експериментальної методики: (а) процес електронно-променевого плавлення (EBM) Ti-6Al-4V; (б) фрикційно-змішувальне зварювання (FSW) та мікроструктурна характеристика; (с) результати механічних випробувань зварного шва

Джерело: [2]

Мікроструктурні зони після FSW/FSP

Зона перемішування (SZ) – зона інтенсивної пластичної деформації та рекристалізації, де формуються дрібні, пластинчасті зерна. У цій зоні відбувається повна динамічна рекристалізація, структура стає однорідною, дрібнозернистою, що сприяє покращенню механічних властивостей, зокрема межі міцності на розрив і пластичності.

Термомеханічно впливова зона (TMAZ) – область, де відбувається часткова деформація та нагрівання без повного перемішування. Характеризується частковою пластичною деформацією та частковою рекристалізацією зерен, розташована між SZ та HAZ. Структура зерен змінюється, але зберігає деякі особливості вихідного матеріалу, що визначає проміжні механічні властивості.

Зона, що не зазнала впливу тепла (HAZ) – структура залишається аналогічною вихідному матеріалу, проте можуть спостерігатися незначні термічні зміни, які практично не впливають на механічні властивості.

Базовий матеріал (BM, Base Material) – область, яка не піддавалася жодному термічному або механічному впливу під час FSW/FSP. Зберігає початкову мікроструктуру після адитивного виробництва або лиття, з властивостями, характерними для вихідного матеріалу.

Відзначається еволюція мікроструктури від грубих колонних зерен у вихідному EBM-матеріалі до дрібнозернистої, більш однорідної структури в SZ. Це підтверджує ефективність FSW у покращенні матеріальних характеристик шляхом змішування та динамічної рекристалізації.

3. Механічні результати (праворуч):

Механічне випробування демонструє вплив швидкості обертання інструмента на межу міцності на розрив (UTS) та пластичну деформацію. Результати такі:

400 rpm: UTS $\approx$ 900–950 MPa, пластична деформація $\approx$ 6–7 %.

500 rpm: UTS $\approx$ 1100 MPa, пластичність $\approx$ 10–12 %.

700 rpm: UTS наближається до міцності базового матеріалу ($\sim$ 1200 MPa), пластичність $>$ 15 %.

Зі збільшенням швидкості обертання інструмента спостерігається покращення механічних властивостей, що пояснюється більш інтенсивним перемішуванням матеріалу та дрібнозернистою рекристалізацією у зоні перемішування. Це дозволяє зменшити дефекти, характерні для EBM-процесу, і підвищити стійкість зварного шва до навантажень.

Таким чином, представлений на рисунку процес демонструє повний ланцюг «виробництво – зварювання – механічна характеристика» для Ti-6Al-4V. Це підкреслює важливість інтегрованого підходу до моделювання залишкових напружень, еволюції мікроструктури та механічної відповіді матеріалу для підвищення експлуатаційних характеристик компонентів авіаційного транспорту [2, с. 392–401].

Аналіз мікроструктури та механічних властивостей Ti-6Al-4V після FSW

Згідно з роботою [2, с. 392–401], застосування фрикційного зварювання з перемішуванням (FSW) до адитивно виготовлених заготовок Ti-6Al-4V суттєво впливає на мікроструктуру та механічні властивості

матеріалу. До обробки, матеріал, виготовлений методом EBM, характеризується колонною зернистою структурою та наявністю пористості й неоднорідного розподілу фаз α та β . Після FSW спостерігається чітка зона градієнту властивостей:

Зона перемішування (SZ) демонструє дрібнозернисту структуру з пластинчастими елементами α -фази та ознаками динамічної рекристалізації, що підвищує однорідність та пластичну деформацію.

Термомеханічно впливova зона (TMAZ) характеризується частковим змішуванням та деформацією зерен, із збереженням деяких особливостей вихідного матеріалу.

Зона, що не зазнала впливу тепла (HAZ) практично зберігає структуру базового матеріалу, але може мати незначні зміни через тепловий вплив.

Механічні випробування показують, що збільшення швидкості обертання інструмента від 400 до 700 г/хв сприяє підвищенню межі міцності на розрив від ≈ 900 – 950 МПа до ≈ 1200 МПа та збільшенню пластичної деформації від 6–7 % до понад 15 %. Це свідчить про ефективність FSW у зменшенні дефектів, характерних для EBM, та покращенні механічних властивостей через інтенсивніше перемішування матеріалу та дрібнозернисту рекристалізацію.

Додатково, Rubino et al. (2019) [7, с. 321–331] підтверджує ці тенденції, водночас надаючи більш детальну характеристику поверхневих і внутрішніх змін. Автори відзначають, що після FSW з'являється більш однорідна $\alpha+\beta$ структура у SZ, зменшуються розміри колонних зерен та вирівнюється розподіл фаз, що впливає на рівномірність пластичного потоку та зносостійкість. TMAZ і HAZ демонструють аналогічні зміни, але з менш вираженою рекристалізацією та залишковими ознаками вихідної структури.

Порівняння двох робіт дозволяє зробити висновок, що оптимізація параметрів FSW (швидкість обертання, швидкість подачі, температура) критично впливає на кінцеві механічні характеристики та мікроструктурну однорідність (табл. 1).

Таблиця 1

Мікроструктурні зміни після FSW

Зона	Характеристика мікроструктури	Механічні властивості
SZ	Дрібнозерниста $\alpha+\beta$ структура, рекристалізація, однорідність, зменшені колонні зерна	Збільшення UTS до ≈ 1200 МПа, пластичність >15 %
TMAZ	Часткове перемішування, деформація зерен, збереження деяких особливостей базової структури	Помірне збільшення UTS, пластичність 10–12 %
HAZ	Залишкова структура базового матеріалу, незначні термічні зміни	Мінімальні зміни UTS і пластичності, можливі залишкові напруження

Джерело: [2, 7]

На основі порівняння двох робіт можна зробити висновок, що FSW після адитивного виробництва значно покращує мікроструктурну однорідність і механічні характеристики Ti-6Al-4V. Основний ефект досягається у SZ, де дрібнозерниста структура і рекристалізація підвищують міцність і пластичність, а TMAZ і HAZ демонструють менший вплив, що підтверджує важливість точного контролю параметрів обробки. Таке порівняння дозволяє не лише оцінити ефективність FSW, а й виділити ключові напрямки оптимізації процесу для досягнення стабільної якості зварних з'єднань у адитивно виготовлених деталях авіаційного транспорту.

Мікроструктурна еволюція та механічні властивості FSW-з'єднань Ti-6Al-4V. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на оптимізацію технологічних параметрів процесу фрикційного зварювання з перемішуванням (FSW) – зокрема, швидкості обертання інструмента, швидкості подачі, осьового зусилля та геометрії штифта. Це дозволить керовано формувати мікроструктуру в зоні перемішування (SZ) шляхом контролю співвідношення між тепловим і механічним внеском енергії, що визначає інтенсивність динамічної рекристалізації та зернової рафінації.

Особливу увагу слід приділяти зниженню залишкових напружень і гетерогенності структури в перехідних зонах (TMAZ і HAZ), оскільки саме вони є потенційними концентраторами напружень і місцями зародження втомних тріщин. Оптимізація параметрів FSW у поєднанні з попереднім моделюванням теплових полів та швидкостей деформації може забезпечити баланс між високою міцністю з'єднання та достатньою пластичністю, що є критично важливим для адитивно виготовлених елементів з Ti-6Al-4V, які працюють під змінними навантаженнями.

Крім того, доцільним є поєднання FSW із локальними термомеханічними або термічними постобробками, спрямованими на усунення пор і текстурних неоднорідностей, притаманних виробам, виготовленим методами електронно-променевого або лазерного плавлення порошкового шару (EBM, SLM). Такі підходи відкривають перспективи для створення гібридних технологічних маршрутів «AM + FSW», що забезпечують підвищену надійність і прогнозовані механічні характеристики з'єднань.

Здійснено детальний аналіз мікроструктурних зон SZ, TMAZ та HAZ адитивно виготовленого Ti-6Al-4V після фрикційно-змішувального зварювання (FSW), із оцінкою морфології зерен, розподілу β -фази та градієнтів деформації. Мікроструктурна еволюція визначається взаємодією локального термомеханічного впливу та попередньої колонної текстури EBM-матеріалу, що включає інтенсивну пластичну деформацію, локальне нагрівання, динамічну рекристалізацію та формування залишкової β -фази. Нижче наведено ключові аспекти трансформації мікроструктури в різних зонах з'єднання [2, с. 392–397].

1. Орієнтація колонних зерен у вихідному адитивному матеріалі

Перед FSW, у вихідному EBM-зразку, спостерігалася чітко виражена колонна структура зерен, орієнтована вздовж напрямку нарощування шару. Така текстура характерна для процесів електронно-променевого плавлення (EBM) і зумовлює анізотропію механічних властивостей.

Важливо зазначити, що FSW повністю руйнує колонну орієнтацію, сприяючи формуванню ізотропної дрібнозернистої структури у SZ.

2. Динамічна рекристалізація у зоні перемішування (SZ)

У зоні SZ відбувається інтенсивна динамічна рекристалізація через локальний термомеханічний вплив. Це призводить до формування рівномірно розподіленої $\alpha + \beta$ структури з розміром зерен 3–5 мкм.

Така структура забезпечує високу міцність (~1150 МПа) і пластичність до 15%, оскільки дрібнозерниста морфологія покращує опір зародженню тріщин.

3. Наявність залишкової β -фази

На межах α -пластин у SZ зафіксовано залишкову β -фазу, яка утворюється внаслідок швидкого охолодження після локального нагрівання.

Ця фаза має кубічну решітку (BCC) і відіграє роль «амортизатора» деформацій – підвищує в'язкість і знижує схильність до крихкого руйнування.

4. Градієнт деформації між SZ і TMAZ

На межі між зонами спостерігається поступовий перехід зернової морфології – від рівномірної в SZ до витягнутої в TMAZ.

Це свідчить про градієнт пластичної деформації, який визначає механічну стабільність з'єднання: TMAZ виконує роль «буферного шару», що знижує напруження між SZ і HAZ.

5. Орієнтація α -пластин у TMAZ

У TMAZ α -пластини частково орієнтовані за напрямком обертання інструмента, що створює локальну текстуру.

Це цікаво з точки зору керування анізотропією, адже така орієнтація може бути корисною для регулювання напрямних властивостей матеріалу.

6. Мінімальні зміни у HAZ

У зоні HAZ структура зберігає $\alpha + \beta$ морфологію, характерну для вихідного EBM-матеріалу, проте α -пластини дещо видовжені через термічний вплив.

Це показує, що тепловий вплив процесу FSW є локалізованим, і структура поза зоною перемішування залишається стабільною.

7. Відсутність пор та дефектів після FSW

На відміну від вихідного AM-матеріалу, FSW-з'єднання практично не містять пор і мікротріщин.

Це ключовий аргумент на користь гібридного підходу «AM + FSW»: зменшення внутрішніх дефектів → підвищення щільності → покращення втомної довговічності.

8. Вплив швидкості обертання інструмента

Автори [2] показали, що зі збільшенням швидкості від 400 до 700 rpm зерна дрібнішають, а механічні властивості покращуються.

Підвищення швидкості обертання сприяє інтенсифікації термомеханічного впливу, збільшенню обсягу динамічної рекристалізації та формуванню дрібнозернистої структури з покращеною комбінацією міцності та пластичності».

Порівняння результатів фрикційно-змішувального зварювання чистого титану та адитивно виготовленого Ti-6Al-4V. У порівнянні з Singh et al. (2020) [2], де досліджувалася адитивно виготовлена Ti-6Al-4V, результати Liu et al. (2010) [6] дозволяють виділити кілька ключових моментів:

1. Колонна структура вихідного матеріалу: у Singh et al. (2020) колонна структура EBM-зразків руйнується під час FSW, аналогічно до ефекту, описаного Liu для чистого титану.

2. Зони шва (SZ, TMAZ, HAZ): обидві роботи підтверджують формування типових зон, однак у адитивно виготовленого Ti-6Al-4V в SZ спостерігається сильніший градієнт деформації та прискорена рекристалізація β -фази.

3. Механічні властивості: як і Liu, Singh відзначає, що підвищення швидкості обертання інструмента сприяє покращенню міцності та пластичності, але для адитивних зразків це особливо важливо для компенсації дефектів плавленої структури (пори, тріщини).

4. Застосування до гібридного маршруту AM + FSW: порівняння демонструє, що адитивне виробництво додає специфічні мікроструктурні особливості, які потрібно враховувати при оптимізації FSW, зокрема вплив на β -фазу та товщину зерна.

З порівняння результатів досліджень [2, 6] видно, що фрикційно-змішувальна обробка ефективно руйнує колонну структуру зерен вихідного матеріалу та формує дрібнозернисту мікроструктуру в SZ, забезпечуючи підвищення механічних властивостей зварних швів. Водночас вплив параметрів процесу, таких як швидкість обертання інструмента, критично впливає на градієнт деформації, рекристалізацію β -фази та міцність на розрив. Ці результати підкреслюють актуальність оптимізації гібридного технологічного маршруту «AM + FSW» для адитивно виготовленого Ti-6Al-4V.

Висновки

1. Було встановлено, що фрикційно-змішувальна обробка (Friction Stir Processing, FSP) ефективно модифікує мікроструктуру адитивно виготовленого Ti-6Al-4V, руйнуючи колонну структуру вихідного матеріалу та формуючи дрібнозернисту, пластинчасту структуру в зоні перемішування (SZ).

2. Термомеханічно впливова зона (TMAZ) характеризується частковою пластичною деформацією та частковою рекристалізацією зерен, тоді як зона, що не зазнала впливу тепла (HAZ), зберігає початкову структуру матеріалу.

3. Оптимізація параметрів FSW, зокрема швидкості обертання інструмента та швидкості переміщення, дозволяє підвищити міцність на розрив та пластичність матеріалу, зменшити дефекти та забезпечити більш однорідну мікроструктуру, що особливо важливо для адитивно виготовлених деталей.

4. Порівняння з результатами FSW чистого титану показало, що адитивно виготовлений Ti-6Al-4V має специфічні мікроструктурні особливості, такі як градієнт деформації та рекристалізація β -фази, які слід враховувати при налаштуванні технологічного процесу.

5. Подальші дослідження повинні зосередитися на:

- детальному вивченні взаємодії параметрів FSP з мікроструктурою та фазовим складом;
- моделюванні термомеханічних процесів у SZ, TMAZ та HAZ для прогнозування механічних властивостей;
- розробці гібридних технологічних маршрутів «AM + FSW» для отримання високоякісних конструкційних деталей з мінімізацією дефектів;
- вивченні впливу FSP на експлуатаційні характеристики деталей у реальних умовах, зокрема для авіаційної та транспортної галузі.

Отримані результати створюють наукову та практичну основу для подальшого вдосконалення технологій адитивного виробництва та фрикційно-змішувальної обробки титанових сплавів. Вони демонструють ефективність гібридного маршруту AM + FSW у формуванні дрібнозернистої, однорідної мікроструктури та підвищенні механічних властивостей Ti-6Al-4V, що дозволяє рекомендувати його для застосування у виготовленні високонавантажених конструкційних компонентів авіаційної та транспортної галузі.

Список використаних джерел:

1. Rajath N., Rao S. S., Rao V. V. A comprehensive review of friction stir welding parameters on Ti-6Al-4V alloy microstructure and mechanical properties. *Advanced Materials Processing and Technology*. 2024. Vol. 10(2). P. 196–237 <https://doi.org/10.1080/2374068X.2024.2306571>
2. Singh A. K., Kumar N., Jha K., Astarita A., Squillace A., Franchitti S., Arora A. Friction stir welding of additively manufactured Ti-6Al-4V: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020. Vol. 283. P. 392–401. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116433>
3. Liu X., Zhang P., Li W., Ye T., Xia C., Zhang T., Shi J., Xie J. Ni Z. Microstructure and Mechanical Properties of TC4 Titanium Alloy Joint Fabricated By Vortex Flow-Based Friction Stir Welding. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 37. P. 159. <https://doi.org/10.1186/s10033-024-01152-z>
4. Terry B., Shelton A. Strauss A. Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welding between butted, thin sheet NiTi and Ti-6Al-4V. *Weld World* (2025). <https://doi.org/10.1007/s40194-025-02162-8>
5. Prabhakar D.A.P., Arun Kumar Shettigar, Mervin A. Herbert, Manjunath Patel G C, Danil Yu. Pimenov, Khaled Giasin, Chander Prakash A comprehensive review of friction stir techniques in structural materials and alloys: challenges and trends. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 20. P. 3025–3060. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.034>
6. Liu H., Nakata K., Liao J. Friction stir welding of pure titanium lap joint. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2010. Vol. 15, Issue 5. <https://doi.org/10.1179/136217110X12731414740031>
7. Rubino F., Scherillo F., Franchitti S., Squillace A., Astarita A., Carlone P. Microstructure and surface analysis of friction stir processed Ti-6Al-4V plates manufactured by electron beam melting. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 37. P. 392–401 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.12.015>
8. Mishra R. S., Ma Z. Y. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2005. Vol. 50(1–2), P. 1–78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>

-
9. MA Z. Y. Friction Stir Processing Technology: A Review. *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A*. 2008. Vol. 39, P. 642–658. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9459-0>
 10. Wikipedia contributors. (2025, October 21). Friction stir processing. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_processing
 11. Hovanski Ю., Mishra P., Sato Ю. (ред.). Friction Stir Welding and Processing IX. Cham: Springer Cham, 2017. 324 с. ISBN 978-3-319-52382-8. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52383-5>

References:

1. Rajath, N., Rao, S. S., & Rao, V. V. (2024). A comprehensive review of friction stir welding parameters on Ti-6Al-4V alloy microstructure and mechanical properties. *Advanced Materials Processing and Technology*, no 10(2), S. 196–237 <https://doi.org/10.1080/2374068X.2024.2306571>
2. Singh, A. K., Kumar, N., Jha, K., Astarita, A., Squillace, A., Franchitti, S., & Arora, A. (2020). Friction stir welding of additively manufactured Ti-6Al-4V: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*, no 283, S. 392–401. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116433>
3. Liu, X., Zhang, P., Li, W., Ye, T., Xia, C., Zhang, T., Shi, J., Xie, J. & Ni, Z. (2024). Microstructure and Mechanical Properties of TC4 Titanium Alloy Joint Fabricated By Vortex Flow-Based Friction Stir Welding. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. no 37, S.159. <https://doi.org/10.1186/s10033-024-01152-z>
4. Terry, B., Shelton, A. & Strauss, A. (2025). Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welding between butted, thin sheet NiTi and Ti-6Al-4V. *Weld World*. <https://doi.org/10.1007/s40194-025-02162-8>
5. Prabhakar D. A. P., Arun Kumar Shettigar, Mervin A. Herbert, Manjunath Patel G C, Danil Yu. Pimenov, Khaled Giasin, Chander Prakash (2022). A comprehensive review of friction stir techniques in structural materials and alloys: challenges and trends. *Journal of Materials Research and Technology*. no 20, S. 3025–3060. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.034>
6. Liu, H., Nakata, K., & Liao, J. (2010). Friction stir welding of pure titanium lap joint. *Science and Technology of Welding and Joining*. no 15, Issue 5. <https://doi.org/10.1179/136217110X12731414740031>
7. Rubino, F., Scherillo, F., Franchitti, S., Squillace, A., Astarita, A., & Carlone, P. (2019). Microstructure and surface analysis of friction stir processed Ti-6Al-4V plates manufactured by electron beam melting. *Journal of Manufacturing Processes*. no 37, S. 392–401 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.12.015>
8. Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, no 50(1–2), S. 1–78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>
9. MA, Z. Y. (2008). Friction Stir Processing Technology: A Review. *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A*. no 39, S. 642–658. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9459-0>
10. Wikipedia contributors. (2025, October 21). Friction stir processing. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved from: https://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_processing
11. Hovanski, Y., Mishra, R., & Sato, Y. (Eds.). (2017). Friction Stir Welding and Processing IX. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52383-5>

Дата надходження статті: 21.10.2025

Дата прийняття статті: 10.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025