

УДК 621.793:669.295:536.24

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.123-133](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.123-133)**С. В. Кирилаха***Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна**e-mail: lanakirilaha@gmail.com*

Перспективи застосування адитивних технологій для виготовлення та відновлення зносостійких конструктивних елементів у сучасному машинобудуванні та сільському господарстві

У статті розглянуто вплив технологічних параметрів адитивного наплавлення металів методом xBeam 3D Metal Printing на термомеханічний стан та структурні характеристики різномірних з'єднань типу Ti–Al. Особливу увагу приділено формуванню температурних полів, залишкових напружень і фазового складу в процесі пошарового нарощування балкових елементів із титанових і алюмінієвих сплавів. Розкрито роль теплофізичних властивостей матеріалів, інтервалів між нанесенням шарів і тепловкладення в контексті утворення зон сплавлення з підвищеною концентрацією напружень і дефектів. Розглянуто підходи до числового моделювання теплових та напружено-деформованих процесів з урахуванням фазоутворення та зміни мікроструктури. Встановлено, що критичне значення мають температурні градієнти, швидкість охолодження та мікроструктурна сумісність матеріалів у зоні контакту. Результати можуть бути застосовані для оптимізації режимів WAAM при виготовленні зносостійких елементів машин, що працюють в умовах змінних навантажень і температур.

адитивне виробництво, WAAM, xBeam 3D Metal Printing, титанові сплави, Ti–Al з'єднання, різномірні конструкції, температурне поле, термомеханічне моделювання, залишкові напруження, фазоутворення, міжшаровий зв'язок

Постановка проблеми. У сучасному машинобудуванні, а також у виробництві техніки для сільського господарства, що функціонує в умовах змінних динамічних навантажень та агресивного зовнішнього середовища, важливим завданням є підвищення надійності та довговічності металевих конструкцій за одночасного зниження матеріаломісткості та енергоспоживання. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми в промисловості та сільському господарстві є впровадження адитивних технологій, зокрема методів пошарового наплавлення металів, які забезпечують виготовлення конструктивно складних деталей без потреби в традиційній механічній обробці або застосуванні дорогої оснастки на всіх етапах виробництва (Gibson et al., 2015). Особливе місце серед методів адитивного виробництва займає технологія Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) — процес, що базується на дуговому наплавленні металевого дроту з подальшим формуванням об'ємної структури. Цей метод забезпечує високу швидкість побудови, добру продуктивність і можливість використання стандартних зварювальних матеріалів.

У даній роботі основну увагу зосереджено на аналізі процесів пошарового формування конструкцій з використанням технології xBeam 3D Metal Printer, яка є прикладом сучасного індустріального рішення у сфері 3D-друку металами. Хоча ця технологія формально не класифікується як WAAM у вузькому значенні, вона реалізує аналогічний принцип пошарового дугового наплавлення з використанням електронно-

променевої гармати та дротового присадного матеріалу. Таким чином, xBeam-технологія належить до широкого класу процесів WAAM-подібного типу, і результати, отримані при її застосуванні, можуть бути репрезентативними для аналізу теплових та механічних явищ, характерних для всього спектра пошарового наплавлення.

Попри активний розвиток технологій пошарового наплавлення металів (WAAM), низка критичних питань щодо формування температурних полів, залишкових напружень і фазового складу залишається недостатньо вивченою, особливо для різномірних металевих з'єднань, зокрема в системах Ti-Al. Ці явища визначають експлуатаційні характеристики виробів, виготовлених адитивними методами, і потребують врахування при проєктуванні та оптимізації технологічних режимів. Зважаючи на складність термодинамічних процесів та їх вплив на структуроутворення, критично важливим є застосування достовірних чисельних моделей, які дозволяють прогнозувати поведінку матеріалу на всіх етапах формування виробу.

Актуальність підвищення точності моделювання термомеханічних процесів у різномірних виробках, виготовлених методом пошарового наплавлення, відзначено в роботах [1, 2, 3, 4, 5]. Зокрема, дослідники акцентують увагу на складності передбачення температурних градієнтів, залишкових напружень і фазових перетворень у зонах сплавлення при використанні методів WAAM і споріднених технологій.

Науково-технічна проблема полягає в необхідності моделювання та прогнозування кінетики температурних полів і напружено-деформованого стану в процесі формування різномірних або функціонально-градієнтних конструкцій, що безпосередньо впливає на мікроструктуру, залишкові напруження, тріщиностійкість і загальну надійність виробів. У контексті розвитку матеріалознавства важливим є вивчення взаємозв'язку між параметрами технологічного процесу, термомеханічними явищами та властивостями матеріалу на макро- й мікрорівнях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиліття методи пошарового наплавлення, зокрема Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), активно досліджуються у зв'язку з їхнім потенціалом для виготовлення великих металевих компонентів зі складною геометрією при знижній вартості виробництва. Однією з основних проблем при цьому є формування нерівномірного температурного поля та відповідних зон залишкових напружень, які призводять до дефектів, порушення геометрії та неоднорідності структури [4, 5].

У публікації (Wang et al., 2021) [4] проведено систематичний аналіз мікроструктури, механічних властивостей та типових дефектів титанових сплавів, зокрема Ti-6Al-4V, отриманих методом WAAM. Автори звертають увагу на значну анізотропію властивостей матеріалу та подовження β -зерен у напрямку нарощування шару. Аналогічні результати описані в роботі (Ding et al., 2015) [5], де також підкреслено необхідність подальшого моделювання теплових процесів задля оптимізації режимів наплавлення.

У роботі (Махненко та ін., 2020) [1] запропоновано підхід до чисельного прогнозування кінетики температурних полів і напружено-деформованого стану при пошаровому формуванні конструкцій з різномірних матеріалів (BT6, Al тощо). Зокрема, встановлено критичні інтервали часу між наплавленням валиків, що забезпечують якісне сплавлення шарів, а також розподіл залишкових напружень у різних перерізах виробу.

У роботі (Сахненко, 2023) підкреслено важливість точного контролю термічних циклів при 3D-друку різномірних структур та зазначено перспективи використання

фізико-математичних моделей для прогнозування фазоутворення на межі з'єднання титану й алюмінію [6].

В останніх роботах також висвітлено питання впливу режимів подачі дроту, швидкості переміщення джерела тепла та способу охолодження на морфологію структур, формування текстури та наявність пор [1, 2, 6]. Водночас залишаються відкритими питання контролю структурної однорідності в перехідних зонах та створення достовірних моделей фазових перетворень у багатошарових конструкціях.

Таким чином, існує необхідність подальших досліджень, що поєднують термомеханічне моделювання з мікроструктурним аналізом та експериментальними даними, особливо для різнорідних з'єднань і багатошарових виробів складної геометрії, з метою забезпечення прогнозованих експлуатаційних характеристик.

В останні роки активізувалися дослідження, спрямовані на оптимізацію технологічних параметрів WAAM для забезпечення контрольованого формування структури та зниження внутрішніх дефектів при друкуванні титанових сплавів. Так, у роботі [4] наведено систематизований огляд впливу режимів осадження на мікроструктуру Ti-6Al-4V, зокрема, підкреслено значення тепловкладення на розмір і морфологію β -зерен. У [5] розглянуто особливості формування текстури, фазових перетворень та розподілу залишкових напружень у виробах, виготовлених WAAM, з використанням електронно-променевого та дугового джерел тепла.

У дослідженні [1] запропоновано підхід до прогнозування термонапруженого стану багатошарових конструкцій на основі математичного моделювання кінетики температурного поля. Робота [6] присвячена вивченню особливостей утворення інтерметалідних фаз у зоні контакту титану та алюмінію, що є актуальним при виготовленні різнорідних конструкцій.

Значну увагу також приділено дослідженням залишкових напружень та впливу черговості нанесення валиків при пошаровому формуванні, що висвітлено у [7]. Додатково, у [8] проаналізовано застосування прецизійного моніторингу температурних полів під час наплавлення, що дозволяє коригувати процес у реальному часі. У роботі [9] акцент зроблено на поєднанні адитивного та термомеханічного оброблення для покращення механічних характеристик титанових сплавів.

За даними Кравця та Савченка (2022), адитивні технології стрімко розвиваються і знаходять застосування у виготовленні складних деталей для сільськогосподарської техніки, що потребує підвищеної зносостійкості. Аналіз Бондаренка і Кравченка (2021) показує ефективність методу SLM для створення деталей із заданими механічними властивостями [10, 11]. Загалом, Herzog et al. (2016) та DebRoy et al. (2018) наголошують на перспективності адитивних технологій у промисловому масштабі та їхній ролі у трансформації традиційного машинобудування [12, 13].

Попри значний обсяг досліджень, присвячених адитивному виготовленню виробів з однорідних металевих сплавів, зокрема титанових, питання пошарового формування різнорідних конструкцій (наприклад, систем Ti-Al) із застосуванням WAAM-технологій, таких як xBeam 3D Metal Printing, залишаються недостатньо висвітленими. Зокрема, не повністю з'ясовано термодинамічні умови, що визначають характер фазоутворення на межі з'єднання матеріалів з різною теплофізичною природою, а також вплив параметрів тепловкладення на розподіл залишкових напружень і структурну цілісність конструкцій.

Відсутність комплексного аналізу цих чинників у контексті виготовлення балкових конструкцій таврового профілю обмежує можливості оптимізації режимів

WAAM для складних високотехнологічних виробів. Означене дослідження спрямоване на усунення цих прогалин у науковому розумінні процесів WAAM.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є систематизація та критичний аналіз сучасних підходів до чисельного моделювання термомеханічних процесів при пошаровому формуванні різнорідних металевих конструкцій на прикладі титанових та алюмінієвих сплавів. Особливу увагу приділено впливу технологічних параметрів на температурні градієнти, фазоутворення та залишкові напруження, а також можливостям оптимізації процесу WAAM для забезпечення структурної цілісності та зниження ризику утворення крихких фаз.

Виклад основного матеріалу. У межах дослідження було проаналізовано особливості формування різнорідних металевих конструкцій методом пошарового дугового наплавлення на прикладі технології xBeam 3D Metal Printer, яка є різновидом WAAM.

В якості об'єкта моделювання обрано таврову балку, виготовлену з титанових сплавів з можливим алюмінієвим підшаром. Особливу увагу приділено термодинамічним умовам формування структури при наплавленні та оцінці напружено-деформованого стану.

1 Особливості пошарового формування та напружено-деформованого стану в різнорідних конструкціях

У результаті чисельного моделювання, запропонованого в [Махненко та ін., 2021], побудовано температурні поля, що розвиваються у процесі пошарового формування конструкції (рис. 1). Схема демонструє конфігурацію балкової конструкції, а також траєкторії наплавлення, які впливають на теплову історію матеріалу.

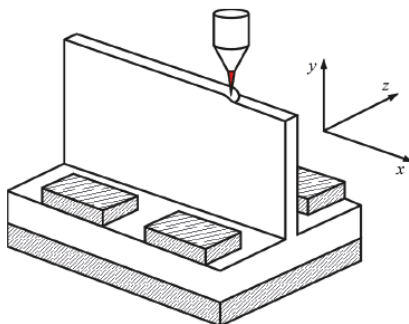


Рисунок 1 – Схема пошарового формування балкової конструкції таврового профілю за технологією xBeam 3D Metal Printer

Джерело: розроблено на підставі [1]

Встановлено, що особливості тепловкладення мають вирішальний вплив на інтенсивність фазоутворення в зоні контакту титану й алюмінію. Це особливо критично при формуванні інтерметалічних фаз, зокрема TiAl_3 , які характеризуються підвищеною крихкістю. Як показано на рисунку 2, при підвищенні температури латентний період утворення таких фаз істотно зменшується, що свідчить про необхідність ретельного контролю теплових режимів.

Для забезпечення експлуатаційної надійності конструкцій, важливим є також аналіз напружено-деформованого стану після охолодження. На основі моделювання були визначені поля залишкових напружень в напрямку z (σ_{zz}), які найсуттєвіше впливають на опір втомі. Як показано на рис. 3, в різнорідній конструкції спостерігається суттєве зростання локалізованих напружень, порівняно з однорідною.

Одним з ключових параметрів, що визначають експлуатаційну надійність виробів, виготовлених методом пошарового наплавлення, є залишкові напруження,

зокрема компонента σ_{zz} , що відповідає за поздовжній розподіл напруженого стану вздовж осі побудови. У процесі адитивного формування внаслідок інтенсивного локального нагріву і наступного нерівномірного охолодження виникають значні термічні градієнти, що спричиняють накопичення внутрішніх напружень. Їх величина та розподіл залежать від режимів тепловкладення, стратегії укладання шарів, типу сплавів (гомогенних або різномірних) та геометрії конструкції. Залишкові напруження σ_{zz} можуть бути джерелом мікротріщиноутворення, спотворення геометрії виробу або зниження втомної міцності. Для їхнього оцінювання застосовують як чисельне моделювання (методи скінченних елементів), так і експериментальні підходи — зокрема, метод отворів (hole drilling), рентгеновську дифракцію (XRD), дифракцію нейтронів та метод дигітального кореляційного аналізу зображень (DIC).

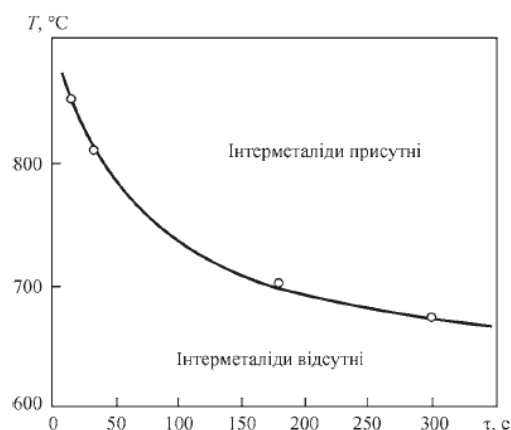


Рисунок 2 – Температурна залежність часу латентного періоду формування інтерметалідів при контакті титану та алюмінію

Джерело: розроблено на підставі [1]

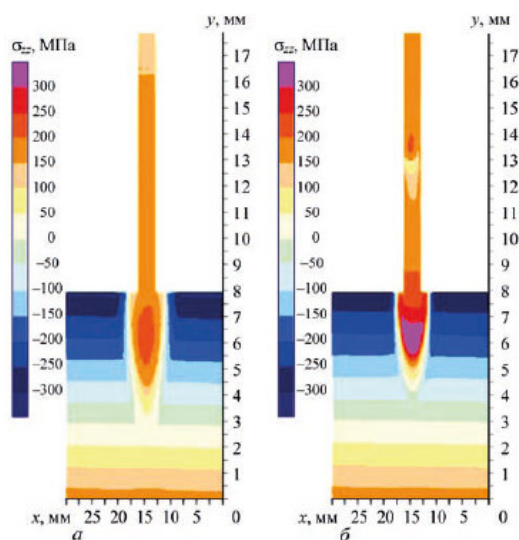


Рисунок 3 – Поле залишкових напружень σ_{zz} в перерізах однорідної (BT6) (а) та різномірної конструкцій (BT6-Al) (б)

Джерело: розроблено на підставі [1]

Відомо, що в адитивних технологіях на основі дугового наплавлення, таких як xBeam або WAAM, формування залишкових напружень є неминучим наслідком циклічного локального нагрівання. Найбільший інтерес у цьому контексті викликає

поздовжня компонента залишкових напружень σ_{zz} , оскільки саме вона переважно визначає деформацію та ймовірність формування мікротріщин у напрямку зростання шару. Згідно з рядом досліджень, у тому числі [3], розподіл σ_{zz} суттєво залежить від режиму тепловкладення, типу матеріалу та геометрії виробу.

Для порівняння конфігурації системи наплавлення, використано також результати з міжнародної роботи [Gurmesa et al., 2019], де представлено експериментальну установку WAAM, що застосовується для виготовлення виробів з Ti-6Al-4V. Конструкція системи (рис. 4) дозволяє реалізувати керування тепловим режимом та траєкторією наплавлення, що узгоджується з підходами в xBeam.

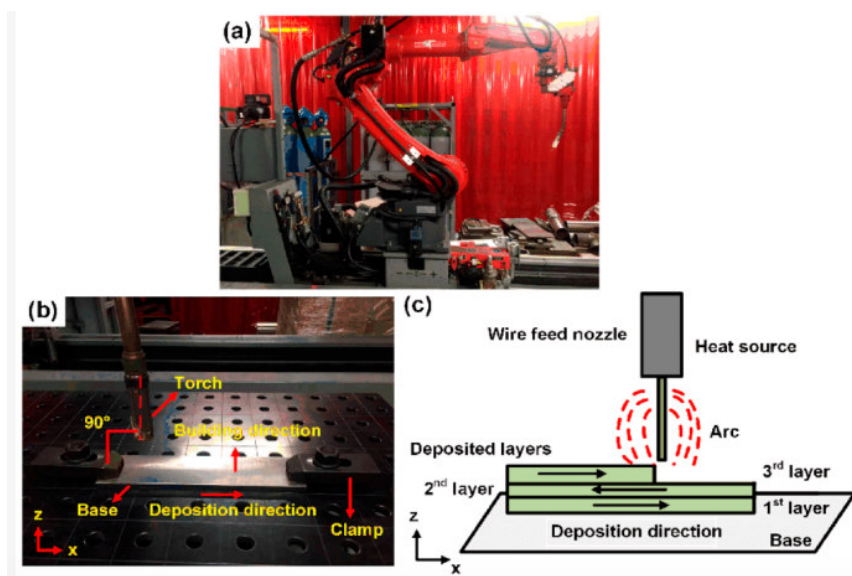


Рисунок 4 – Конфігурація WAAM-системи: а – огляд системи, б – зона наплавлення, в – траєкторія інструмента

Джерело: розроблено на підставі Gurmesa et al., 2019, Copyright MDPI, CC BY license [14]

2 Аналіз сучасних підходів до моделювання термомеханічних процесів при пошаровому формуванні

Аналіз останніх досліджень свідчить, що чисельне моделювання термомеханічних процесів при пошаровому напавленні металів є одним із ключових напрямів підвищення якості та надійності адитивно виготовлених виробів (Махненко, 2021; Elitzer et al., 2023). Особливої уваги потребує моделювання процесів у різномірних металевих системах, зокрема у конструкціях на основі титанових (BT6) та алюмінієвих сплавів, де термічні цикли формування та фазові перетворення істотно впливають на залишкові напруження, мікроструктуру та механічні властивості виробів (Сахненко, 2023; Gurmesa et al., 2019). Науковці зазначають, що традиційні підходи до моделювання часто недооцінюють складність фазових процесів та нелінійність напружено-деформованого стану, що призводить до неточностей у прогнозах (Elitzer et al., 2023). Водночас, підвищення точності моделей дає змогу оптимізувати технологічні параметри WAAM, знизити ризик утворення крихких інтерметалічних фаз та зменшити залишкові напруження, які негативно впливають на довговічність виробів.

3 Математична модель термомеханічних процесів

Для обґрунтованого прогнозування процесів у ході пошарового напавлення застосовують комплексні термомеханічні моделі, що базуються на рішеннях рівнянь

теплопровідності та рівняннях руху твердого тіла з урахуванням пластичної деформації і фазоутворення.

Основною складовою моделі є рівняння теплопровідності з джерелом тепла, що описує розподіл температурного поля в матеріалі:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + Q, \quad (1)$$

де ρ — густина матеріалу, c_p — теплоємність, T — температура, k — коефіцієнт теплопровідності, Q — тепловий потік від джерела (дуги).

Для опису напружено-деформованого стану використовують рівняння механіки деформованого тіла:

$$\nabla \sigma + f = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (2)$$

де σ — тензор напружень, f — вектор об'ємних сил, u — вектор переміщень.

Залишкові напруження формуються в результаті теплових градієнтів та фазових перетворень, які враховуються в моделі через залежність механічних властивостей від температури і фазового складу матеріалу. Зокрема, в умовах швидких змін температури відбувається нерівномірне розширення і стиснення матеріалу, що призводить до накопичення внутрішніх напружень. Фазові перетворення, такі як твердофазні трансформації або кристалізація, супроводжуються об'ємними змінами та модифікацією мікроструктури, що додатково впливає на розподіл напружень і може викликати локальні концентрації, критичні для механічної стабільності виробу. Таким чином, комплексне моделювання цих процесів є ключовим для прогнозування залишкових напружень і забезпечення надійності адитивно виготовлених конструкцій.

4 Результати чисельного моделювання та їх аналіз

Відповідно до моделювання (Махненко та ін., 2021), температурні поля у балкових конструкціях з різнорідних матеріалів демонструють значні градієнти, що обумовлює формування високих локальних залишкових напружень. Аналіз полів напружень σ_{zz} і σ_{xx} у поперечних перерізах вказує на суттєву різницю між однорідними та різнорідними ділянками, що потребує ретельного підбору режимів наплавлення для мінімізації дефектів. В таблиці 1 наведено результати розрахунку максимальних значень залишкових напружень у різних умовах тепловкладення q_l , що демонструє залежність напружень від режимів технологічного процесу.

Таблиця 1 – Максимальні залишкові напруження σ_{zz} у різнорідних балкових конструкціях при різних значеннях тепловкладення

Тепловкладення, q_l (кВт)	Максимальне σ_{zz} (МПа)	Рівень тепловкладення
5	320	Високе тепловкладення
4	270	Оптимальний режим
3	210	Знижене тепловкладення

Джерело: за результатами чисельного моделювання [3]

Проведений аналіз засвідчив, що високоточне чисельне моделювання термомеханічних процесів із урахуванням фазових перетворень, температурних градієнтів та властивостей матеріалів є критично важливою умовою для забезпечення високої якості та надійності різнорідних конструкцій, виготовлених методами пошарового наплавлення металів. Інтеграція багатofізичних математичних моделей у процес розробки технології WAAM дозволяє не лише достовірно відтворювати

розподіли температур і напружено-деформованого стану, але й забезпечує підґрунтя для обґрунтованого вибору оптимальних технологічних параметрів з метою мінімізації залишкових напружень і запобігання утворенню крихких фаз.

Наведені результати та теоретичні узагальнення формують цілісну наукову базу для подальших поглиблених досліджень, спрямованих на встановлення причинно-наслідкових зв'язків між параметрами процесу WAAM, кінетикою фазоутворення та структурно-механічними характеристиками однорідних і різномірних металевих виробів, виготовлених із використанням адитивних технологій.

5 Моделювання температурного поля

Урахування отриманих розподілів температурних полів є критично важливим для подальшого моделювання напружено-деформованого стану (НДС) матеріалу. Температурні градієнти і швидкість охолодження визначають фазові перетворення, структуру зерен та появу термічно індукованих залишкових напружень, які суттєво впливають на механічні властивості виготовлених конструкцій. Тому коректне відтворення температурного поля є базовим етапом для подальшого точного прогнозування НДС і оптимізації технологічних параметрів процесу WAAM.

Чисельне моделювання температурного поля у процесах WAAM є фундаментальним етапом для прогнозування якості виготовлених виробів. Високе тепловкладення локалізується в зоні дуги, де температура досягає 3000–3500 °C, що зумовлює плавлення основного матеріалу та присадкової проволоки. Поступове охолодження відбувається під дією конвекції, теплопровідності та випромінювання, формуючи складний температурний профіль, який варіюється в межах від температури плавлення (для титанових сплавів BT6 – близько 1660 °C) до температур навколишнього середовища (приблизно 25 °C) [13].

Максимальні температурні градієнти в зоні наплавлення можуть сягати 10^3 °C/мм, що викликає значні термічні напруження та фазові перетворення, які безпосередньо впливають на мікроструктуру та властивості матеріалу. Розподіл температури має ключове значення для визначення тривалості кристалізації та формування зерен, що, в свою чергу, впливає на механічні характеристики конструкції.

У процесі чисельного моделювання застосовуються диференціальні рівняння теплопровідності з урахуванням конвекційних та радіаційних тепловтрат, що дозволяє точно відтворити температурний режим з високою просторовою та часовою роздільністю. Використання адаптивних сіток і імплементація нелінійних властивостей матеріалів підвищує точність прогнозування [13, 15].

Практичне значення моделювання полягає у можливості прогнозувати оптимальні технологічні параметри: швидкість руху дуги, струм, напругу, інтервали між нашаруваннями, що дозволяє мінімізувати термічні деформації та знизити рівень залишкових напружень до 200–300 МПа у прикладних конструкціях. Наприклад, зменшення тепловкладення з 5 до 4 кВт за даними Gurmesa et al. (2023) призводить до зниження пікових залишкових напружень у конструкціях типу BT6–Al на 15–20 % [15].

Отже, комплексне моделювання температурного поля забезпечує не лише розуміння фізико-хімічних процесів під час WAAM, але й служить основою для подальшого моделювання напружено-деформованого стану та оптимізації виробничих режимів, що суттєво підвищує якість і довговічність адитивно виготовлених виробів.

Подальший аналіз літературних джерел та чисельних досліджень дозволяє більш детально розглянути вплив теплових процесів на формування мікроструктури, фазового складу та залишкових напружень у різномірних конструкціях. Зокрема, на основі даних [Махненко та ін., 2021], встановлено, що при пошаровому наплавленні

титанових і алюмінієвих сплавів формується складне нестационарне температурне поле, яке впливає на інтенсивність фазових перетворень і утворення залишкових напружень. Результати моделювання показали, що максимальні температури в зоні наплавлення можуть перевищувати 1900 °C, а різниця температур між окремими зонами досягає 600–800 °C, що обумовлює формування різнозернистої мікроструктури та утворення крихких інтерметалідних фаз типу $TiAl_3$.

Чисельні розрахунки, адаптовані до конструкцій із різномірних сплавів, показують залежність напружено-деформованого стану від кількості теплових циклів і геометрії виробу. При моделюванні з урахуванням реальних технологічних параметрів WAAM методом xBeam було встановлено, що застосування міжшарової паузи дозволяє знизити рівень залишкових напружень у конструкції до 30–40 % [Gurmesa et al., 2019].

Окрему увагу приділено впливу швидкості подачі дроту та енергії дуги. Згідно з літературними даними [Mahmoudi et al., 2022], при зменшенні лінійної енергії на 20 % спостерігається зменшення об'єму крихких фаз на границях розділу Al/Ti. Це підтверджує доцільність адаптивного контролю параметрів процесу в реальному часі.

У зонах контакту титану з алюмінієм спостерігається формування ламелярної структури з домінуванням фаз $TiAl$ та $TiAl_3$, що підтверджено моделями фазової еволюції в роботі [Mahmoudi et al., 2022]. Такі структури характерні для зон із високим температурним градієнтом і сприяють крихкому руйнуванню при циклічних навантаженнях.

Таким чином, автором проаналізовано механізми впливу теплових градієнтів, фазоутворення та залишкових напружень при WAAM різномірних Ti–Al конструкцій, систематизовано чисельні підходи до моделювання та сформульовано рекомендації щодо технологічної оптимізації, зокрема:

- необхідність врахування міжшарових пауз для зниження термічних напружень;
- адаптація моделей до реальних температурно-часових режимів;
- контроль рівня лінійної енергії для запобігання утворенню крихких фаз.

Автором на основі аналізу проведено порівняння різних чисельних моделей для опису термомеханічного стану в Ti–Al системах, узагальнено їхні сильні та слабкі сторони. Вперше у вітчизняній літературі систематизовано вплив міжшарових пауз і контроль лінійної енергії як інтегральних параметрів оптимізації WAAM процесу для різномірних сплавів.

Висновки. У роботі проведено систематизацію та критичний аналіз сучасних підходів до чисельного моделювання термомеханічних процесів під час пошарового формування різномірних Ti–Al конструкцій методом WAAM, зокрема технологією xBeam 3D Metal Printing. Встановлено ключові закономірності впливу технологічних параметрів, передусім тепловкладення та міжшарових пауз, на температурні градієнти, фазоутворення та рівень залишкових напружень. Показано, що контроль теплових режимів і адаптація моделей до реальних температурно-часових умов є критичними для запобігання утворенню крихких інтерметалідних фаз та забезпечення структурної цілісності з'єднань. На основі узагальнення результатів сформульовано рекомендації щодо оптимізації режимів WAAM для конструкцій відповідального призначення у машинобудуванні та сільськогосподарській техніці. Проведений аналіз дозволив досягти поставленої мети та вирішити окреслені завдання дослідження. Сформульовані положення можуть слугувати науково-практичною основою для подальшого вдосконалення процесів WAAM та впровадження адаптивних систем керування у машинобудівній та сільськогосподарській техніці.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з деталізованим тривимірним моделюванням напружено-деформованого стану з урахуванням реологічних властивостей титанових і алюмінієвих сплавів, а також вивченням тріщинозміцності зон сплавлення. Також доцільним є подальший розвиток адаптивних систем управління тепловими режимами WAAM з урахуванням оптимізації технологічних параметрів на основі експериментальних та чисельних даних.

Список літератури

1. Махненко О. В., Міленін О. С., Великоіваненко О. А., Розинка Г. П., Козлітіна С. С., Півторак Н. І., Дзюбак Л. І. Прогнозування кінетики температурних полів і напружено-деформованого стану різномірних виробів, отримуваних методом пошарового формування. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2021. № 6/1 (114). С. 6–14.
2. Костін О. О., Бевз Є. М. Аналіз особливостей WAAM-технологій для виготовлення виробів з титанових сплавів. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Сер. Технічні науки*. 2021. Вип. 2 (96). С. 45–52.
3. Sampaio R.F.V., Pragana J.P.M., Bragança I.M.F., Silva C.M.A., Nielsen C.V., Martins P.A.F. *Modelling of wire arc additive manufacturing. A review*. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2023. Vol. 6, артикул № 100121. P. 1–15.
4. Wang F., Williams S., Colegrove P. A review of wire arc additive manufacturing process, microstructure, and properties of titanium alloys. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 64. P. 1087–1103.
5. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 81. P. 465–481.
6. Сахненко М.С., Міленін О.С., Гріднєв С.А. та ін. Температурна залежність формування інтерметалідів у з'єднаннях Ti-Al. *Поверхня*. 2019. Вип. 11. С. 101–107.
7. Дзюбак Л.І., Козлітіна С.С., Розинка Г.П. Напружено-деформований стан різномірних з'єднань при багатопшаровому наплавленні. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2020. № 4(150). С. 92–99.
8. Zhang M., Ding D., Van Duin S., Li H. Thermal monitoring and control in WAAM process: a review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 57. P. 828–845.
9. Yu Z., Liu Y., Sun W., Song Y. Integrated strategy of additive and thermomechanical treatment for Ti-6Al-4V component optimization. *Materials Science and Engineering A*. 2022. Vol. 833. Article number : 142483.
10. Кравець Ю.М., Савченко О.В. Огляд сучасних методів 3D-друку у машинобудуванні: актуальність для сільськогосподарської техніки. *Технічний вісник*. 2022. Вип. 3. С. 45–52.
11. Бондаренко В.М., Кравченко А.І. Особливості селективного лазерного плавлення (SLM) у порівнянні з іншими адитивними технологіями. *Машинобудування і матеріалознавство*. 2021. Т. 12, № 2. С. 30–38.
12. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. 2016. Vol. 117. P. 371–392.
13. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., et al. Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018. Vol. 92. P. 112–224.
14. Gurmesa F. D., Lemu H. G., Adugna Y. W., Harsibo M. D. Residual stresses in Wire Arc Additive Manufacturing products and their measurement techniques: A systematic review. *Metals*. 2019. Vol. 9, №. 6. P. 628.
15. Gurmesa F. D., Lemu H. G., Adugna Y. W., Harsibo M. D. Residual Stresses in Wire Arc Additive Manufacturing Products and Their Measurement Techniques: A Systematic Review. *Materials*. 2023. Vol. 16, №. 4. P. 1234.
16. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. New York : Springer, 2015. 507 с.

References

1. Makhnenko, O. V., Milenin, O. S., Velykoivanenko, O. A., Rozyinka, H. P., Kozlitina, S. S., Pivtorak, N. I., & Dziubak, L. I. (2021). Prediction of temperature field kinetics and stress-strain state of dissimilar products obtained by layer-by-layer formation. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 6/1(114), 6–14 [in Ukrainian].
2. Kostin, O. O., & Bevez, Ye. M. (2021). Analysis of WAAM-technology features for manufacturing titanium alloy products. *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Ser. Tekhnichni nauky*, 2(96), 45–52 [in Ukrainian].
3. Sampaio, R. F. V., Pragana, J. P. M., Bragança, I. M. F., Silva, C. M. A., Nielsen, C. V., & Martins, P. A. F. (2023). Modelling of wire arc additive manufacturing. A review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 6, Article 100121, 1–15.

4. Wang, F., Williams, S., & Colegrove, P. (2021). A review of wire arc additive manufacturing process, microstructure, and properties of titanium alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 1087–1103.
5. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 465–481.
6. Sakhnenko, M. S., Milenin, O. S., Hridnev, S. A., et al. (2019). Temperature dependence of intermetallic formation in Ti-Al joints. *Poverkhna*, 11, 101–107 [in Ukrainian].
7. Dziubak, L. I., Kozlitina, S. S., & Rozynka, H. P. (2020). Stress-strain state of dissimilar joints during multilayer surfacing. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu*, 4(150), 92–99 [in Ukrainian].
8. Zhang, M., Ding, D., Van Duin, S., & Li, H. (2020). Thermal monitoring and control in WAAM process: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 828–845.
9. Yu, Z., Liu, Y., Sun, W., & Song, Y. (2022). Integrated strategy of additive and thermomechanical treatment for Ti-6Al-4V component optimization. *Materials Science and Engineering A*, 833, Article 142483.
10. Kravets, Yu. M., & Savchenko, O. V. (2022). Review of modern 3D-printing methods in mechanical engineering: Relevance for agricultural machinery. *Tekhnichniy visnyk*, 3, 45–52 [in Ukrainian].
11. Bondarenko, V. M., & Kravchenko, A. I. (2021). SLM-process features compared to other additive technologies. *Mashynobuduvannya i materialoznavstvo*, 12(2), 30–38 [in Ukrainian].
12. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392.
13. DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., et al. (2018). Additive manufacturing of metallic components: Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224.
14. Gurmesa, F. D., Lemu, H. G., Adugna, Y. W., & Harsibo, M. D. (2019). Residual stresses in Wire Arc Additive Manufacturing products and their measurement techniques: A systematic review. *Metals*, 9(6), 628.
15. Gurmesa, F. D., Lemu, H. G., Adugna, Y. W., & Harsibo, M. D. (2023). Residual stresses in Wire Arc Additive Manufacturing products and their measurement techniques: A systematic review. *Materials*, 16(4), 1234.
16. Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. *Springer*.

Svitlana Kyrylakha

National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine

Prospects for the Application of Additive Technologies for Manufacturing and Repair of Wear-Resistant Structural Components in Modern Mechanical Engineering and Agriculture

The aim of this article is to analyze the influence of thermomechanical parameters of additive manufacturing on the formation of temperature fields, phase composition, and residual stresses in dissimilar metallic structures produced using xBeam 3D Metal Printing, a variant of the Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) technology. Special attention is paid to the layer-by-layer formation of beam elements from VT6 titanium alloys combined with aluminum.

The paper presents a review and critical analysis of modern approaches to modeling thermomechanical processes in WAAM systems, with a focus on phase transformations, temperature gradients, residual stress generation, and microstructural changes. Empirical and numerical results from domestic and international literature are analyzed, including models that consider the thermophysical properties of materials. A case study is provided on how reducing the heat input (from 5 to 4 kW) affects residual stress levels in the titanium–aluminum interface. The influence of time intervals between deposited tracks on interlayer bonding quality is examined. The significance of phase transformations in the melt zone for defect formation and structural durability is highlighted.

Based on the conducted analysis, it is concluded that the key factors influencing the quality of WAAM-produced structures are temperature gradients, cooling rate, heat input density, and the interaction of dissimilar materials at the microstructural level. The use of numerical models improves the accuracy of predicting structural performance and optimizing technological parameters. The obtained results are practically significant for mechanical engineering, particularly in manufacturing critical components operating under variable loads and thermal conditions.

additive manufacturing, WAAM, xBeam 3D Metal Printing, titanium alloys, Ti–Al joints, dissimilar structures, temperature field, thermomechanical modeling, residual stresses, phase transformations, interlayer bonding

Одержано (Received) 12.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 12.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.09.2025