

УДК 621.6-11

Павленко П.М., докт.техн.наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки Державний університет «Київський авіаційний інститут», petrpav@ukr.net
Мальгін М.Г., канд. техн. наук
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, kievsp@gmail.com

РОЗРОБКА МЕТОДІВ І ТЕХНОЛОГІЙ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА МЕТАЛЕВОЇ АДДИТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Аддитивна технологія Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) дозволяє виробляти великогабаритні металеві компоненти з високою швидкістю обробки, точністю та економічною ефективністю. Проте, стабільне забезпечення якості деталей, що виготовляються в реальному часі, залишається поки що невіршеним дослідним завданням. Ці труднощі виникають через унікальність процесу виробництва кожного компонента, що обмежує адаптивність існуючих рішень, запропонованих дослідниками. Дані обмеження поширюється на проектування структурних елементів цієї технології, автоматизацію моніторингу та управління процесом 3D друку та на розробку цифрових двійників.

Для вирішення цієї проблеми пропонується нова методологія розробки цифрових двійників для 3D принтерів на базі WAAM, яка використовує міждисциплінарний досвід та перевірені проектні рішення. Запропоновані методи описують конкретні завдання кожного етапу розробки, і пропонують практичні алгоритми їхнього вирішення. Проектні рішення обґрунтовані з погляду реальної реалізації, надаючи розробникам основу для швидкого створення цифрових двійників, адаптованих до конкретних вимог. Ефективність запропонованих рішень оцінюється з особливим акцентом на виявлення потенційних вузьких місць, та їх вирішення за допомогою сучасних цифрових технологій, штучного інтелекту, та інструментальних засобів.

Етап 1. Розробка віртуального роботизованого пристрою для симуляції тривимірного аддитивного друку за технологією WAAM. Основні завдання, які вирішувалися на цьому етапі:

- 1.1. Вибір інструментального засобу розробки.
- 1.2. Вибір та встановлення системи координат та векторів.
- 1.3. Формування процедур просторового переміщення та обертання вузлових елементів.
- 1.4. Виконання прямого та зворотного кінематичного моделювання.
- 1.5. Виконання процедур планування траєкторії
- 1.6. Моніторинг робочої зони.
- 1.7. Генерація траєкторії.

Завдання реалізуються як процес розробки окремих компонентів роботизованої системи, які проектуються, тестуються та вдосконалюються окремо, а потім поєднуються в єдине, функціональне рішення. При подальшій інтеграції у цифровий двійник ця віртуальна система також інтегрується з фізичними даними реального 3D принтеру. Необхідно провести з'єднання всіх компонентів з реальними фізичними даними та датчиками, що забезпечують зворотний зв'язок. Отже, процес включає налаштування та калібрування датчиків і сенсорів, які вимірюють положення, швидкість та орієнтацію робота. Отримані дані передаються в адаптивну систему керування, де вони використовуються для коригування рухів робота в режимі реального часу.

Етап 2. Нарізка 3D-моделей та автоматизація стратегії нанесення шарів металу. В аддитивному виробництві процес нарізки деталі на шари поширене і дещо стандартне завдання. Однак, коли йдеться про технологію WAAM, це завдання ускладнюється, оскільки потрібно враховувати безліч факторів, пов'язаних із проектуванням траєкторії нанесення шарів металу на різних рівнях моделювання. Рівні включають побудову

траєкторії для запуску всього WAAM процесу з акцентом на ефективне використання матеріалів, а також чисельне моделювання, спрямоване на оптимізацію розподілу тепла та мінімізацію деформацій у виробі, що дозволяє уникнути неприпустимих відхилень від заданої геометрії та виникнення дефектів. Для розробки цифрового двійника ці завдання розглядаються комплексно, забезпечуючи тісну інтеграцію між проектуванням траєкторії та моделюванням фізичних процесів.

Етап 3. Автоматизація чисельного моделювання процесів 3D друку для технології WAAM. На даному етапі необхідно розробити спеціалізований програмний модуль автоматизації чисельного моделювання для WAAM процесів. При цьому використовувалося комбіноване поєднання методів мультифізичного моделювання - аналіз методу кінцевих елементів (FEA) для моделювання розподілу температури, залишкової напруги та термічної деформації та метод обчислювальної гідродинаміки (CFD) для моделювання течії розплавленого металу, а також моделі, отримані на попередньому етапі. Як робочі CAE-системи були використані ABAQUS і COMSOL. Вирішення завдань даного етапу потребує глибоких міждисциплінарних знань та розуміння теорії чисельного мультифізичного моделювання, а також подолання різних складностей, пов'язаних з його реалізацією.

Етап 4. Калібрування розрахункової моделі з урахуванням реальних параметрів 3D-принтера. Встановлено, що ключовим джерелом невизначеності в отриманих на попередньому етапі розрахункових моделях є теплове введення, яке складно виміряти безпосередньо і яке піддається значним коливанням. Локальні джерела тепла що рухаються для напрямків виступають вхідними даними для термічних і механічних розрахунків. Тому без точного термічного моделювання неможливо коректно враховувати напругу, деформацію, а також мікроструктурні зміни. У зв'язку з цим розробка технології надійного калібрування чисельних моделей була одним із ключових завдань під час створення цифрового двійника WAAM процесу 3D друку.

Етап 5. Моніторинг та управління процесу 3D друку засобами автоматизованої системи із зворотним зв'язком. Найбільш складний та відповідальний етап розробки. Тут необхідно реалізувати моніторинг якості 3D друку та зіставлення фактичної геометрії виробів з їх проектними CAD-моделями за допомогою автоматизованої системи із зворотним зв'язком. Результати цього модуля дозволяють своєчасно виявляти та виправляти дефекти, мінімізують витрати та забезпечують якість кінцевого продукту. Для досягнення цієї мети знову застосовуються алгоритми, що базуються на нейронних мережах і технологіях комп'ютерного зору. Вирішуються завдання попереджувального прогнозування можливих відхилень параметрів якості кожного з шарів металу, що наплавляється. Надзвичайно технічно складний та відповідальний етап, що вимагає наявності сучасних датчиків, сенсорів, камер високої роздільної здатності та багато іншого.

Етап 6. Розробка інтерфейсу сервера та інтеграція всіх програмних модулів у платформу цифрового двійника. Створюється графічний інтерфейс, який забезпечує інтуїтивно зрозумілу роботу користувача із програмно-технічним середовищем цифрового двійника. Він включає можливості завантаження CAD-моделей, налаштування параметрів друку, а також візуалізацію як процесу друку, так і результатів чисельного аналізу. Крім того, сервер підтримує розраховану на багато користувачів роботу з цифровим двійником, забезпечує виконання чисельних розрахунків, зберігання даних і результатів, а також навчання і донавчання нейронних мереж та інше. Багато проблем створюють завдання інтеграції всіх програмних модулів, очищення даних та їх синхронізація в реальному часі. Повноцінна реалізація описаних етапів забезпечує якісне використання WAAM технології.