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,
професор Національного авіаційного університету, м. Київ, petrpav@ukr.net

ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В МЕТАЛООБРОБНИХ ГАЛУЗЯХ ПРОМИСЛОВОСТІ

Сьогодні у світовій інженерії стрімко розвиваються два глобальні тренди, які, на думку експертів, визначають найближче майбутнє багатьох галузей:

– дослідження, розроблення та використання адитивних технологій для металевого 3Dдруку деталей і конструкцій;
– дослідження, розроблення та використання цифрових двійників [1, 2].

Розглянемо коротко кожен із них окремо, а потім їх спільне використання.

В останні кілька десятиліть промислове виробництво більше не обмежується традиційними видами виробництва металевих виробів. Процес адитивного виробництва, що інтенсивно розвивається і використовується, відповідає сучасним вимогам обробки високоякісних і складних форм, а також виробництва виробів з індивідуальним дизайном. З дев'яти основних видів адитивного виробництва виокремимо пряме осадження енергії та матеріалів (DED – Direct Energy Deposition) – спеціалізована технологія адитивного виробництва для друку металевих деталей. А з цього виду виокремимо конкретну, наразі досліджувану, технологію та відповідний 3D друк, а саме – адитивне виробництво дротяної дуги (WAAM –Wire Arc Additive Manufacturing). Як джерело енергії тут використовується електрична дуга, а як вихідний матеріал – дріт з різних матеріалів. Ця технологія є одним із найперспективніших процесів у категоріях методу DED, оскільки саме вона дає змогу виготовляти деталі з різних сплавів з необхідною щільністю та зниженою пористістю, порівняно з лазерними та іншими металевими адитивними системами. Технологія WAAM привертає значну увагу в промислових галузях практично всіх індустріально розвинених країн світу, включно з машинобудівною, приладобудівною, оборонною та іншими, завдяки своїй здатності виготовляти великогабаритні металеві деталі з високою швидкістю наплавлення, часом виробничого процесу, необхідною точністю та економічністю.

Для масового індустріального використання адитивного виробництва дротяною дугою необхідно забезпечити якісний 3Dдрук з першого разу. Однак, наразі необхідно методом проб і помилок оптимізувати параметри процесу для кожної конкретної деталі. Якщо друкується нова деталь зі складною геометрією, то, як правило, спочатку необхідно виконати кілька тестових ітерацій. Крім того, під час цього процесу можливо багато невизначеностей. Через зміну умов довкілля, температури або забруднення вихідного матеріалу, підкладки або потоку інертного газу можуть виникнути дефекти, що призводять до виробничого браку і значних витрат. І хоча фізичний процес цієї адитивної технології виготовлення деталей добре вивчений, автоматизація управління цим процесом у реальному режимі часу і забезпечення високої точності та якості одержуваних деталей все ще залишається відкритою дослідницькою проблемою.

Вирішення цих проблем сьогодні ґрунтується на використанні саме технологій і можливостей цифрових двійників. Цифрові двійники адитивного виробництва здатні розв'язувати завдання скорочення кількості дефектів, вирішуючи оптимізаційні задачі на кожному з етапів 3D друку металевих деталей і конструкцій. Однак, розробка наукових і прикладних рішень для цифрових двійників адитивних технологій з виготовлення металевих виробів перебуває на ранній стадії досліджень. Нижче представлені авторські матеріали щодо актуальних наукових та прикладних завдань вище описаних проблем і

варіантів їх вирішення, над якими наразі працюють науковці в усіх промислово розвинених країнах світу.

Комплекс, що реалізує безперервний та якісний процес виготовлення металевих деталей за технологією WAAM, зображений на рисунку 1.

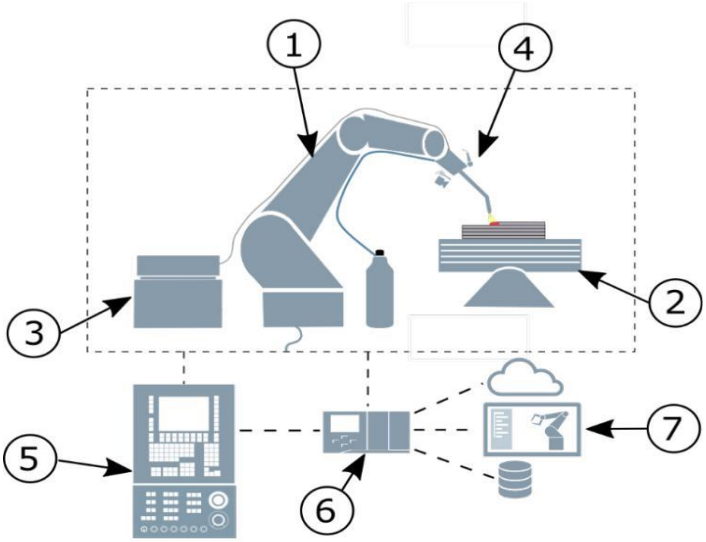

Рис.1 – Схема інтелектуальної виробничої системи WAAM:
1) робот, 2) поворотно-відкидний стіл, 3) зварювальне джерело, 4) сенсорна установка контролю, 5) система управління, 6) система моделювання, 7) цифрові двійники

Інтелектуальна виробнича система складається із семи частин, як показано на рисунку. Кінематична установка ґрунтується на шестивісному роботі (1) з двовісним похило-поворотним столом (2). Процес зварювання активується зварювальним джерелом (3). Процес WAAM контролюється сенсорною установкою (4), що включає датчик напруги та струму, зварювальну камеру, спектрометр, структурний акустичний датчик, мікрофон і датчик витрати газу. Кінематика, як і зварювальне обладнання, управляється числовим контролером (5), підключеним до комп'ютерної системи моделювання (6). Система обробляє дані від датчиків та аналізує їх. Крім того, вона забезпечує пряму трансляцію, збагачену інформацією про всі дані процесу, оператору або інженеру через людино-машинний інтерфейс цифрових двійників (7).

Розглянемо тепер поняття і термін цифрові двійники.

Згідно зі стандартом ISO 23247 цифровий двійник – це цифрова модель конкретного фізичного об'єкту, процесу або їхнього життєвого циклу, що забезпечує конвергенцію між фізичним і віртуальним станами з відповідною швидкістю синхронізації.

Компоненти цифрового двійника класифікують таким чином.

1 Елементні компоненти:

1.1 Фізичний (може бути продуктом, процесом, роботою або їхнім життєвим циклом).

1.2 Цифровий (віртуальний компонент).

1.3 Інформаційний потік між фізичним і цифровим активом.

2 Імперативні компоненти:

2.1 Пристрої Інтернету речей (IoT) – для збору інформації датчиків від різних підкомпонентів фізичного активу і периферійних пристроїв.

2.2 Дані збираються з різних компонентів і програмного забезпечення.

2.3 Машинне навчання – для прогнозування та реалізації зворотного інформаційного зв'язку, а також для визначення ефективних стратегій пом'якшення або усунення похибок і проблем виготовлення деталі.

Очевидно, що до цієї класифікації можна додавати й інші складові, такі, як великі бази експериментальних даних, безпека даних тощо. З урахуванням цієї інформації, очевидно, що вищевказане визначення ISO стандарту не відображає суті сучасного стану цифрового двійника.

На нашу думку, цифрові двійники – це комп'ютерні моделі фізичного об'єкту, процесу або їхнього життєвого циклу, синхронізовані в реальному часі за допомогою двостороннього зіставлення з метою прогнозування характеристик і усунення проблем, що виникають та забезпечення їх якісної роботи або поведінки.

З цього визначення і з досвіду проведених досліджень випливає важливий висновок. Для складних об'єктів і процесів цифровий двійник може, і, як правило, повинен представлятися не однією комп'ютерною моделлю, а кількома моделями.

Нижче подано рекомендовані етапи та завдання розроблення цифрових двійників для адитивних технологій виготовлення деталей із металів за технологією WAAM.

Етап1. Створення цифрового двійника деталі або процесу її експлуатації, без безпосереднього спостереження за фізичним процесом 3D друку:

1.1 Проєктування 3D-моделей з використанням CAD/CAM/CAE-систем і комп'ютерне моделювання за допомогою цифрових платформ (3D Experiense та ін.) з урахуванням особливостей адитивного виробництва, таких як можливість створення деталей складної геометрії та інших характеристик.

1.2 Створення цифрового двійника деталі або конструкції. Включає в себе дані фізичної структури, дані про параметри та характеристики функціонування та поведінки.

1.3 Тестування та оптимізація віртуальних випробувань деталі, конструкції або процесу (оцінювання міцності, гідродинаміки та стійкості до різних умов експлуатації та інші характеристики).

1.4 Коригування та зміна деталі, конструкції або процесу за результатами досліджень.

Етап 2. Створення цифрового двійника процесу моделювання металів,сплавів і додаткових матеріалів для дослідження та управління властивостями матеріалів (розв'язання матеріалознавчих задач):

2.1 Вибір відповідного металевого дроту (порошку) або іншого матеріалу для адитивного виробництва.

2.2 Дослідження властивостей матеріалу, включно з температурними характеристиками, міцністю, стійкістю до корозії тощо.

2.3 Комп'ютерне мультифізичне моделювання даних – попереднього друку, геометрії деталі, налаштувань 3D-принтера, динаміки краплі металу (порошку), термічних процесів, еволюції мікроструктури та напружень/деформацій.

2.4 Створення цифрового двійника адитивного процесу для забезпечення оптимальних параметрів і характеристик друку та прогнозування результатів у нових сценаріях друку.

2.5 Згенеровані оптимальні процеси передаються оператору або інженеру для зміни складу вихідного матеріалу або налаштувань 3D принтера.

Етап 3. Створення цифрового двійника процесу 3D друку для його симуляції та оптимізації:

3.1 Налаштування та використання датчиків і сенсорів, встановлених на принтер, для моніторингу та використання даних у реальному часі.

3.2 Використання методів машинного навчання, методів комп'ютерного зору, методів семантичної сегментації та інших сучасних інтелектуальних методів оперативного опрацювання даних під час 3D друку.

3.3 За допомогою CAE-системи (наприклад, Abaqus) і спеціальних датчиків, встановлених на принтері, проводять симуляцію процесу друку, включно з тепловими й механічними параметрами та характеристиками для оптимізації параметрів друку і запобігання виникненню дефектів.

3.4 Отриманий цифровий двійник процесу 3D друку використовує дані датчиків для прямих вимірювань та обчислювальні дані (моніторинг і прогнозування) спостережуваних даних про шар металу для створення віртуального представлення відбитка металу в реальному часі.

3.5 Шаруватий процес друку металевих виробів дає змогу захоплювати й обробляти постійний інформаційний потік даних, вносячи корективи в кожний наступний шар обробки.

3.6 Оптимізація процесу друку, шляхом підбору оптимальних параметрів друку, включно зі швидкістю, температурою, висотою шару та орієнтацією деталі.

3.7 Застосування стратегій підтримки для деталей зі складною геометрією.

Етап 4. Створення цифрового двійника процесу функціонування 3D-принтера:

4.1 Створення цифрового двійника для вдосконалення фізичного 3D-принтера на основі його віртуального представлення та моделювання системи управління.

4.2 Виготовлення прототипів складних деталей для перевірки функціональності процесу 3D друку та його ефективності.

4.3 Проведення випробувань, включно з механічними тестами, для оцінювання якості та надійності процесу 3D друку.

Етап 5. Створення інтелектуального цифрового двійника процесу управління життєвим циклом 3D друку:

5.1 Аналіз результатів тестування та внесення змін до процесу друку для поліпшення якості та продуктивності.

5.2 Інтеграція з життєвим циклом продукту–виробу або процесу:

5.3 Розвиток цифрового двійника протягом усього життєвого циклу продукту, включно з оновленням моделі на основі даних про експлуатацію та обслуговування.

5.4 Адаптивне обслуговування з використанням даних із цифрових двійників для адаптації до планового технічного обслуговування, виходячи з їхнього сталого стану та умов експлуатації.

5.5 Оновлення компонентів для швидкого виробництва оновлених або модифікованих компонентів та комплектуючих.

Усі із запропонованих етапів вимагають тісної взаємодії інженерів, технологів, матеріалознавців та IT-фахівців для створення ефективних і функціональних цифрових двійників 3D друку металевих виробів. Цифровий двійник поєднує в собі комп'ютерне моделювання, симуляцію, машинне навчання, оптимізацію та використання Інтернет речей (IoT) у реальному часі. Цифровий двійник забезпечує не тільки оптимізацію деталі, конструкції або процесу, а й забезпечує превентивне прогнозування та локалізацію можливих дефектів. Поєднання цифрових двійників та адитивних технологій у багатьох галузях промисловості зможе, забезпечуючи значні переваги в гнучкості конструкцій, швидкості, точності та надійності, не тільки скоротити витрати і час на розробку та виготовлення, а й підвищити ефективність металообробних підприємств країни.

Список посилань

1. Shaw C., Feng I., Albert T., Jones K., Guodong S.,Data Requirements for Digital Twins in Additive Manufacturing. Proceedings of the ASME 2023 International Manufacturing Science and Engineering Conference, June 12-16, 2023, New Brunswick, NJ, USA, paper #: MSEC2023-10113.

2. Hengrui L., Xichun S., Bintao W., Diego R., Zengxi P., Huijun L., Wire arc additive manufacturing: A review on digital twinning and visualization process. Journal of Manufacturing Processes, 116 (2024),P. 293–305.