

Я. С. ГРИГОРЕНКО

аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0009-5092-1012

С. Г. КАТРИЧ

аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0006-7964-693X

ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ В АДИТИВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ

Статтю присвячено цифровим двійникам (Digital Twin, DT) у металевому адитивному виробництві, зокрема в процесах лазерного сплавлення порошкового шару (laser powder bed fusion, LPBF; також powder bed fusion, PBF) та наплавлення з підведенням енергії (directed energy deposition, DED), включно з дуговим наплавленням дротом (wire arc additive manufacturing, WAAM). Розглянуто підходи до побудови архітектур цифрових двійників за рівнями «машина–процес–деталь» із визначенням функціонального призначення кожного рівня та взаємозв'язків між ними. Проаналізовано джерела даних моніторингу в процесі виготовлення (in-situ), зокрема оптичні та інфрачервоні (ІЧ) камери, фотодіоди, акустичні та електричні сигнали, що використовуються для оцінювання стану процесу та параметрів формування виробу. Систематизовано фізично обґрунтовані моделі теплопереносу, гідродинаміки ванни розплаву, формування залишкових напружень і деформацій, а також еволюції мікроструктури в умовах поширеного виготовлення. Окремо узагальнено гібридні підходи «фізика+дані» та сурогатні моделі, які поєднують результати багатофізичного моделювання з експериментальними даними та забезпечують зменшення обчислювальних витрат і наближення розрахунків до режиму реального часу. Показано типові задачі цифрового двійника в адитивному виробництві, зокрема прогноз дефектів (пористість, неповне проплавлення/lack-of-fusion, тріщини), керування параметрами процесу, віртуальну кваліфікацію якості та зв'язування параметрів процесу з мікроструктурою і властивостями виробів. На основі аналізу публікацій запропоновано концептуальний алгоритм прогнозування дефектів у режимі, наближеному до реального часу, що передбачає використання даних моніторингу та моделей цифрового двійника з контуром зворотного зв'язку для його оновлення та, за необхідності, корекції параметрів процесу.

Ключові слова: адитивне виробництво металів (AM), лазерне сплавлення порошкового шару (LPBF/PBF), наплавлення з підведенням енергії (DED), дугове наплавлення дротом (WAAM), цифровий двійник (DT), моніторинг у процесі виготовлення (in-situ monitoring), мікроструктура, пористість, якість.

YA. S. HRYHORENKO

Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0009-5092-1012

S. G. KATRICH

Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0006-7964-693X

DIGITAL TWINS IN METAL ADDITIVE MANUFACTURING

The review focuses on digital twins (DT) in metal additive manufacturing, in particular laser powder bed fusion (LPBF; also powder bed fusion, PBF) and directed energy deposition (DED), including wire arc additive manufacturing (WAAM). The paper examines the role of digital twins as integrated computational and data-driven representations of physical manufacturing systems operating under layer-by-layer fabrication conditions. Digital-twin architectures are discussed at the “machine–process–part” levels together with in-situ monitoring data sources, such as optical and infrared (IR) cameras, photodiodes, acoustic, and electrical signals, which are used to capture process behavior and part formation characteristics during printing. The functional interaction between these architectural levels and their contribution to process understanding and quality assessment are considered. The paper systematizes physics-based models of heat transfer;



melt-pool hydrodynamics, residual stress and distortion formation, and microstructure evolution, taking into account the multiphysical nature of metal additive manufacturing processes. Hybrid “physics+data” approaches and surrogate models that enable near real-time inference are summarized, emphasizing their role in reducing computational cost while maintaining consistency with physically grounded simulations and experimental observations. Typical DT tasks in additive manufacturing are highlighted: defect prediction (porosity, lack-of-fusion, cracks), process-parameter control, virtual quality qualification, and linking process parameters to microstructure and part properties. Based on the analysis of the literature, a conceptual algorithm for defect prediction in a near real-time mode is proposed, incorporating a feedback loop for updating the digital twin and (optionally) adjusting process parameters to maintain process stability and quality consistency.

Key words: metal additive manufacturing (AM), laser powder bed fusion (LPBF/PBF), directed energy deposition (DED), wire arc additive manufacturing (WAAM), digital twin (DT), in-situ monitoring, microstructure, porosity, quality.

Постановка проблеми

Металеве адитивне виробництво (additive manufacturing, AM) забезпечує виготовлення виробів складної геометрії, решітчастих структур та внутрішніх каналів, проте характеризується високою чутливістю до параметрів процесу й стану порошку/дроту. Невеликі відхилення енерговкладу, стратегії сканування, подачі матеріалу або захисної атмосфери можуть призводити до формування пористості, зон неповного проплавлення, тріщин, залишкових напружень і деформацій. Традиційний контроль якості часто здійснюється після друку (КТ, металографія, механічні випробування) і не забезпечує оперативного керування причинами дефектів під час побудови. Цифровий двійник у контексті AM розглядається як синхронізована з процесом модель, що поєднує дані моніторингу та обчислювальні моделі для прогнозу стану, дефектів та властивостей у процесі виготовлення і після нього [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У статтях [5, 6] висвітлено сучасні підходи до побудови цифрових двійників у адитивному виробництві та узагальнено типові джерела in-situ даних і класи моделей, що застосовуються для прогнозу стану процесу та якості виробів. Авторами роботи [2] проведено аналіз практичних сценаріїв використання цифрового двійника та наголошено на необхідності інтеграції фізичних моделей із даними моніторингу під час виготовлення і реалізації замкнених контурів керування параметрами друку. Дослідженню застосування концепції «digital twin science» до порошкового сплавлення (powder bed fusion, PBF) присвячено роботу [3], де встановлено, що поєднання багатофізичного моделювання з підходами інтегрованого обчислювального матеріалознавства (integrated computational materials engineering, ICME) дає змогу зв'язувати параметри процесу з еволюцією мікроструктури та властивостями. Результати досліджень [1, 7, 8] свідчать, що найбільш практичний ефект для застосувань у 3D-друку металів забезпечує зв'язування in-situ спостережень із прогнозом дефектів (пористість, неповне проплавлення/lack-of-fusion) з подальшим коригуванням режимів друку.

Архітектура та керування даними цифрового двійника. У роботах з керування даними цифровий двійник описується як сукупність пов'язаних представлень обладнання, процесу та деталі, а також як механізм узгодження даних між етапами підготовки, друку та контролю якості. Запропоновано хмарно-периферійні схеми з «cloud DT» і «edge DT» для металевого AM [4], а також ієрархічний підхід до цифрового двійника для розмежування функцій за рівнями «машина–процес–деталь» [9].

In-situ моніторинг та прогноз дефектів. In-situ моніторинг у LPBF/DED базується на оптичних та ІЧ-камерних даних, фотодіодних сигналах, акустиці та електричних параметрах джерела енергії. На цих даних розвиваються методи оцінки стабільності melt pool, класифікації режимів плавлення та прогнозу дефектів, включно з пористістю і lack-of-fusion [7, 8]. Цифровий двійник використовується для in-situ кваліфікації якості, коли прогноз дефектів формується шляхом поєднання моделювання термальної історії та даних моніторингу [7]. Загальну схему процесу PBF/LPBF наведено на рис. 1.

Фізично обґрунтовані та гібридні моделі. Фізичні моделі цифрового двійника охоплюють теплоперенос і затвердіння, динаміку ванни розплаву, формування залишкових напружень і деформацій, а також еволюцію мікроструктури (ріст зерен, фазові перетворення, текстура) [1, 3]. Гібридні підходи комбінують фізичні обмеження з даними in-situ та використовують сурогатні моделі для скорочення обчислювальних витрат і наближення до реального часу [5, 6].

Цифрові двійники в DED/WAAM. У публікаціях [6, 9] зазначено, що для directed energy deposition (DED) та wire arc additive manufacturing (WAAM) ключовими є відтворення теплових циклів і накопичення деформацій при багатопрхідному наплавленні та інтеграція даних роботизованої траєкторії з параметрами джерела енергії і температурними вимірюваннями. Такий підхід забезпечує основу для оцінювання стабільності наплавлення і прогнозування дефектів у виробничих сценаріях.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є систематизація підходів до створення цифрових двійників у металевому адитивному виробництві та узагальнення того, як поєднуються дані in-situ моніторингу з фізичними та гібридними моделями для прогнозу дефектів, мікроструктури та властивостей виробів. Додатковою метою є класифікація задач цифрового двійника за етапами життєвого циклу деталі та типами AM-процесів (LPBF/PBF, DED/WAAM).

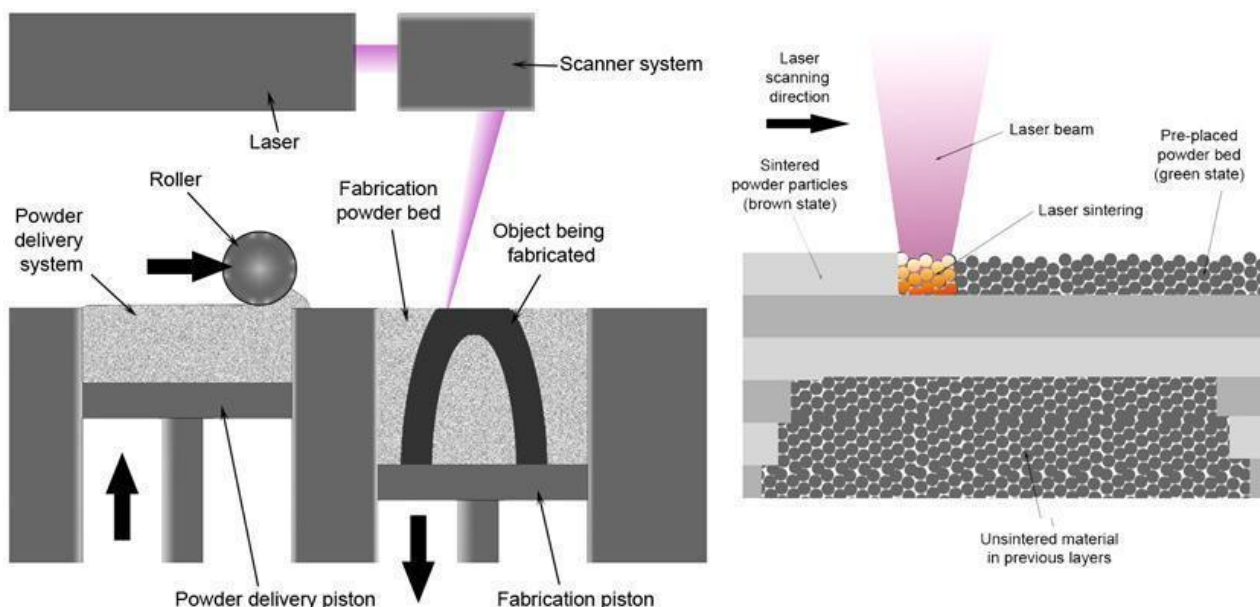


Рис. 1. Схема процесу PBF/LPBF [10]

Викладення основного матеріалу дослідження

У найпоширенішій інтерпретації цифровий двійник в AM містить: (i) цифрову модель об'єкта (машини, процесу та/або деталі), (ii) механізми збору і синхронізації даних з фізичного процесу, (iii) модуль порівняння моделі з вимірюваннями та оновлення стану, (iv) інтерфейси для прогнозу та керування (у т.ч. оптимізації параметрів). Нижче узагальнено типові рівні та функції цифрового двійника для AM. У табл. 1 наведено узагальнення за рівнями «машина–процес–деталь», типами даних і типовими виходами цифрового двійника.

Таблиця 1

Типові рівні та функції цифрового двійника в AM

Рівень	Об'єкт	Дані	Типові виходи
Машина	Установка LPBF/DED, робот, оптика	стан вузлів, лог-файли, калібрування	діагностика, стабільність режимів, обслуговування
Процес	melt pool, термополе, подача матеріалу	відео/ІЧ, фотодіод, акустика, електричні сигнали	виявлення аномалій, карти ризику дефектів
Деталь	геометрія, пористість, напруження, структура	параметри треків/шарів + моделі + вибіркова КТ/металографія	прогноз якості, мікроструктури та властивостей; віртуальна кваліфікація

Узгодження даних і синхронізація (data fusion). У цифровому двійнику ключовим є не лише збір сигналів, а й їх узгодження у часі та просторі: прив'язка кадрів оптичних/ІЧ-камер і каналів фотодіода/акустики до координат траєкторії, треку та шару. Для LPBF це означає відображення «кадр/сигнал → трек/шар → ділянка деталі», тоді як для WAAM/DED – узгодження «прохід/валик → параметри дуги (струм/напруга) → геометрія валика та локальна температура». Без синхронізації підвищується рівень шуму у вибірці, що погіршує переносимість моделей і надійність прогнозу.

Критерії дефектів і зв'язок із сигналами. У практичних сценаріях цифрового двійника дефектність пов'язують з індикаторами процесу: наприклад, пористість взаємопов'язана з аномаліями термального поля та нестабільністю ванни розплаву, а неповне проплавлення (lack-of-fusion) – із недостатнім енерговкладом, що може проявлятися у зниженні інтенсивності випромінювання, зміні геометрії melt pool та характері розбризкування (spatter). Типові явища та дефекти, характерні для SLM/LPBF, наведено на рис. 2.

Для формування «карт ризику» доцільно поєднувати ознаки з різних джерел (ІЧ-кадри + фотодіод + технологічні параметри) та агрегувати їх у вікнах, прив'язаних до треків і шарів. Окремо важливо визначати ціль прогнозу: (i) класифікація режимів/аномалій, (ii) оцінка ймовірності дефекту, (iii) локалізація ділянок підвищеного ризику для подальшої інспекції або корекції параметрів.

Калібрування цифрового двійника (model updating). Моделі цифрового двійника потребують періодичного оновлення параметрів за вимірюваннями (калібрування): наприклад, ефективного енерговкладу та коефіцієнтів теплопереносу/поглинання для термальної моделі, а також параметрів сурогатів, навчених на результатах CFD/

FEM. Калібрування може спиратися на in-situ термографію, оптичні спостереження ванни розплаву, а також вибіркові результати КТ або металографії. Практично це реалізується як цикл «прогноз → порівняння з вимірюванням → корекція параметрів → повторний прогноз».

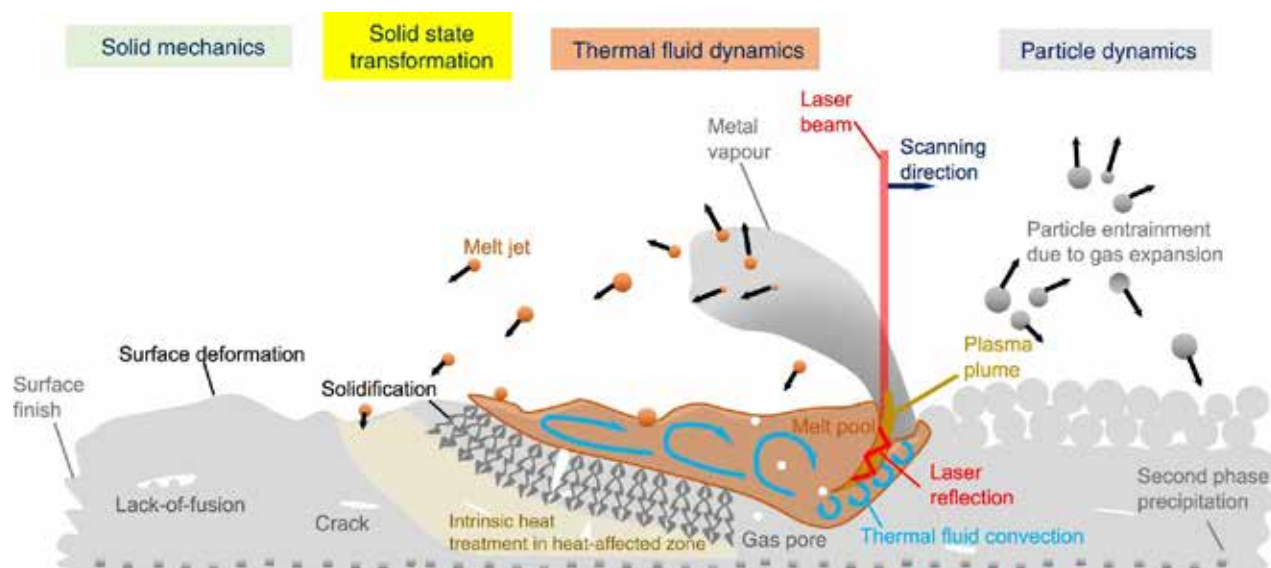


Рис. 2. Приклади явищ, пов'язаних із формуванням дефектів у SLM/LPBF [11]

Для LPBF типова постановка задачі цифрового двійника зводиться до реконструкції термальної історії по шарах і треках та її зв'язування з дефектністю (пористістю, lack-of-fusion) і параметрами мікроструктури [1,3,7,8]. Фізичні моделі можуть бути повнорозмірними (обчислювальна гідродинаміка (computational fluid dynamics, CFD)/метод кінцевих елементів (finite element method, FEM)) або редукованими; для оперативної роботи часто використовуються сурогати, навчені на результатах симуляцій та валідації [5,6].

У процесах directed energy deposition (DED) та wire arc additive manufacturing (WAAM) цифровий двійник, як правило, фокусується на відтворенні теплових циклів та накопиченні деформацій під час багатошарового наплавлення. У роботах [6,9] підкреслено доцільність поєднання моделей траєкторій і послідовності проходів із вимірюваннями струму/напруги, температурними даними та геометрією валика для подальшої оцінки ризику дефектів і стабільності процесу.

Питання валідації цифрового двійника в адитивному виробництві (AM) тісно пов'язане з неруйнівними методами контролю (комп'ютерна томографія, КТ) та матеріалознавчими дослідженнями (металографія, дифракція зворотно-розсіяних електронів (electron backscatter diffraction, EBSD), фрактографія). Результати досліджень [7, 9] свідчать, що практичною основою є формування наборів «ground truth» на обмеженій кількості зразків і подальше перенесення моделей на виробничі сценарії, а також розвиток процедур інспекції деталі у контексті цифрового двійника. Запропонований алгоритм прогнозування дефектів (концепція). З урахуванням проаналізованих підходів [1–9] та практичного досвіду розробки програмних систем доцільно розглядати прогнозування дефектів як керований конвеєр даних цифрового двійника, що працює в (наближеному) реальному часі. Узагальнену структурну схему конвеєра цифрового двійника наведено на рис. 3.

На рис. 3 показано логіку інтеграції модулів цифрового двійника: від збору in-situ даних і узгодження у часі/просторі до побудови ознак, гібридного моделювання «фізика+дані», оцінювання невизначеності, прийняття рішень і циклу валідації з подальшим оновленням моделі.

1) Збір даних: синхронізований запис оптичних/ІЧ-кадрів, фотодіодних, акустичних та електричних сигналів, а також технологічних параметрів (потужність, швидкість сканування/наплавлення, подача матеріалу).

2) Попередня обробка: очищення шумів, нормалізація, вирівнювання часових міток, формування пакетів «трак/шар» та автоматичне маркування подій (нестабільність ванни розплаву, перегрів тощо).

3) Виділення ознак: статистичні та спектральні ознаки сигналів; зображувальні ознаки з кадрів (температурні поля, геометрія melt pool, спатер); агрегування у вікнах часу.

4) Гібридна модель: поєднання швидкої фізично-обґрунтованої оцінки енерговкладу/термальної історії з моделлю машинного навчання (класифікація/регресія) для ймовірності дефектів та їх локалізації.

5) Оцінювання невизначеності: розрахунок довіри прогнозу (наприклад, через ансамбль моделей) для відсіювання сумнівних рішень і коректного запуску додаткового контролю.

Цифровий двійник (DT) для прогнозування дефектів у металевому адитивному виробництві

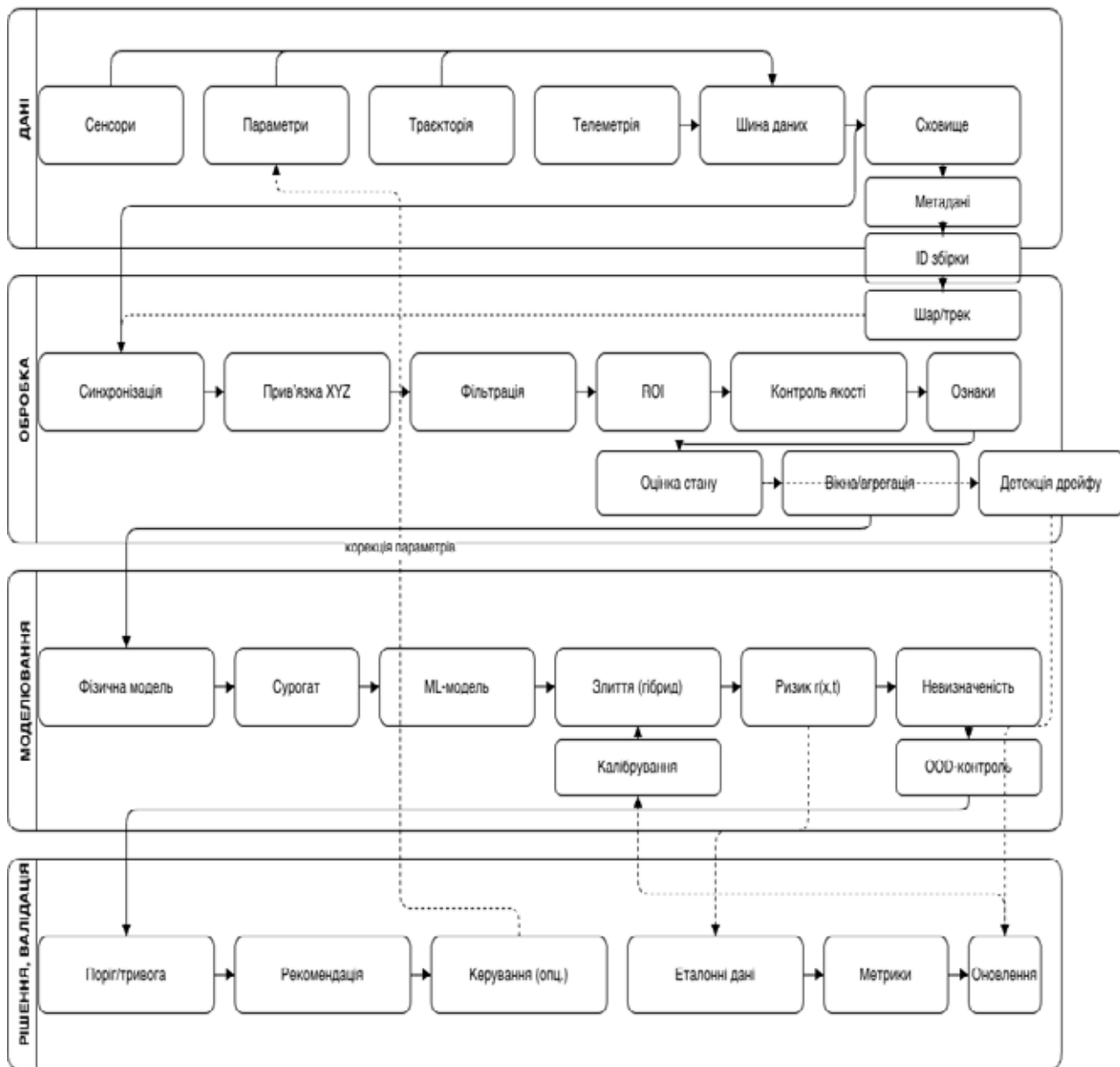


Рис. 3. Концептуальна схема цифрового двійника для прогнозування дефектів

6) Онлайн-інференс і зворотний зв'язок: якщо ризик дефекту перевищує поріг – рекомендація або автоматичне коригування параметрів (енерговклад, швидкість, стратегія) з протоколюванням змін.

7) Післяпроцесна валідація: зв'язування прогнозів із результатами КТ/металографії, оновлення датасету та періодичне перенавчання/калібрування моделей.

Обмеження та область застосування. Запропонована схема орієнтована на оперативну оцінку ризику дефектів і підтримку рішень під час друку, а не на детальне повнорозмірне моделювання кожного фізичного явища. Точність прогнозу залежить від якості «ground truth» (КТ/металографія) та відтворюваності умов друку для конкретного матеріалу, геометрії та обладнання. Тому критичними є оцінювання невизначеності, контроль перенесення моделі на нові режими та періодичне оновлення/калібрування цифрового двійника за результатами вибіркової інспекції.

Формалізація запропонованого підходу.

Вхідні дані: часово синхронізовані in-situ сигнали (оптичні/ПЧ-кадри, фотодіодні/акустичні канали), технологічні параметри (потужність, швидкість, подача матеріалу) та метадані траєкторії (шар, трек, координати).

Вихід алгоритму: оцінка ризику дефекту $r(x,t) \in [0;1]$ (ймовірність або індекс), а також локалізація/клас дефекту (наприклад, пористість або lack-of-fusion) для конкретного шару чи ділянки траєкторії.

Модель: гібридний предиктор, де фізично-обґрунтовані індикатори енерговкладу та термальної історії формують базові ознаки, а модель машинного навчання реалізує відображення ознак у ризик дефектів; невизначеність оцінюється ансамблюванням або байєсівським наближенням.

Валідація: порівняння прогнозів із результатами КТ/металографії (ground truth) за метриками AUC/PR-AUC, F1 (для класифікації) або MAE/RMSE (для регресії) із окремим аналізом узагальнення на нові геометрії та режими.

Запропоновано інтегрований контур «in-situ дані \rightarrow гібридне моделювання \rightarrow оцінка невизначеності \rightarrow керуюча дія», що узгоджує цифровий двійник із задачами оперативного прогнозування дефектів і підтримки рішень у процесі друку.

Висновки

Цифрові двійники у металевому адитивному виробництві формуються як інтеграція сенсорних даних, моделей процесу та матеріалознавчих описів мікроструктури і властивостей. Для LPBF ключовими є реконструкція термальної історії, прогноз пористості та керування режимами плавлення; для DED/WAAM – теплові цикли, деформації та стабільність наплавлення. Гібридні моделі «фізика+дані» та сурогатні підходи є основним шляхом до побудови цифрового двійника, придатного до роботи у виробничому циклі. На основі огляду та практичного досвіду програмної розробки запропоновано концептуальний алгоритм прогнозування дефектів, що включає збір і синхронізацію in-situ даних, попередню обробку, виділення ознак, гібридне моделювання, оцінювання невизначеності та онлайн-зворотний зв'язок для коригування параметрів друку. Подальший розвиток напрямку залежить від стандартизації даних і метрик якості та узгодження моделей на різних масштабах для надійного зв'язування «процес–структура–властивості».

Список використаної літератури

1. Mukherjee T., DebRoy T. A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components. *Applied Materials Today*. 2019. Vol. 14. P. 59–65. DOI: 10.1016/j.apmt.2018.11.003.
2. Gunasegaram D. R., Murphy A. B., Matthews M. J., DebRoy T. The case for digital twins in metal additive manufacturing. *Journal of Physics: Materials*. 2021. Vol. 4, No. 4. Art. 040401. DOI: 10.1088/2515-7639/ac09fb.
3. Koizumi Y., Okugawa M. Digital Twin Science of Metal Powder Bed Fusion Additive Manufacturing: A Selective Review of Simulations for Integrated Computational Materials Engineering and Science. *ISIJ International*. 2022. Vol. 62, No. 11. P. 2183–2196. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-184.
4. Liu C., Le Roux L., Körner C., Tabaste O., Lacan F., Bigot S. Digital twin-enabled collaborative data management for metal additive manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*. 2020. Vol. 62. P. 857–874. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.05.010.
5. Ben Amor S., Elloumi N., Eltaief A., Louhichi B., Alrasheedi N. H., Seibi A. Digital Twin Implementation in Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Processes*. 2024. Vol. 12, No. 6. Art. 1062. DOI: 10.3390/pr12061062.
6. Tudorache L., Mihai A., Constantin G. та ін. Current approaches to digital twins in additive manufacturing: a systematic literature review. *Progress in Additive Manufacturing*. 2025. DOI: 10.1007/s40964-025-01262-7.
7. Bevans B. D., Carrington A., Riensche A. та ін. Digital twins for rapid in-situ qualification of part quality in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2024. Vol. 93. Art. 104415. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104415.
8. Malik A. W., Mahmood M. A., Liou F. Digital twin-driven optimization of laser powder bed fusion processes: a focus on lack-of-fusion defects. *Rapid Prototyping Journal*. 2024. Vol. 30, No. 10. P. 1977–1988. DOI: 10.1108/RPJ-02-2024-0091.
9. Phua A., Davies C. H. J., Delaney G. W. A digital twin hierarchy for metal additive manufacturing. *Computers in Industry*. 2022. Vol. 140. Art. 103667. DOI: 10.1016/j.compind.2022.103667.
10. Materialgeez. SLS schematic.svg (Selective laser melting system schematic) [Електронний ресурс]. Wikimedia Commons. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SLS_schematic.svg (дата звернення: 21.02.2026).
11. Panwisawas C., Tang Y. T., Reed R. C. Metal 3D printing as a disruptive technology for superalloys. *Nature Communications*. 2020. Vol. 11, No. 1. Art. 2327. DOI: 10.1038/s41467-020-16188-7.

References

1. Mukherjee, T., & DebRoy, T. (2019). A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components. *Applied Materials Today*, 14*, 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.11.003>
2. Gunasegaram, D. R., Murphy, A. B., Matthews, M. J., & DebRoy, T. (2021). The case for digital twins in metal additive manufacturing. *Journal of Physics: Materials*, 4*(4), 040401. <https://doi.org/10.1088/2515-7639/ac09fb>

3. Koizumi, Y., & Okugawa, M. (2022). Digital twin science of metal powder bed fusion additive manufacturing: A selective review of simulations for integrated computational materials engineering and science. *ISIJ International, 62*(11), 2183–2196. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-184>
4. Liu, C., Le Roux, L., Körner, C., Tabaste, O., Lacan, F., & Bigot, S. (2020). Digital twin-enabled collaborative data management for metal additive manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems, 62*, 857–874. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.05.010>
5. Ben Amor, S., Elloumi, N., Eltaief, A., Louhichi, B., Alrasheedi, N. H., & Seibi, A. (2024). Digital twin implementation in additive manufacturing: A comprehensive review. *Processes, 12*(6), 1062. <https://doi.org/10.3390/pr12061062>
6. Tudorache, L., Mihai, A., Constantin, G., et al. (2025). Current approaches to digital twins in additive manufacturing: A systematic literature review. *Progress in Additive Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01262-7>
7. Bevans, B. D., Carrington, A., Riensche, A., et al. (2024). Digital twins for rapid in-situ qualification of part quality in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing, 93*, 104415. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104415>
8. Malik, A. W., Mahmood, M. A., & Liou, F. (2024). Digital twin-driven optimization of laser powder bed fusion processes: A focus on lack-of-fusion defects. *Rapid Prototyping Journal, 30*(10), 1977–1988. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2024-0091>
9. Phua, A., Davies, C. H. J., & Delaney, G. W. (2022). A digital twin hierarchy for metal additive manufacturing. *Computers in Industry, 140*, 103667. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103667>
10. Materialgeeza. (n.d.). SLS schematic.svg [Diagram]. Wikimedia Commons. Retrieved February 21, 2026, from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SLS_schematic.svg
11. Panwisawas, C., Tang, Y. T., & Reed, R. C. (2020). Metal 3D printing as a disruptive technology for superalloys. *Nature Communications, 11*(1), 2327. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16188-7>

Дата першого надходження статті до видання: 13.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 07.05.2026