

ПЕРСПЕКТИВИ ПОЄДНАННЯ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ В АДИТИВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

M.J. Quintana^{1,2}, Y. Ji^{1,3}, P.C. Collins^{1,2,3,4}

¹Department of Materials Science and Engineering, Iowa State University, Ames, USA

²The Center for Advanced Nonferrous Structural Alloys, joint NSF I/UCRC Iowa State University
and the Colorado School of Mines, USA

³The Center for Nondestructive Evaluation, USA

⁴Ames Laboratory, Ames, USA. pcollins@iastate.edu

У цій статті представлено перспективи, пов'язані із застосуванням міждисциплінарного підходу в галузі неруйнівного контролю (НК) адитивного виробництва (АВ), надано стислий опис основ та подробиць, що стосуються обох напрямків, а також представлено оцінку сучасного стану. Ця стаття у певному розумінні може сприйматися у якості спільної основи для різних областей, а також каталізатора для створення майбутніх зв'язків. Зрештою стане зрозуміло, що попереду ще багато роботи, але робота, яка триває, є захоплюючою, і потенціал для використання методів НК для АВ металовиробів дуже високий.

Вступ. Безсумнівно, АВ є новою парадигмою виробництва. У своєму найбільш футуристичному сенсі (див. рис. 1) АВ здатне виробляти чисті або майже чисті (близькі до них) форми:

- характеристики яких охоплюють різні масштаби довжини (Zhou et al. 2015; Riveiro et al. 2019; Kumar and Maji 2020; Marini and Corney 2020);
- чия топологія може бути топологічно оптимізованою або, з часом, генеративно розробленою (Meng et al. 2020; Liu et al. 2018);
- стан матеріалів, а отже, властивості/продуктивність, можна контролювати просторово шляхом налаштування процесу, та/або композиції (Tamas-Williams and Todd 2017; Li et al. 2020);
- локальний стан матеріалів може бути розроблений і виміряний під час виготовлення компонента, забезпечуючи цифровий запис/двійник, який можна використовувати як для перевірки технологічного простору, так і для прогнозування властивостей/продуктивності деталі під час обслуговування.

Більшість методів АВ є процесами, заснованими на синтезі, склад осадженого матеріалу може відрізнитися від складу вихідного порошку чи дроту через або переважну втрату деяких легких елементів, або потрапляння інших елементів з навколишнього середовища (Carroll et al. 2015; Sato and Kuwana 1995; Semiati et al. 2004). Природа процесу АВ динамічна, інші дослідження ведуть до нових уявлень про утворення та еволюцію дефектів (Kenney et al. 2021; Quintana et al. 2021), важливість динаміки рідини (Tamas-Williams et al. 2015; Hojjatzadeh et al. 2019) щодо розплавленої ванни та наявності будь-якої замкової щілини, а також конкуренції між молекулярним потоком газу та випаровуванням елементарних часток та

їх спільного впливу на проксимальний порошок (Yoder et al. 2021; Ahsan and Ladani 2020). Ці нові підходи в фізиці відкриваються в складних експериментальних установках, включаючи високоенергетичні промені, де можна отримати як просторові, так і часові дані (мікрометри та мікросекунди). Сучасні методи кореляції фізичних механізмів починають співвідноситися з деякими підходами НК, пов'язаними з АВ.

Огляд адитивного виробництва. Найдавнішу технічну основу для АВ на основі металу можна знайти в патенті 1920 року Ralph Baker (1920), який запатентував метод виготовлення декоративних виробів за допомогою електродугового зварювання для нанесення шарів матеріалу на попередньо осаджені шари з того самого металу. У той час як цей метод згадувався в інших методах зварювання в 1960-х роках, наступний відомий патент був отриманий в 1979 р. від Brown (1979) під час роботи в United Technologies Corp. над проектом, фінансованим ВМС США. У 1979 р. винахідники розкрили процес для подальшого осадження металевих шарів, який був би здатний виробляти об'ємні, швидко твердіючі метали. У своїй роботі вони назвали цю техніку «LAYERGLAZE», і в своєму патенті вони включили можливості багатьох джерел тепла (включаючи електронні промені та лазери) і різноманітних форм матеріалу (включно з порошком і дротом).

Інші ключові технологічні патенти в 1980-х роках, ґрунтуються на полімерних матеріалах, включаючи роботу Hideo Kodama в 1981 р. (Kodama 1998), роботу Charles Hull's в стереолітографії в 1984 році (Hull 1984) і перший 3D-принтер Hull у 1987 р. (3D Systems 2021). На початку АВ були спроби зрозуміти масштаб обробки властивостей, зрозуміти простір склад-мікроструктура-властивості, включаючи використання сумішей елементів

(Schwender et al. 2001; Al Mangour et al. 2017) і виконати початкову роботу зі створення композиційно градуєваних структур (Zhang and Bandyopadhyay 2019; Bandyopadhyay and Heer 2018; Obielodan and Stucker 2013; Balla et al. 2009). Галузі промисловості почали фінансувати роботу з розробки перших баз даних обробки–структури–властивостей і почали вводити в експлуатацію металеві частини АВ (Collins et al. 2014, 2016). Протягом останнього десятиліття були докладені зусилля з розробки та інтеграції обчислювальних інструментів для прогнозування геометрії (включаючи викривлення та залишкову напругу), мікроструктури, властивостей деталей АВ (Smith et al. 2016a; King et al. 2015). Рівень складності та доступності машин зараз достатньо високий, що у 2019 році було навіть показано, що можна надрукувати 3D і «полетіти» в костюмі супергероя (All3DP 2021).

Масштаби систем АВ коливаються від аерозольних струменевих процесів, із субмікрометровою роздільною здатністю до великомасштабних АВ в кілька метрів (Lim et al. 2012; Williams et al. 2016). У той час як більшість систем АВ, пов'язаних із металами, включають синтез (маси рідкого

металу), існують інші інноваційні методи АВ, які є твердотільними і покладаються на фрикційний або ультразвуковий методи з'єднання. Джерела тепла для АВ включають лазери, електронні промені, джерела плазми та методи, засновані на опорі (Huang et al. 2014; Batista et al. 2020). Вхідний матеріал, який додається, як правило, це дріт або порошок, та також може включати тонкий лист або стрічку (Kobryn et al. 2022; Hascoet et al. 2014).

Атмосфера може бути різною, починаючи від вакууму і інертного захисного газу до осадження в контрольованих атмосферних камерах. Ця мінливість впливає на склад осаджених матеріалів у системах на основі синтезу. Системи АВ можуть бути адитивними або гібридними, що включають субтрактивні або інші методи, такі як лазерне очищення для локального контролю залишкової напруги (Hackkel et al. 2018; Madireddy et al. 2019). Системи можуть бути обладнані для доставки матеріалу з одного джерела живлення або з кількох джерел живлення, щоб уможливити просторовий контроль складу попередньо запрограмованим способом (Kelly et al. 2021; Schwartz and Boydston 2019).

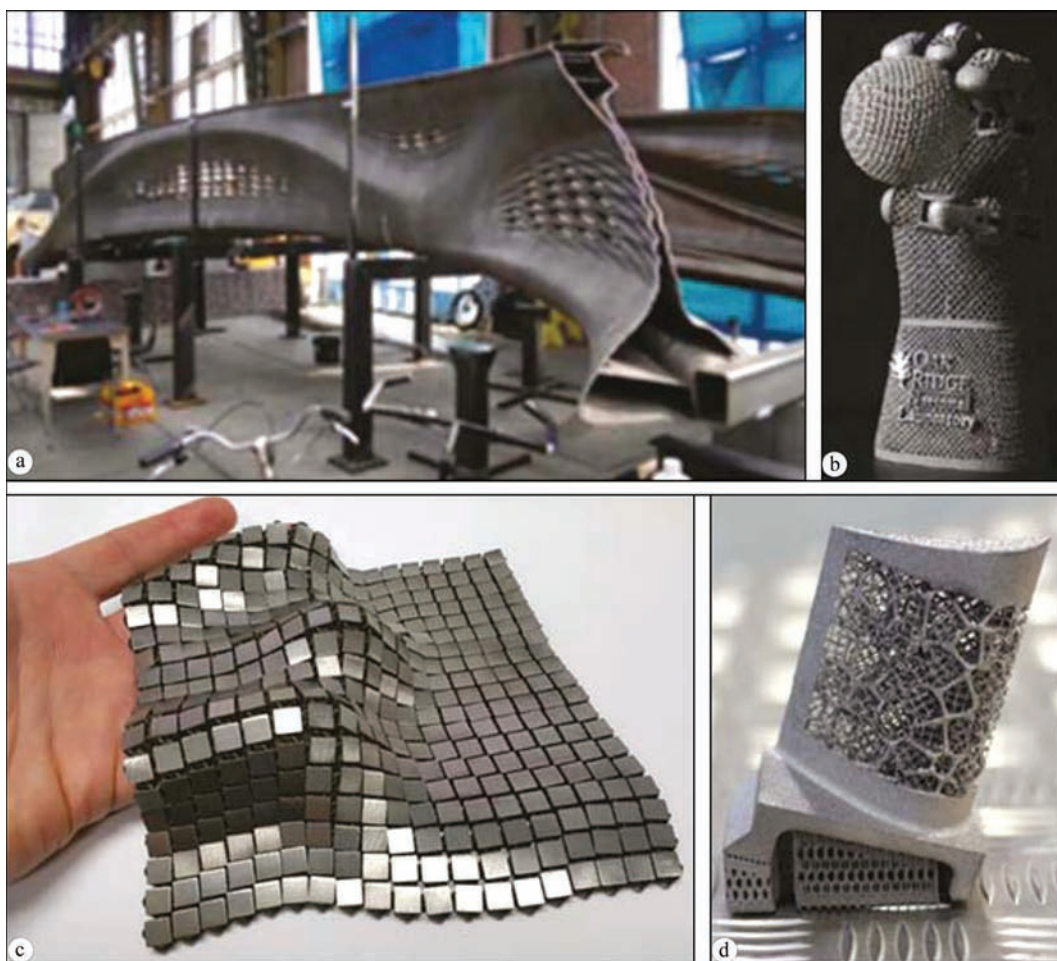


Рис. 1. Різноманітність застосувань методів АВ: а — адитивно виготовлений міст із застосуванням технології адитивного виробництва дротяної дуги; б — гідравлічний ручний 3D-друк, надрукований Національною лабораторією Oak Ridge, всередині якого розміщені електродвигуни та гідравлічні компоненти; с — надрукована на 3D-принтері металева «космічна тканина», розроблена та виготовлена NASA; д — мезоструктури АВ у лопатці турбіни

Таблиця 1. Змінні стану матеріалів, зв’язаних з різними фізичними процесами, пов’язаними з АВ

Фізичний процес	Змінні стану матеріалів					
	Склад		Фази (розмір, частка)	Розмір зерна/фактура	Дефекти	Залишкова напруга
	Середній	Локальний				
Введення тепла	—	X	x	x	—	—
Макроскопічний теплообмін	—	—	x	—	—	—
Термодинаміка матеріалів	—	X	—	—	x	—
Динаміка рідини в ванні розплаву	—	—	—	—	x	—
Процеси руху рідини, суміжні з ванною	x	X	—	—	x	—
Процеси розділу рідина/пар	—	X	—	x	x	x
Процеси розділу рідина/тверде тіло	—	—	x	—	—	x
Твердотільні фазові перетворення	—	—	—	x	x	x
Пружна та пластична деформація, градієнти	—	—	x	x	x	x
Термомеханічні обертання	—	—	—	x	x	x
Ефекти евклідового осадження (тобто G-коду)	—	X	x	x	—	—

Осаджені структури можуть бути повністю щільними, гратчастими або з варіаціями контрольованих внутрішніх порожнин (Juechter et al. 2018; Wang et al. 2018; Tao 2016; Gardan and Schneider 2015). На рис. 1 представлено широкий огляд типів структур, систем і процесів, які існують. Ці процеси ще більше ускладнюються рухом джерела тепла, викликаючи так звані термічні обертання в деталі, і заслуговують окремого розгляду за межами цієї статті. Однак розуміння таких широких категорій корисне для розуміння ключових показників стану матеріалів, які впливають на властивості та продуктивність матеріалу. У табл. 1 представлені кореляції між цими загальними типами фізичних процесів та параметрами стану матеріалів, які визначають властивості та продуктивність матеріалів.

Важливі фактори стану матеріалів. З точки зору відмови в більшості металевих систем, головна мета полягає в тому, щоб зрозуміти наявність дефектів і пошкоджень та їх розвиток під час експлуатації. Таким чином, такі поняття, як втома та руйнування, йдуть поряд з усвідомленням стану матеріалів і будь-якими спробами пов’язати методи НК з АВ. У АВ-матеріалах домінуючими макроскопічними дефектами є пористість, непровар (LOF), розтріскування/розрив і сфероїдизація. Текстура відіграє важливу роль у властивостях матеріалів. Текстура дуже поширена в АВ-матеріалах через круті температурні градієнти та швидке затвердіння (Quintana et al. 2020; Saville et al. 2021; Kamath et al. 2021; Kunze et al. 2015; Dinda et al. 2012; Song et al. 2014). Склад матеріалів, фази, їх розмір і розподіл є критично важливими для встановлення базових механічних властивостей сплавів (таких як міцність, пластичність, і в’язкість до руйнування). Існують локальні композиційні флуктуації в компонентах АВ (Kenney et al. 2021; Collins 2004; Hayes et al. 2017), які можуть призвести до варіацій тензора пружної жорсткості і,

отже, мають бути актуальними для НК. Існує взаємозв’язок між змінними стану матеріалів, який забезпечує потенційні стратегії їх кращої ідентифікації за допомогою методів НК.

Дефекти. Існує принаймні п’ять типів макроскопічних дефектів, пов’язаних із такими об’ємними змінами: сферична пористість, непровар LOF, сфероїдизація, розтріскування або гарячий розрив та луска риби (Zhou et al. 2015; Tamas-Williams et al. 2015; Pogson et al. 2004; Sochalski-Kolbus et al. 2015). На рис. 2 наведено приклади чотирьох типів макроскопічних дефектів. Часто й помилково вважається, що сферична пористість (рис. 2, а) вказує на наявність газової пори. Першим джерелом пори є газоподібні елементи, такі як аргон, другим джерелом є легуючі елементи, які випаровуються та створюють замкову щілину. Дефекти LOF (рис. 2, b) спричинені частковим плавленням матеріалу через недостатню кількість тепла (Polonsky et al. 2020; Calta 2019; Martin et al. 2019; Cunningham et al. 2019). Методи НК, такі як рентгенівська комп’ютерна томографія, визначають наявність дефектів LOF у деталі, їх розташування та розміри глибини проникнення. Надмірне тепло може спричинити інші дефекти, пов’язані з «феноменом сфероїдизації» (рис. 2, c), коли рідкі краплі металу викидаються з ванни розплаву, швидко охолоджуються і приземляються (Khairallah et al. 2016; Gunenthiram et al. 2018; Haghdadi et al. 2021) та можуть ефективно змінювати локальні властивості (топологічні, механічні, хімічні, текстурні, термічні тощо) і впливати на наступні шари. Дефект розтріскування (рис. 2, d) — визначається пластичністю матеріалу. Дефект «луска риби» (рис. 2, e та 2, f). Цей дефект спостерігається в площинах, паралельних напрямку формування, і є результатом коливань концентрацій розчиненої речовини або хімічних коливань у розплаві, або варіацій утворення осаду та морфології (Sochalski-Kolbus et al. 2015; Tang et al. 2015; Brandl et al. 2012).

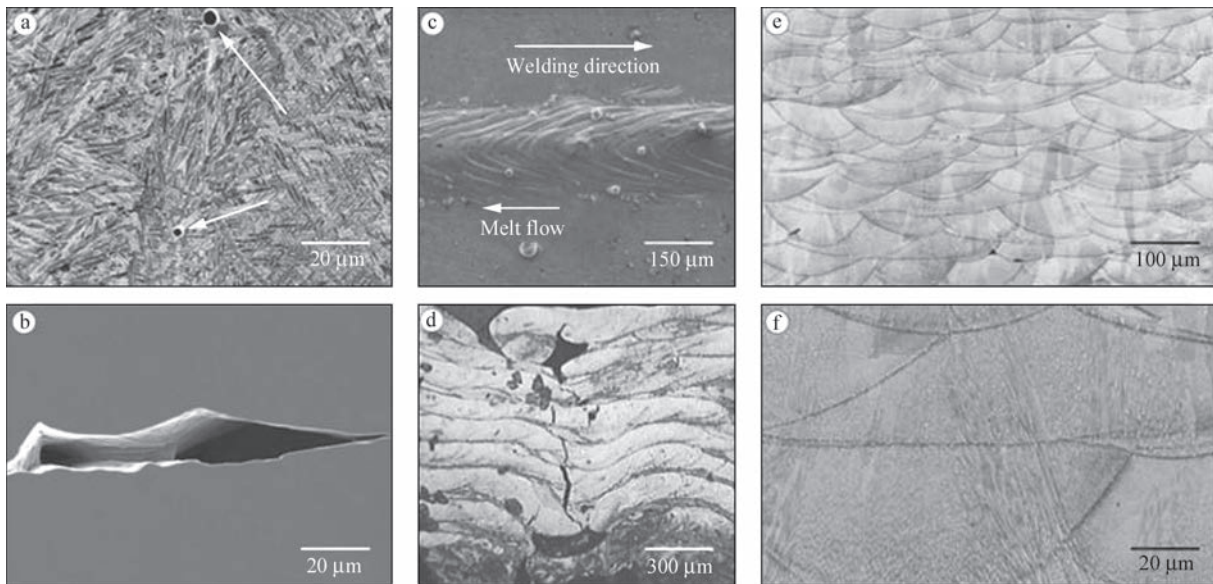


Рис. 2. Дефекти, які зазвичай спостерігаються в АВ: а — сферична пористість (позначена стрілками); б — дефекти LOF; с — сфероїдизація; d — гарячий розрив, спричинений надлишковим надходженням енергії, що створює викид матеріалу та термічні напруги; е і f “луска риби” при різних збільшеннях

У АВ такі параметри процесу, як розмір ванни розплаву, стратегія сканування та висота шару, впливають на максимальний тепловий градієнт і, таким чином, відповідають за текстуру та морфологію зерна, що може призвести до рівновісних зерен (рис. 3, а) або подовжених стовпчастих зерен (рис. 3, b) (Naghdadi et al. 2021). Оскільки текстура безпосередньо пов'язана з тепловим потоком, наявність дефектів, таких як сферичні пори або LOF (Kenney et al. 2021), може змінити вектор тепла та орієнтацію росту стовпчастих зерен. Це локальне порушення є прикладом корельованої мікроструктурної особливості, яка може допомогти ідентифікувати дефекти — навіть ті, що знаходяться під поверхнею — у компонентах АВ.

Залишкова напруга. У наплавлених АВ, залишкові напруги можуть змінюватися в межах шару. Вони відрізняються в нижній частині шару від верхньої (Denlinger et al. 2014, 2015; Michaleris 2014; Mercelis and Kruth 2006). Враховуючи градієнтний характер локальних станів напруги/деформації та типове балансування станів напружень, ці напруги можуть бути стискаючими або розтягуючими за своєю природою (Denlinger et al. 2015; Brice, Hofmeister 2013). Roberts (2009) повідомили, що залишкові напруги безпосередньо пов'язані з температурними градієнтами в ванні розплаву, і, отже, ними можна керувати за допомогою теплових градієнтів шляхом зміни параметрів друку та стратегії сканування. Такі залишкові напруги були б потенційно придатними для нелінійних методів НК після осадження, хоча можливо використовувати методи на основі зображення для прогнозування локального залишкового напруження компонента.

Композиційні варіації. У АВ варіації складу можуть бути викликані навмисно (наприклад,

через контрольовану модифікацію вхідної подачі матеріалу) або ненавмисно (наприклад, через летючість елементарних видів у присутності вакууму та під впливом значного перегріву). На додаток до цих макроскопічних змін у складі ванни розплаву або її поверхні, складний потік рідини може передавати різні композиційні області (часто зі швидкістю потоку від 0,1 до 1,0 м/с). Крім того, нещодавно було показано, що для процесів із порошковим шаром динаміка рідини пов'язана з конвективними силами всередині розплавленої ванни, що може мати значний вплив на локальний склад затверділого матеріалу.

Потік рідини в поєднанні з переважним елементарним випаровуванням можна спостерігати в оптичній мікроскопії (зазвичай у вигляді світлих і темних смуг, перпендикулярних до напрямку будови) та енергетично дисперсійній спектроскопії (захоплення смуг і хімічні турбулентні сигнатури за наявності дефектів) (рис. 3, с).

Фази. Традиційні моделі фазового перетворення не є повністю дійсними для систем АВ і вимагають модифікації, щоб включити ці термічні цикли та їхній вплив на вже надруковані шари. Однак може бути так, що непрямі методи можна використовувати для оцінки фазоутворення, оскільки виділення однієї фази змінить кристалохімію вихідної фази, що призведе до змін локального тензора пружної жорсткості, властивості, яку можна визначити за допомогою методів НК.

Огляд застосування методів НК для адитивного виробництва. НК — це набір якісних і кількісних методів тестування, які використовуються для оцінки певних характеристик об'єкта тестування без постійного пошкодження чи зміни. Методи НК покладаються на електромагнітне випроміню-

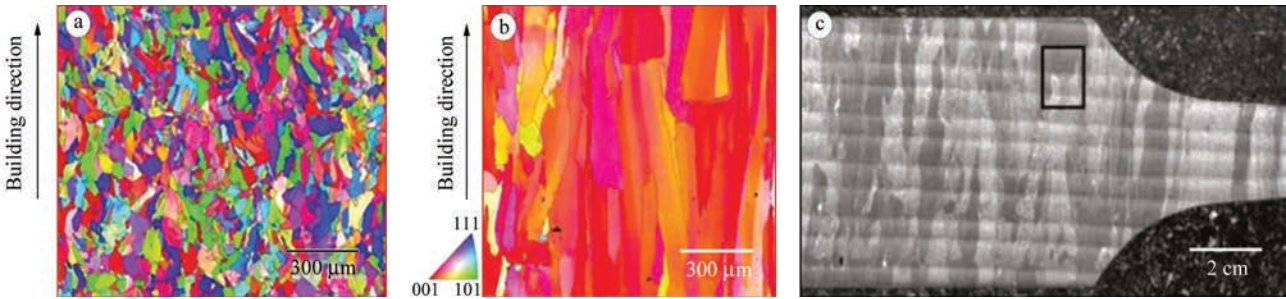


Рис. 3. Текстура в сплавах АВ: а — графіки зворотної полюсної фігури нержавіючої сталі 316L з використанням потужності лазера 150 Вт; б — графіки зворотної полюсної фігури нержавіючої сталі 316L з використанням потужності лазера 1000 Вт; с — стовпчастий ріст і смуги в зразку на розтяг Ti–6Al–4V

нювання, електромагнітну хвилю, процес електромагнітної дифузії, механічну хвилю, видиме та невидиме світло або комбінацію цих фізичних явищ (наприклад, лазерно-індукована фазована решітка LIPA та електромагнітний акустичний перетворювач ЕМАТ) для опосередкованого впливу або безпосереднього досліджування зразків. Варто зазначити, що НК — це набагато більше, ніж просто «виявлення тріщин», оскільки дуже часто використовують методи НК для оцінки властивостей ідеально працюючих об’єктів на мікро-, мезо- та макромасштабі. Виходячи з конкретних фізичних процесів і принципів, методи НК можна в цілому розділити на шість модальностей: візуальне тестування (VT), ультразвукове тестування (UT), тестування акустичним випромінюванням (АЕ), електромагнітне тестування (ЕТ), радіографічне тестування (РТ) і теплові/інфрачервоні випробування (ІР). Оскільки якість деталей АВ дуже чутлива до технологічного процесу та складних і конкуруючих фізичних характеристик, існує очевидна потреба в НК на АВ. Необхідно включити НК в цикл процесу АВ, щоб інформація зворотного зв’язку від методів НК могла не тільки покращити процес, але й відігравати важливу роль у загальній парадигмі забезпечення якості. Табл. 2 (Taheri et al. 2017) підсумовує використання методів НК у АВ у 2017 р. та їх розвиток протягом наступних чотирьох років.

Візуальне тестування (VT). Методи VT включають, але не обмежуються цим: контурне відображення, проекцію смуги (структуроване світло), лазерну профілометрію, цифрову кореляцію зображень, а також оптичне зображення та томографію. Ці методи в основному використовуються для оцінки геометричної точності, шорсткості поверхні та залишкової напруги (Sharratt 2015). Нещодавні досягнення в області комп’ютерного зору також можуть надати інший спосіб вимірювання залишкової напруги за допомогою Ейлерового збільшення відео (Wu et al. 2012), який є відносно дешевим, оскільки він заснований на камері. Методи VT (на основі камери) корисні для моніторингу процесу АВ на місці завдяки їх низькій вартості, простоті використання та численним програмним пакетам підтримки. Основним застосуванням методів камери в моніторингу процесу АВ є дефектоскопія. Дефекти LOF можна ідентифікувати з оптичних даних шляхом співвіднесення кількох зображень з різними умовами освітлення та із кількох шарів (Abdelrahman et al. 2017). Механічні властивості, такі як щільність і межа текучості, також можна визначити за допомогою оптичних зображень, отриманих під час моніторингу на місці процесу селективного лазер-

Таблиця 2. Порівняння потенціалу та можливостей застосування методів NDE для виявлення дефектів та оцінки матеріалів для готових деталей АМ, а також зміни в цих методах за останні чотири роки

Метод контролю	Пропозиція		Тріщина		Мікро-структурні аномалії		Геометричні аномалії		Механічні властивості		Електро-магнітні властивості		Залишкова напруга	
	2017	2021	2017	2021	2017	2021	2017	2021	2017	2021	2017	2021	2017	2021
Візуальний	C	B ¹	C	B ¹	A		A		N	B ²	N		N	B ^{3,4}
Ультразвуковий	A		A		A		B		A		N		B	
Електромагнітний	B		A		D		B		N		A		C	
Рентгенографічний	A		A		C		A		N		N		A	
Тепловий/інфрачервоний	D	B ⁵	B		D		B		N		N		N	

Примітка: А — застосування; В — можлива/потребує розробки для використання в АВ; С — низька ймовірність успішного застосування до АВ; D — не застосовується до АВ; N — не застосовується.

¹Gobert et al. 2018. ²Lu et al. 2019. ³Sharratt 2015. ⁴Wu et al. 2012. ⁵McNeil et al. 2020.

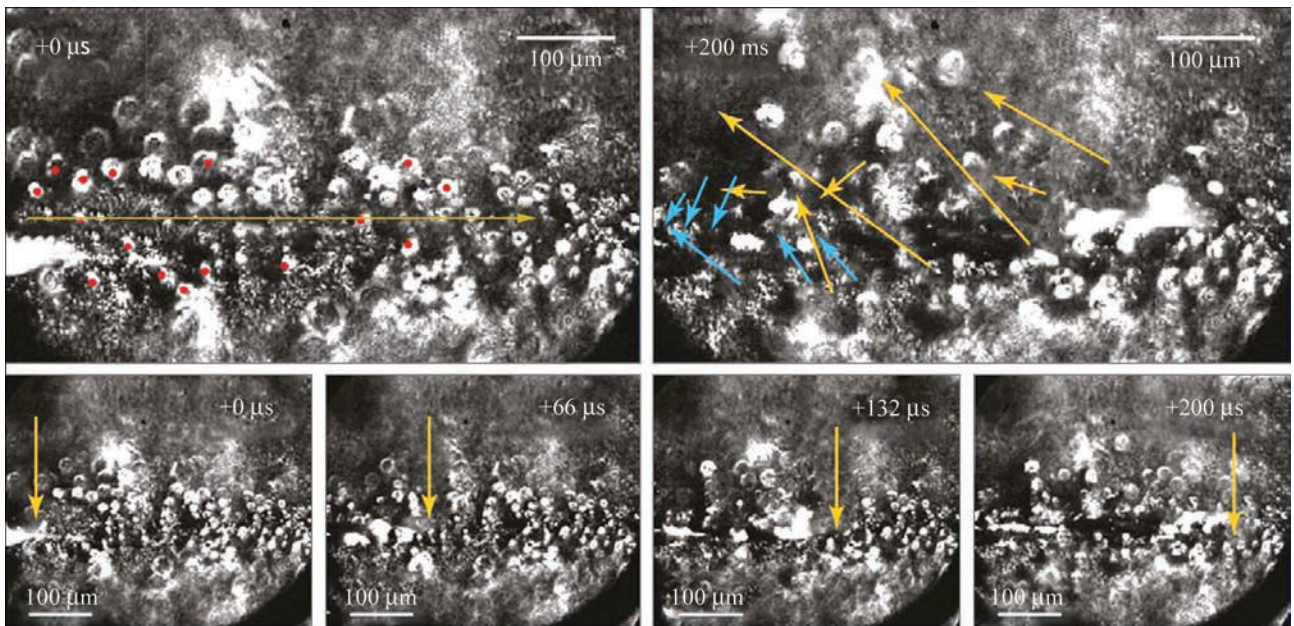


Рис. 4. Високошвидкісне зображення просування доріжки розплаву та руху порошку під впливом гарячої пари, ефекту Bernoulli

ного плавлення (Lu et al. 2019). Окрім вимірювання властивостей матеріалу, оптичне зображення також може дати нове розуміння фізичних явищ, які відбуваються під час процесу АВ. Високошвидкісна візуалізація з мікросекундною роздільною здатністю може допомогти у встановленні нових уявлень про конкуренцію між випаровуванням елементарних видів і навколишнім газовим потоком для регулювання динаміки руху порошку в системах порошкового шару подальше від ванни розплаву (Matthews et al. 2016), як показано на рис. 4.

Ультразвуковий контроль (UT). UT широко використовується для оцінки характеристик матеріалів. У контексті АВ пористість можна співвіднести зі швидкістю ультразвукової хвилі, а межа роздільної здатності такого методу становить ~0,5 % (Slotwinski et al. 2014). Це створює певні труднощі для вчених, де може бути бажаним точне вимірювання часток пористості нижче 0,5 %. Лазерний ультразвук — це безконтактний метод ультразвукового дослідження, який викликає спричинене лазером теплове напруження, достатнє для генерування ультразвукових хвиль у зразку. Нещодавній прогрес у лазерно-індукованих фазованих решітках (LIPA) (Pieris et al. 2020) продемонстрував, що LIPA є життєздатною дистанційною неруйнівною технікою УЗ, як показано на рис. 5.

Акустична спектроскопія з просторовою роздільною здатністю (SRAS) — це акустична техніка, яка використовує поверхневі акустичні хвилі для картографування зернистої структури матеріалу (Smith et al. 2014), включаючи локальну кристалографічну орієнтацію та текстуру. У деяких відношеннях результати SRAS забезпечують високу просторову оцінку стану матеріалу, і, отже, можуть служити так званою базовою істинністю,

коли використовуються інші (дешевші) методи НК. На рис. 6 наведено приклад вимірювання розміру зерна та орієнтації SRAS.

Випробування акустичної емісії (AE). Випробування на акустичну емісію (AE) — це метод НК, який вимірює пружну енергію, що виділяється у формі акустичних хвиль у матеріалах, які зазнають певних змін (таких як пластична деформація, розтріскування або розрив) (Ida and Meyendorf 2019).

Однією із демонстрацій застосування UT до АВ є оцінка типу гібридного АВ (Sotelo et al. 2021). Ця робота показує, що UT можна використовувати для просторової оцінки відмінностей у матеріальному стані, де склад і матеріальний стан можуть змінюватися в межах однієї єдиної структури. Карта затухання, показана на рис. 7, а і 7, б, свідчить про те, що мікроструктура цих зразків є переважно однорідною, незважаючи на відому неоднорідність, внесену процесом АВ, а на рис. 7, с демонструється виражена циклічність, яка в пер-

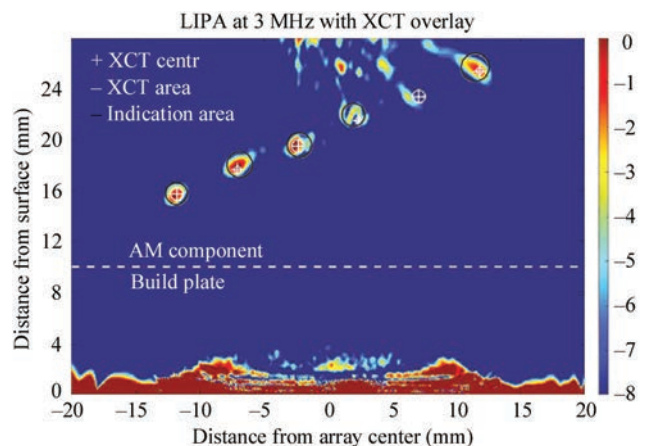


Рис. 5. Нормалізоване зображення з використанням хвилі прибуття-зсуву

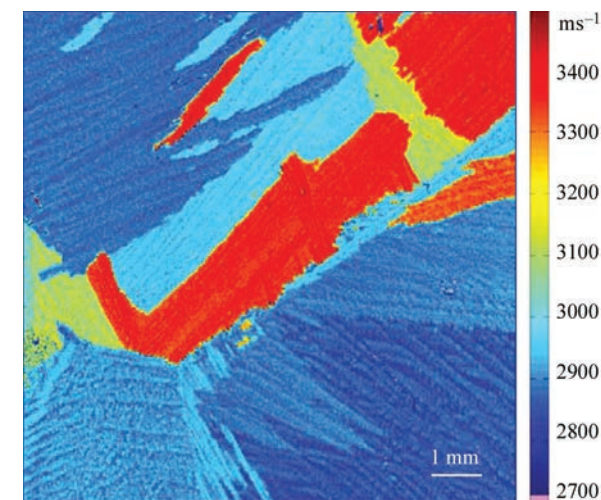


Рис. 6. Зображення TiLG685, що демонструє внутрішню структуру великих зерен. Кристаліти чітко видно, а просторова роздільна здатність становить приблизно 50 мкм

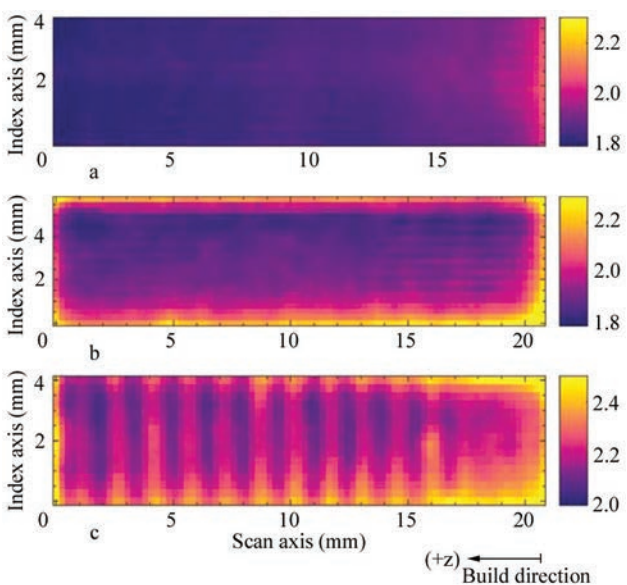


Рис.7. Затухання, α (Np/m), карти для: а — кованого; б — АВ; с — гібридні зразки АВ

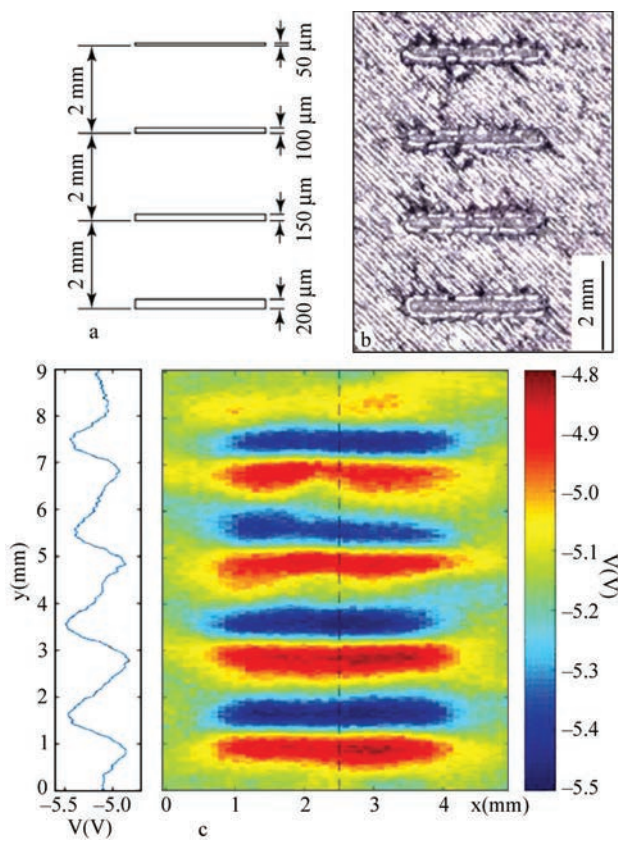


Рис. 8. Гетеродина система випробування вихровими струмами на основі магніторезистивного датчика: а — креслення бажаної геометрії дефекту (глибина 200 мкм); б — мікроскопічне зображення дефектів штучної поверхні; с — дані ЕТ про дефекти штучної поверхні

шу чергу пояснюється мікроструктурними змінами, наданими гібридним процесом.

Електромагнітне випробування (ЕТ). Від низькочастотних до високочастотних, це сімейство методів НК включає альтернативне падіння потенціалу струму, випробування вихровими струмами, мікрохвильові та міліметрові хвилі, а також технологію вимірювання терагерцового діапазону. ЕТ є,

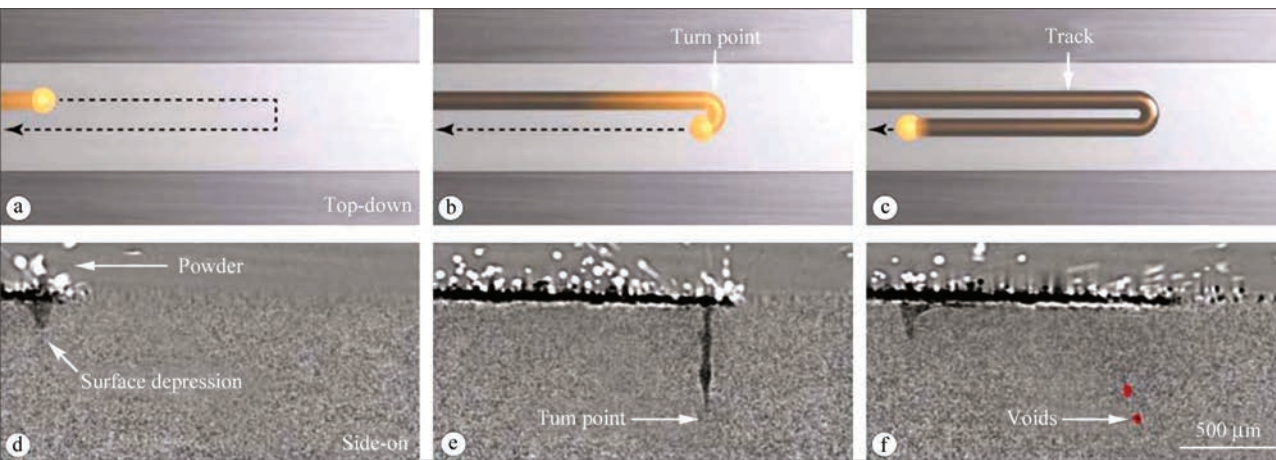


Рис. 9. Ілюстрація експериментальної геометрії для експериментів з точкою повороту лазера: а-с — ілюстрація точки повороту лазера, досліджуваної тут; d-f — часові різнічні рентгеновські зображення повороту в Ti-6Al-4V, виконані при потужності лазера 200 Вт і заданій швидкості сканування 1000 мм/с; d — лазерне сканування зліва направо з бризками та порошком над поглибленням розплаву через віддачу пари внизу; e — лазер потрапляє в область точки повороту, і парова депресія проникає глибоко в підкладку; f — рух лазера справа наліво після повороту

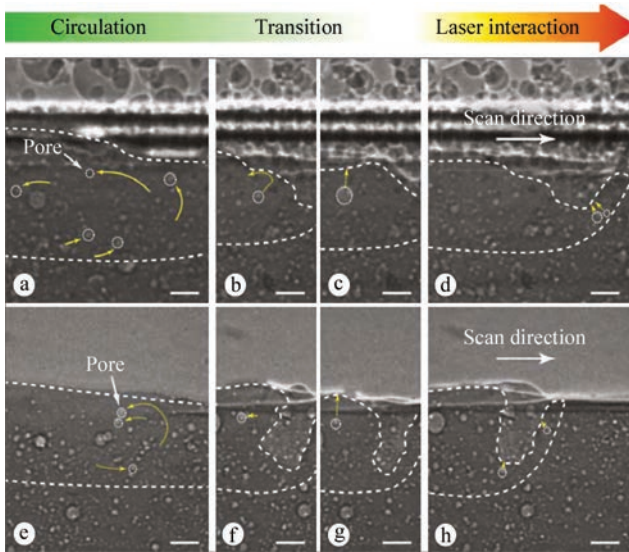


Рис. 10. Одноімпульсні рентгенівські зображення, що показують рух пор в ваннах розплаву: a–d — динаміка пор під час процесу лазерного сплавлення шару порошку; e–h — динаміка пор під час плавлення оголеної підкладки

мабуть, найперспективнішою технікою з цих чотирьох методів для процесів АВ на основі металевих порошків, оскільки пропонує безконтактний і високошвидкісний спосіб перевірки поверхневих і приповерхневих характеристик досліджуваних зразків.

Удосконалення технології магнітометрів допомогло покращити ефективність контролю з точки

зору мінімального розміру виявленого дефекту. Показано, що гетеродинамічна система на основі магніторезистивного датчика здатна виявляти поверхневі дефекти розміром близько 100 мкм (Ehlers et al. 2020), як показано на рис. 8.

Радіографічне тестування (RT). Рентгенівське зображення (2D) і рентгенівська комп'ютерна томографія (КТ) (3D) є дуже потужними інструментами для виявлення внутрішніх дефектів. Завдяки високій просторовій роздільній здатності було продемонстровано, що мікро КТ здатний виявляти низькі об'ємні частки пористості (du Plessis et al. 2015), LOF та включення, що робить мікро КТ ідеальним інструментом для розробки вдосконалень процесу АВ та забезпечення якості деяких високоцінних компонентів. Поєднання роздільної здатності та глибини проникнення рентгенівського зображення робить його ідеальним методом для зображення та наукового дослідження підповерхневих фізичних явищ. Динаміку підповерхневої ванни розплаву, включаючи динаміку замкової щілини та колапс, утворення та рух бульбашок пари, а також вплив параметрів повороту лазера на глибину ванни розплаву та пов'язані з цим утворені дефекти можна спостерігати за допомогою візуалізації за допомогою рентгенівського випромінювання. Рис. 9 демонструє можливість використання рентгенівського зображення для спо-

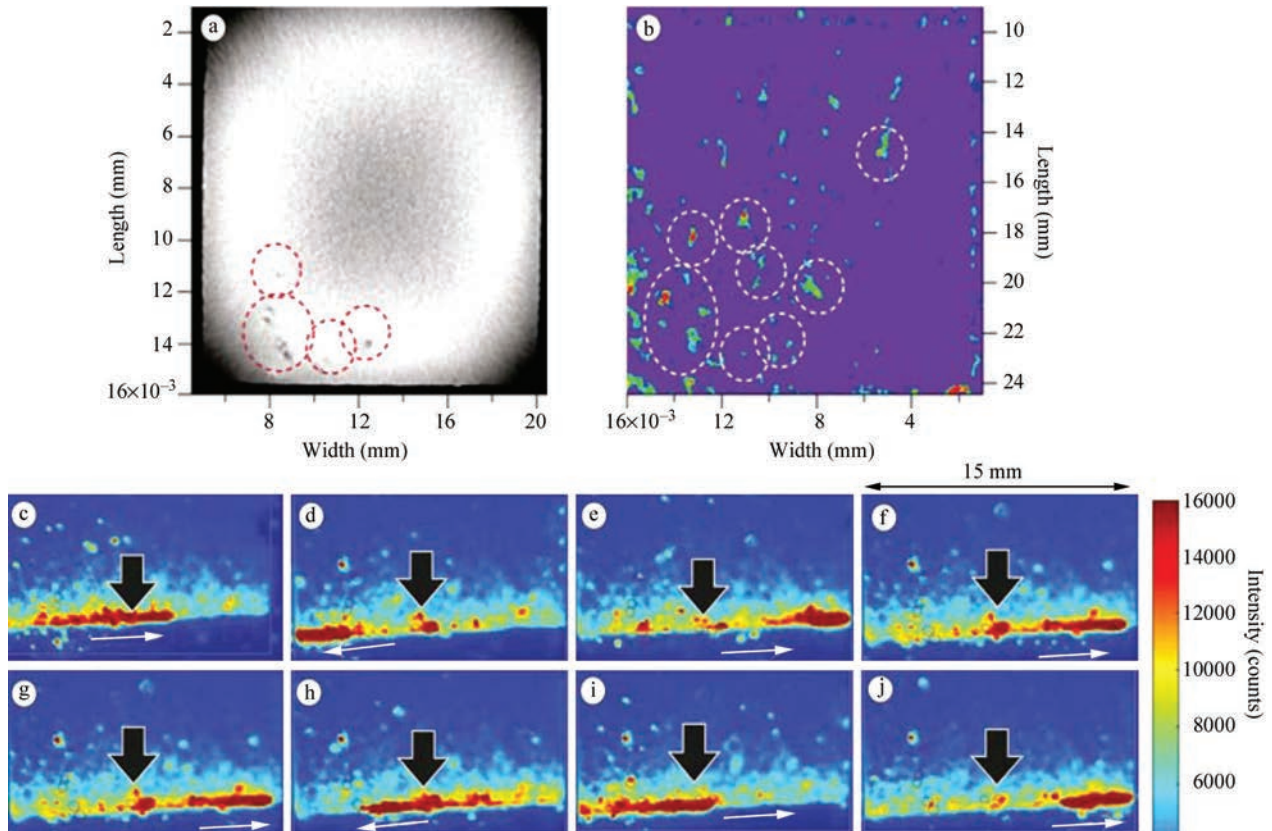


Рис. 11. Рентгенівська комп'ютерна томографія використовується як метод визначення характеристик ex situ для забезпечення перехресного порівняння з даними, отриманими за допомогою методів in situ, таких як теплове/інфрачервоне тестування (IR) та оптичне зображення: a — ex situ дані для шару 309; b — оптичні зображення in situ з того самого місця, що показують контраст, пов'язаний з нерівностями поверхні; c–f — in situ IR-кадри з того самого шару в місці дефекту

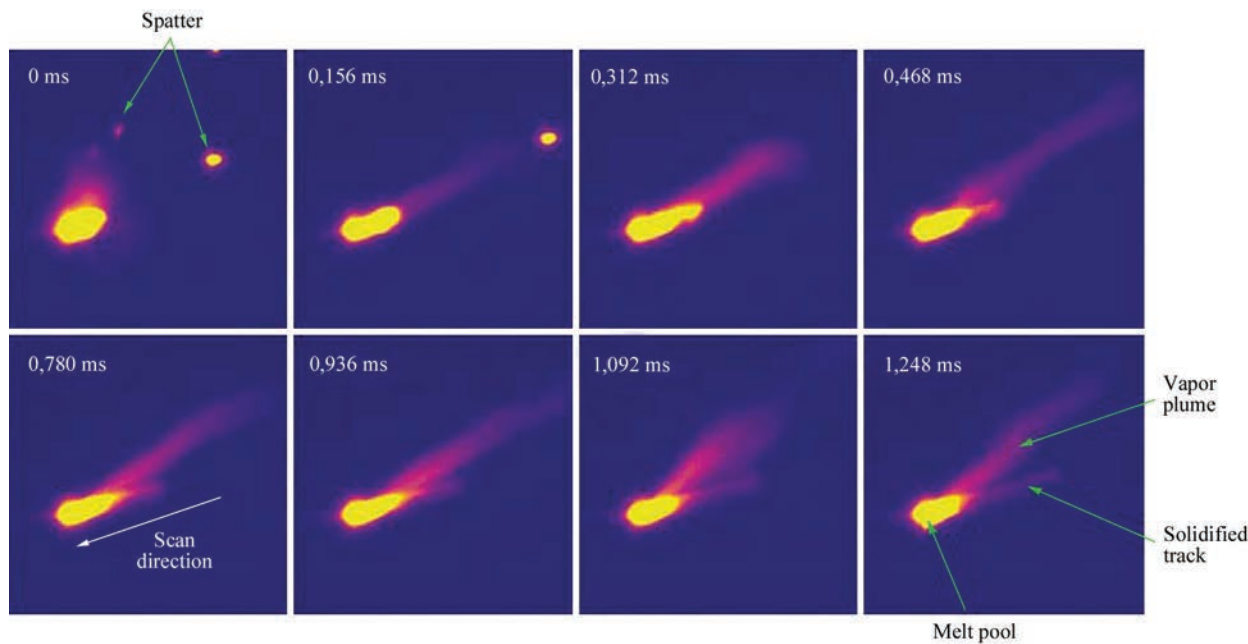


Рис. 12. Високошвидкісні теплові зображення, зібрані камерою моніторингу ванни розплаву

стереження за динамікою утворення пор у точці повороту лазера.

Результати, показані на рис. 10, є важливими для розуміння процесу АВ — лазерного плавлення порошкового шару.

Теплове/інфрачервоне випробування (IR). IR-технологія — це метод візуалізації, який використовує теплове випромінювання об’єкта для визначення його характеристик (Ida and Meyendorf 2019). У порівнянні з іншими методами НК, такими як UT та RT, IR-технологія є швидкою та може використовуватися для одночасного огляду великих площ. Виміряне поверхнєве випромінювання може виявити наявність розривів, які впливають на теплопровідність у металевих частинах АВ, оскільки температура поверхні та її розподіл залежать від теплової дифузії матеріалу, а також від геометрії та розташування розривів (Mandache 2019). Рис. 11 продемонстрував, що висновки *in situ* можна перехресно перевірити за результатами рентгенівських КТ (ХСТ) *ex situ* (McNeil et al. 2020).

Якщо використовувати високошвидкісні теплові камери, можна уважно спостерігати за поведінкою ванни розплаву в часових рядах, яка допоможе зрозуміти процес АВ. Нещодавні дослідження (Calta et al. 2019) демонструють, що зображення з високошвидкісної камери можна використовувати для усунення теплового випромінювання від розбризкування, коливань у самій ванні розплаву, шлейфу пари та затверділої доріжки під час охолодження, як показано на рис. 12.

Висновки

У цій статті подано огляд матеріалознавчих аспектів АВ, а також перспективи методів НК для надання ключової інформації щодо процесу. Фундаментальна фізика, пов’язана з АВ, є складною, і відповідні масштаби довжини коливаються від нанометрів до сантиметрів, тоді як масштаби часу коливаються від субмікросекунд до багатьох секунд. Відповідні швидкості включають не тільки очевидні «швидкості руху» процесу АВ, але також швидкість поверхні розділу тверде тіло та рідина та конвективний потік у рідкому стані. Кожен із цих параметрів пов’язаний із деталями процесу та фазовими перетвореннями, які визначають стан матеріалів, включаючи склад нанесеного матеріалу, структуру, текстуру, дефекти та залишкову напружку. Хоча буде неможливо безпосередньо виміряти всі ці параметри, існує перспектива того, що деякі масштабні процеси з різною довжиною матимуть вимірні сигнатури, які можна буде перевірити за допомогою методів НК. Було представлено безліч методів і технік, починаючи від візуальних, ультразвукових і радіографічних (хвильові методи) до електромагнітних і термографічних (на основі дифузії), і всі вони показали певну користь, чи то для розуміння варіацій процесу або проведення дискретних вимірювань стану матеріалів. Це поле залишається активним.

Список літератури (155 items, see <https://doi.org/10.32548/2022.me-04256>).
From Materials Evaluation Vol. 80, No. 4: 45–63
<https://doi.org/10.32548/2022.me-04256>
Copyright © 2022 by The American Society for Nondestructive Testing Inc.
Reprinted with permission 01.05.2023