

З А В Т О М А Т И Ч Н Е С В А Р Ю В А Н Н Я

11
2023

Автоматическая сварка

Automatic Welding

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

Академік Борис Євгенович Патон
До 105-річчя від дня народження3

Пленарні доповіді науково-технічної конференції
**Сучасні напрями розвитку
адитивних технологій**
27 листопада 2023 р., Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона

Коржик В.М., Гринюк А.А., Хаскін В.Ю., Войтенко О.М.,
Бурлаченко О.М., Хуан О.О. Плазмово-дугові технології
адитивного наплавлення (3D друку) просторових метале-
вих виробів: досвід застосування і нові можливості5

Квасницький В.В., Лагодзінський І.М. Вплив методів
GMAW і PAW адитивного дугового наплавлення та складу
захисного газу на геометричні характеристики поверхонь і
структуру металу виробів23

Шаповалов В.О., Никитенко Ю.О., Якуша В.В., Гніздило О.М.,
Карускевич О.В. 3D технологія вирощування монокри-
сталів вольфраму32

Коржик В.М., Строгонов Д.В., Бурлаченко О.М.,
Войтенко О.М., Куницький Д.В. Розвиток плазмово-дуго-
вих технологій отримання сферичних гранул для адитив-
ного виробництва і гранульної металургії37

Бабінець А.А. Технологічні методи керування формуван-
ням металу, наплавленого порошковими дротами53

Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В.,
Бадюк С.І. Вплив обдуву та навантаженості робочого
простору на механічні властивості зразків, виготовлених за
SLM-технологією59

Шваб С.Л., Селін Р.В., Ахонін С.В., Ворон М.М.,
Ковальчук Д.В. Металево-порошковий дріт на основі
титану як матеріал для адитивного виробництва64

Махненко О.В., Саприкіна Г.Ю., Савицька О.М.,
Ананченко М.С. Відновлювальний ремонт робочих лопаток
парової турбіни за допомогою адитивної технології71

Масючок О.П., Юрженко М.В., Колісник Р.В., Шадрін А.О.,
Кондратенко В.Ю., Кораб М.Г. Дослідження впливу пара-
метрів FDM 3D друку на процеси формування, структуру
та властивості виробів з полілактиду76

ІНФОРМАЦІЯ

Quintana M.J., Ji Y., Collins P.C. Перспективи поєднання
матеріалознавства та неруйнівного контролю в адитивно-
му виробництві84



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ представляє Україну
в Міжнародному інституті зварювання
та в Європейській зварювальній федерації
The E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU represents Ukraine
in International Institute of Welding
and in European Federation for Welding

CONTENT

Academician Boris Paton
To the 105th anniversary of the birthday.....3

Plenary reports of the scientific and technical conference
**Current directions of the development
of additive technologies**
November 27, 2023, Kyiv, PWI

Korzhuk V.M., Grynyuk A.A., Khaskin V.Yu., Voytenko O.M.,
Burlachenko O.M., Khuan O.O. Plasma-arc technologies
of additive surfacing (3D printing) of spatial metal products:
application experience and new opportunities.....5

Kvasnytskyi V.V., Lagodzinskiy I.M. Influence of GMAW and
PAW methods of additive arc surfacing and shielding gas
composition on surface geometry and metal structure.....23

Shapovalov V.O., Nikytenko Yu.O., Yakusha V.V., Gnizdylo O.M.,
Karuskevych O.V. 3D technology of growing tungsten single-
crystal32

Korzhuk V.M., Strohonov D.V., Burlachenko O.M.,
Voitenko O.M., Kunitskiy D.V. Development of plasma-arc
technologies of spherical granules production for additive
manufacturing and powder metallurgy37

Babinets A.A. Technological methods of controlling the
formation of metal deposited by flux-cored wires53

Adzhamskiy S.V., Kononenko G.A., Podolskiy R.V.,
Badyuk S.I. Influence of blowing and loading of working space
on mechanical properties of samples manufactured using
SLM technology59

Schwab S.L., Selin R.V., Akhonin S.V., Voron M.M.,
Kovalchuk D.V. Titanium-based metal powder wires as
materials for additive manufacturing.....64

Makhnenko O.V., Saprykina G.Yu., Savitska O.M.,
Ananchenko M.S. Reconditioning repair of steam turbine
blades using additive technology71

Masyuchok O.P., Yurzenko M.V., Kolisnyk R.V.,
Shadrin A.O., Kondratenko V.Yu., Korab M.G. Study of
the influence of FDM 3D printing parameters on formation
processes, structure and properties of polylactide products76

INFORMATION

Quintana M.J., Ji Y., Collins P.C. A perspective of the
needs and opportunities for coupling materials science
and nondestructive evaluation for metals-based additive
manufacturing.....84



Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ:
І.В. Кривцун (головний редактор),
В.М. Ліподаєв (штатний заст. гол. ред.)
О.М. Берднікова, В.В. Книш,
В.М. Коржик, Ю.М. Ланкін,
Л.М. Лобанов, С.Ю. Максимов,
О.В. Махненко, М.О. Пашчин,
В.Д. Позняков, І.О. Рябцев;
В.В. Дмитрик, НТУ «ХПІ», Харків;
В.В. Квасницький, Є.П. Чвертко,
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ;
М.М. Студент, Фізико-механічний інститут
ім. Г.В. Карпенка НАНУ, Львів;
М. Зініград, Аріельський університет, Ізраїль;
У. Райсген, Інститут зварювання та з'єднань,
Аахен, Німеччина;
Виконавчий директор – О.Т. Зельніченко, Міжнародна
Асоціація «Зварювання», Київ

Засновники

Національна академія наук України,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,
Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
03150, Україна, Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as

Журнал входить до переліку затверджених
Міністерством освіти і науки України видань
для публікації праць здобувачів наукових ступенів за
спеціальностями 131, 132, 151
Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001

ISSN 0005-111X
DOI: <http://dx.doi.org/10.37434/as>

Передплата 2024

Передплатний індекс 70031.
6 випусків на рік (видається раз на два місяці).
Друкована версія: 1800 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.
Електронна версія: 1800 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера
передплатника надається доступ до архіву журналу).
Передплата можлива на попередні випуски за будь-який рік.
Статті з журналу «Автоматичне зварювання» вибірково
перевидуються англійською мовою в журналі
«The Paton Welding Journal»:
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

За зміст рекламних матеріалів
видавець відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU:
I.V. Krivtsun (Editor-in-Chief),
V.M. Lipodaev (Staff Deputy Editor-in-Chief)
O.M. Berdnikova, V.V. Knysh,
V.M. Korzhyk, Yu.M. Lankin,
L.M. Lobanov, S.Yu. Maksimov,
O.V. Makhnenko, M.O. Pashchin,
V.D. Poznyakov, I.O. Ryabtsev;
V.V. Dmitrik, NTU «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv;
V.V. Kvasnytskyi, E.P. Chvertko, NTUU «Igor Sykorsky
Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv;
M.M. Student, Karpenko Physico-Mechanical Institute
of NASU, Lviv;
M. Zinigrad, Ariel University, Israel;
U. Reisgen, Welding and Joining Institute, Aachen, Germany;
Executive Director – O.T. Zelnichenko,
International Association «Welding», Kyiv, Ukraine

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,
E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU,
International Association «Welding» (Publisher)

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU
03150, Ukraine, Kyiv-150, 11 Kazymyr Malevych Str.
Tel./fax: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as

The Journal is included in the list of publications approved
by the Ministry of Education and Science of Ukraine
for the publication of works of applicants for academic degrees
in specialties 131, 132, 151.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing Editorial Board of the Journal

Certificate of state registration
of KV 4788 dated 09.01.2001
ISSN 0005-111X
DOI: <http://dx.doi.org/10.37434/as>

Subscription 2024

Subscription index 70031.
6 issues per year, back issues available.
\$192, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.
\$156, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).
Subscription is possible for previous issues for any year.

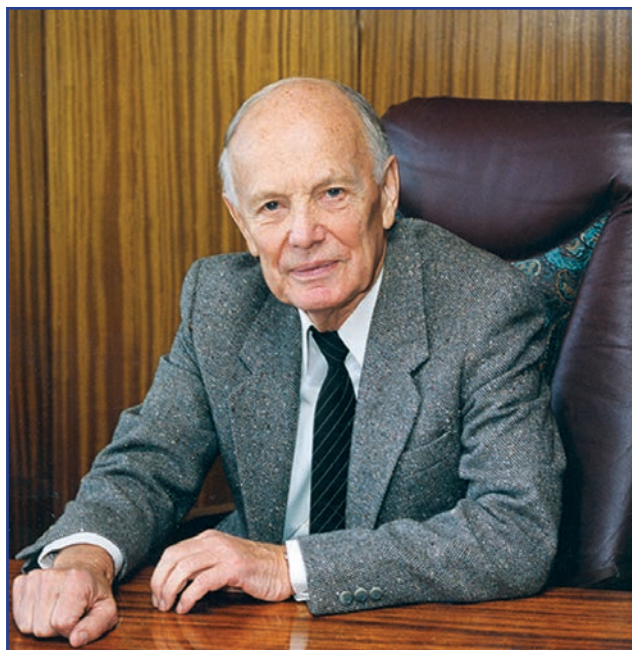
Articles from «Автоматичне Зварювання» (Automatic Welding)
journal is republished selectively in English in
«The Paton Welding Journal»:
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

Publisher is not responsible
for the content of the promotional material.

АКАДЕМІК БОРИС ЄВГЕНОВИЧ ПАТОН

До 105-річчя від дня народження

Про наукову, організаційну та громадську діяльність видатного вченого в галузі зварювання, металургії, технології металів, матеріалознавства та громадського діяча, талановитого організатора науки, Президента Національної академії наук України, директора Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Бориса Євгеновича Патона написано багато. Сам він не написав мемуарів. Але ніколи не відмовляв журналістам, чесно відповідаючи на будь-які питання, розповідаючи про себе, погляди на світ, науку та людей, наставляючи молодь. Нижче представляємо висловлювання про його життя та діяльність, які запозичені з відомих публікацій, а також з його власних інтерв'ю.



Величезна особиста відповідальність Б.Є. Патона — організатора міжнародної наукової кооперації — підтверджується переліком керівних і почесних посад у різноманітних міжнародних наукових об'єднаннях, посад, які він не тільки обіймає, а й активно використовує для вироблення стратегії розвитку науки. Б.Є. Патон — президент Міжнародної асоціації академії наук, почесний президент Міжнародної інженерної академії, член Академії Європи, почесний член Римського клубу, Міжнародної академії технологічних наук, почесний член Центральноевропейської академії природних наук і мистецтв, Міжнародної академії астронавтики, іноземний член академій та науково-технічних товариств багатьох країн. Він очолює Міждержавну наукову раду зі зварювання та споріднених технологій, входить до складу Міжнародного комітету з науково-технічного розвитку країн СНД, правління Міжнародної паливно-енергетичної асоціації, опікунської ради Міжнародного фонду ядерної безпеки (акад. НАН України А.Г. Загородній).

Одним з основних принципів, закладених Євгеном Оскаровичем Патonom при створенні Інституту й розвинених Борисом Євгеновичем, є проведення цілеспрямованих фундаментальних досліджень і тісний зв'язок

науки з виробництвом. Реалізація цієї системи дозволила створити унікальні конструкції, обладнання, матеріали, технології, використання яких сильно вплинуло на розвиток багатьох галузей промисловості — машинобудування, суднобудування, ракетно-космічний комплекс, авіабудування, енергетику, гірничопромисловий комплекс, металургію й хімічне виробництво, створення трубопровідного транспорту, будівельну індустрію. Борис Євгенович відрізняється винятковим умінням працювати з колективом: жодна корисна пропозиція, висловлена будь-яким співробітником, не залишиться без його уваги. Він завжди готовий підтримати цікаву ідею, належно оцінити виконану роботу. Його ентузіазм, рідкісна працездатність і увага до кожного працівника створюють в колективі здорову творчу атмосферу. Він любить працювати з молоддю, часто безпосередньо спілкується з тими, у кому бачить майбутнє Інституту. В ІЕЗ виросли сотні талановитих учених і інженерів (акад. НАН України А.Г. Наумовець).

Його метод навчання колег і співробітників зводиться до простого та ефективного методу: «Роби, як я». Слідувати повністю цьому закличу навіть приблизно я не міг зі зрозумілих для всіх причин, але намагався в міру своїх сил. Борис Євгенович, безсумнівно, є геніальною людиною у всіх областях: в науці, в організації масштабних державних науково-технічних робіт і навіть в управлінні своїм організмом і своєю нервовою системою. Відзначаю його високі морально-етичні правила, які він висуває у першу чергу до себе і яким незмінно слідує (акад. НАН України В.Г. Бар'яхтар).

Борис Євгенович Патон — лідер, боєць, творча особистість, глибоко порядна і добра людина, з фантастичною енергією та працездатністю, величезним досвідом, глибокими знаннями в багатьох сферах, здатністю постійно вчитися. У нього широка натура, гострий аналітичний розум, він демократичний, доброзичливий, відкритий для спілкування, доступний, завжди готовий підтримати людину в біді, допомогти їй (акад. НАН України І.К. Походня).

Борис Євгенович Патон — яскрава особистість. Так, президент Національної академії. Так, найбільший вчений у галузі техніки, директор всесвітньо відомого Інституту електрозварювання. Так, громадський діяч, багаторічний член парламентів колишнього Союзу та України. І ще численних «рад», комітетів, комісій...

На всіх цих посадах та званнях — не просто «знаходитися» — працює. Безумовно — видатна людина. Про нього багато написано. Проте лишається питання — у чому джерело цієї феноменальної працездатності? Думаю, не тільки в генах, уроджених здібностях, інтелекті. Джерело — у характері, що він жорстко тренує все життя. А ще, можливо, якість душі. У її величчі, якщо хочете. Його багатогранність та працездатність вражають. Тільки завдяки глибокому почуттю особистої відповідальності перед державою, народом, власною совістю він успішно працює та справляється з таким навантаженням. Допомогала йому у цьому хороша фізична форма, регулярне заняття тенісом, водними лижами, плаванням (акад. НАН України М.М. Амосов).

Принципи проведення цілеспрямованих фундаментальних досліджень й тісний зв'язок науки з виробництвом втілювалося Б.Є. Патонем все його творче життя. Наукові відділи інституту, дослідне конструкторсько-технологічне бюро, інженерні центри, експериментальне виробництво, дослідні заводи створювались протягом всієї історії Інституту — це невід'ємні ланки системи організації досліджень і втілення їхніх результатів у виробництво.

На відповідальному посту Президента Національної академії наук України розкрився талант Бориса Євгеновича Патона як видатного організатора. За його участю була розроблена нова структура Академії наук, її новий статут, що спрямований на найраціональніше використання наукових сил і засобів, їхню концентрацію при вирішенні найважливіших фундаментальних та прикладних наукових проблем, які мають важливе значення для економіки країни, створено десятки нових інститутів і установ, що розвинули і поглибили дослідження у найважливіших наукових напрямках (акад. НАН України І.В. Кривцун).

Борис Євгенович був серцем і мозком Національної академії наук України. Він сприяв становленню та успішному розвитку багатьох наукових напрямів і відповідних наукових установ. Він впровадив новий підхід у діяльності Академії, що включає проведення цілеспрямованих наукових досліджень з обов'язковим практичним використанням їх результатів у промисловості та економіці нашої держави. Завдяки незаперечному авторитету, багатому досвіду, мудрості Бориса Євгеновича Академія змогла не тільки вистояти у складних економічних умовах останніх десятиліть, але й ефективно працювати.

Борис Євгенович був видатним державним і громадським діячем. Впевнений, що саме таким людям повинна належати влада у державі. Наша країна не

зазнала б таких негараздів, що спостерігаються у теперішній час, якби у керма її управління стояла така людина, як Б.Є. Патон. Вражаюча ясність життєвого шляху Бориса Євгеновича, його надзвичайно плідна наукова, науково-організаційна та державна діяльність надихатимуть наступні покоління українських учених. Ім'я Бориса Євгеновича Патона назавжди залишиться серед імен видатних діячів світової науки (акад. НАН України Л.М. Лобанов).

Питання з інтерв'ю Дмитру Киянському «Патон, якого ми не знаємо», газета «Дзеркало тижня» 13 березня 1999 р.

Педантичність, порядність, неприйняття усіялих інтриг, підклимної боротьби та недозволених прийомів — непорушні традиції вашої родини, що передаються від батьків дітям. Але подібні якості, властиві кращим представникам інтелігенції, були не дуже у честі за радянських часів, особливо у вищих ешелонах влади. Як у подібних умовах вам вдавалося залишатися в ладі зі своєю совістю та моральними принципами?

— У деяких ситуаціях я й справді відчував, якщо так можна сказати, моральний дискомфорт. Іноді на мене дивилися, як на чужинця з іншої планети. Але я сповідаю одне непорушне правило — ніколи не поступатися принципами через те, що так поведуться інші. Це, зрештою, справа їхньої порядності. Приказка: «З вовками жити — по вовчі вити» — мені не підходить. Я завжди, в будь-яких умовах, намагаюся чинити так, як велить моє сумління.

Якщо вас ображають, роблять по відношенню до вас низький вчинок, чи вважаєте ви можливим дати здачу?

— Іншими словами, чи підставляю я ліву щоку після того, як мене б'ють правою? Ні не підставляю! І здачі дати можу. Але у деяких випадках відбувається парадоксальне явище. Чим більше ви робите людині добра, тим раніше вона вас зрадить або зробити якусь капость. Можливо, тут спрацює психологічний механізм. Вашому опоненту неприємно згадувати, що своїми досягненнями, знаннями, науковими ступенями та іншим він завдячує не собі, а комусь іншому. Перенести це не може. Така реакція нерідко спостерігається з боку людей, які мають якісь фізичні чи моральні вади, часто приховані. Я в подібних випадках роблю так. Якщо ця людина нормально працює і потрібна для справи, говорю про себе: чорт з нею! Іншими словами, про його моральні якості знаю, але мирюся. І у відповідь на його низький вчинок не розраховуюся з ним тією ж монетою.

Природа наділила Бориса Євгеновича Патона фантастичною енергією та працездатністю, спрагою постійно вчитися, невгамовною допитливістю. А величезний досвід, глибокі знання в багатьох галузях науки і техніки він все життя здобував сам. Спираючись на те, що вже досягли вчені, винахідники, новатори, він зробив величезний внесок у науково-технічний прогрес. Багато чого з того, що за 101 рік життя Бориса Євгеновича досягло людство, в тому числі і за його участю, не могли вигадати навіть фантасти.

Редакція журналу «Автоматичне зварювання»

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).

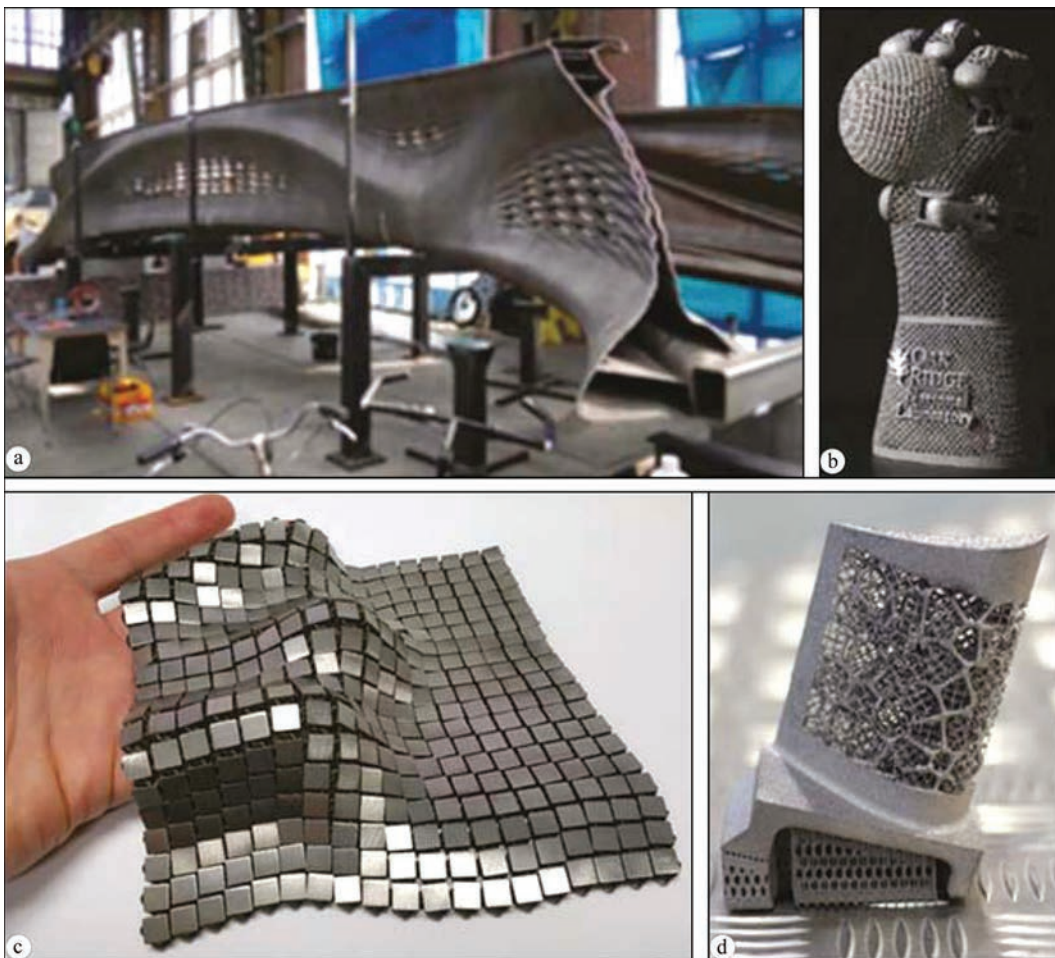


Рис. 1. Різноманітність застосувань методів АВ: а — адитивно виготовлений міст із застосуванням технології адитивного виробництва дрютяної дуги; б — гідравлічний ручний 3D-друк, надрукований Національною лабораторією Oak Ridge, всередині якого розміщені електродвигуни та гідравлічні компоненти; с — надрукована 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, ґратчастими 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).

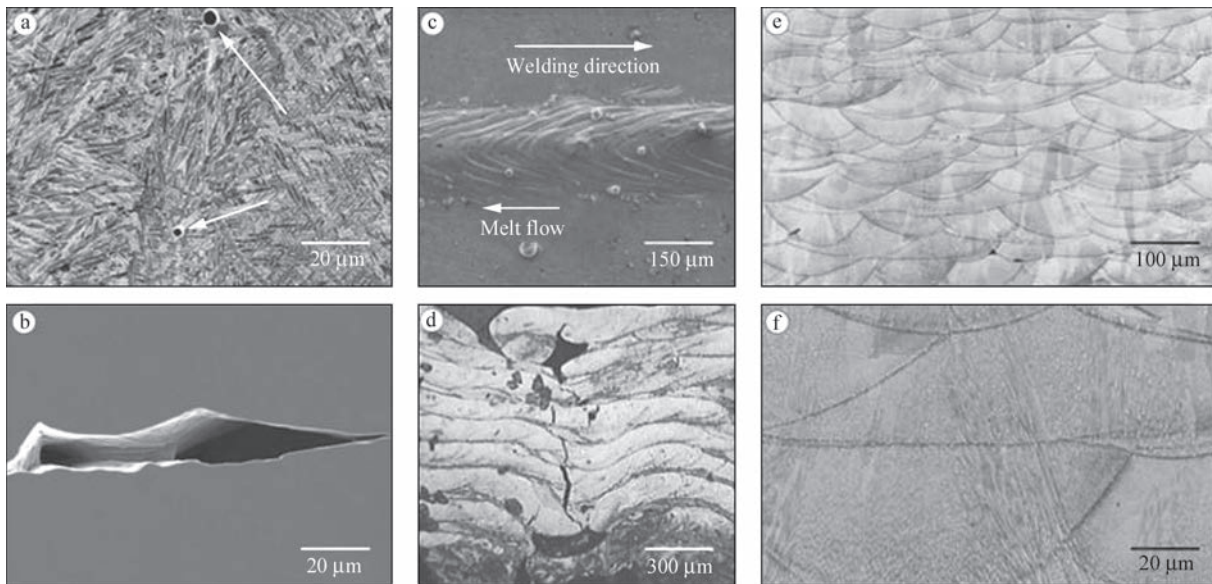


Рис. 2. Дефекти, які зазвичай спостерігаються в АВ: а — сферична пористість (позначена стрілками); б — дефекти LOF; с — сфероїдизація; d — гарячий розрив, спричинений надлишковим надходженням енергії, що створює викид матеріалу та термічні напруги; е і f “луска риби” при різних збільшеннях

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, б) (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-

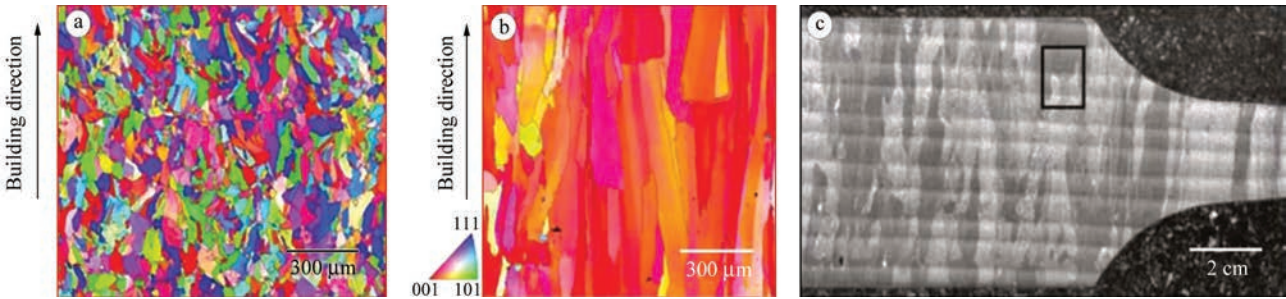


Рис. 3. Текстура в сплавах АВ: а — графіки зворотної полюсної фігури нержавіючої сталі 316L з використанням потужності лазера 150 Вт; б — графіки зворотної полюсної фігури нержавіючої сталі 316L з використанням потужності лазера 1000 Вт; с — стовпчастий ріст і смуги в зразку на розтяг Ti–6Al–4V

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 EMAT) 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 (AE), електромагнітне тестування (ET), радіографічне тестування (RT) і теплові/інфрачервоні випробування (IR). 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.

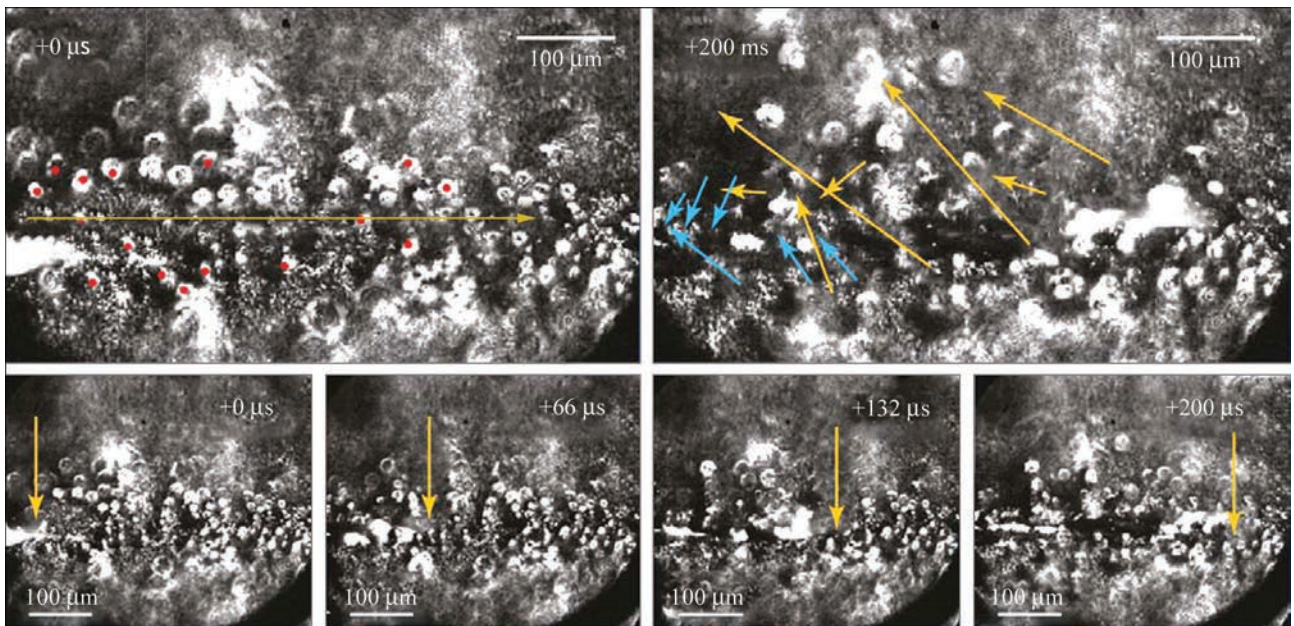


Рис. 4. Високошвидкісне зображення просування доріжки розплаву та руху порошку під впливом гарячої пари, ефекту Bernoulli

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-

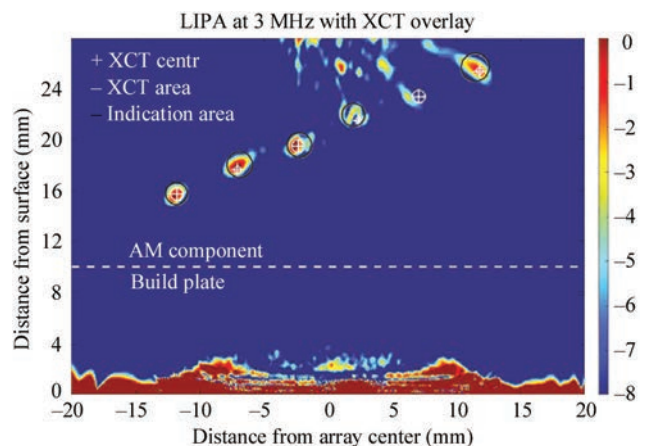


Рис. 5. Нормалізоване зображення з використанням хвилі прибуття-зсуву

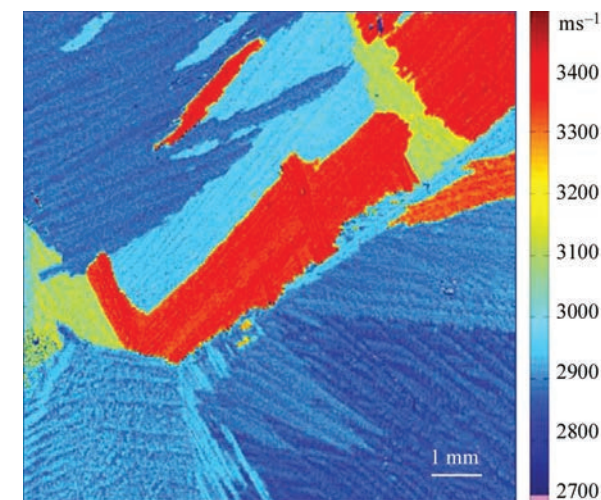


Рис. 6. Зображення TiLG685, що демонструє внутрішню структуру великих зерен. Кристаліти чітко видно, а просторова роздільна здатність становить приблизно 50 мкм

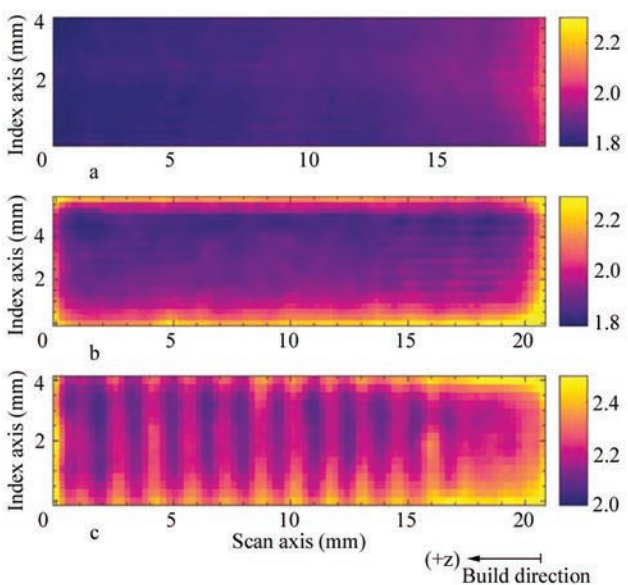


Рис.7. Затухання, α (Np/m), карти для: а — кованого; б — АВ; с — гібридні зразки АВ

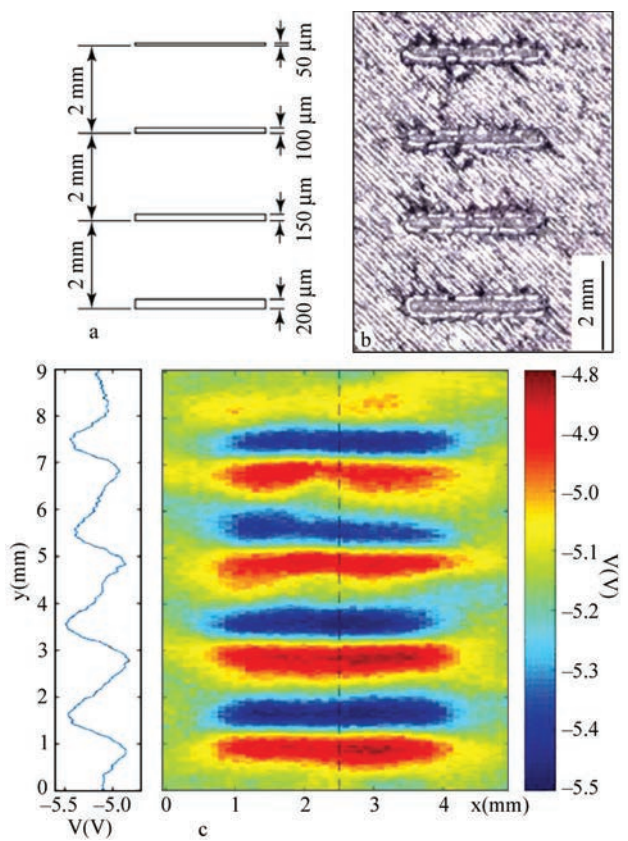


Рис. 8. Гетеродина система випробування вихровими струмами на основі магніторезистивного датчика: а — креслення бажаної геометрії дефекту (глибина 200 мкм); б — мікроскопічне зображення дефектів штучної поверхні; с — дані ЕТ про дефекти штучної поверхні

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,

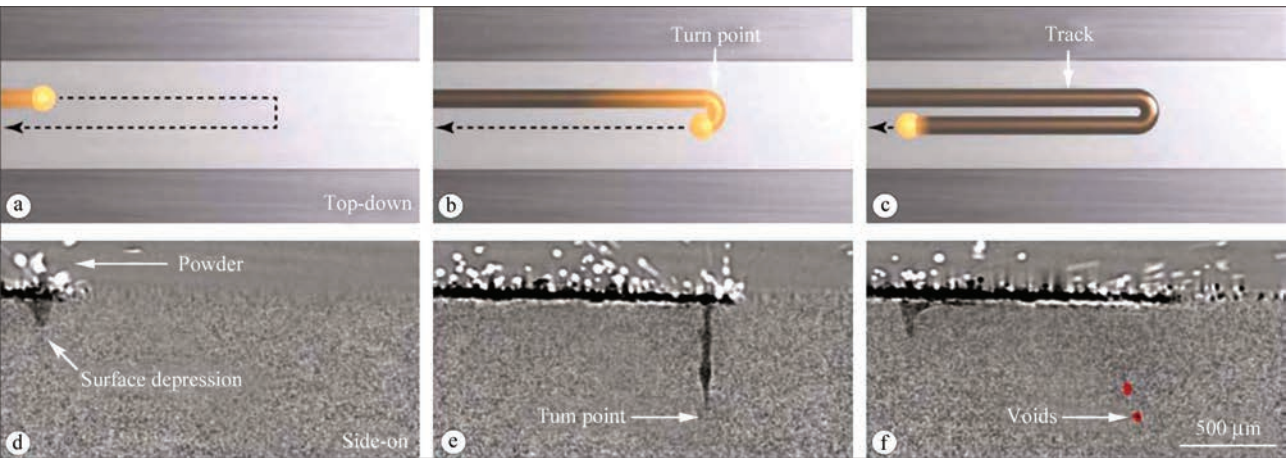


Рис. 9. Ілюстрація експериментальної геометрії для експериментів з точкою повороту лазера: а-с — ілюстрація точки повороту лазера, досліджуваної тут; d-f — часові різнічні рентгеновські зображення повороту в Ti-6Al-4V, виконані при потужності лазера 200 Вт і заданій швидкості сканування 1000 мм/с; d — 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

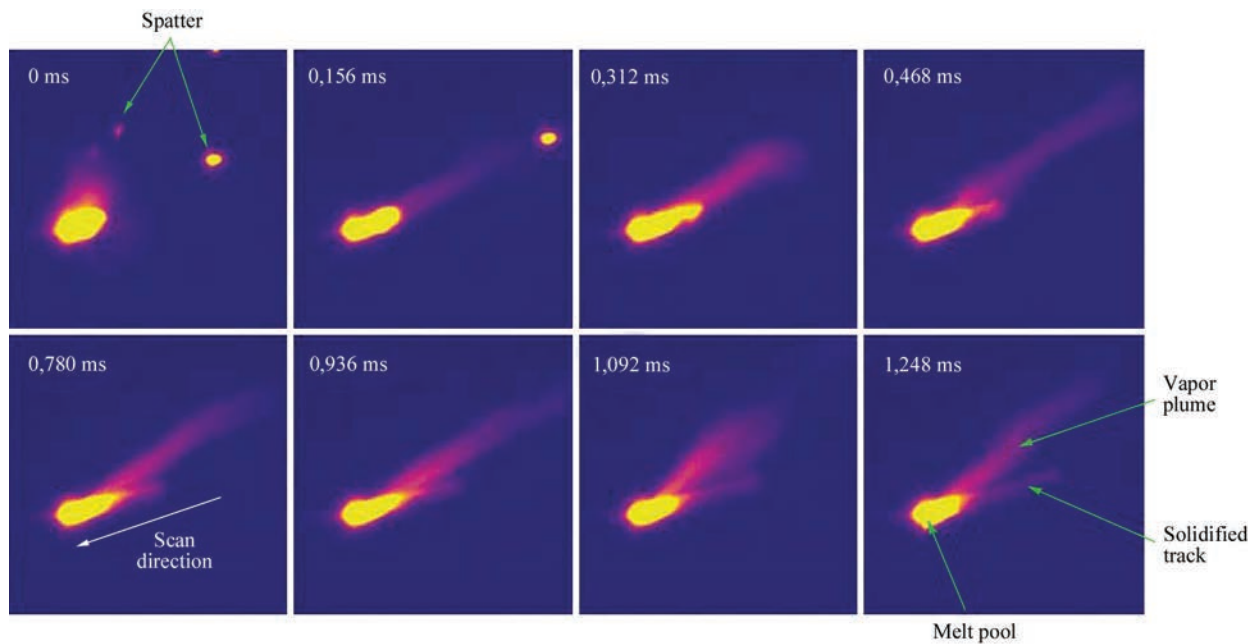


Рис. 12. Високошвидкісні теплові зображення, зібрані камерою моніторингу ванни розплаву

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