

А. І. Кузьмичєв, О. В. Богдан

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ МЕТАМАТЕРІАЛІВ

Одеса
«Політехперіодика»
2025

УДК 539.3:621.7-4+621.9.04
А60

А60 **Адитивні технології для метаматеріалів** / А. І. Кузьмичєв, О.В.Богдан. —
Одеса : Політехперіодика, 2025. — 62 с. : 5 іл., 1 табл.
ISBN 978-966-2666-32-8

Наведено аналіз досліджень, які проводяться в галузі адитивно виготовлених метаматеріалів, історичний огляд як метаматеріалів, так і способів адитивного виробництва, а також прогнози щодо майбутніх напрямків досліджень. Розглянуті електромагнітні, акустичні, механічні і термічні метаматеріали, структурні варіанти реалізації та технологічні особливості. Огляд та адаптований технічний переклад за базовим виданням Robert Saunders. Metamaterials Using Additive Manufacturing Technologies. Призначається для студентів, аспірантів, молодих спеціалістів та науково-технічних робітників.

УДК 539.3:621.7-4+621.9.04

Виконано при грантовій підтримці Національного фонду досліджень України, реєстраційний номер №2023.04/0047 «Розроблення мобільного пасивного акустичного пеленгатора на основі ширококутових інфразвукових сенсорів».

ISBN 978-966-2666-32-8

© А. І.Кузьмичєв, О.В.Богдан, 2025

© ПП «Політехперіодика», 2025

ЗМІСТ

Передмова	4
Скорочення	5
Вступ	6
1. Адитивні технології та метаматеріали	6
1.1. Технології адитивного виробництва	6
1.2. Метаматеріали	6
2. Виготовлення й адитивне виробництво метаматеріалів ...	6
2.1. Виготовлення метаматеріалів	6
2.2. Адитивне виробництво метаматеріалів	6
3. Адитивно виготовлені метаматеріали	6
3.1. Властивості	6
3.2. Застосування	6
Резюме	6
Література	6

ПЕРЕДМОВА

В цій роботі представлено огляд літератури з використання технології адитивного виробництва (АВ) для виготовлення метаматеріалів. Популярність як АВ, так і власне метаматеріалів різко зросла за останні два десятиліття, й на сьогодні з цієї тематики є десятки тисяч публікацій. Адитивне виробництво, або 3D-друк, — це процес з'єднання матеріалів для виготовлення деталей за даними 3D-моделі (зазвичай шар за шаром) на відміну від методів субтрактивного виробництва та формування. Процес АВ дуже гнучкий і щодо дизайну деталей, і щодо вибору матеріалів. Метаматеріали являють собою збірні конструкції чи композитні матеріали, які або імітують характеристики відомих матеріалів, або мають якісно нові, фізично реалізовані функції відгуку, які у природних матеріалів взагалі відсутні чи зустрічаються вкрай рідко. Вони спочатку розглядалися теоретично і розроблялися для електромагнітних застосувань, але потім поширилися також на оптичну, теплову, акустичну та механічну області використання. Метаматеріали зазвичай називають штучними матеріалами, оскільки екзотичні властивості, які можуть бути ними продемонстровані, залежать не від хімічних складових, а скоріше від їхньої внутрішньої структури. Зрозуміло, що ця внутрішня структура може бути складною й важкою у виготовленні. Завдяки безпрецедентній свободі для дизайну, яку надає адитивне виробництво, вибір АВ для виготовлення метаматеріалів є природним.

Недосяжний раніше характер поведінки забезпечується тим, що внутрішня структура метаматеріалів управляє фізикою хвилі в масштабі довжини хвилі. Тому внутрішня структура залежно від застосування повинна мати масштаб від міліметрів до нанометрів. Попередні методи виготовлення були засновані на літографії, оскільки вона дозволяє досягати субмікронної роздільної здатності структур. Однак літографічні методи мають низку обмежень, таких як складність виробництва 3D-об'єктів на великих площах, необхідність використання “негативів” і низька швидкість. З розвитком АВ виготовлення метаматеріалів стає все більш вигідним. Багато таких поширених методів адитивного виробництва, як SLM, SLS, EBM, DMLS, FDM і SLA, вже застосовувалися для успішного виготовлення метаматеріалів. Недоліки цих методів в основному пов'язані з одержуваною точністю виготовлення, яка зазвичай знаходиться у верхньому діапазоні (відповідає субміліметрам) того, що потрібно при виготовленні метаматеріалів. Щоб розв'язати цю проблему, було розроблено низку високоточних методів АВ, які дозволяють досягати субмікронної та навіть нанометрової роздільної здатності. Найвідоміший з цих методів — проєкційна мікростереолітографія, заснована на SLA, яка здатна досягти точності мікронного рівня та добре масштабується до великих виробів, при тому що цей метод є відносно простим і добре зрозумілим. Розроблені високоточні методи АВ дотепер призначалися в основному для неметалічних матеріалів, але останнім часом почалася робота з модифікації процесів друку металевих і керамічних матеріалів. Металеві та керамічні метаматеріали здатні забезпечити структурну жорсткість поряд з іншими бажаними властивостями, тому ця область потребує подальшого розвитку, особливо високоточних методів АВ для металів.

Початкова мета використання адитивного виробництва полягала не в тому, щоб отримати нові властивості, а перш за все тому, що АВ дозволяє виготовляти метаматеріали. Теоретично будь-яка властивість метаматеріалу може бути реалізована без використання АВ, але на практиці без цієї технології багато метаматеріалів ніколи не зможуть продемонструвати бажані теоретичні властивості. З ростом популярності

обчислювального моделювання та оптимізації топології метаматеріалів з надзвичайно складною структурою можуть бути розроблені таким чином, щоб проявляти більше ніж просто виняткову поведінку, наприклад здатність маскувати (приховувати) предмети або мати від'ємний показник заломлення. Метаматеріал можна сконструювати так, щоб зберігаючи, наприклад, оптимальне охолодження, текучість або міцність, він демонстрував інші бажані властивості. Оскільки АВ за своєю суттю є обчислювальним процесом, реально це єдиний метод виробництва, доступний для виготовлення таких конструкцій. Механічні метаматеріали зазвичай засновані на періодичних ґратчастих структурах, які можна було б достатньо легко побудувати за допомогою методів виготовлення, не пов'язаних з АВ. Однак використання адитивного виробництва відкриває такий простір для проєктування, що дозволяє отримувати невпорядковані та/або мультиматеріальні решітки. Мультиматеріальні механічні метаматеріали продемонстрували низький коефіцієнт Пуассона — на рівні -7 , що менше, ніж у метаматеріалів, виготовлених з одного матеріалу. В області акустичних метаматеріалів осесиметричні акустичні “плащі”-укриття та радіопоглинальні метаматеріали були створені з використанням конструкцій, які можна виготовити лише за допомогою АВ. Застосування адитивного виробництва для створення електромагнітних, оптичних і теплових метаматеріалів не було широко вивчено, ймовірно, через субмікронну роздільну здатність, необхідну для цих метаматеріальних структур. Але завдяки швидкому розвитку високоточних методів АВ ці класи метаматеріалів вже готові для нових розробок. Адитивне виробництво кераміки стає все популярнішим і може дозволити створювати термічні метаматеріали за екстремальних температур для забезпечення, наприклад, теплової “невидимості” реактивних двигунів.

Іншим напрямком розвитку метаматеріалів є застосування 4D-друку (адитивне виробництво “розумних” матеріалів — смартматеріалів). Попередні дослідження в цій області показали можливість створення метаматеріалів, які можна налаштовувати та перемикаєти. Додатковий ступінь свободи в конструкційному просторі — час — до-

зволяє створювати конструкції метаматеріалів, що можуть змінювати свою поведінку відповідно до впливів навколишнього середовища. Розробки в області 4D-метаматеріалів є зовсім новими, вони, як правило, продемонстровані тільки в лабораторних умовах і в основному з полімерними матеріалами. Використання металевих смартматеріалів, таких як сплави з пам'яттю форми (SMA), відкриває ще більше можливостей, особливо в поєднанні з полімерами з пам'яттю форми (SMP) для створення “заморожуваних” композитів з пам'яттю форми. Мультиматеріальні методи АВ можуть дозволити легко виготовляти такі матеріали. Одна з можливих конструкцій — оригамі-метаматеріал на основі SMP, до якого за допомогою адитивного виробництва вбудовано SMA. Такий метаматеріал можна скласти, розгорнути та зафіксувати в будь-якому положенні, використовуючи відповідний конструктивний дизайн і вибір матеріалів, він може знайти застосування в розгортальних структурах космічного базування або біомедичних додатках.

Використання АВ для виготовлення метаматеріалів багато в чому обмежено технологією, а не обов'язково розумінням метаматеріалу. Однак використання АВ для виготовлення метаматеріалів уможливує отримання нових конструкцій внутрішніх структур метаматеріалів і прогрес в області метаматеріалів. Через те що структури метаматеріалів є унікальними, не завжди найкраще у загальній технології АВ буде найкращим для розробки метаматеріалів, і навпаки. Наприклад, пористість і анізотропія в процесі АВ зазвичай вважаються негативними характеристиками, а в метаматеріалах ці дефекти можна використати для налаштування необхідних механічних властивостей. Тобто цілеспрямовані дослідження мають проводитися, щоб максимізувати переваги й особливості адитивного виробництва для метаматеріалів.

СКОРОЧЕННЯ

Скоро- чення	Англійською	Українською
3DP	3D-Printing	3D-друк
AD	Aerosol deposition	Аерозольне осадження
AMM	Acoustic metamaterial	Акустичний метаматеріал
CAD	Computer assisted design	Автоматизоване проектування (САПР)
CS	Cold spraying	Холодне напилення
DED	Directed energy deposition	Осадження спрямованою енергією
DMLS	Direct metal laser sintering	Пряме лазерне спікання металу
EBM	Electron beam melting	Електронно-променеве сплавлення
FDM	Fused deposition modeling	Моделювання шляхом осадження розплавленого матеріалу
IJP	Ink-jet printing	Струменевий друк
LENS	Laser engineered net shaping	Формування сітки за допомогою лазера

Скоро- чення	Англійською	Українською
LOM	Laminated object manufacturing	Виробництво ламінованих об'єктів
LRM	Laser rapid manufacturing	Швидкісне лазерне виробництво
PBF	Powder bed fusion	Сплавлення порошкового шару
PμSLA	Projection microstereo-lithography	Проекційна мікростереолітографія
SLA	Stereolithography	Стереолітографія
SLM	Selective laser melting	Селективне лазерне плавлення
SLS	Selective laser sintering	Селективне лазерне спікання
SMA	Shape memory alloy	Сплав з пам'яттю форми
SMP	Shape memory polymer	Полімер з пам'яттю форми
TPP	Two-photon polymerization	Двофотонна полімеризація
VPM	Vat photopolymerization	Фотополімеризація у ванні (пошарове затверднення фотополімерних смол)

ВСТУП

Такі теми як «Метаматеріали» й «Аддитивне виробництво» багато обговорюються, у базі даних Scopus можна знайти десятки тисяч публікацій за цими темами — їх понад 35000 та 24000 відповідно. Як видно з рис. 1, стрімке зростання популярності обох технологій відбулося за останні 20 років. Але, хоча і адитивне виробництво, і метаматеріали є популярними областями досліджень самі по собі, поєднання цих двох технологій, тобто адитивне виробництво метаматеріалів, тільки починається.

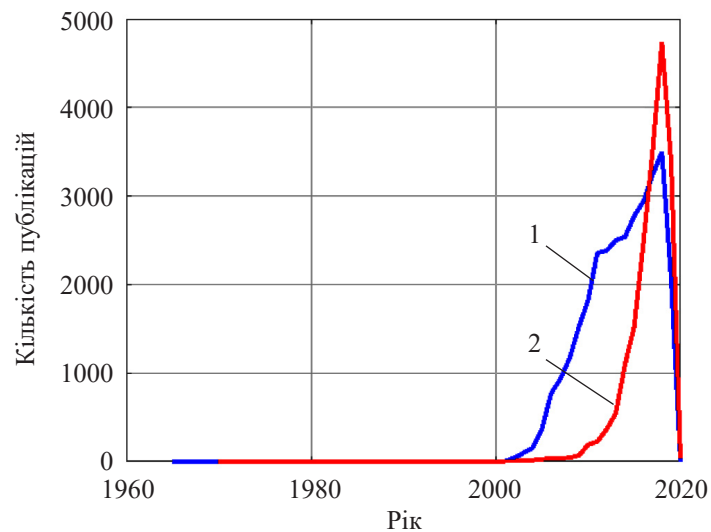


Рис. 1. Результати пошуку публікацій у базі Scopus за термінами «метаматеріали» (1) та «аддитивне виробництво» (2) по роках

У цій роботі буде наведено огляд літератури з використання адитивних технологій для виготовлення метаматеріалів [1 — 148]. В розділі 1 можна ознайомитися з історією адитивного виробництва та метаматеріалів. У розділі 2 проаналізуємо наявні дослідження з виготовлення метаматеріалів і техпроцеси адитивного виробництва, які можна застосовувати для цього, а у розділі 3 розглянемо вироби з метаматеріалів, які були виготовлені з використанням цих технологій, їхні унікальні властивості та області застосування. Наприкінці підіб'ємо підсумки та зупинимося на потенційних можливостях застосування адитивних технологій для виготовлення метаматеріалів.

1. АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МЕТАМАТЕРІАЛИ

1.1. Технології адитивного виробництва

Найбільша частина всієї роботи в області адитивного виробництва (AB) була виконана протягом останніх двох десятиліть, але використані для цього ідеї можна датувати ще 1860-ми роками [1]. AB згадується багатьма назвами в літературі, це, зокрема, 3D-друк, швидке прототипування й пошарове виготовлення [1—4]. Однак загальний процес AB був визначений стандартами ISO/ASTM як «процес з'єднання матеріалів для виготовлення деталей за даними 3D-моделі, зазвичай шар за шаром, на відміну від субтрактивного виробництва та методів формативного виробництва», що надає області AB можливостей до дуже широкого охоплення. Аналогічним чином, за тими ж стандартами визначення, основні процеси AB можна узагальнити у вигляді семи категорій [2, 5]:

- моделювання методом осадження розплавленого матеріалу (fused deposition modeling, FDM);
- струменевий друк (inkjet printing, IJP);
- виробництво ламінованих об'єктів (laminated object manufacturing, LOM);
- формування сітки за допомогою лазера (laser engineered net shaping, LENS);
- стереолітографія (stereolithography, SLA);
- селективне лазерне спікання (selective laser sintering, SLS);

— трикомпонентний розмірний друк (three-dimensional printing, 3DP).

Так само як найменування для AB, назви процесів також можуть широко варіюватися [1]. Наприклад, всі технології, що використовують лазерну обробку металевих матеріалів, можуть називатися залежно від того, як подається і як плавиться порошок [6—8]. В адитивному виробництві може використовуватися різноманітні матеріали з широкого діапазону — від пластмас до металів, кераміки і харчових продуктів та інших біологічних/полімерних матеріалів [4, 9—12]. Як правило, матеріали певного класу друкуються певним методом (наприклад, метали — методами SLS або LENS, пластмаси — FDM тощо), але це не є суворим правилом, і в міру розширення досліджень в цій області перелік матеріалів для друку з використанням деякого методу AB також розширюватиметься [11, 13]. Коротку класифікацію процесів AB представлено у таблиці нижче.

Адаптацію та розширення AB можна частково пояснити зниженням вартості програмованих контролерів, лазерів і програмного забезпечення для автоматизованого проєктування (САПР) [14]. Процес створення деталі, яка буде виготовлена методом AB, починається зі створення на комп'ютері у вигляді файлу САПР тривимірної моделі, яка розбивається на безліч окремих шарів, що використовуються потім як вхідні дані для машини AB, щоб виготовити виріб. Значною мірою цифровий робочий алгоритм процесу AB забезпечує дизайн і геометричну гнучкість з високою точністю розмірів. Процес AB, крім того, є економічно вигідним, оскільки нема потреби в складанні деталей і дуже мало відходів [13, 14]. До того ж процеси AB для друку деталей можна збільшувати в діапазоні від нано/мікрометрів [15—17] до метрового масштабу [18, 19].

Підмножиною 3D-друку (або AB) є 4D-друк, який застосовується у випадках, коли в процесі AB використовуються смарт-матеріали або мультиматеріали, що мають здатність до трансфор-

Категорія	Технологія	“Чорнила” для друку	Джерело енергії	Переваги та недоліки
Екструзія матеріалу (<i>material extrusion</i>)	Моделювання оса- дженням розплавленого матеріалу (<i>fused deposition modeling, FDM</i>)	Термопластики, керамічна суспензія, металеві пасти	Нагрів	Недорога екструзійна машина. Обмежена роздільна здатність. Погана обробка поверхні
Сплавлення порошкового шару (<i>powder bed fusion</i>)	Селективне лазерне спікання (<i>selective laser sintering, SLS</i>). Пряме лазерне сплавлення металу (<i>direct metal laser melting, SLM</i>). Електронно-промене- ве сплавлення (<i>electron beam melting, EBM</i>)	Розпилений металевий порошок (неіржавна сталь 17-4 PH, хром, кобальт, титан Ti6Al4V), керамічний порошок	Потужний лазерний промінь	Висока точність і деталізація. Повністю щільні деталі. Висока питома міцність та жорсткість. Оброблення та перероблення порошку. Структура анкерна чи з опорою

*ASTM International (*American society for testing and materials*) — американська міжнародна добровільна організація, що розробляє і видає стандарти щодо матеріалів, продуктів, систем та послуг.

Категорія	Технологія	“Чорнила” для друку	Джерело енергії	Переваги та недоліки
Фотополімеризація у ванні (<i>vat photopolymerization</i>)	Стереолітографія (<i>stereolithography, SLA</i>)	Фотополімер, кераміка (оксиди алюмінію та цирконію, титанат-цирконат свинцю)	Ультрафіолетовий лазер	Висока швидкість побудови. Хороша роздільна здатність. Перезатвердіння, форма сканованої лінії. Висока вартість витратних матеріалів
Струменевий тривимірний друк (<i>material jetting</i>)	Поліджет (<i>polyjet</i>)/ Струменевий друк	Фотополімер, віск	Нагрів (теплова енергія / фотозатвердіння)	Багатоматеріальний друк. Висока чистота обробки поверхні. Маломіцний матеріал

Категорія	Технологія	“Чорнила” для друку	Джерело енергії	Переваги та недоліки
Упорскування сполучної речовини (<i>binder jetting</i>)	Непрямий струменевий друк (3D-друк з біндером) (<i>3D binder print, 3DP</i>)	Полімер, порошок (гіпс, смола), керамічний порошок, металевий порошок	Нагрів (теплова енергія)	Друк повноколірних об’єктів. Потрібна інфільтрація під час подальшої обробки. Широкий вибір матеріалів. Висока пористість готових деталей
Ламінування листами (<i>sheet lamination</i>)	Виробництво ламінованих предметів (<i>laminated object manufacturing, LOM</i>)	Пластикові плівки, металевий лист, керамічна стрічка	Лазерний промінь	Висока чистота обробки поверхні. Низька вартість матеріалу, машини, технологічного процесу. Віддалення відходів ламинату

Категорія	Технологія	“Чорнила” для друку	Джерело енергії	Переваги та недоліки
Осадження спрямованою енергією (<i>directed energy deposition</i>)	Формування сітки за допомогою лазера (<i>laser engineered net shaping, LENS</i>) Електронне променеве зварювання (<i>electronic beam welding, EBW</i>)	Розплавлений металевий порошок	Лазерний або електронний промінь	Ремонт пошкоджених / зношених деталей. Функціонально градуирований друк матеріалів. Необхідність у машині для подальшої обробки

мації з плином часу [20, 21]. Перетворення матеріальної системи в часі є результатом прикладеного впливу у вигляді теплової, механічної, електричної, магнітної, хімічної дії тощо або їх комбінації [22—24]. Основна частина досліджень 4D-друку зосереджена на сплавах з пам'яттю форми [25], полімерах [26, 27] і їх композитах [28], а недавні досягнення почали поширювати це також на мультиматеріальні системи й метаматеріали [29]. При цьому область застосування 4D-друку також розширюється, і 4D-деталі створюються для застосування у біомедицині, текстильній промисловості, м'якій робототехніці, оригамі, в адаптивних конструкціях і в аерокосмічній техніці [24, 27].

1.2. Метаматеріали

Як і у випадку з адитивним виробництвом, популярність метаматеріалів (ММ) різко зросла за останні 20 років, але джерела цих матеріалів можна простежити ще до початку дев'ятнадцятого століття [30]. Метаматеріали — це штучно виготовлені конструкції та композитні матеріали, які або імітують реакції відомих матеріалів, або мають якісно нові, реалізовані фізично функції відгуку, яких в природі або не існує, або вони можуть бути недоступними [31]. Ці “штучні” матеріали можуть мати екзотичні якості, які не залежать від внутрішніх властивостей матеріалу, хімічних складових, а зумовлюються, скоріше, внутрішньою особливістю структури метаматеріалів [32]. Джерела сучасних електромагнітних метаматеріалів є похідними від теоретичної роботи Веселаго [33], а пізніше Pendry [34] і Smith et al. [35]. Однак ці роботи були чисто теоретичними, а Shelby et al. вперше виготовили такий матеріал і продемонстрували від'ємний показник заломлення [36].

Основний принцип дії метаматеріалів полягає в тому, що ці структури використовують хвильову фізику для досягнення незвичайної або раніше недосяжної поведінки [37]. Найперші експерименти з ММ проводилися в області електромагнетизму для реалізації подвійного від'ємного показника заломлення (DNG) матеріалу (рис. 2) з ранньої теоретичної роботи Веселаго. Робота

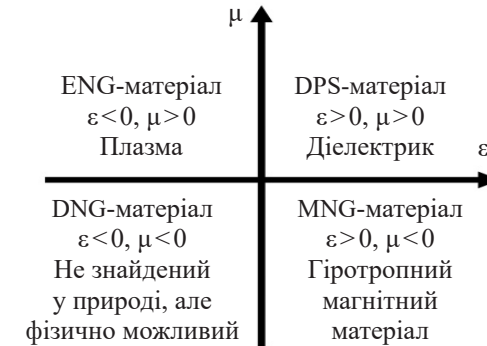


Рис. 2. Класифікація метаматеріалів за діелектричною ϵ та магнітною μ проникностями [31]:

DPS — подвійний додатний (*double positive*); DNG — подвійний від'ємний (*double negative*); MNG — μ -від'ємний (*magnetic negative*); ENG — ϵ -від'ємний (*electric negative*)

зі штучного магнетизму Pendry et al. (1990-ті роки) була першою, де був продемонстрований магнітний матеріал з від'ємною магнітною проникністю (μ) і додатною діелектричною проникністю (ϵ) [38]. Вона була ключовою для розробки штучної структури, відомої як резонатор з розрізаним кільцем (SRR), яка вперше продемонструвала реалізований DNG [34, 36, 39]. Спочатку ці метаматеріали обмежувалися мікрохвильовим діапазоном (рис. 3)

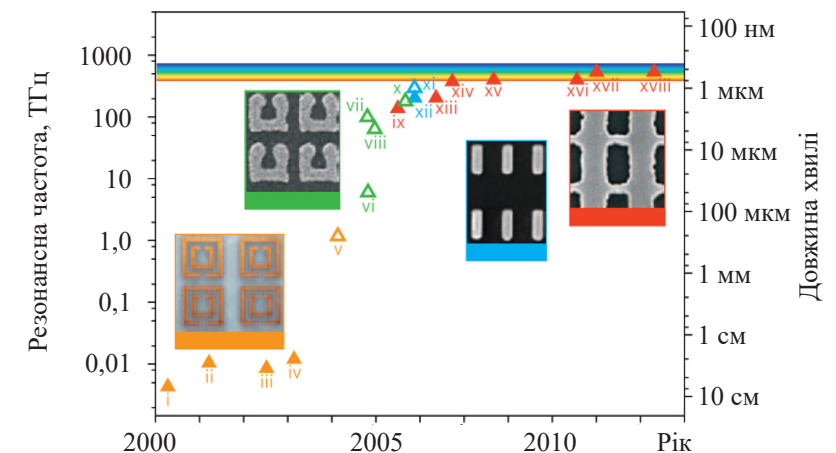


Рис. 3. Прогрес в області електромагнітних/оптичних метаматеріалів [45]

[40], але дослідження швидко розширили область, охопивши частоти в терагерцовому й оптичному діапазонах [41, 42]. Спочатку запропоновані та побудовані для створення і демонстрації цих ММ структури були одиничними функціональними шарами, але Valentine et al. [43] реалізували тривимірну (3D) структуру, склавши відповідним чином кілька окремих шарів [44, 45]. Успіх метаматеріалів в електромагнетизмі/оптиці привів до розвитку метаматеріалів для роботи на хвилях набагато більшої довжини та в масштабах довжини, як, наприклад, в акустиці, термодинаміці та механіці [46, 47].

1.2.1. Термічні метаматеріали

Термічні метаматеріали описуються рівняннями, аналогічними тим, які використовуються для електромагнітних ММ [48] і належать до термодинаміки перетворень [49, 50]. Термічні метаматеріали, мабуть, найменш вивчений клас ММ через відносно пізнє виведення термодинамічних перетворень [51]. Проте, термічні метаматеріали швидко знаходять застосування в тепловому маскуванні, захисті та менеджменті [52, 53].

1.2.2. Акустичні метаматеріали

Акустичні та механічні метаматеріали схожі між собою, і в багатьох випадках їх об'єднують в групи, оскільки акустика залежить від модуля пружності так само, як і класична механіка суцільного середовища [54]. В перших акустичних метаматеріалах (АММ), розроблених Liu et al. [55], використовувалися вкриті гумою сфери для створення локально резонансних і глибоко субхвильових структур, які реагували на акустичні хвилі. Відтоді багато дослідників досліджували спроможність АММ контролювати загасання акустичних хвиль, створювати ефект укриття (маскування), їхню здатність до інженерії акустичного хвильового фронту, наприклад фокусування через управління акустичним імпедансом метаматеріалів [56]. АММ можуть управля-

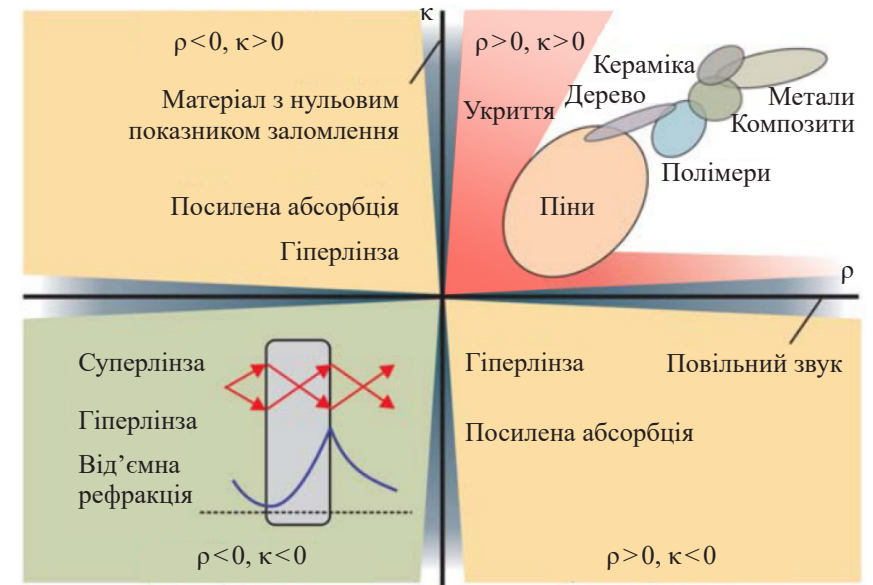


Рис. 4. Класифікація акустичних метаматеріалів за масовою щільністю ρ та об'ємним модулем κ (аналогічно рис. 2) [60]

ти поширенням хвиль, змінюючи об'ємний модуль (κ) і/або масову щільність (ρ), аналогічно тому, як це багато в чому відбувається з електромагнітними метаматеріалами (рис. 4). Таким чином, можна показати, що в акустичних і електромагнітних рівняннях κ^{-1} відповідає ϵ , а ρ відповідає μ [47]. Публікацій в галузі АММ дуже багато, серед них існує низка дуже ґрунтовних оглядів, в яких обговорюються акустичні гіперлінзи [57], механізми поглинання [58], перестроювані АММ [56], а також інші аспекти та застосування, такі як маскування та активні АММ [59—61].

1.2.3. Механічні метаматеріали

Взагалі, серед усіх метаматеріалів механічні ММ, мабуть, є найскладнішими для проектування через кількість параметрів, що можуть брати участь в описі матеріалу суцільного середовища (наприклад, тензор анізотропної пружності, термопружність, пружнопластичність тощо) [48]. Механічні метаматеріали зазви-

чай проєктуються для одержання нульового або від'ємного коефіцієнта Пуассона (ауксетичні ММ) [62—65], дуже низької або від'ємної масової щільності (легкі ММ), зникаючого модулю зсуву (пентамодні або антиауксетичні ММ) [66, 67], від'ємної жор-

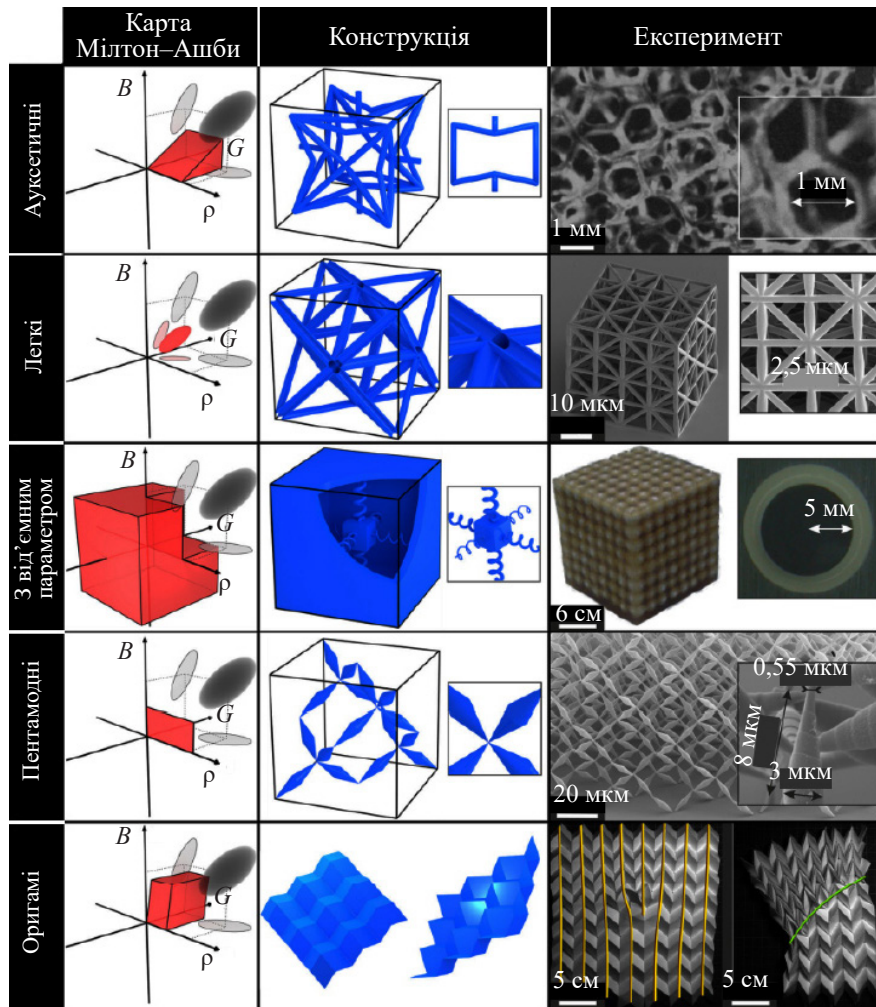


Рис. 5. Огляд механічних метаматеріалів Крістенсена та ін. [54]

(у першому стовпчику B — модуль об'ємної пружності; ρ — масова щільність; G — модуль зсуву; червоний колір відповідає умовам для метаматеріалів, а чорний — для традиційних матеріалів)

сткості або стисливості (ММ з від'ємним параметром) [68, 69], структур оригамі та/або від'ємного коефіцієнта теплового поширення [70, 71]. Приклади кожного з цих класів матеріалів можна побачити на рис. 5.

Хоча більшість механічних метаматеріалів є металевими, також були проведені дослідження з полімерами [72] та керамікою [73]. Як і у випадку з акустичними ММ, в області механічних метаматеріалів також було виконано багато досліджень, додаткову інформацію можна знайти в деяких оглядах в цій області, наприклад [54, 74—76].

2. ВИГОТОВЛЕННЯ Й АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО МЕТАМАТЕРІАЛІВ

Як обговорювалося в попередньому розділі, поведінка метаматеріалу залежить від його внутрішньої структури, яка в цілому являє собою складну повторювану структуру невеликого розміру. Очевидно, що для її отримання дуже підходить технологія адитивного виробництва завдяки безлічі її унікальних переваг, таких як можливість друку геометричних фігур від макро- до мікромасштабу та відсутність просторових обмежень [77, 78]. У цьому розділі коротко розглянемо загальні питання виготовлення ММ, потім переглянемо недавні роботи з виготовлення метаматеріалів методами АВ. Специфічні властивості та застосування метаматеріалів, виготовлених за допомогою АВ, обговорюватимуться в розділі 3.

2.1. Методи виготовлення метаматеріалів

Після того як у 2001 році були продемонстровані перші метаматеріали, постало зацікавлення у вдосконаленні технологіях виготовлення метаматеріалів як у 2D-, так і в 3D-формах. Єдиною великою перешкодою для широкого впровадження ММ на сьогодні є складність переходу від 2D- до 3D-форми зі зберіганням при цьому достатньої роздільної здатності елементарної комірки при виготовленні деталей в макромасштабі.

Найпоширеніші методи виготовлення 2D-метаматеріалів належать до літографії, зокрема це фотолітографія, літографія тіньової маски, м'яка літографія, електронно-променева літогра-

фія, рентгенівська літографія або двофотонна літографія [79]. Фотолітографія є одним з найперших методів виготовлення метаматеріалів. Загалом, методи літографії використовують штампування або процес трансферного друку, для чого потрібен “негатив” того рисунка, який необхідно надрукувати, а також джерело енергії ультрафіолетового світла або електронного промення. Цими методами можна створювати деталі на субмікронному та нанорівнях, вони дозволяють отримувати 3D-форму шляхом накладення декількох шарів один на одного [80]. Однак зазвичай літографія — повільний, дорогий метод, який не масштабується до великих площ [81]. Стереолітографія зазвичай використовується в адитивному виробництві, але дуже рідко для виготовлення метаматеріалів через недостатню роздільну здатність. Однак недавні досягнення в області мікростереолітографії розв’язали цю проблему [82], що обговорюватиметься у наступному розділі.

В ідеалі вбачається, що великомасштабні 3D-метаматеріали будуть реалізовані за допомогою якогось недорогого та високопродуктивного процесу, наразі ж більшість методів їх виготовлення належать або до тривимірного, або до великомасштабного, але при цьому деякі з них вже починають долати цей розрив. Один з перших 3D-метаматеріалів був створений Deubel et al. [83] з використанням методу прямого лазерного друку (direct laser writing, DLW), який має низьку продуктивність і обмежений вибір матеріалів [80]. Також були вивчені інші просунуті 3D-методи виготовлення, такі як відбиткова літографія (imprint lithography), інтерференційна літографія, багатофотонна полімеризація [17] і фрезерування сфокусованим іонним пучком (focused ion beam milling), але їм зазвичай притаманні ті ж самі проблеми — низька продуктивність, недостатня роздільна здатність, неможливість масштабування за межі мікронного масштабу, труднощі з вибором матеріалу [79, 84]. Додаткові 3D-методи, засновані на традиційних виробничих процесах, таких як лиття кераміки [85] і формування під тиском [86], також були адаптовані для виго-

товлення метаматеріалів, але вони не були широко використані через проблеми зі створенням пресформ і необхідність спікання для остаточного формування деталі. Найперспективнішими методами виготовлення великомасштабних 3D-метаматеріалів є нановідбиткова літографія (nanoimprint lithography) [87], перенесення шаблону (pattern transfer) [88], самозбірка (self-assembly) [89, 90] та адитивне виробництво. Подробиці щодо цих методів, крім АВ, тут розглядати не будемо, з ними можна ознайомитися в оглядах Yoon et al. [80] та Bishop-Moser et al. [81].

2.2. Адитивне виробництво метаматеріалів

АВ вже використовувалося для створення легких конструкцій з високою жорсткістю шляхом оптимізації топології після зародження цього методу, а потім його використання отримало більше поширення [14, 91]. Хоча багато прикладів оптимізації топології, створеної за допомогою АВ, є справді структурами довільної форми, багато з них засновані на структурованих елементарних комірках [92]. Тобто є природним поєднання адитивного виробництва і метаматеріалів. Однак найбільш поширені методи АВ працюють в діапазоні довжини від мікронів до метрів, в той час як метаматеріали зазвичай використовують структури в масштабі від міліметра до нанометра, особливо в електромагнітних і оптичних застосуваннях, де розміри субструктури метаматеріалу мають бути такими ж, як і довжина хвилі. Щоб узгодити цю різницю в масштабі, для виготовлення метаматеріалів було розроблено й впроваджено багато нових високоточних методів АВ.

Існує низка робіт, в яких використовується модифікована високоточна версія стереолітографії (SLA) — проєкційна мікростереолітографія (PμSLA) [78]. Цей метод дозволяє створювати елементи з роздільною здатністю 1 мкм практично так само, як і традиційний SLA. Метод PμSLA, мабуть, є одним з найпоширеніших методів виготовлення метаматеріалів серед описаних в літературі [82, 93, 94]. Частково це обумовлено тим, що PμSLA

є відносно простим та добре вивченим процесом, що забезпечує продуктивність і добре масштабується до великих площин. Як і у випадку з традиційним SLA, вибір матеріалів для PμSLA зазвичай обмежується фотополімерами, але є приклади використання кераміки [95] та металів [96].

Також відомі два дещо поширених високоточних методи виготовлення метаматеріалів за допомогою АВ — згадуваний вище прямий лазерний друк (DLW) і прямий друк “чорнилом” (direct ink writing, DIW). Перший дещо схожий з SLA, в той час як DIW більше нагадує методи друку струменем зі зв’язувальною речовиною (binder jetting, BJ) або екструзії матеріалу [97]. До методів DLW належить двофотонна полімеризація (two-photon polymerization, TPP), яка використовує лазерний промінь з фемтосекундними імпульсами для ініціювання процесу фотополімеризації. Цей метод надзвичайно точний, його роздільна здатність менше ніж 100 нм, до того ж він працює у справжньому тривимірному просторі (тобто опорна конструкція тут не потрібна, фотополімеризація відбувається на безперервному тривимірному лазерному шляху, а не пошарово) [98]. TPP, будучи надзвичайно точним, погано масштабується до великих деталей, а вибір матеріалів для нього дуже малий. В методі DIW використовуються колоїдні “чорнила”, які тверднуть під тиском, а не завдяки фазовому переходу, як у традиційних методах екструзії [99, 100]. Прямий друк “чорнилом” може досягати субмікронної роздільної здатності та використовуватися для широкого вибору матеріалів, але має недолік — повільний процес друку [78, 101].

Можна згадати ще два методи виготовлення метаматеріалів високої точності — електрофоретичне осадження [102] та електрогідродинамічний друк [103], що використовують електростатичні поля для транспортування матеріалу в необхідне місце. Обидва процеси дуже перспективні, оскільки є дешевими, надійними та високоточними. Однак вони мають й низку недоліків, зокрема низьку швидкість осадження [78]. Крім того, хоча

обидва методи є адитивними, жоден з них не вписується у стандартну класифікацію процесів АВ (див. таблицю), і далі не обговорюватимуться.

Поряд з описаними вище високоточними методами для виробництва метаматеріалів все ще використовують традиційні методи АВ, особливо при виготовленні механічних і акустичних ММ, структури яких не обов'язково мають бути мікро/нанометровими. Щоб уникнути повторення, наведемо лише короткий огляд деяких традиційних методів АВ, які використовувалися для виготовлення метаматеріалів (пояснення аббревіатур див. вище у таблиці).

Метод SLA був використаний для створення механічних решіток октетів для поглинання енергії [104] і метаматеріалу з вбудованою геометричною оптикою [105]. Методи плавлення порошкового шару, такі як SLS [106—109], DMLS [110], SLM [15], EBM [111], особливо широко застосовуються для механічних метаматеріалів, де бажаною є міцність металевих конструкцій. Для отримання 4D-метаматеріалів [112] та інших застосувань полімерів [113] використовувався FDM. Зрідка були застосовані й інші методи, наприклад друк струменем зі зв'язувальною речовиною (BJ) [114]. Попри те що аерозольний струменевий друк [115] не має прямого відношення до методу спрямованого енергетичного осадження (DED), він демонструє деякі подібності до нього, а також до аерозольного осадження (aerosol deposition, AD) [116] і холодного розпилення (cold spraying, CS) [117], але з набагато більшою точністю.

Такі методи як шарове ламінування та DED здаються найменш поширеними для виготовлення метаматеріалів. Листове ламінування, швидше за все, не використовується, через відсутність механізму створення структурних характеристик, необхідних для метаматеріалів, а DED зазвичай має меншу роздільну здатність, ніж інші подібні методи спікання або плавлення металевих матеріалів. Однак DED можна застосовувати для багатоосьових

фрезерних верстатів, тобто він надає більше просторової свободи, ніж інші процеси АВ. Така свобода може бути корисною при створенні складних метаматеріальних структур, і це дуже важливо, оскільки може допомогти в створенні ізотропних метаматеріалів. На відміну від інших методів, особливо металевого адитивного виробництва, DED дозволяє створювати також функціонально диференційовані та багатоматеріальні деталі.

2.2.1. 4D-метаматеріали

Як згадувалося раніше, ще одним класом 4D-матеріалів, що розвивається, є 4D-метаматеріали. Через те що впровадження 4D-друку почалося відносно недавно, робота з такими метаматеріалами обмежена, але відкриває перспективи створення ММ, які функціонують як метаматеріали з декількома станами [118]. Найбільш поширені методи 4D-друку метаматеріалів — це FDM і SLA/PμSLA для полімерів з пам'яттю форми. Але були успішними й інші методи, такі як селективне лазерне спікання (SLS) і струменевий друк для полімерів із пам'яттю форми та селективне лазерне плавлення (SLM) для сплавів з пам'яттю форми [24, 119—121]. Інші роботи в галузі 4D-друку стосувалися друку із функціональними градаціями та друку з кількох матеріалів, але ці методи не використовувалися для демонстрації поведінки традиційних метаматеріалів [122].

3. АДИТИВНО ВИГОТОВЛЕНІ МЕТАМАТЕРІАЛИ

Розглянемо властивості метаматеріалів, виготовлених методом АВ, і обговорімо деякі їх застосування. Як і слід було очікувати, їм притаманні багато з тих властивостей, що й метаматеріалам, які не належать до АВ, але зробимо розрізнення цих двох класів матеріалів. Також слід зазначити, що Wu et al. у [123] наводять чудовий огляд адитивних метаматеріалів та їх застосувань і властивостей. Поточна ж робота відрізняється тим, що дає ширший огляд застосувань і властивостей, а не багато прикладів використання метаматеріалів.

3.1. Властивості

Як і в розділі 1.2, спочатку обговорімо електромагнітні та оптичні властивості метаматеріалів, а потім термічні та акустичні і, нарешті, механічні. Мало хто з авторів обговорює виключно властивості електромагнітних або оптичних метаматеріалів, виготовлених методом АВ. Натомість більшість авторів вчать на результатах, отриманих дослідниками електромагнітних матеріалів, розробляють метаматеріал для конкретного застосування, а потім використовують АВ для друку деталі. Інтуїтивно зрозуміло, що це має сенс, оскільки електромагнітні метаматеріали були широко вивчені в 2D-форматі, і їхні властивості, як правило, очевидні, тому АВ для виготовлення деталі є виключно прикладним методом. Але невеликі розміри, необхідні для електромагнітних метаматеріалів, роблять АВ навіть простих конструк-

цій викликом. Однак деякі автори обговорюють властивості, які можуть бути досягнуті тільки методом АВ. Наприклад, Garcia [124] описує використання FDM для створення виробу на основі елементарних комірок з малим анізотропним діелектричним тензором. У тому ж ключі Ісаков та ін. [113] використовували діелектричні матеріали з високою та низькою діелектричною проникністю, укладені шарами відповідним чином для досягнення штучної анізотропної діелектричної проникності.

3.1.1. Термічні метаматеріали

Як і у випадку з АВ електромагнітних матеріалів, існує лише невелика кількість літературних джерел, присвячених розробленню індивідуальних властивостей для термічних метаматеріалів АВ без прив'язки до конкретного застосування. Wu et al. [125] використовували мультиматеріальний струменевий друк для конструювання та виготовлення антихіральних структур з від'ємним термічним розширенням. Аналогічним чином Wang et al. [70] використовували мультиматеріальну стереолітографію (SLA) для конструювання ґратчастої структури з від'ємним тепловим розширенням. Зауважимо, що “запущена” АВ конкретна робота щодо створення теплового укриття (теплової “невидимості”), отримання від'ємної теплопровідності тощо наразі не є активною областю досліджень, отже, існує великий потенціал для нових досліджень, таких як проєктування метаматеріальних субструктур, які могли б бути отримані тільки методом АВ.

3.1.2. Акустичні метаматеріали

Локально резонансні метаматеріали призначаються для запобігання поширенню хвиль певного частотного діапазону (створення заборонених зон) з метою акустичної ізоляції або маскування. У 2013 році Sanchis et al. [126] використовували АВ для розробки прототипу осесиметричного плаща-укриття, здатного придушити 90% хвиль, розсіяних сферою на певній частоті. Для

акустичної “невидимості” особливо важливо, щоб вона була ізотропною та всенаправленою. Методи, продемонстровані Sanchis et al., можуть бути розвинені таким чином, щоб всенаправлене укріплення розроблялося та реалізовувалося за допомогою АВ. Пізніше Raza [127] розробив локально резонансні метаматеріали для поглинання енергії, аналогічно Sanchis et al., але для цього він використовував новий метод мультиматеріального друку. Цей метод є гібридним — прямий крапельний друк сумісно з методом безперервного прямого друку з використанням трьох різних матеріалів (двох полімерів і адгезиву). Ця технологія може стати значущою, якщо її трохи модифікувати з метою розширення діапазону використовуваних матеріалів. Наприклад, Matlack et al. [128] розробили композитну структуру з полікарбонату та сталевих кубиків для поглинання вібрації. Полікарбонат друкувався на 3D-принтері з перервами для розміщення сталевих кубиків. Можливо, таку композитну структуру можна було б зробити без перерви, якби розроблену Raza технологію модифікувати належним чином. В дослідженні [111] Wormser et al. використовували електронно-променеве плавлення (EBM) АВ з титаном для розробки швидкісного лазерного виробництва (LRM) на основі оптимізованої тривимірної решітки. Були винайдені, виготовлені та протестовані кілька конструкцій, які показали наявність різних фононних заборонених зон і слабку ауксетичну поведінку. Подвійна властивість спроектованої структури вказує на те, що можна проєктувати метаматеріали для двох завдань — структурно-акустичного або теплового.

3.1.3. Механічні метаматеріали

У порівнянні з іншими метаматеріалами, механічним метаматеріалам, виробленим за допомогою АВ, присвячено багато літератури. Швидше за все, це може бути пов'язано з тим, що АВ є термомеханічним і орієнтованим на матеріали процесом, який має очевидні тісні зв'язки зі структурною механікою і, отже, ме-

ханічним дизайном метаматеріалу. Крім того, як згадувалося раніше, для механічних метаматеріалів не потрібна така ж роздільна здатність, як для електромагнітних та оптичних, що робить їх простішими для виготовлення та більш доступними для вивчення.

Одними з перших застосували метод АВ для створення механічних метаматеріалів були автори Kashdan et al. [106], коли за технологією SLS був виготовлений з нейлону елемент з від'ємною жорсткістю, призначений для віброізоляції. Цей прототип, в якому використовувалася пружина для управління поздовжнім вигином балки, був унікальною конструкцією для метаматеріалу, але мав деякі елементи конструкції, схожі на конструкцію з від'ємними параметрами на рис. 5. Метод SLS використовувався і в інших роботах для побудови невпорядкованих ґраток для постійного механічного налаштування [109] та виготовлення ауксетичної структури, в якій використовувався поліамід, просочений вуглецевими нанотрубками (carbon nanotubes, CNTs) [108]. Невпорядковані решітки, створені Mirzaali et al. [109] були унікальними, оскільки більшість підструктур були засновані на симетричних октетах, реєнтрентних або подібних періодичних ґратках. Оскільки невпорядковані решітки були складними, для їх виготовлення необхідно було розробити технологію АВ. В цих невпорядкованих структурах вдалося досягти набагато більш широкого діапазону значень пари модуль пружності — співвідношення Пуассона, ніж в типових ґратчастих системах. Технологія АВ також була необхідна Yuan et al. [108] для виготовлення CNT-модифікованих ауксетичних буклікристалів поліаміду. Ця робота показала, як можуть бути змінені характеристики поглинання енергії залежно від дизайну конструкції. Крім того, при використанні CNT-модифікованих неметалічних матеріалів можна уникнути дефектів обробки, притаманних більшості металевих матеріалів АВ. Використання CNTs може бути розширено, щоб надати ауксетичній структурі більш унікальних

електричних/термічних властивостей, які зазвичай проявляються в матеріалах на основі CNT.

Інші методи АВ, такі як електронно-променево-спалення (EBM), пряме лазерне спалення металу (SLM), стереолітографія (SLA), також використовувалися для виготовлення механічних метаматеріалів. Amendola et al. [129] використовували EBM для виготовлення різноманітних структур метаматеріалів на основі пентамодів з титану, щоб вивчити, як мікро- та макроскопічні особливості впливають на конструкцію, призначену для віброізоляції. Були виконані деякі циклічні тести, але було б цікаво перевірити, наскільки суттєво впливає структура метаматеріалу на довгострокову роботу при малих вібраційних навантаженнях. Аналогічно попереднім роботам, Hedayat et al. [130] використовували SLM для виготовлення титанових пентамодових матеріалів. Новизна цього дослідження полягала в зміні щільності енергії, використовуваної для створення різних форм стійки в конструкції пентамодового метаматеріалу. В дослідженні Tancogne-Dejean et al. [15] SLM використовували для виробництва пентамодових метаматеріалів з неіржавної сталі 316L, де розміри стійки варіювалися для створення різної поведінки макроскопічної структури. Крім того, в цій роботі було показано фактичну мікроструктуру металу та проаналізовано дефекти виробництва. Ці дефекти добре вивчені для АВ, і подальша робота в цій галузі для метаматеріалів можуть призвести до отримання мікроструктур з ще більше поліпшеними механічними властивостями або можливостями, ніж ті, що сьогодні вивчаються.

Пентамодові метаматеріали також вивчалися за полімерними матеріалами, надрукованими методом SLA. Друковані ґратчасті структури в метаматеріалах змінювалися [131] та показали високі характеристики поглинання енергії з великими відновлюваними деформаціями [104]. Ці явища в менших масштабах спостерігалися також в пентамодових метаматеріалах, вироблених за допомогою проєкційної мікростереолітографії (PμSLA) [82, 94]. Конструкція

метаматеріалів була дуже легкою з майже лінійною характеристикою «маса — жорсткість» на відміну від квадратичної або кубічної у стандартних матеріалів. Метод PμSLA також використовувався для друку мультиматеріальних решіток із регульованими механічними константами, включно з коефіцієнтом Пуассона, який може перебувати в діапазоні від майже 0 до -7 [132]. Діапазон і контроль пружних констант у продемонстрованих мультиматеріальних решітках показують, яким може бути діапазон проєктного простору, що допускається технологією АВ. Цей діапазон дизайну в комбінації з оптимізацією топології і комп'ютерним моделюванням можна було б використовувати для створення метаматеріалів з ще більш екстремальною поведінкою, ніж в попередній роботі. Додатково до PμSLA, використовувався прямий струменевий друк для створення структур, які теж демонструють близьку до лінійної залежність «маса — жорсткість» і від'ємну жорсткість [101].

Ще одна перспективна область механічних метаматеріалів — ієрархічний структурний дизайн. Ієрархічний дизайн забезпечується можливістю створювати структури в нано-/мікромасштабі (при використанні таких методів, як самоскладання (self assembly), двофотонна полімеризація (TPP) або PμSLA) з залученням їх у великі структури макрорівня [107]. Серед перших наукових груп, які вивчали цей тип структури, були Meza, Zheng et al. [96, 133, 134]. Починавши з нанорозмірної решітки, вони змогли використати PμSLA на великій площі для створення нанорозмірних субструктур, здатні реалізувати розмірний ефект матеріалу та збільшити його аж до сантиметрового масштабу. Деталі, виготовлені з використанням цього ієрархічного підходу, можуть забезпечити екстремальні механічні властивості, адаптовані для будь-якого бажаного застосування, зберігаючи при цьому надзвичайно низьку щільність. Крім того, завдяки масштабу базової нанорешітки цей метод можна використовувати для створення не тільки механічних, а й інших метаматеріалів, таких як оптичні, електромагнітні або термічні.

3.1.4. 4D-властивості

Як зазначалося раніше, 4D-друк забезпечує отримання метаматеріалів з унікальними властивостями, як, наприклад, матеріалів, що діють як перемикачі або можуть “замерзнути” в певних положеннях [112, 120]. Цей тип метаматеріалів може бути сконструйований як ауксетичний метаматеріал і використаний в згорнутому стані (наприклад, космічні конструкції, що згодом розгортаються). Такий метаматеріал можна зберігати в компактному вигляді, а потім вивільнити й розгорнути до значного розміру з використанням лише подразників навколишнього середовища. Крім того, трансформна природа матеріалу може забезпечити регульовану заборонену зону, яка взаємодітиме не з однією частотою, а з усім діапазоном частот, як показано в [135]. Велика частина 4D-метаматеріалів була виконана з полімерами з пам’яттю форми (SMP), проте сплави з пам’яттю форми (SMA) поки що лишаються зовсім новою галуззю [136]. Ці матеріали поки що не створювалися спеціально як механічні метаматеріали, але результати поточних досліджень можна легко поширити на їх конструювання. Наприклад, Saedi et al. [137] показали, що за допомогою SLM можна виготовити пористий NiTi та варіювати його механічні властивості залежно від пористості. Детальне моделювання та оптимізація могли б розвинути ідеї, продемонстровані Saedi et al., щоб будувати механічні, термічні, акустичні метаматеріали, які налаштовуються залежно від області застосування.

3.2. Застосування

Адитивне виробництво не тільки забезпечує унікальні властивості метаматеріалів, недосяжні при традиційних методах обробки, але й дозволяє створювати деталі для унікальних застосувань. Мультиматеріальна система, розроблена Raza [127], була використана для виготовлення різних LRM-конструкцій, використовуваних для збирання енергії. Аналогічним чином Yin et al. [138] розробили й продемонстрували радіопоглинальну струк-

туру, виготовлену за допомогою стереолітографії (SLA). Для її створення використовували конструкцію по типу стосу, де окремі елементи чергуються й розподіляються таким чином, щоб щільність структури ставала більшою ближче до об’єкта, який потрібно захистити від радара. Цей тип дизайну може бути створений тільки завдяки можливостям АВ.

Як згадувалося раніше, Sadeqi et al. [105] використовували SLA для розробки метаматеріалу з вбудованою геометричною оптикою. За допомогою техніки АВ вони змогли покрити оптику метаматеріалом з мікрохвильовим поглинанням на заданій частоті. Автори зазначили, що зі збільшенням роздільної здатності та площі терагерцової й оптичні метаматеріали можуть бути вбудовані в оптику. Вважається, що система, розроблена Meza, Zheng et al. [96, 133, 134], в поєднанні з SMP придатна для друкування з високою роздільною здатністю на великій площі та дозволяє отримати оптику, перебудовувану за частотою внаслідок активації SMP.

Клас механічних ММ, які ще не обговорювалися, — це ті, що використовуються в структурах оригамі (див. рис. 5). Цей клас метаматеріалів використовує періодичне розташування складок для створення дизайну з високою гнучкістю, можливістю розгортання та малою вагою. Багато прикладів реалізації обговорюється Zadpoor у [74], але одним з найцікавіших є використання для створення оригамі 4D-друку. Це дозволяє оригамі в певний момент самостійно складатися та розкладатися, що значно розширює можливості його застосування. Liu et al. [139] методом осадження розплавленого матеріалу (FDM) з використанням SMP створювали 4D-оригамі Міура-орі, які показали 300% оборотної зміни об’єму тільки за допомогою теплового подразника. Han et al. [140] недавно розробили мультиматеріальну систему РμSLA й припустили, що її можна використовувати для друку розумних (smart) матеріалів. Han et al. використовували цю машину, щоб продемонструвати мультичутливий пучок гідроге-

лю через теплові та електричні входи. Активне оригамі — це область, де для створення структур оригамі, що самі згинаються, використовуються вбудовані в еластomers SMA [141]. Композити з пам'яттю форми, що використовують вбудовані в SMP-дроти SMA, були запропоновані як механізм для створення самозгинних оригамі, які можуть залишатися заблокованими в активованому, складеному положенні [142]. Використання системи, подібної до розробленої Han et al., може розширити можливий простір дизайну композитного оригамі з пам'яттю форми завдяки можливості одночасного друкування з застосуванням SMA та SMP. Сплави SMA не обов'язково мають бути вбудовані як дроти, вони можуть бути надруковані як планарна сітка в SMP, аналогічно надрукованій Liu et al.

Обговорювані застосування жодним чином не є вичерпними, і АВ можна використовувати для виготовлення практично будь-яких метаматеріалів для будь-якого застосування. Звичайно, існують обмеження, такі як розмір деталі й можливості вибору матеріалу, але ці перешкоди в разі потреби необхідно долати за допомогою традиційної технології виробництва. Інформацію щодо застосувань, не обговорюваних тут, можна знайти в оглядових статтях про метаматеріали та використання АВ, наприклад в [13, 78, 97]. Деякі застосування метаматеріалів, виготовлених методом АВ, запропоновані в цих роботах — суперконденсатори, акумуляторні електроди та біомедичні застосування. Зупинимося коротко на останньому.

3.2.1. Біологічні застосування

Технології адитивного виробництва для біологічних/біомедичних застосувань — це інновація, що використовує відносно низьку продуктивність АВ і гнучкість дизайну для створення індивідуальних структур і медичних фантомів. Ці персоналізовані деталі можуть бути використані для будь-чого: від зубних протезів і слухових апаратів до протезів частин тіла. Нещодавно поча-

лась робота з використання метаматеріалів в біомедичних застосуваннях [143]. Наприклад, з використанням АВ може бути виготовлений метаматеріал для демонстрації ауксетичної поведінки, і це можна використовувати для управління локальною щільністю клітин для зростання/регенерації клітин.

Біологічна тканина належить до найскладніших з точки зору механіки матеріалів для її характеризувати і може демонструвати гіперпружність, в'язкопружність, нестисливість і анізотропію, як деякі матеріали, що демонструють всі ці властивості одночасно. Крім того, біологічні матеріали (наприклад, кістка) можуть мати ієрархічну структуру або містити складні мікроструктури, такі як мікроструктури губчастої кістки. Метаматеріали, засновані на решітчастих структурах, можуть демонструвати майже нескінченний діапазон механічних властивостей та ідеально підходять для імітації описаних біологічних властивостей. Так, Johnson et al. [144] застосували АВ для виготовлення метаматеріалів, здатних імітувати поведінку різних тканин. Це дозволило їм використати добре вивчені еластичні біосумісні матеріали для створення решіток, необхідних для імітації біоматеріалу, а АВ уможливило побудову решітки. Аналогічним чином Wang et al. [145 — 147] досліджували мультиматеріальний метод АВ для створення фантомів, що імітують тканину. Цей підхід дозволяє ще більше наблизитися до тканин, і цілком можливо, що у перспективі можна буде використовувати АВ для створення фантома цілої кінцівки — це допоможе зрозуміти процеси, які відбуваються при травмуванні.

В іншій роботі електронно-променеве плавлення та титан були використані для виготовлення ауксетичних метаматеріалів в поєднанні з традиційними матеріалами для створення “метамімплататів”, які змогли знизити ризик руйнування інтерфейсу «кістка — імплантат» [148].

Окрім фантомів, що імітують тканини, які фіксують біомеханічну реакцію, метаматеріали, виготовлені за технологіями АВ,

здатні вирощувати/відновлювати тканини за допомогою імплантованих клітин. Raman et al. [93] використовували багатоматеріальний PμSLA, щоб створити структуру з клітин і біоматеріалів, яка відтворює кровоносно-нервовий апарат. Для отримання правильної структури вирішальне значення тут мало застосування АВ, що дозволило найбільш точно імітувати живу тканину, щоб клітини були якомога ближче до стану *in vivo*. Передбачається, що цей тип мультиматеріального АВ може бути використаний в широкому діапазоні застосувань (а не тільки кровоносно-нервової системи), зокрема високопродуктивне тестування ліків і дослідження розвитку захворювання *in vitro*.

РЕЗЮМЕ

У представлений роботі наведено огляд адитивних технологій виготовлення метаматеріалів, а також розглянуто їхні унікальні властивості та застосування. Як свідчить аналіз літератури, чимало технологій АВ вже використовуються для виготовлення метаматеріалів, а багато поширених методів виготовлення метаматеріалів аналогічні тим, що використовувалися в АВ. Багато з цих процесів необхідно було модифікувати для застосування в малих (нано/мікро) масштабах, наприклад в електромагнітних і оптичних застосуваннях. В огляді було показано унікальні властивості та області застосування метаматеріалів, виготовлених з використанням технологій АВ, та зазначено прогалини в знаннях та потенціал, що впливають на майбутній їх розвиток, дещо з цього розглянемо зараз більш детально.

Потенціальні можливості АВ. Як вже зазначалося, спрямоване енергетичне осадження (DED) не є методом АВ, який був використаний для виготовлення метаматеріалів. Можливості методів DED необхідно досліджувати, оскільки їх можна застосовувати до металевих матеріалів. Крім того, вони дозволяють виробляти деталі з різних матеріалів і є функціонально диференційованими, чого не можна сказати про метод на основі порошкового шару. Причиною утруднень з адаптацією DED до виробництва метаматеріалів є його відносно низька точність дотримання заданих розмірів. Однак процес DED можна порівняти з ме-

тодом аерозольного струменевого друку Jahn et al. [115], за винятком того, що DED використовує лазер для спікання матеріалу в процесі покриття. Високоточні лазери зараз доступні, як і ті, що використовуються у двофотонній полімеризації, і в поєднанні з аерозольним струменем вони, по суті, можуть реалізувати високоточний метод DED. Така розробка може забезпечити можливість виробництва унікальних металевих метаматеріалів з тепловими, акустичними або електромагнітними/оптичними властивостями додатково до високої міцності конструкції. Цей тип розробки міг би поєднуватися з функціональною градацією матеріалу та оптимізацією топології для отримання структур, які зберігають свою міцність, зменшують щільність і все ще можуть функціонувати як плащ-укриття з метаматеріалу. Інший, більш доступний шлях для впровадження DED у процес виготовлення метаматеріалів — використання гібридної системи АВ. Ця система використовує як адитивні, так і субтрактивні методи для виробництва деталей високої якості з високою роздільною здатністю. Субтрактивні процеси з числовим комп'ютерним управлінням (CNC subtractive processes) здатні забезпечити точність до одного мікрметра, що, в принципі, є достатнім для будь-якого застосування метаматеріалів.

Розвиток технологій АВ. Ще один можливий розвиток технологій АВ, який може поліпшити сучасний стан виробництва метаматеріалів — це лазерна обробка з різною роздільною здатністю. Теоретично, у цій системі має бути два лазери: лазер макрорівня, який формує деталь і виготовляє більшу частину об'єму, і більш сфокусований лазер, який спікає дрібні елементи в структурі метаматеріалу. Як альтернатива: система використовує один лазер, здатний фокусуватися в різних масштабах на “льоту” по ходу процесу. Така система буде реалізована, швидше за все, в методі порошкового шару для металевих матеріалів. Основною перешкодою для цього процесу, вочевидь, буде обробка порошку та контроль за цим процесом, оскільки частинки порошку ма-

ють бути достатньо малими, щоб відтворити необхідні деталі в будь-якому сценарії. Пропонована система могла б виробляти металеві деталі з високою роздільною здатністю і сприяти експансії електромагнітних, оптичних і теплових АВ-метаматеріалів, що дасть спеціалістам більше свободи в процесі проєктування при збереженні структурної жорсткості.

Поліпшення мікроструктури та механічні властивості. Добре відомо, що мікроструктура металевих матеріалів, отриманих за допомогою методів АВ, є унікальною та дуже далекою від традиційно вироблених деталей з такого ж матеріалу і зазвичай проявляє анізотропію та неоднорідність (тобто пористість). Її характеристики залежать від параметрів процесу АВ і сильно впливають на механічну поведінку виготовленої деталі. Крім того, через мікроструктуру зазвичай розвиваються залишкові напруги від термічної обробки, які можуть деформувати деталі, особливо тонкі структури. Як виникають залишкові напруги і як вони впливають на остаточні механічні властивості добре вивчено спільнотою АВ (див. в літературі зв'язок *властивість — структура — процес*, англ. *process — structure — property*, PSP). Ці дослідження потребують подальшого розвитку, особливо в області виготовлення структур з високою роздільною здатністю і структур, особливо схильних до деформації. Розуміння механізмів виникнення залишкових напружень, анізотропії та неоднорідності мікроструктури може призвести до розробок мікроструктур, адаптованих для подальшого поліпшення властивостей метаматеріалу, наприклад використання/зміна тензора анізотропічної жорсткості по всій конструкції для досягнення ще більшого від'ємного коефіцієнта Пуассона, ніж було реалізовано при збереженні осової жорсткості. Така поведінка вже була певною мірою досліджена Saedi et al. [137] з пористими сплавами з пам'яттю форми. У зв'язку з цим багато досліджень механічного метаматеріалу спрямовано на вивчення його пружних, зсувних, об'ємних властивостей, але зовсім мало — циклічної

поведінки. Зниження довговічності через втомлюваність — важлива проблема для будь-якої деталі, тому ця область потребує подальшого вивчення, особливо для метаматеріалів, виготовлених методом АВ, в яких дефекти можуть служити центрами зародження тріщин.

“Розумні” (smart) матеріали та композити. Як вже обговорювалося, були запропоновані інтелектуальні композити, які об’єднують дроти SMA в матрицю SMP. SMP може фіксувати композит в деформованому стані та спрацьовувати в таких застосуваннях, як оригамі, зі збереженням до подальшої активації/деактивації. Слід зазначити, що для друку метаматеріалів оригамі зі smart-матеріалів АВ ще не використовувалося, але ймовірно, що це дозволить отримати набагато більшу гнучкість композиту, ніж це було можливо раніше. Крім композитів smart/4D, надалі потрібно вивчати й регульовані 4D-метаматеріали. Деякі автори почали усвідомлювати здатність налаштування 4D-метаматеріалів не на окремі частоти, а на певні частотні діапазони, але це було досягнуто тільки за допомогою SMP для налаштування забороненої зони. Можливо, є інші застосування, що виходять за рамки цього аналізу. Наприклад, метаматеріал auxetic на основі SMA може бути розроблений і надрукований так, щоб залежно від теплового впливу він мав різний об’єм. Тепловий вплив може визначатися умовами навколишнього середовища, а зміна об’єму може допомогти полегшити охолодження та підтримувати оптимальну температуру.

Багатофункціональні метаматеріали. Останній виявлений в цій роботі пробіл в літературі — багатоцільове використання метаматеріалів, тобто акусто-термічні або механо-термічні метаматеріали. Можна легко уявити застосування, де одночасно необхідне як акустичне, так і теплове поглинання/маскування (наприклад, реактивні двигуни або двигуни БПЛА), або застосування механічного метаматеріалу з бажаною властивістю, який має

забезпечувати необхідну теплопровідність або масовий потік через структуру (наприклад, біомедичне застосування). Зауважимо, що немає ніяких фізичних принципів, які б могли перешкоджати створенню таких метаматеріалів, а з огляду на те, що обчислювальні можливості постійно збільшуються, поява такого метаматеріалу вбачається реальною. Ймовірно, що чим більше вимог висувається до конструкції метаматеріалу, тим складнішою є його структура. Отже для виготовлення спроектованого метаматеріалу, ймовірно, буде потрібно АВ.

На закінчення слід зазначити, що у багатьох відношеннях розроблення метаматеріалів з використанням АВ обмежується лише технологією АВ, і не обов’язково — розумінням структури метаматеріалу. Адитивне виробництво — це складний процес, і потрібен час, щоб повністю зрозуміти й використовувати його можливості, але з його розвитком метаматеріали можуть стати складнішими, а межі їхніх властивостей — розширюватимуться.

ЛІТЕРАТУРА

1. D. L. Bourell, "Perspectives on Additive Manufacturing", *Annual Review of Materials Research* 46(1), 1–18 (2016), <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-031606>.
2. J.-P. Kruth, M. C. Leu, T. Nakagawa, "Progress in additive manufacturing and rapid prototyping", *CIRP Annals* 47(2), 525–540 (1998), [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63240-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5).
3. G. N. Levy, R. Schindel, J. Kruth, "Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (lm) technologies, state of the art and future perspectives", *CIRP Annals* 52(2), 589–609 (2003), [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60206-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60206-6).
4. C. Buchanan, L. Gardner, "Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges", *Engineering Structures* 180 (2018), 332–348 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045>.
5. S. H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, L. Hou, "Additive manufacturing and its societal impact: A literature review", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67(5–8), 1191–1203 (2013), <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>.
6. D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann, "Additive manufacturing of metals", *Acta Mater.* 117, 371–392 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>.
7. D. D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe, "Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms", *International Materials Reviews* 6608 (2017), <http://dx.doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014>.
8. T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J. O. Milewski, A. M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang, "Additive manufacturing of metallic components — Process, structure and properties", *Progress in Materials Science* 92, 112–224 (2018), <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>.

9. F. P. Melchels, M. A. Domingos, T. J. Klein, J. Malda, P. J. Bartolo, D.W. Huttmacher, "Additive manufacturing of tissues and organs", *Progress in Polymer Science* 37(8), 1079–1104 (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007>.
10. S.V. Murphy, A. Atala, "3D bioprinting of tissues and organs", *Nature Biotechnology* 32(8), 773–785 (2014), <http://dx.doi.org/10.1038/nbt.2958>.
11. D. Bourell, J. P. Kruth, M. Leu, G. Levy, D. Rosen, A. M. Beese, A. Clare, "Materials for additive manufacturing," *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66(2), 659–681 (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>.
12. W. Du, X. Ren, C. Ma, Z. Pei, "Ceramic binder jetting additive manufacturing : Particle coating for increasing powder sinterability and part strength", *Materials Letters* 234, 327–330 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.118>.
13. M. K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, F. Martina, "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints", *CIRP Annals — Manufacturing Technology* 65(2), 737–760 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>.
14. W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C. B. Williams, C. C. Wang, Y. C. Shin, S. Zhang, P. D. Zavattieri, "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering", *CAD Computer Aided Design* 69, 65–89 (2015), <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.
15. T. Tancogne-Dejean, A. B. Spierings, D. Mohr, "Additively-manufactured metallic microlattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading", *Acta Materialia* 116, 14–28 (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.05.054>.
16. L. Hirt, A. Reiser, R. Spolenak, T. Zambelli, "Additive Manufacturing of Metal Structures at the Micrometer Scale", *Advanced Materials* 29(17), 1604211 (2017), <https://doi.org/10.1002/adma.201604211>.
17. Q. Geng, D. Wang, P. Chen, S.-C. Chen, "Ultrafast multi-focus 3-D nano-fabrication based on two-photon polymerization", *Nature Communications* 10(1), 2179 (2019), <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10249-2>.

18. A. Roschli, K. T. Gaul, A. M. Boulger, B. K. Post, P. C. Chesser, L. J. Love, F. Blue, M. Borish, "Designing for Big Area Additive Manufacturing", *Additive Manufacturing* 25 (2018), 275–285 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.006>.
19. C. Greer, A. Nycz, M. Noakes, B. Richardson, B. Post, T. Kurfess, L. Love, "Introduction to the design rules for Metal Big Area Additive Manufacturing", *Additive Manufacturing* 27(2018), 159–166 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.016>.
20. S. Tibbits, "4D Printing: Multi-Material Shape Change", *Architectural Design* 84(1), 116–121 (2014), <https://doi.org/10.1002/ad.1710>.
21. D. Raviv, W. Zhao, C. McKnelly, A. Papadopoulou, A. Kadamby, B. Shi, S. Hirsch, D. Dikovsky, M. Zyracki, C. Olguin, R. Raskar, S. Tibbits, "Active Printed Materials for Complex Self-Evolving Deformations", *Scientific Reports* 4(1), 7422 (2015), <https://doi.org/10.1038/srep07422>.
22. F. Momeni, S. M. Mehdi Hassani, N. X. Liu, J. Ni, "A review of 4D printing", *Materials & Design* 122, 42–79 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.068>.
23. A. Mitchell, U. Lafont, M. Hołyńska, C. Semprimoschnig, "Additive manufacturing — A review of 4D printing and future applications". *Additive Manufacturing* 24(2017), 606–626 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.038>.
24. J. Gardan, "Smart materials in additive manufacturing: state of the art and trends". *Virtual and Physical Prototyping* 14(1), 1–18 (2019), <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1518016>.
25. J. Ma, B. Franco, G. Tapia, K. Karayagiz, L. Johnson, J. Liu, R. Arroyave, I. Karaman, A. Elwany, "Spatial Control of Functional Response in 4D-Printed Active Metallic Structures". *Scientific Reports* 7(1), 46707 (2017), <https://doi.org/10.1038/srep46707>.
26. S. Miao, N. Castro, M. Nowicki, L. Xia, H. Cui, X. Zhou, W. Zhu, S.-j. Lee, K. Sarkar, G. Vozzi, Y. Tabata, J. Fisher, L. G. Zhang, "4D printing of polymeric materials for tissue and organ regeneration", *Materials Today* 20(10), 577–591 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.06.005>.
27. C. M. Gonzalez-Hernandez, M. A. Sarabia-Vallejos, J. Rodriguez-Hernandez, "Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications", *Progress in Polymer Science* 94, 57–116 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.03.001>.
28. X. Kuang, D. J. Roach, J. Wu, C. M. Hamel, Z. Ding, T. Wang, M. L. Dunn, H. J. Qi, "Advances in 4D Printing: Materials and Applications",

- Advanced Functional Materials* 29(2), 1–23 (2019), <https://doi.org/10.1002/adfm.201805290>.
29. J. J. Schwartz, A. J. Boydston, "Multimaterial actinic spatial control 3D and 4D printing", *Nature Communications* 10(1), 791 (2019), <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08639-7>.
30. V. G. Veselago, E. E. Narimanov, "The left hand of brightness: Past, present and future of negative index materials", *Nature Materials* 5(10), 759–762 (2006), <https://doi.org/10.1038/nmat1746>.
31. N. Engheta, R. W. Ziolkowski, "Metamaterials: Physics and Engineering Explorations", (John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2006), <https://doi.org/10.1002/0471784192>.
32. Y. Liu, X. Zhang, "Metamaterials: a new frontier of science and technology", *Chemical Society Reviews* 40(5), 2494 (2011), <https://doi.org/10.1039/c0cs00184h>.
33. V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with negative epsilon and mu", *Soviet Physics USPEKHI* 10(4) (1968).
34. J. B. Pendry, "Negative Refraction Makes a Perfect Lens", *Physical Review Letters* 85(18), 3966–3969 (2000).
35. D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, S. Schultz, "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity", *Physical Review Letters* 84(18), 4184–4187 (2000), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4184>.
36. R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz, "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction", *Science* 292(5514), 77–79 (2001), <https://doi.org/10.1126/science.1058847>.
37. C. M. Soukoulis, M. Wegener, "Optical Metamaterials—More Bulky and Less Lossy", *Science* 330(6011), 1633–1634 (2010), <https://doi.org/10.1126/science.1198858>.
38. D. R. Smith, J. B. Pendry, M. C. Wiltshire, "Metamaterials and negative refractive index", *Science* 305(5685), 788–792 (2004), <https://doi.org/10.1126/science.1096796>.
39. J. B. Pendry, "Controlling Electromagnetic Fields", *Science* 312(5781), 1780–1782 (2006), <https://doi.org/10.1126/science.1125907>.
40. D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, D. R. Smith, "Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies", *Science* 314(5801), 977–980 (2006), <https://doi.org/10.1126/science.1133628>.

41. H. t. Chen, W. J. Padilla, J. M. O. Zide, A. C. Gossard, A. J. Taylor, R. D. Averitt, “Active terahertz metamaterial devices”, *Nature* 444(7119), 597–600 (2006), <https://doi.org/10.1038/nature05343>.
42. N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, W. J. Padilla, “Perfect Metamaterial Absorber”, *Physical Review Letters* 100(20), 207402 (2008), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.207402>.
43. J. Valentine, S. Zhang, T. Zentgraf, E. Ulin-Avila, D. A. Genov, G. Bartal, X. Zhang, “Threedimensional optical metamaterial with a negative refractive index”, *Nature* 455(7211), 376–379 (2008), <https://doi.org/10.1038/nature07247>.
44. A. A. Zhilin, M. P. Shepilov, “Metamaterials: A new direction in materials science”, *Glass Physics and Chemistry* 36(5), 521–553 (2010), <https://doi.org/10.1134/S1087659610050019>.
45. C. M. Soukoulis, M. Wegener, “Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials”, *Nature Photonics* 5(9), 523–530 (2011), <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.154>.
46. M. Wegener, “Metamaterials Beyond Optics”, *Science* 342(6161), 939–940 (2013), <https://doi.org/10.1126/science.1246545>.
47. M. Kadic, T. Bückmann, R. Schittny, M. Wegener, “Metamaterials beyond electromagnetism”, *Reports on Progress in Physics* 76(12), 126501 (2013), <https://doi.org/10.1088/0034-4885/76/12/126501>.
48. T. Koschny, C. M. Soukoulis, M. Wegener, “Metamaterials in microwaves, optics, mechanics, thermodynamics, and transport”, *Journal of Optics* 19(8), 084005 (2017), <https://doi.org/10.1088/2040-8986/aa7288>.
49. C. Z. Fan, Y. Gao, J. P. Huang, “Shaped graded materials with an apparent negative thermal conductivity”, *Applied Physics Letters* 92(25), 251907 (2008), <https://doi.org/10.1063/1.2951600>.
50. S. Guenneau, C. Amra, D. Veynante, “Transformation thermodynamics: cloaking and concentrating heat flux”, *Optics Express* 20(7), 8207 (2012), <https://doi.org/10.1364/OE.20.008207>.
51. S. R. Sklan, B. Li, “Thermal metamaterials: functions and prospects”, *National Science Review* 5(2), 138–141 (2018), <https://doi.org/10.1093/nsr/nwy005>.
52. C. Park, R. T. Haftka, N. H. Kim, “Remarks on multi-fidelity surrogates”, *Structural and Multidisciplinary Optimization* 55(3), 1029–1050 (2017), <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1550-y>.

53. E. M. Dede, F. Zhou, P. Schmalenberg, T. Nomura, “Thermal Metamaterials for Heat Flow Control in Electronics”, *Journal of Electronic Packaging* 140(1), 010904 (2018), <https://doi.org/10.1115/1.4039020>.
54. J. Christensen, M. Kadic, O. Kraft, M. Wegener, “Vibrant times for mechanical metamaterials”, *MRS Communications* 5(3), 453–462 (2015), <http://dx.doi.org/10.1557/mrc.2015.51>.
55. Z. Liu, “Locally Resonant Sonic Materials”, *Science* 289(5485), 1734–1736 (2000), <https://doi.org/10.1126/science.289.5485.1734>.
56. S. Chen, Y. Fan, Q. Fu, H. Wu, Y. Jin, J. Zheng, F. Zhang, “A Review of Tunable Acoustic Metamaterials”, *Applied Sciences* 8(9), 1480 (2018), <https://doi.org/10.3390/app8091480>.
57. Z. J. Wong, Y. Wang, K. O’Brien, J. Rho, X. Yin, S. Zhang, N. Fang, T.-J. Yen, X. Zhang, “Optical and acoustic metamaterials: superlens, negative refractive index and invisibility cloak”, *Journal of Optics* 19(8), 084007 (2017), <https://doi.org/10.1088/2040-8986/aa7a1f>.
58. Y. I. Bobrovnikskii, T. M. Tomilina, “Sound Absorption and Metamaterials: A Review”, *Acoustical Physics* 64(5), 519–526 (2018), <https://doi.org/10.1134/S1063771018040024>.
59. S. A. Cummer, J. Christensen, A. Alù, “Controlling sound with acoustic metamaterials”, *Nature Reviews Materials* 1(3), 16001 (2016), <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.1>.
60. M. R. Haberman, M. D. Guild, “Acoustic metamaterials”, *Physics Today* 69(6), 42–48 (2016), <https://doi.org/10.1063/PT.3.3198>.
61. G. Ma, P. Sheng, “Acoustic metamaterials: From local resonances to broad horizons”, *Science Advances* 2(2), e1501595 (2016), <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501595>.
62. R. Gatt, L. Mizzi, J. I. Azzopardi, K. M. Azzopardi, D. Attard, A. Casha, J. Briffa, J. N. Grima, “Hierarchical Auxetic Mechanical Metamaterials”, *Scientific Reports* 5(1), 8395 (2015), <https://doi.org/10.1038/srep08395>.
63. K. K. Saxena, R. Das, E. P. Calius, “Three Decades of Auxetics Research – Materials with Negative Poisson’s Ratio: A Review”, *Advanced Engineering Materials* 18(11), 1847–1870 (2016), <https://doi.org/10.1002/adem.201600053>.
64. H. M. Kolken, A. A. Zadpoor, “Auxetic mechanical metamaterials”, *RSC Advances* 7(9), 5111–5129 (2017), <https://doi.org/10.1039/c6ra27333e>.

65. X. Ren, R. Das, P. Tran, T. D. Ngo, Y. M. Xie, “Auxetic metamaterials and structures: a review”, *Smart Materials and Structures* 27(2), 023001 (2018), <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa61c>.
66. M. Kadic, T. Bückmann, N. Stenger, M. Thiel, M. Wegener, “On the practicability of pentamode mechanical metamaterials”, *Applied Physics Letters* 100(19), 191901 (2012), <https://doi.org/10.1063/1.4709436>.
67. T. Bückmann, M. Thiel, M. Kadic, R. Schittny, M. Wegener, “An elasto-mechanical unfeelability cloak made of pentamode metamaterials”, *Nature Communications* 5(1), 4130 (2014), <https://doi.org/10.1038/ncomms5130>.
68. R. S. Lakes, T. Lee, A. Bersie, Y. C. Wang, “Extreme damping in composite materials with negative-stiffness inclusions”, *Nature* 410(6828), 565–567 (2001), <https://doi.org/10.1038/35069035>.
69. Z. G. Nicolaou and A. E. Motter, “Mechanical metamaterials with negative compressibility transitions”, *Nature Materials* 11(7), 608–613 (2012), <https://doi.org/10.1038/nmat3331>.
70. Q. Wang, J. A. Jackson, Q. Ge, J. B. Hopkins, C. M. Spadaccini, N. X. Fang, “Lightweight Mechanical Metamaterials with Tunable Negative Thermal Expansion”, *Physical Review Letters* 117(17), 175901 (2016), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.175901>.
71. L. Ai, X. L. Gao, “Metamaterials with negative Poisson’s ratio and non-positive thermal expansion”, *Composite Structures* 162, 70–84 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.11.056>.
72. A. Alderson, K. L. Alderson, “Auxetic materials”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 221(4), 565–575 (2007), <https://doi.org/10.1243/09544100JAERO185>.
73. Y. Liu, H. Hu, “A review on auxetic structures and polymeric materials”, *Scientific Research and Essays* 5(10), 1052–1063 (2015).
74. A. A. Zadpoor, “Mechanical meta-materials”, *Materials Horizons* 3(5), 371–381 (2016), <https://doi.org/10.1039/C6MH00065G>.
75. X. Yu, J. Zhou, H. Liang, Z. Jiang, L. Wu, “Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review”, *Progress in Materials Science* 94, 114–173 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.12.003>.
76. E. Barchiesi, M. Spagnuolo, L. Placidi, “Mechanical metamaterials: a state of the art”, *Mathematics and Mechanics of Solids* 24(1), 212–234 (2019), <https://doi.org/10.1177/1081286517735695>.

77. D. Lin, Q. Nian, B. Deng, S. Jin, Y. Hu, W. Wang, G. J. Cheng, “Three-Dimensional Printing of Complex Structures: Man Made or toward Nature?”, *ACS Nano* 8(10), 9710–9715 (oct 2014), <https://doi.org/10.1021/nn504894j>.
78. M. Mao, J. He, X. Li, B. Zhang, Q. Lei, Y. Liu, D. Li, “The Emerging Frontiers and Applications of High-Resolution 3D Printing”, *Micromachines* 8(4), 113 (2017), <https://doi.org/10.3390/mi8040113>.
79. S. Walia, C. M. Shah, P. Gutruf, H. Nili, D. R. Chowdhury, W. Withayachumnankul, M. Bhaskaran, S. Sriram, “Flexible metasurfaces and metamaterials: A review of materials and fabrication processes at micro- and nano-scales”, *Applied Physics Reviews* 2(1), 011303 (2015), <https://doi.org/10.1063/1.4913751>.
80. G. Yoon, I. Kim, J. Rho, “Challenges in fabrication towards realization of practical metamaterials”, *Microelectronic Engineering* 163, 7–20 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.mee.2016.05.005>.
81. J. Bishop-Moser, C. Spadaccini, C. Andres, “Metamaterials Manufacturing: Pathway to Industrial Competitiveness”, 2018.
82. X. Zheng, H. Lee, T. H. Weisgraber, M. Shusteff, J. DeOtte, E. B. Duoss, J. D. Kuntz, M. M. Biener, Q. Ge, J. A. Jackson, S. O. Kucheyev, N. X. Fang, C. M. Spadaccini, “Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials”, *Science* 344(6190), 1373–1377 (2014), <https://doi.org/10.1126/science.1252291>.
83. M. Deubel, G. von Freymann, M. Wegener, S. Pereira, K. Busch, C. M. Soukoulis, “Direct laser writing of three-dimensional photonic-crystal templates for telecommunications”, *Nature Materials* 3(7), 444–447 (2004), <https://doi.org/10.1038/nmat1155>.
84. A. Boltasseva, V. M. Shalae, “Fabrication of optical negative-index metamaterials: Recent advances and outlook”, *Metamaterials* 2(1), 1–17 (2008), <https://doi.org/10.1016/j.metmat.2008.03.004>.
85. B. Du, J. Zhou, L. F. Hao, “Fabrication and properties of metamaterials based on multilayer ceramic structure”, *Journal of Electroceramics* 21(1–4), 165–169 (2008), <https://doi.org/10.1007/s10832-007-9113-7>.
86. J. Wang, S. Liu, S. Guruswamy, A. Nahata, “Injection Molding of Free-Standing, Three-Dimensional, All-Metal Terahertz Metamaterials”, *Advanced Optical Materials* 2(7), 663–669 (2014), <https://doi.org/10.1002/adom.201400094>.

87. L. Gao, K. Shigeta, A. Vazquez-Guardado, C. J. Proglar, G. R. Bogart, J. A. Rogers, D. Chanda, "Nanoimprinting Techniques for Large-Area Three-Dimensional Negative Index Metamaterials with Operation in the Visible and Telecom Bands," *ACS Nano* 8(6), 5535–5542 (2014), <https://doi.org/10.1021/nn5015775>.

88. T. Paik, H. Yun, B. Fleury, S. h. Hong, P. S. Jo, Y. Wu, S. J. Oh, M. Cargnello, H. Yang, C. B. Murray, C. R. Kagan, "Hierarchical Materials Design by Pattern Transfer Printing of Self-Assembled Binary Nanocrystal Superlattices", *Nano Letters* 17(3), 1387–1394 (2017), <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b04279>.

89. S. Vignolini, N. A. Yufa, P. S. Cunha, S. Guldin, I. Rushkin, M. Stefik, K. Hur, U. Wiesner, J. J. Baumberg, U. Steiner, "A 3D Optical Metamaterial Made by Self-Assembly", *Advanced Materials* 24(10), OP23–OP27 (2012), <https://doi.org/10.1002/adma.201103610>.

90. J. Y. Kim, H. Kim, B. H. Kim, T. Chang, J. Lim, H. M. Jin, J. H. Mun, Y. J. Choi, K. Chung, J. Shin, S. Fan, S. O. Kim, "Highly tunable refractive index visible-light metasurface from block copolymer self-assembly", *Nature Communications* 7(1), 12911 (2016), <https://doi.org/10.1038/ncomms12911>.

91. W. Carter, D. Erno, D. Abbott, C. Bruck, G. Wilson, J. Wolfe, D. Finkhousen, A. Tepper, R. Stevens, "The GE aircraft engine bracket challenge: an experiment in crowdsourcing for mechanical design concepts", *Proceedings of the 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2014, pp. 1402–1411.

92. L. E. Murr, S. M. Gaytan, D. A. Ramirez, E. Martinez, J. Hernandez, K. N. Amato, P. W. Shindo, F. R. Medina, R. B. Wicker, "Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies", *J. Mater. Sci. Technol.* 28(1), 1–14 (2012), [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60016-4](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60016-4).

93. R. Raman, B. Bhaduri, M. Mir, A. Shkumatov, M. K. Lee, G. Popescu, H. Kong, R. Bashir, "High-Resolution Projection Microstereolithography for Patterning of Neovasculature", *Advanced Healthcare Materials* 5(5), 610–619 (2016), <https://doi.org/10.1002/adhm.201500721>.

94. Z. Jiang, W. Chen, B. J. German, "Multidisciplinary Statistical Sensitivity Analysis Considering Both Aleatory and Epistemic Uncertainties", *AIAA Journal* 54(4), 1326–1338 (2016), <https://doi.org/10.2514/1.j054464>.

95. H. Cui, R. Hensleigh, H. Chen, X. Zheng, "Additive Manufacturing and sizedependent mechanical properties of three-dimensional microarchitected, high-temperature ceramic metamaterials", *Journal of Materials Research* 33(3), 360–371 (2018), <https://doi.org/10.1557/jmr.2018.11>.

96. X. Zheng, W. Smith, J. Jackson, B. Moran, H. Cui, D. Chen, J. Ye, N. Fang, N. Rodriguez, T. Weisgraber, C. M. Spadaccini, "Multiscale metallic metamaterials", *Nature Materials* 15(10), 1100–1106 (2016), <https://doi.org/10.1038/nmat4694>.

97. J. U. Surjadi, L. Gao, H. Du, X. Li, X. Xiong, N. X. Fang, Y. Lu, "Mechanical Metamaterials and Their Engineering Applications", *Advanced Engineering Materials* 21(3), 1800864 (2019), <https://doi.org/10.1002/adem.201800864>.

98. S. Hengsbach, A. D. Lantada, "Direct laser writing of auxetic structures: present capabilities and challenges", *Smart Materials and Structures* 23(8), 085033 (2014), <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/8/085033>.

99. J. A. Lewis, "Direct-write assembly of ceramics from colloidal inks", *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 6(3), 245–250 (2002), [https://doi.org/10.1016/S1359-0286\(02\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S1359-0286(02)00031-1).

100. J. E. Smay, J. Cesarano, J. A. Lewis, "Colloidal Inks for Directed Assembly of 3-D Periodic Structures", *Langmuir* 18(14), 5429–5437 (2002), <https://doi.org/10.1021/la0257135>.

101. C. M. Spadaccini, "Mechanical Metamaterials : Design , Fabrication, and Performance", *Proceedings of the Frontiers of Engineering: Reports on Leading-Edge Engineering from the 2015 Symposium* (National Academies Press), 2016.

102. L. Besra , M. Liu, "A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD)", *Progress in Materials Science* 52(1), 1–61 (2007), <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.07.001>.

103. A. Reiser, M. Lindén, P. Rohner, A. Marchand, H. Galinski, A. S. Sologubenko, J. M. Wheeler, R. Zenobi, D. Poulikakos, R. Spolenak, "Multi-metal electrohydrodynamic redox 3D printing at the submicron scale", *Nature Communications* 10(1), 1853 (2019), <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09827-1>.

104. M. Mohsenizadeh, F. Gasbarri, M. Munther, A. Beheshti, K. Davami, "Additively-manufactured lightweight Metamaterials for energy absorption", *Materials and Design* 139, 521–530 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.037>.

105. A. Sadeqi, H. Rezaei Nejad, R. E. Owyung, S. Sonkusale, "Three dimensional printing of metamaterial embedded geometrical optics (MEGO)", *Microsystems & Nanoengineering* 5(1), 16 (2019), <https://doi.org/10.1038/s41378-019-0053-6>.
106. L. Kashdan, C. Conner Seepersad, M. Haberman, P. S. Wilson, "Design, fabrication, and evaluation of negative stiffness elements using SLS", *Rapid Prototyping Journal* 18(3), 194–200 (2012), <https://doi.org/10.1108/13552541211218108>.
107. Y. Sha, L. Jiani, C. Haoyu, R. O. Ritchie, X. Jun, "Design and strengthening mechanisms in hierarchical architected materials processed using additive manufacturing", *International Journal of Mechanical Sciences* 149(August), 150–163 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.09.038>.
108. S. Yuan, C. K. Chua, K. Zhou, "3D-Printed Mechanical Metamaterials with High Energy Absorption", *Advanced Materials Technologies* 4(3), 1800419 (2019), <https://doi.org/10.1002/admt.201800419>.
109. M. J. Mirzaali, H. Pahlavani, A. A. Zadpoor, "Auxeticity and stiffness of random networks: Lessons for the rational design of 3D printed mechanical metamaterials", *Applied Physics Letters* 115(2), 021901 (2019), <https://doi.org/10.1063/1.5096590>.
110. A. D. Dressler, E.W. Jost, J. C. Miers, D. G. Moore, C. C. Seepersad, B. L. Boyce, "Heterogeneities dominate mechanical performance of additively manufactured metal lattice struts", *Additive Manufacturing* 28(June), 692–703 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.06.011>.
111. M. Wormser, F. Wein, M. Stingl, C. K. orner, "Design and AdditiveManufacturing of 3D Phononic Band Gap Structures Based on Gradient Based Optimization", *Materials* 10(10), 1125 (2017), <https://doi.org/10.3390/ma10101125>.
112. M. Bodaghi, W. H. Liao, "4D printed tunable mechanical metamaterials with shape memory operations", *Smart Materials and Structures* 28(4), 045019 (2019), <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab0b6b>.
113. D. Isakov, Q. Lei, F. Castles, C. Stevens, C. Grovenor, P. Grant, "3D printed anisotropic dielectric composite with meta-material features", *Materials & Design* 93, 423–430 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.176>.

114. Y. Tang, Y. Zhou, T. Hoff, M. Garon, Y. F. Zhao, "Elastic modulus of 316 stainless steel lattice structure fabricated via binder jetting process", *Materials Science and Technology* 32(7), 648–656 (2016), <http://dx.doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000084>.
115. D. Jahn, R. Eckstein, L. M. Schneider, N. Born, G. Hernandez-Sosa, J. C. Balzer, I. Al-Naib, U. Lemmer, M. Koch, "Digital Aerosol Jet Printing for the Fabrication of Terahertz Metamaterials", *Advanced Materials Technologies* 3(2), 1–7 (2018), <https://doi.org/10.1002/admt.201700236>.
116. J. Akedo, "Aerosol Deposition of Ceramic Thick Films at Room Temperature: Densification Mechanism of Ceramic Layers", *Journal of the American Ceramic Society* 89(6), 1834–1839 (2006), <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01030.x>.
117. H. Assadi, H. Kreye, F. Gartner, T. Klassen, "Cold spraying — A materials perspective", *Acta Materialia* 116, 382–407 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.034>.
118. C. Yang, M. Boorugu, A. Dopp, J. Ren, R. Martin, D. Han, W. Choi, H. Lee, "4D printing reconfigurable, deployable and mechanically tunable metamaterials", *Materials Horizons* 6(6), 1244–1250 (2019), <https://doi.org/10.1039/C9MH00302A>.
119. P. Li, D. H. Warner, A. Fatemi, N. Phan, "Critical assessment of the fatigue performance of additively manufactured Ti—6Al—4V and perspective for future research", *International Journal of Fatigue*, 85, 130–143 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.12.003>.
120. M. Bodaghi, A. R. Damanpack, W. H. Liao, "Self-expanding/shrinking structures by 4D printing", *Smart Materials and Structures* 25(10), 105034 (2016), <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/10/105034>.
121. W. Abuzaid, M. Alkhader, M. Omari, "Experimental analysis of heterogeneous shape recovery in 4d printed honeycomb structures", *Polymer Testing* 68(February), 100–109 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.03.050>.
122. M. Bodaghi, A. Damanpack, W. Liao, "Adaptive metamaterials by functionally graded 4D printing", *Materials & Design* 135, 26–36 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.08.069>.
123. X. Wu, Y. Su, J. Shi, "Perspective of additive manufacturing for metamaterials development", *Smart Materials and Structures* 28(9), 093001 (2019), <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab2eb6>.

124. C. R. Garcia, “3D printed spatially variant anisotropic metamaterials”, PhD thesis (The University of Texas at El Paso, 2014).
125. L. Wu, B. Li, J. Zhou, “Isotropic Negative Thermal Expansion Metamaterials”, *ACS Applied Materials & Interfaces* 8(27), 17721–17727 (2016), <https://doi.org/10.1021/acsami.6b05717>.
126. L. Sanchis, V. M. García-Chocano, R. Llopis-Pontiveros, A. Climente, J. Martínez-Pastor, F. Cervera, J. Sánchez-Dehesa, “Three-Dimensional Axisymmetric Cloak Based on the Cancellation of Acoustic Scattering from a Sphere”, *Physical Review Letters* 110(12), 124301 (2013), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.124301>.
127. I. M. H. Raza, “Additive Manufacturing of Locally Resonant Metamaterials”, PhD thesis (Imperial College London, 2017).
128. K. H. Matlack, A. Bauhofer, S. K. Odel, A. Palermo, C. Daraio, “Composite 3Dprinted metastructures for low-frequency and broadband vibration absorption”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113(30), 8386–8390 (2016), <https://doi.org/10.1073/pnas.1600171113>.
129. A. Amendola, C. Smith, R. Goodall, F. Auricchio, L. Feo, G. Benzoni, F. Fraternali, “Experimental response of additively manufactured metallic pentamode materials confined between stiffening plates”, *Composite Structures* 142, 254–262 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.091>.
130. R. Hedayati, A. M. Leeflang, A. A. Zadpoor, “Additively manufactured metallic pentamode meta-materials”, *Applied Physics Letters* 110(9), 091905 (2017), <https://doi.org/10.1063/1.4977561>.
131. R. Schittny, T. Bückmann, M. Kadic, M. Wegener, “Elastic measurements on macroscopic threedimensional pentamode metamaterials”, *Applied Physics Letters* 103(23), 231905 (2013), <https://doi.org/10.1063/1.4838663>.
132. D. Chen, X. Zheng, “Multi-material Additive Manufacturing of Metamaterials with Giant, Tailorable Negative Poisson’s Ratios”, *Scientific Reports* 8(1), 9139 (2018), <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26980-7>.
133. L. R. Meza, A. J. Zelhofer, N. Clarke, A. J. Mateos, D. M. Kochmann, J. R. Greer, “Resilient 3D hierarchical architected metamaterials”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112(37), 11502–11507 (2015), <https://doi.org/10.1073/pnas.1509120112>.
134. J. Bauer, L. R. Meza, T. A. Schaedler, R. Schwaiger, X. Zheng, L. Valdevit, “Nanolattices: An Emerging Class of Mechanical Metamaterials”,

- Advanced Materials* 29(40), 1701850 (2017), <https://doi.org/10.1002/adma.201701850>.
135. Q. Zhang, K. Zhang, G. Hu, “Smart three-dimensional lightweight structure triggered from a thin composite sheet via 3D printing technique”, *Scientific Reports* 6(1), 22431 (2016), <https://doi.org/10.1038/srep22431>.
136. M. Taheri Andani, S. Saedi, A. S. Turabi, M. Karamooz, C. Haberland, H. E. Karaca, M. Elahinia, “Mechanical and shape memory properties of porous Ni 50.1 Ti 49.9 alloys manufactured by selective laser melting”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 68(January), 224–231 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.01.047>.
137. S. Saedi, S. E. Saghaian, A. Jahadakbar, N. S. Moghaddam, M. T. Andani, S. M. Saghaian, Y. C. Lu, M. Elahinia, H. E. Karaca, “Shape memory response of porous NiTi shape memory alloys fabricated by selective laser melting”, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* (2018), <https://doi.org/10.1007/s10856-018-6044-6>.
138. L. Yin, J. Doyhamboure-Fouquet, X. Tian, D. Li, “Design and characterization of radar absorbing structure based on gradient-refractive-index metamaterials”, *Composites Part B: Engineering* 132, 178–187 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.003>.
139. J. Liu, B. Jalalahmadi, Y. B. Guo, M. P. Sealy, N. Bolander, “A review of computational modeling in powder-based additive manufacturing for metallic part qualification”, *Rapid Prototyping Journal* 24(8), 1245–1264 (2018), <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2017-0058>.
140. D. Han, C. Yang, N. X. Fang, H. Lee, “Rapid multi-material 3D printing with projection micro-stereolithography using dynamic fluidic control”, *Additive Manufacturing* 27(April), 606–615 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.031>.
141. E. A. Peraza-Hernandez, D. J. Hartl, R. J. Malak Jr, D. C. Lagoudas, “Origami-inspired active structures: a synthesis and review”, *Smart Materials and Structures* 23(9), 094001 (2014), <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/9/094001>.
142. R. Saunders, D. Hartl, R. Malak, D. Lagoudas, “Design and Analysis of a Self-Folding SMA-SMP Composite Laminate”, *Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Volume 5B: 38th Mechanisms and Robotics Conference. Buffalo, New York, USA, 2014. V05BT08A048. ASME. <https://doi.org/10.1115/DETC2014-35151>

143. B. Wang, T. Chen, A. Xu, “Gaussian process regression with functional covariates and multivariate response”, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 163, 1–6 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2017.02.001>.

144. O. K. Johnson, C. Kurniawan, “An efficient algorithm for generating diverse microstructure sets and delineating properties closures,” *Acta Materialia* 147, 313–321 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.01.004>.

145. K. Wang, Y. Zhao, Y. h. Chang, Z. Qian, C. Zhang, B. Wang, M. A. Vannan, M. j. Wang, “Controlling the mechanical behavior of dual-material 3D printed meta-materials for patientspecific tissue-mimicking phantoms”, *Materials & Design* 90, 704–712 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.022>.

146. K. Wang, C. Wu, Z. Qian, C. Zhang, B. Wang, M. A. Vannan, “Dual-material 3D printed metamaterials with tunable mechanical properties for patient-specific tissue-mimicking phantoms”, *Additive Manufacturing* 12, 31–37 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.06.006>.

147. J. Chen, K. Wang, C. Zhang, B. Wang, “An efficient statistical approach to design 3D-printed metamaterials for mimicking mechanical properties of soft biological tissues”, *Additive Manufacturing* 24, 341–352, (2018), <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.007>.

148. H. M. A. Kolken, S. Janbaz, S. M. A. Leeftang, K. Lietaert, H. H. Weinans, A. A. Zadpoor, “Rationally designed meta-implants: a combination of auxetic and conventional meta-biomaterials,” *Materials Horizons* 5(1), 28–35 (2018), <https://doi.org/10.1039/C7MH00699C>

Наукове видання

А. І. Кузьмичев, О.В.Богдан.

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ МЕТАМАТЕРІАЛІВ

Редактор, коректор *О. А. Тихонова*

Технічний редактор *Є. І. Корецька*

Формат 60×90/16. Ум.-друк. арк. 4,0. Тираж 300 пр. Зам № 159.

ПП «Політехперіодика»,
а/с 17, м. Одеса, 65044

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3232 від 09.07.2008.

Оригінал-макет, друк: видавництво «Політехперіодика»