

АДИТИВНЕ ВИГОТОВЛЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ТОНКОСТІННІЙ ОСНОВІ: ВИКЛИКИ ТА ТРУДНОЩІ (Огляд)

М.В. Соколовський¹, А.В. Бернацький¹, Н.О. Шамсутдінова¹, Ю.В. Юрченко¹, О.О. Данилейко^{1,2}

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський просп. (Перемоги), 37.

У даній роботі було проведено літературний огляд матеріалів, присвячених різним напрямкам дослідження технологій селективного лазерного плавлення (SLM) та селективного лазерного спікання (SLS) з метою аналізу процесів, споріднених до селективного лазерного наплавлення, котрі відбуваються при SLM та SLS, а також впливу технологічних заходів на кінцеву структуру, механічні та експлуатаційні характеристики виготовленої деталі при адитивному виробництві конструктивних елементів на тонкостінній основі. Основними завданнями наукових робіт, проаналізованих у даному огляді, були дослідження, що фокусувались на особливостях утворення конструктивних елементів на тонкостінній основі за технологіями SLM та SLS: моделювання процесів адитивного виробництва; аспекти планування експериментів та виробничих процесів; вивчення перебігу процесів SLM та SLS в даних умовах; потреби в попередній або постобробці матеріалу; а також аналіз кінцевої мікроструктури та характеристик зразків, виготовлених за допомогою цих технологій. На підставі результатів літературного аналізу визначено проблеми та розглянуто перспективи застосування процесів SLM та SLS при утворенні конструктивних елементів на тонкостінній основі. Аргументовано ряд аспектів, на які необхідно звернути увагу при дослідженні процесів SLM та SLS під час роботи з тонкостінною основою. Бібліогр. 36, рис. 9.

Ключові слова: селективне лазерне плавлення (SLM), адитивне виробництво, селективне лазерне спікання (SLS), тонкостінні вироби

Вступ. Тонкостінні деталі – категорія деталей, де величина товщини є набагато меншою за інші розміри (та не перевищує 3...5 мм). Тонкостінні деталі можуть включати різні типи виробів, головною характеристикою яких є відсутність жорсткості та високий кінцевий коефіцієнт тонкості, який визначається як їх висота, поділена на їх товщину. Що стосується різновидностей виробів за їх характеристиками, деталі можна класифікувати на дві групи: монолітні блоки та панелі обшивки. Такі деталі широко використовуються в авіапромисловості (рис. 1), у двигунобудуванні, а також в інших сферах промисловості [1, 2].

Ці та інші деталі часто потребують виготовлення конструктивних елементів, які можна отримати за допомогою багатьох технологій, включаючи лазерне наплавлення [1, 3].

Лазерне наплавлення (laser cladding) – методика виробництва конструктивних елементів за допомогою створення на поверхні виробу шарів матеріалу в результаті проплавлення порошку даного матеріалу лазерним променем [4, 5]. Даний процес дозволяє наплавляти шари завтовшки в 100...500 мкм за допомогою лазерного променя діаметром у 2...4 мм (потужністю до 5 кВт) [6, 7] та подачею металевого порошку або дроту різними методами (рис. 2) [5].

Соколовський М.В. – <https://orcid.org/0000-0003-3243-5060>, Бернацький А.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8050-5580>, Шамсутдінова Н.О. – <https://orcid.org/0000-0002-3525-0080>, Юрченко Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9253-009X>, Данилейко О.О. <https://orcid.org/0000-0002-8501-0421>

© М.В. Соколовський, А.В. Бернацький, Н.О. Шамсутдінова, Ю.В. Юрченко, О.О. Данилейко, 2023

Однак в останні десятиліття з причин, пов'язаних з характеристиками матеріалів, отриманими за даними методами, для виготовлення конструктивних елементів на тонкостінних деталях все частіше використовують такі технології адитивного виробництва, як селективне лазерне спікання та селективне лазерне плавлення [8–10].

Селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering, SLS) – технологія адитивного виробництва, що використовується для виготовлення складних за формою і структурою виробів з порошкових матеріалів та небов'язкових полімерних додатків (рис. 3). Цей процес полягає в послідовному пошаровому спіканні (або частковому плавленні) порошкового матеріалу в наперед закладеному порошковому матеріалі за допомогою лазерного випромінювання або електронного променя [11]. Дана технологія дозволяє наносити шари металевого, пластикового або керамічного матеріалу завтовшки 20...150 мкм лазерним або електронним променем діаметром до 300 мкм [12, 13].

Перевагами використання технології SLS є:

- широкий спектр можливих матеріалів;
- достатня точність готової деталі;
- можливість створення деталей з більш складною геометрією.

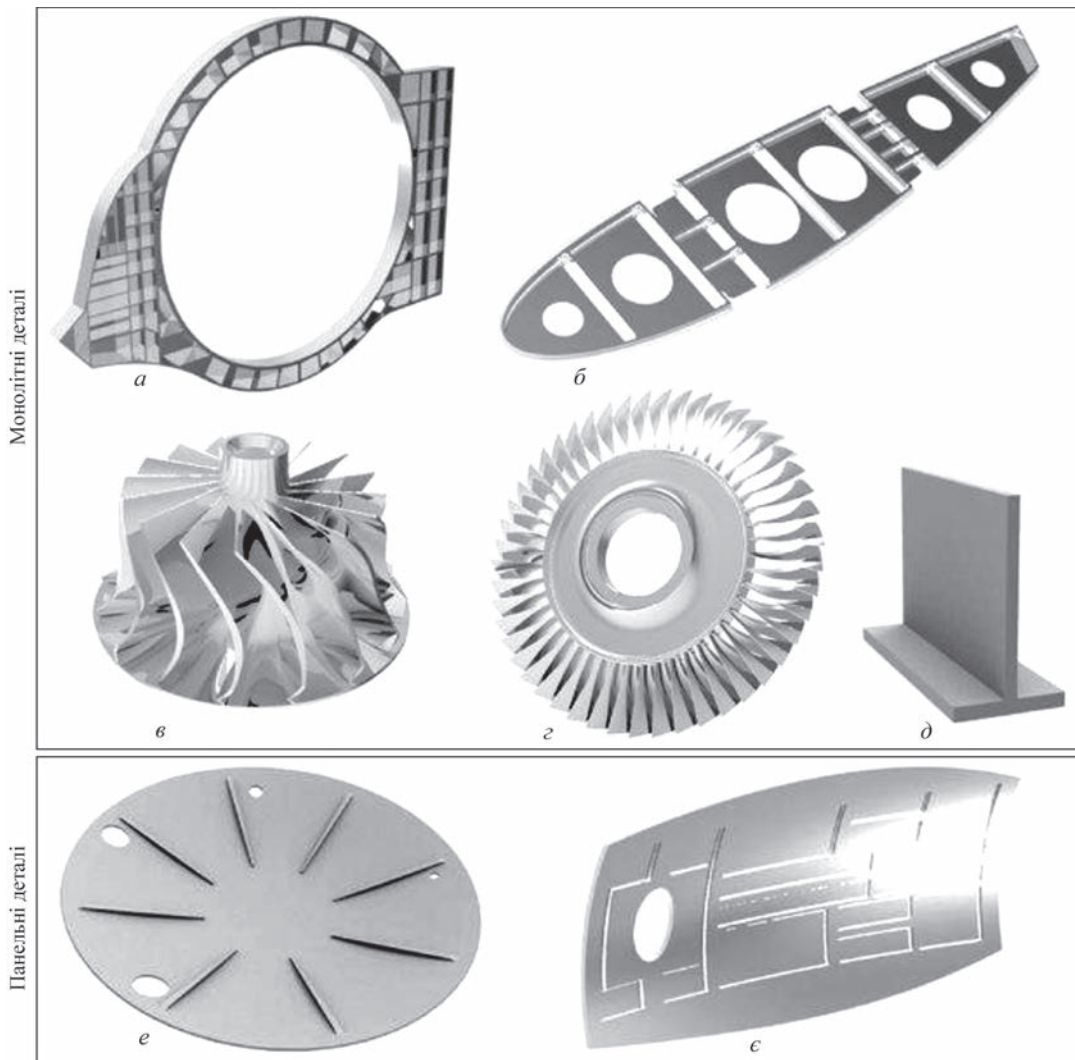


Рис. 1. Приклади тонкостінних деталей в авіапромисловості: *а* – каркас; *б* – ребро; *в, г* – складові турбін реактивних двигунів; *д* – шпангоути; *е* – перегородки; *е* – вузли обшивки фюзеляжу [1]

Недоліками технології SLS є висока пористість поверхонь виготовленої деталі та нерівномірне значення внутрішньої щільності матеріалу деталі [5, 11, 13].

Селективне лазерне плавлення (Selective Laser Melting, SLM) – одна з сучасних технологій адитивного виробництва, що використовується для виготовлення складних за формою і структурою виробів з порошкових матеріалів. Цей процес полягає в послідовному пошаровому розплавленні попередньо нанесеного порошкового матеріалу в спеціальній захисній камері за допомогою потужного лазерного випромінювання (рис. 4) [13, 14]. Дана технологія дозволяє наплавляти шари завтовшки 20...200 мкм лазерним променем потужністю від 100 Вт до 2...3 кВт.

Переваги використання технології SLM є підґрунтям для серйозних перспектив – підвищення ефективності виробництва в багатьох галузях промисловості, оскільки:

- процес забезпечує високу точність (до 0,4 мм) і повторюваність;

- механічні характеристики виробів, надрукованих на цьому типі 3D-принтера, можна порівняти з литтям [15];

- вирішує складні технологічні завдання, пов'язані з виготовленням геометрично складних виробів;

- дозволяє зменшити масу за рахунок побудови об'єктів з внутрішніми порожнинами;

- економить матеріал при виробництві.

Незважаючи на численні переваги, основним недоліком селективного лазерного плавлення (SLM) порівняно з методами виробництва деталей на основі осадження є порівняно низька продуктивність та неможливість виготовлення велико-розмірних деталей [5, 13, 14].

Головна різниця між процесами SLS та SLM полягає у тому, що SLS спікає порошковий матеріал при температурі, приблизно рівній 85 % від $T_{пл}$ матеріалу, що наноситься; в той час як SLM з'єднує порошковий матеріал шляхом класичного лазерного плавлення.

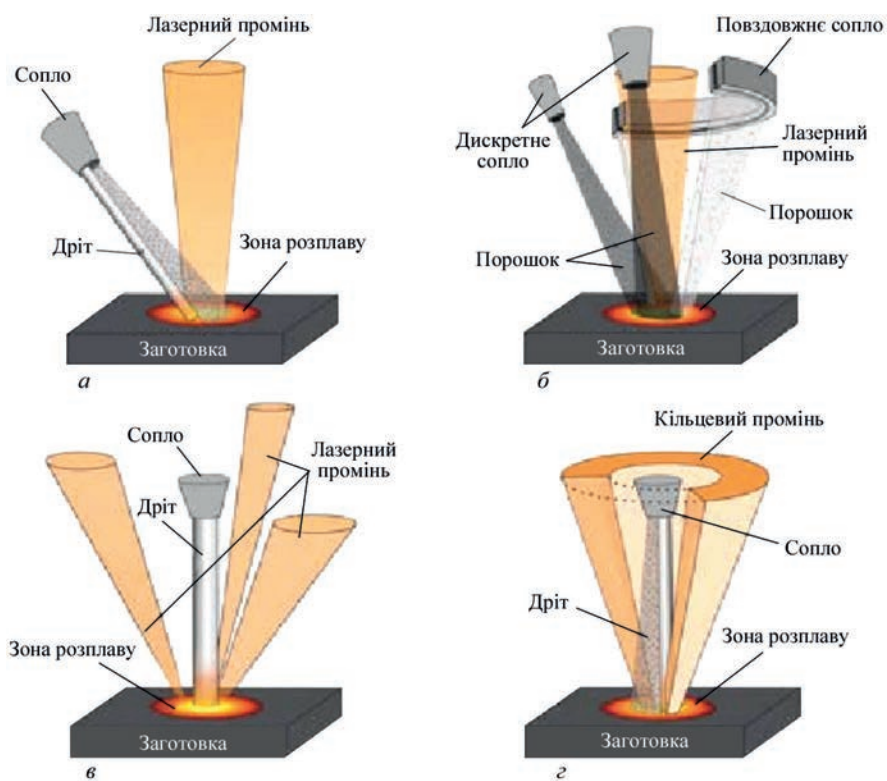


Рис. 2. Схеми подачі матеріалу для лазерного наплавлення: *а* – бічна; *б* – коаксіальна з подачею з двох кутів; *в* – осьова, з лазерними променями, що йдуть зі сторін; *г* – осьова з кільцевим лазерним променем [5]

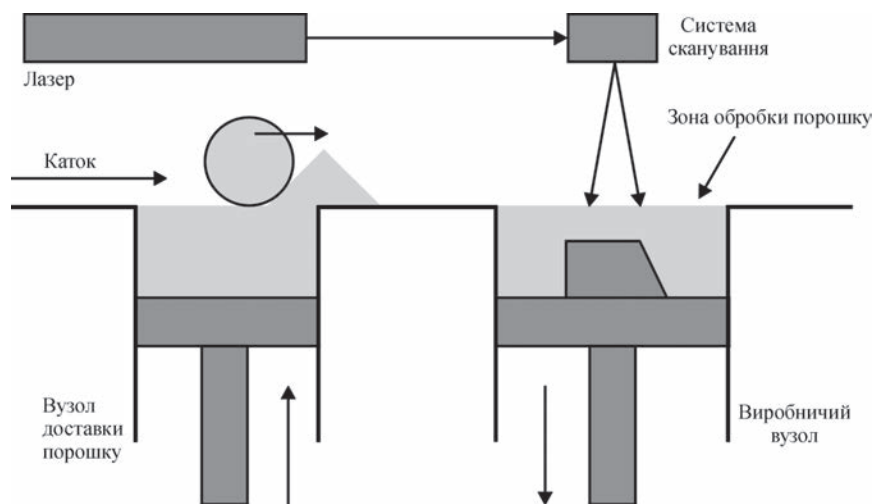


Рис. 3. Схеми установки для процесу SLS [12]

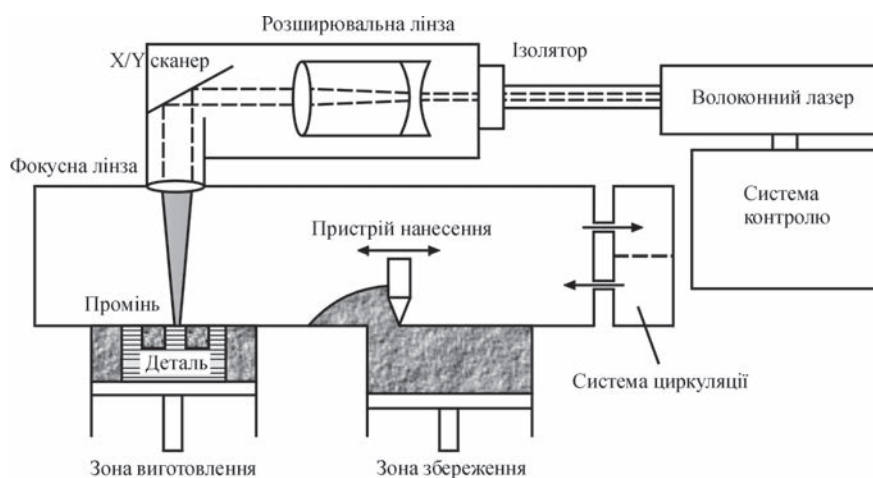


Рис. 4. Схеми установки, що використовується для SLM [5]

Під час роботи з тонкостінними виробами стало питання наплавки конструктивних вузлів на тонкостінну заготовку. В даних умовах використання лазерного наплавлення приводить до дуже високого ризику утворення деформацій та проплавлення заготовки [4, 7]. Виробництво тонкостінних елементів, а також елементів на тонкостінній базі залишається одним з напрямків розвитку технологій адитивного виробництва, що швидко розвивається. При цьому, використання технологій адитивного виробництва відкриває нові можливості у контролі процесів наплавлення [9, 11, 14], а також кращих властивостей наплавленого матеріалу [14, 15].

Через це було визначено за необхідне провести аналіз робіт, пов'язаних з вивченням технологій лазерного адитивного виробництва з ціллю прийняття до уваги досвіду вдосконалення процесів, що застосовується при виконанні даного завдання. Особливий інтерес приділяється аналізу робіт, пов'язаних з виробами, які мають тонкостінну основу, оскільки деталі такої конфігурації є одними з найскладніших для використання процесів адитивного виробництва. Внаслідок цього питання, а також інших особливостей, притаманних процесам SLM та SLS [16–18], постає проблема дослідження складових даних процесів. Для цього в даній роботі було оглянуто ряд робіт, пов'язаних з SLM- та SLS виготовленням деталей на тонкостінній основі. Метою цієї роботи є встановлення актуальних напрямків дослідження різних наукових складових процесу SLM та SLS, а також аналіз впливу технологічних заходів на кінцеву структуру виготовленої деталі, та її механічні та експлуатаційні характеристики для визначення важливих аспектів процесів SLM та SLS при виробництві деталей з тонкостінною основою.

Аналіз впливу планування експерименту на процеси адитивних технологій. Достатня увага в дослідженні процесів адитивного виробництва приділяється складовим планування експерименту та попередньої математичної підготовки: вивчення процесів адитивного виробництва в математичному вимірі, а також попереднє моделювання технологічного процесу.

Математичне моделювання є невід'ємною складовою експерименту, оскільки воно дозволяє швидко знайти найбільш перспективні варіанти режимів обробки та інших факторів, що помітно збільшує продуктивність процесу. Існує декілька варіантів математичного моделювання, найбільш застосовуваним є метод скінчених елементів. У практиці дослідження методу скінчених елементів вирізняють два підходи: методика, що фокусується на вивченні впливу окремої величини на процес, і фокусується на отриманні оптимального ре-

зультату для окремого завдання, що була описана в роботах [19, 20]; а також методика, що опирається на використання рядів безплощинних чисел, яка була описана в роботі Mukherjee та ін. [21]. Дана методика опирається на числа Марангоні, Пекле, Фур'є та значення безплощинного енергетичного входу, та припускає, що використання груп значень спрощує загальний процес моделювання комплексних процесів адитивного виробництва, може привести до більш глибокого аналізу динаміки поведінки даних процесів, а також дають знайти більш глибокі принципи взаємозалежності між величинами значень змінних в даних процесах [21].

Наступною актуальною проблемою дослідження процесів адитивного виробництва на тонкостінній основі є моделювання напружень, що утворюються під час роботи з тонкостінними елементами. Так, в роботі Yang та ін. [22] розглядався процес виготовлення тонкостінних елементів за допомогою SLM. Результати даної роботи вказують на значні внутрішні напруження, що утворюються у перших нанесених шарах порошкового матеріалу, величина яких вважається достатньою для деформації даної поверхні під час експлуатації (рис. 5).

Варто зауважити, що даний ризик існує і для наперед заданої існуючої тонкостінної деталі, на яку під час селективного лазерного наплавлення буде відбуватися нанесення шару. Зменшення внутрішніх напружень може бути досягнуто багатьма методами: від контролю енергетичних характеристик лазерного випромінювання, про що писали в роботах Li та ін. [23] та Abele та ін. [24], контролю швидкості подачі порошку (стаття Liu та ін. [25]), а також наступної комплексної термічної обробки деталі, що була описана в статті Niu та ін. [26].

Однак при цьому необхідно не забувати і про розбіжності значень математичних моделей з реальними експериментальними даними. Так, комп-

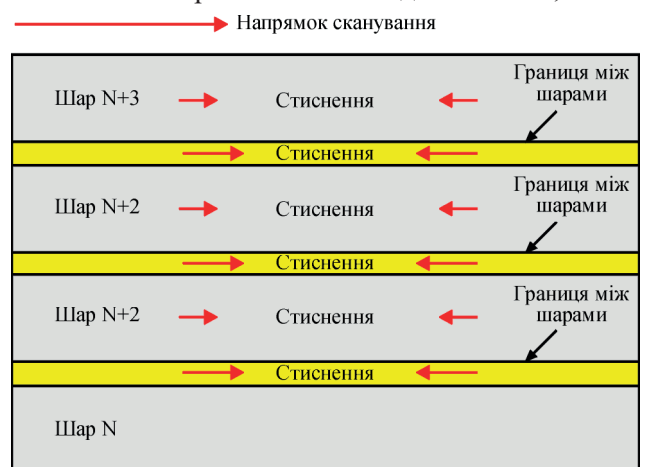


Рис. 5. Абстрактна схема навантажень, що спричиняють деформації при адитивному виробництві тонкостінних деталей або елементів на їх поверхні [22]

лексним проявам розбіжностей результатів моделювання процесів адитивного виробництва та експериментальними результатами надається велика увага в роботах [19–21]. Ця розбіжність часто є динамічною. Так, на рис. 6 приведено приклад, в якому було відзначено [21], що навіть при підтвердженні більшості математичних розрахунків експериментальними даними існують проблеми в точному розрахунку зони розплаву при розрахунку перших нанесених шарів порошкового матеріалу.

Наступним важливим елементом планування експерименту є вибір траєкторії сканування, оскільки визначено, що ця складова має великий вплив на процеси адитивного виробництва [5, 13]. Так, в роботі AlMangour та ін. [27] було проведено аналіз ряду траєкторій, в якому приведено аргументацію щодо переваг схем сканування, де кожен шар відрізняється від попереднього. В цьому дослідженні [27], а також в роботах Zhao та ін. [28] і Vambach та ін. [29] було виявлено, що стратегія сканування впливає на безперервність росту зерен через сусідні шари та зростання зерен всередині доріжки розплаву. В результаті було розглянуто ряд схем (рис. 7):

- лінійну – де процес нанесення матеріалу проводиться ідентичними монотонними рухами;
- паралельну, де доріжки нанесеного матеріалу знаходяться паралельно одна одній в орієнтації, але не в напрямку нанесення (див. рис. 7, а);
- радіальну, де матеріал наноситься з центру до країв або навпаки (див. рис. 7, в);
- змішану, яка комбінує декілька схем одночасно (див. рис. 7, б).

Окремо варто виділити механізм взаємодії між шарами нанесеного матеріалу. Так, в роботах [28, 29] було доведено, що зміна кута траєкторії нанесення порошкового матеріалу між шарами позитивно впливає на механічні властивості матеріалу. Але в роботі AlMangour та ін. [27] було виявлено,

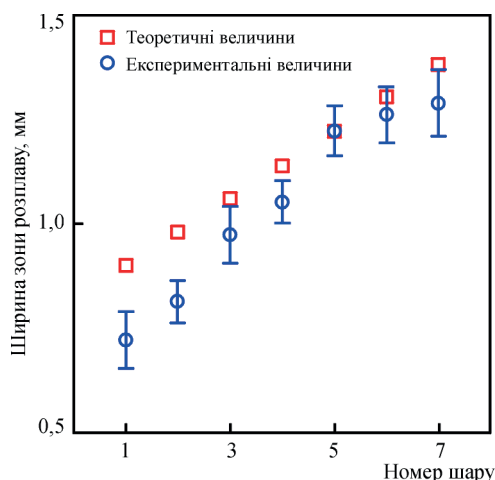


Рис. 6. Порівняння розрахункової та експериментально виміряної ширини зони розплаву для 7 нанесених шарів порошкового матеріалу [21]

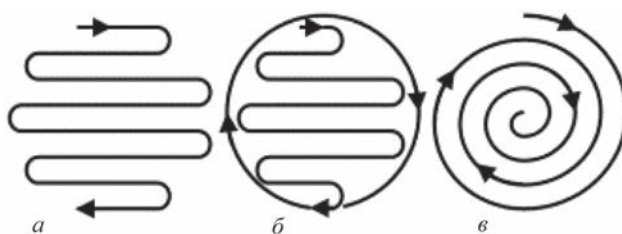


Рис. 7. Схеми сканування, що були розглянуті в роботі Vambach та ін. [29]: а – паралельна схема; б – змішана схема; в – радіальна схема

що зміна кута траєкторії («поворот траєкторії») нанесення порошкового порошку може приводити до змін різних параметрів нанесеного матеріалу. При цьому зміна кута траєкторії під час переходу на новий шар матеріалу не є універсально позитивним принципом [27, 29].

Аналіз перебігу процесів адитивного виробництва при роботі з тонкостінними основами. В поглибленні знань щодо процесів адитивного виробництва при роботі на тонкостінній основі велика увага приділяється вивченню впливу змінних на перебіг процесів SLM та SLS, а також поглибленню знань про сам перебіг даних процесів в заданих умовах. Так, в роботі Ahuja та ін. [30] описано наплавлення порошкового матеріалу на тонкостінну основу у вигляді штампованої деталі завтовшки 1,5 мм. Для виготовлення конструктивного вузла зі сплаву Ti–6Al–4V у формі циліндра розміром 10x5 мм використовувався принтер SLM-280HL з потужністю лазерного випромінювання у 400, 700 та 1000 Вт та швидкістю сканування до 10 м/с. У статті [30] також приділяється окрема увага розміру (фракція 25...45 мкм), фазовому складу порошкового матеріалу та його сумісності з матеріалом тонкостінної основи. Тут же описується необхідність правильного закріплення та охолодження деталі, оскільки при наявності повітря позаду тонкостінної основи вона зазнає деформацій під впливом лазерного випромінювання. Розмір можливих деформацій, виявлених в статті [30], було візуалізовано (рис. 8).

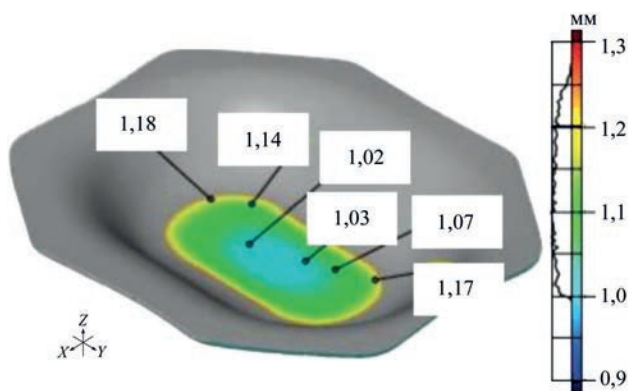


Рис. 8. Тривимірний графік деформації тонкостінної основи після селективного лазерного плавлення елемента. Точність $\pm 0,15$ мм [30]

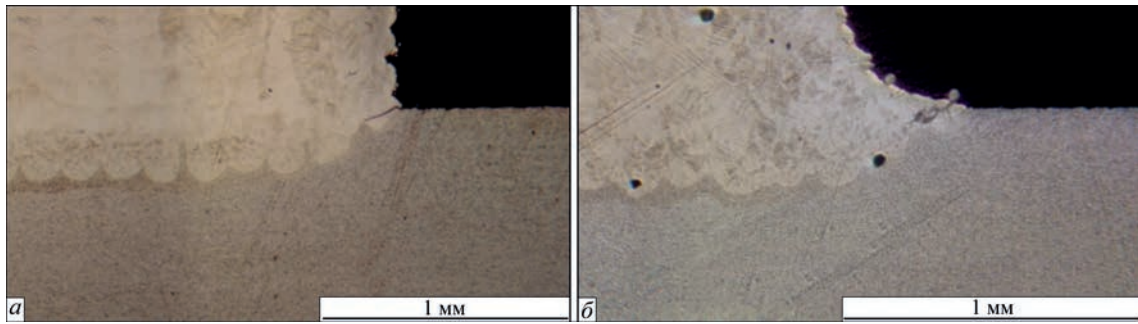


Рис. 9. Структура перехідної зони [30]: а – без нанесення лиски, можна помітити розтріскування на краях перехідної зони; б – з перехідною лискою на перших шарах нанесеного матеріалу, розтріскування відсутнє

Про необхідність охолодження тонкостінної деталі під час обробки йдеться і у статті Heilemann та ін. [31]. Для запобігання деформації авторами використовувалась мідна підкладка завтовшки 4 мм. Також підкреслюється необхідність контролю енергетичної складової з розділенням процесів нанесення перших шарів порошкового матеріалу та подальших, виділяючи велику різницю між природою різних стадій цього процесу [32–34].

Аналіз властивостей деталей з наплавленими на них за допомогою SLM або SLS-процесів матеріалами. Важливо звернути увагу на перехідну зону, а також на механічні властивості вузлів, отриманих шляхом адитивного виробництва на тонкостінній основі. Так, в раніше згаданих роботах [18, 29–31] це питання сприймалось під різними кутами, оскільки на механічні властивості деталей можуть впливати багато складових процесу адитивного виробництва – як енергетичних, так і термофізичних. Окремо необхідно виділити мікроструктуру даної зони таких елементів, оскільки зона переходу між основою та нанесеним порошковим матеріалом є однією з критичних зон. Так, наприклад, у роботі Ahiya та ін. [30] було досліджено утворення мікротріщин в перехідній зоні. Для запобігання їх утворенню було запропоновано виконувати наплавлення з лискою величиною в 0,5 мм (рис. 9).

Однак необхідно зазначити, що правильне закріплення деталі впливає не тільки на основу, але й на нанесені матеріали. Так, в роботах [30, 35] було помічено, що рівномірність розповсюдження матеріалу на пряму впливає на частку розплавленого матеріалу та мікроструктуру, утворюючи ослаблені зони. У статті Schaub та ін. [35] було визначено, що міцність зв'язку між листовим металом і наплавленим елементом можна покращити, запобігаючи виникненню окислення та зменшуючи температурний градієнт між верхньою поверхнею листового металу та першими шарами розплавленої лазерним променем частини. Тут же велась розмова про попередню та наступну термічну обробку, що сходиться з дослідженнями, про-

веденими Niu та ін. [26]. У даному дослідженні [26], а також у роботах Lesyk та ін. [9, 36] було відзначено наявність частково розплавленого металевого порошку на бокових поверхнях шарів нанесених матеріалів. Мінімізація кількості даних утворень є ще однією причиною для проведення термічної постобробки.

Аналіз результатів розглянутих робіт. Специфіка використання адитивних технологій при наплавленні елементів на тонкостінну основу. За результатами проведеного аналізу можна зазначити, що в розглянутих роботах використовується більш комплексний погляд на процеси адитивного виробництва, пов'язані з наплавленням елементів на тонкостінну основу. Можна помітити різницю підходів до моделювання та розгляду технологій; так, наприклад, більшість робіт, що розглядають питання моделювання процесів адитивного виробництва використовує метод скінченних елементів, але різниця в підходах до змінних повільно змінюється в сторону комплексного розгляду рядів параметрів [5, 20, 21]. Також можна помітити додатковий фокус на диференціювання процесу нанесення перших шарів порошкового матеріалу на тонкостінну основу та нанесення додаткових шарів через важливість впливу лазерного випромінювання на тонкостінну основу та перехідні шари. В цьому плані можна відзначити важливість правильного закріплення та охолодження деталі, оскільки існує загальне розуміння, що це – важливо не лише для рівномірного утворення матеріалу, що наплавляється [18, 29, 30], але і для запобігання термодеомацій тонкостінної основи [30]. Однак існує і зворотна сторона – зменшення градієнту температур за рахунок термічної постобробки тонкостінної основи забезпечує підвищення міцності перехідної зони «основа-наплавлений елемент» [35]. Також необхідно виділити проблему деформацій, що можуть відбутись через внутрішні напруження, які утворюються у розплавленому порошковому матеріалі [18] і вимагають термічної обробки деталей. Додатково необхідно зазначити, що перехід «основа-наплавлений елемент» повинен відбува-

тися з мінімальним градієнтом температур – це мінімізує ризик зниження характеристик міцності виробу [25, 26]. Ці проблеми, разом з питаннями до фазового складу, створює комплексне питання щодо пріоритетності характеристик, бажаних для тих чи інших завдань.

Висновки

Аналіз досліджень адитивного виробництва елементів на тонкостінній основі дозволив встановити певні закономірності, які варто використати для розробки процесу селективного лазерного наплавлення, а саме:

- необхідність правильного планування експерименту, а також технологічного процесу, а саме: вибір траєкторії сканування, режимів обробки, а також моделювання перехідної зони «тонкостінна основа – наплавлений матеріал» для утворення найбільш плавної та міцної перехідної зони;

- необхідність контролю технології під час всього процесу, забезпечення рівномірного розподілу металевих порошків та охолодження тонкостінної основи;

- необхідність забезпечення охолодження тонкостінної основи для запобігання термічним деформаціям, а також наявність термічної обробки для нівелювання внутрішніх напружень, що утворюються в поверхневих шарах розплавленого матеріалу.

Список літератури/References

1. Del Sol, I., Rivero, A., Lacalle, L., Gámez, A. (2012) Thin-Wall Machining of Light Alloys: A Review of Models and Industrial Approaches. *Materials*, 12. 10.3390/ma12122012.
2. Singh R., Gupta A., Tripathi O. et al. (?) *Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview*. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.635>
3. Mazumder J. (2017) *1 – Laser-aided direct metal deposition of metals and alloys*. Editor(s): Milan Brandt. In Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials. *Laser Additive Manufacturing*. Woodhead Publishing, 21–53. ISBN 9780081004333. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00001-4>
4. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. (2007) *Інженерія поверхні: Підручник*. Київ, Наукова думка. ISBN 978-966-00-0655-3
Yushchenko, K.A., Borysov, Yu.S., Kuznetsov, V.D., Korzh, V.M. (2007) *Surface Engineering: Manual*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian]. ISBN 978-966-00-0655-3
5. Li Yuan, Songlin Ding, Cuie Wen. (2019) Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: *A review*, *Bioactive Materials*, 4, 56–70. ISSN 2452-199X. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2018.12.003>
6. Kritskiy, D., Pohudina, O., Kovalevskiy, M. et al. (2022) *Powder Mixtures Analysis for Laser Cladding Using OpenCV Library*. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2021*. ICTM 2021. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 367. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_72
7. Duriagina, Z., Kulyk, V., Kovbasiuk, T. et al. (2021) Synthesis of Functional Surface Layers on Stainless Steels by Laser Alloying. *Metals*, 11, 434. <https://doi.org/10.3390/met11030434>
8. Korzhyk, V., Khaskin, V., Voitenko, O. et al. (2017). *Welding Technology in Additive Manufacturing Processes of 3D Objects*. In *Materials Science Forum*, 906, 121–130. Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.906.121>
9. Lesyk, D.A., Martinez, S., Pedash, O.O. et al. (2022) *Nickel Superalloy Turbine Blade Parts Printed by Laser Powder Bed Fusion: Thermo-Mechanical Post-processing for Enhanced Surface Integrity and Precipitation Strengthening*. *J. of Materi Eng and Perform*, 31, 6283–6299. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06710-x>
10. Peleshenko, S., Korzhyk, V., Voitenko, O. et al. (2017) Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/1, 42–52. 10.15587/1729-4061.2017.99666.
11. Kumar, S. (2014) *10.05 – Selective Laser Sintering/Melting*, Editor(s): Saleem Hashmi, Gilmar Ferreira Batalha, Chester J. Van Tyne, Bekir Yilbas. *Comprehensive Materials Processing*, Elsevier, 93–134. ISBN 9780080965338. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01003-7>
12. Serin, G., Kahya, M., Unver, H. et al. (2018) A Review Of Additive Manufacturing Technologies. Conference: *The 17th International Conference on Machine Design and Production, Bursa, Turkey, January 2018*.
13. Joel C. Najmon, Sajjad Raeesi, Andres Tovar (2019) *2 – Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry*, Editor(s): Francis Froes, Rodney Boyer, *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, Elsevier, 7–31. ISBN 9780128140628. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9>.
14. Del Sol, I., Rivero, A., Lacalle, L., Gámez, A. (2019) Thin-Wall Machining of Light Alloys: A Review of Models and Industrial Approaches. *Materials*, 12, 2012. 10.3390/ma12122012.
15. Adjamsky, S.V., Sazanishvili, Z.V., Tkachov, Y.V. et al. (2021) Influence of the Time Interval between the Deposition of Layers by the SLM Technology on the Structure and Properties of Inconel 718 Alloy. *Mater Sci*, 57, 9–16. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00508-3>
16. Sun, Z., Tan, X., Tor, S. Chua, C. (2018) Simultaneously enhanced strength and ductility for 3D-printed stainless steel 316L by selective laser melting. *NPG Asia Materials*, 10(4), 127–136.
17. Wang, Y., Voisin, T., McKeown, J. et al. (2017) Additively manufactured hierarchical stainless steels with high strength and ductility. *Nature Materials*, 17(1), 63–71.
18. Yang, W., Tang, Y. (1998) Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 84(1-3), 122–129.
19. Gibson, D. Rosen, B. Stucker (2015) *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing Ch.10* (Springer, New York, 2015).
20. Pulin, Nie, Ojo, O.A., Zhuguo, Li (2014) Numerical modeling of microstructure evolution during laser additive manufacturing of a nickel-based superalloy. *Acta Materialia*, 77, 85–95, ISSN 1359-6454. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.05.039>
21. Mukherjee, T., Manvatkar, V., De, A., DebRoy, T. (2017) Dimensionless numbers in additive manufacturing. *J. Appl. Phys.*, 121, 064904. Doi: 10.1063/1.4976006
22. Yang, T., Xie, D., Yue, W. et al. (2019) Distortion of Thin-Walled Structure Fabricated by Selective Laser Melting Based on Assumption of Constraining Force-Induced Distortion. *Metals*, 9(12), 1281. <https://doi.org/10.3390/met9121281>
23. Zhonghua, Li, Renjun, Xu, Zhengwen, Zhang, Ibrahim, Kucukkoc (2018) The influence of scan length on fabricating thin-walled components in selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 126, 1–12. ISSN 0890-6955. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.11.012>
24. Eberhard Abele, Hanns A. Stoffregen, Knipenkamp, M. et al. (2015) Selective laser melting for manufacturing of thin-walled porous elements. *Journal of Materials Processing*

- Technology*, 215, 114–122. ISSN 0924-0136. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.07.017>
25. Jichang, Liu, Lijun, Li (2005) Effects of powder concentration distribution on fabrication of thin-wall parts in co-axial laser cladding. *Optics & Laser Technology*, 37, 4, 287–292. ISSN 0030-3992. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2004.04.009>
 26. Xu Niu, Ruixian Qin, Yunzhuo Lu, Bingzhi Chen (2021) Energy Absorption Behaviors of Laser Additive Manufactured Aluminium Alloy Thin-Walled Tube Tailored by Heat Treatment. *Materials Transactions*, 62, 2, 278–283.
 27. AlMangour, B., Grzesiak, D., Yang, J. (2017) Scanning strategies for texture and anisotropy tailoring during selective laser melting of TiC/316L stainless steel nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*, 728, 424–435.
 28. Zhao, C., Bai, Y., Zhang, Y. et al. (2021) Influence of scanning strategy and building direction on microstructure and corrosion behaviour of selective laser melted 316L stainless steel. *Materials & Design*, 209, id.109999.
 29. Bambach, M, Sviridov, A, Weisheit, A, Schleifenbaum, JH. (2017) Case Studies on Local Reinforcement of Sheet Metal Components by Laser Additive Manufacturing. *Metals.*, 7(4), 113. <https://doi.org/10.3390/met7040113>
 30. Bhriгу Ahuja, Adam Schaub, Michael Karg et al. (2015) High power laser beam melting of Ti–6Al–4V on formed sheet metal to achieve hybrid structures. *Proc. SPIE 9353, Laser 3D Manufacturing II, 93530X (16 March 2015)*. Doi: 10.1117/12.2082919
 31. Heilemann, M., Beckmann, J., Konigorski, D., Emmelmann, C. (2018) Laser metal deposition of bionic aluminum supports: reduction of the energy input for additive manufacturing of a fuselage. *Procedia CIRP*, 74, 136–139. ISSN 2212-8271. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.063>.
 32. Векілов С.Ш., Ліповський В.І., Марчан Р.А., Бондаренко О.С. (2021) Особливості використання технології виготовлення SLM для компонентів РПД. *Journal of Rocket-Space Technology*, 29, 112–123. <https://doi.org/10.15421/452112>
 33. Kelly, S.M., Kampe, S.L. Microstructural Evolution in Laser-Deposited Multilayer Ti–6Al–4V Builds: Part I. (2004) Microstructural Characterization. *Metallurgical and materials transactions*, 35A, June 1861.
 34. Heilemann, M., Möller, M., Emmelmann, C. et al. (2017) *Laser Deposition of Ti–6Al–4V Structures: Analysis of the Build Height Dependent Microstructure and Mechanical Properties*. MS&T 2017.
 35. Schaub, A., Ahuja, B., Karg, M. et al. (2014) Fabrication and Characterization of Laser Beam Melted Ti–6Al–4V Geometries on Sheet Metal. *DDMC 2014 Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference, Berlin, Germany*.
 36. Lesyk, D., Martinez, S., Dzhemelinkiy, V., Lamikiz, A. (2020) Additive Manufacturing of the Superalloy Turbine Blades by Selective Laser Melting: Surface Quality, Microstructure and Porosity. In: *Karabegović, I. (eds) New Technologies, Development and Application III. NT 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*, 128. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46817-0_30

ADDITIVE MANUFACTURING OF STRUCTURAL ELEMENTS ON A THIN-WALLED BASE: CHALLENGES AND DIFFICULTIES (Review)

M.V. Sokolovskiy¹, A.V. Bernatskiy¹, N.O. Shamsutdinova¹, Yu.V. Yurchenko¹, O.O. Danileiko^{1,2}

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

²E.O. Paton Education&Research Institute of Materials Science and Welding of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. 37 Beresteysky Ave. (Peremohy), 03056, Kyiv

In the work, a literary review of materials was conducted, devoted to different areas of studying selective laser melting (SLM) and selective laser sintering (SLS) technologies in order to analyze the processes associated with selective laser surfacing occurring during SLM and SLS, as well as the impact of technological measures on the final structure, mechanical and service characteristics of a manufactured part in the additive manufacturing of structural elements on a thin-walled base. The main tasks of research works analyzed in the review were studies focused on the features of structural elements formation on a thin-walled by means of SLM and SLS technologies: modelling of additive manufacturing processes; aspects of planning experiments and manufacturing processes; studying the course of SLM and SLS processes in the given conditions; need in pre- or post-treatment of material; as well as analysis of the end microstructure and characteristics of specimens manufactured using these technologies. Based on the results of literary analysis, problems were identified and the prospects of using SLM and SLS processes were considered during the formation of structural elements on a thin-walled base. A number of aspects were justified, on which it is necessary to pay attention during studies of SLM and SLS processes when working with a thin-walled base. 36 Ref., 9Fig.

Keywords: selective laser melting (SLM), additive manufacturing, selective laser sintering (SLS), thin-walled products

Надійшла до редакції 10.07.2023



**VII INTERNATIONAL
CONFERENCE ON WELDING
AND RELATED TECHNOLOGIES**

7-10 October 2024 Kyiv, Ukraine

www.wrt2024.com.ua