

# ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ АЕРОКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ (Огляд)

М.В. Соколовський

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [m\\_sokolovskiy@paton.kiev.ua](mailto:m_sokolovskiy@paton.kiev.ua)

У даній роботі з метою визначення актуальних напрямків дослідження різних наукових складових процесу селективного лазерного плавлення (SLM), а також технологічних заходів, які впливають на кінцеву структуру, механічні та експлуатаційні характеристики виготовленої деталі, було проведено літературний огляд матеріалів, присвячених різним напрямкам дослідження технології SLM. Напрямами наукових робіт, розглянутих у даному огляді, були: дослідження та поглиблення знань щодо впливу енергетичної складової процесу SLM; можливості модифікації процесу SLM шляхом контролю величини розфокусування лазера; вивчення режимів та методів SLM-обробки, а також кінцевої мікроструктури зразків; вивчення корозійної стійкості виробів, виготовлених за допомогою SLM. На підставі результатів літературного аналізу показано проблеми та перспективи вивчення процесів SLM для матеріалів аерокосмічної індустрії, аргументовано необхідність створення систематизованого комплексного підходу до вивчення складових процесу SLM, а також поглиблення знань щодо технологічних можливостей його використання. Бібліогр. 46, рис. 6.

*Ключові слова:* селективне лазерне плавлення (SLM), адитивне виробництво, порошкова металургія, контроль розміру фокусної плями, стратегія сканування, метали аерокосмічної індустрії.

**Вступ.** Селективне лазерне плавлення (Selective Laser Melting, SLM) – одна з сучасних технологій адитивного виробництва, що використовується для виготовлення складних за формою і структурою виробів з металевих порошків. Цей процес полягає в послідовному пошаровому розплавленні порошкового матеріалу за допомогою потужного лазерного випромінювання. За допомогою селективного лазерного плавлення можна створити унікальні вироби зі складним профілем без використання механічної обробки і складного дорогого оснащення, зокрема, завдяки можливості управляти фізико-механічними властивостями виробів.

SLM-технології мають можливість вирішувати складні завдання авіакосмічної, енергетичної, нафтогазової та інших галузей машинобудування, а також у металообробці, медицині і ювелірній справі. Однак, незважаючи на численні переваги, основним недоліком SLM порівняно з методами виробництва різних деталей та конструкцій, заснованих на процесі осадження, є порівняно низька продуктивність даної технології. Збільшення діаметра лазерного променя покращує швидкість нарощування SLM, але призводить до втрати точності. При цьому необхідно розуміти, що для отримання повністю щільної деталі без дефектів (пор та інших концентраторів напружень) необхідно повністю розплавити частинки металевого порошку. В такому випадку доцільно використовувати достатньо велику потужність лазера. Однак необхідно зазначити, що при виборі надлишкової

потужності процес може перейти у менш стабільний вид, що спричиняє появу таких дефектів, як «ефект кульки» та надлишкова місцева концентрація внутрішніх напружень, що може спричинити деформацію деталі або виникнення внутрішніх мікротріщин [1, 2].

Через ці та інші питання [3–5] постає проблема дослідження складових SLM-процесу. Для цього було оглянуто ряд робіт, пов'язаних з SLM-обробкою одних з найбільш часто використовуваних матеріалів у авіакосмічній індустрії – сталі AISI 316L, а також сплавів Inconel 625 та 718. Всі ці матеріали широко використовуються у аерокосмічній галузі через свою корозійну стійкість та високі робочі температури.

Метою цієї роботи є визначення актуальних напрямків дослідження різних наукових складових процесу SLM, а також технологічних заходів, які впливають на кінцеву структуру виготовленої деталі та на її механічні та експлуатаційні характеристики.

**Аналіз різних напрямків вивчення складових процесів SLM.** Питання вивчення процесу селективного лазерного плавлення комплексне, вимагає огляду різних факторів, які б враховували всі механічні та фізичні властивості вироблених конструкцій та деталей. В результаті інформаційно-аналітичних досліджень було встановлено, що для вирішення даного комплексу питань застосовуються різні методи, які концентруються на оптимізації однієї чи двох характеристик, що впливають на протікання процесу аналізу різних шляхів вивчення складових процесу SLM. Розглянуті в цьому дослідженні наукові праці зосере-

джуються на оптимізації процесу SLM наступними шляхами:

- дослідження та поглиблення знань щодо впливу енергетичної складової процесу SLM на його результат;
- можливості модифікації процесу SLM шляхом контролю величини розфокусування лазера;
- вивчення режимів та методів SLM-обробки, а також кінцевої мікроструктури зразків. Вивчення корозійної стійкості виробів, виготовлених за допомогою SLM.

**Дослідження енергетичної складової процесу SLM.** Попередні дослідження [1–6] енергетичної складової процесу SLM показали, що потужність лазера та щільність енергії є важливими факторами, що впливають на якість деталей, виготовлених за допомогою даної технології. Для дослідження параметрів процесу цінними були б методи, розроблені в роботах [3–5] з ортогональним проектуванням масиву та аналізом розмірів зони термічного впливу (ЗТВ). Тим часом, з використанням нормалізованої карти обробки, розробленої у роботі Thomas [6], яка виводить на передній план використання безрозмірних параметрів енергетичної складової процесу для розрахунків, можна зробити висновок, що нормована потужність лазера  $q^*$  є найбільш значущим фактором, що впливає на велике число змінних процесу. Ця ж модель підкреслює важливість величини нормованої еквівалентної щільності енергії ( $E_0^*$ ) як ключового параметру, що впливає на властивості виготовлених деталей [6–11].

У дослідженні Jiang [12] для планування експерименту прийнято нормалізовану безрозмірну технологічну карту процесу SLM, ефективність застосування якої було продемонстровано роботами [2, 7, 9, 10]. В цій роботі було вивчено вплив нормованої еквівалентної щільності потужності  $E_0^*$  та безрозмірної потужності лазера  $q^*$  на процес SLM для дослідження утворюваних дефектів, форми басейну розплаву, а також первинної міждендритної відстані для мікроструктури деталей, створених зі сталі 316L методом SLM.

Безрозмірна потужність лазера  $q^*$  визначається за даним рівнянням:

$$q^* = Aq/[R\lambda(T_m - T_0)], \quad (1)$$

де  $A$  – коефіцієнт поглинання поверхні;  $q$  – потужність лазера (Вт);  $R$  – радіус лазерного променя (м);  $\lambda$  – теплопровідність ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{K}^{-1}$ );  $T_m$  – температура плавлення (К);  $T_0$  – температура плавлення початкового (або порошкового) матеріалу (К).

Еквівалентна щільність потужності  $E_0^*$  можна представити таким рівнянням (2):

$$E_0^* = q^*/(v^*l^*h^*) = [Aq/2v^*lh^*] [1/\rho C_p(T_m - T_0)], \quad (2)$$

де  $q^*$  – безрозмірна потужність лазера (1);  $v^*$  – безрозмірна швидкість лазерного сканування;

$l^*$  – безрозмірна висота наплавленого шару;  $h^*$  – безрозмірна відстань між вісями проходів сканування (3):

$$v^* = vR/a, \quad l^* = 2l/R, \quad h^* = h/R, \quad (3)$$

тут  $v$  – швидкість лазерного сканування (м/с);  $\alpha$  – коефіцієнт теплопровідності при точці плавлення ( $\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$ );  $l, h$  – відповідно товщина шару (мкм) і відстань між вісями проходів сканування (мкм).

Отримана під час експерименту дендритна мікроструктура, за допомогою розрахунків за цією моделлю, відображає комбінований вплив параметрів процесу та особливостей фазового складу матеріалу на його кінцевий стан в зоні термічного впливу. В результаті дослідження було виявлено, що низькі значення параметру  $E_0^*$  можуть призвести до збільшення величини швидкості охолодження, результатом якої є структура з меншим міждендритним інтервалом. В роботі було експериментально виведено, що при виготовленні деталі, яка повинна витримувати значні навантаження на розтяг, параметри процесу слід обирати так, щоб забезпечити відносно низькі значення параметру  $E_0^*$ . В роботах [1, 11] було доведено, що форма ванни розплаву, а також розмір зони термічного впливу контролюються величиною потужності лазера. Досліджений у роботі Sun та ін. [1] зразок мав вузьку, глибоку форму ванни розплаву, демонструючи кращі механічні властивості відносно зразку з широкою та неглибокою формою ванни розплаву. Вузька глибока ванна розплаву створюється при поєднанні високого значення безрозмірного параметру потужності лазера  $q^*$  та достатнього значення величини нормованої еквівалентної щільності потужності  $E_0^*$ . Однак наукова праця Ma та ін. [11] виявила, що таке поєднання збільшує нестабільність ванни розплаву, викликаючи дефекти явища «keyhole». При цьому підкреслюється, що для кожного технічного завдання існують свої оптимальні величини параметрів  $q^*$  та  $E_0^*$ . При цьому результати роботи [12] підкреслюють, що при використанні технології SLM без подальшої термічної обробки, призначеної для зняття залишкових напружень, високі комплексні характеристики міцності і пластичності виготовленої деталі можуть бути досягнуті при використанні відносно низького значення параметра  $E_0^*$ . Вплив параметрів процесу на мікроструктуру нержавіючої сталі 316L був також досліджений у роботі Kurzynowski та ін. [13]. Однак, дійшовши до схожих висновків, він зазначив, що процес SLM є дуже локалізованим і швидкоплиним, що ускладнювало отримання більш глибокого розуміння механізму формування різних морфологій матеріалу, а також мікроструктур поверхонь виготовлених деталей. Поки що цій проблемі було присвячено лише декілька досліджень,

більшість з яких вивчала результати експериментів за допомогою місцевої рентгенівської візуалізації [13, 14].

Альтернативним методом вивчення структур деталей, виготовлених за допомогою процесу SLM, є обчислювальне моделювання та прогнозне моделювання. Даний метод знаходить все більше і більше розповсюдження в сучасних дослідженнях в цій тематиці. Так, у роботі Tang та ін. [15] було показано розроблену тривимірну модель для імітації утворення слідів розплаву нержавіючої сталі 316L під час процесу SLM, де було доведено, що саме поверхневий натяг і тиск віддачі були двома ключовими факторами у створенні макроструктури однопрохідного наплавленого зразка як сферичних, так і неправильних форм.

У роботі [16] було вивчено особливості поверхні зразків Inconel 718, виготовлених за допомогою SLM при різних потужностях лазера та швидкостях сканування, корелюючи комбінації цих величин з відомими принципами поведінки розплавленого порошку. Для дослідження морфології поверхні та мікроструктури затвердіння сплаву Inconel 718 за допомогою мезомасштабної тривимірної моделі висотної функції решітки Больцмана (HF-LBM) [17, 18] використовувались як експериментальні, так і модельні підходи. Було виявлено, що саме поверхневий натяг, а не тиск віддачі, як вважалось раніше [18], втягували розплавлений порошок у ванну розплаву під час процесу SLM. Що стосується низького рівня введення енергії, то розплав порошку зливається разом з нерозплавленими частинками перед потраплянням в ванну розплаву, що було визначено як основну причину утворення поверхневих флуктуацій у ванні розплаву і подальше утворення закритих поверхневих пор. Deng та ін. [19] зазначили, що коли вхідна енергія лазера перевищить межу, у басейні розплаву відбудеться «феномен кульки».

Керпен у своїй дисертації [20] прийшов до висновку, що першим кроком до розширення можливостей процесу SLM є уточнення траєкторії сканування однолінійних доріжок з різними комбінаціями потужності лазера та швидкості сканування для заданого діаметра лазерного пучка та товщини шару. Після цього він привів необхідність проведення аналізу структури у ванні розплаву, щоб вибрати оптимальну серію параметрів для подальшої побудови 3D-моделі створюваної деталі. Наступний крок в основному включає визначення оптимальної стратегії сканування та інтервалу штрихування, тобто відстані між сусідніми доріжками. Так, наприклад, роботи Wang та ін. [21], а також Yadroitsev та ін. [22] дослідили кореляцію введення тепла та отриманої після однорядкового сканування морфології матеріалу. А саме: в

цих роботах було проведено дослідження впливу лінійної густини енергії  $\Theta$  – співвідношення між потужністю лазера  $P$  та швидкістю сканування  $v$  на кінцеву структуру деталі, виготовленої за допомогою технології SLM. Ці роботи загалом підтверджують теорії, наведені в роботах [14, 16, 20], але ставлять під питання використання експериментальних однопрохідних зразків через те, що в практичному виробництві деталей передбачається багатопрохідна методика.

**Можливості модифікації процесу SLM шляхом контролю величини розфокусування лазера.** У своєму дослідженні Promorpatum та ін. [23] вказав, що використання високої потужності лазера та малого діаметра променя не призводить до стабільного перебігу процесу SLM, оскільки концентрація великої кількості енергії в невеликій точці може спричинити випаровування оброблюваного матеріалу та утворення «keyhole». Після експериментальних випробувань він дійшов до висновку, що при постійній швидкості сканування збільшення розміру лазерної плями дозволяє використовувати високопотужні лазери без перегріву оброблюваного матеріалу, однак ускладнює втримання заданого рівня точності і шорсткості поверхні.

Цій проблемі можна запобігти, використовуючи стратегію «корпус-ядро», що передбачає набір високопродуктивних робочих параметрів для серцевини деталі та високоточних робочих режимів для поверхневих шарів виготовлюваної деталі [24]. Ця методика поєднує високу швидкість, геометричну точність і низьку шорсткість поверхні. Набір основних параметрів робочих режимів в такому випадку зазвичай включає збільшення величини розфокусування, що призводить до збільшення розміру ванни розплаву та більшої товщини оброблюваного шару. При цьому вказується на необхідність дотримання мінімальної необхідної потужності для проведення операції процесу SLM.

У роботі [25] було проаналізовано морфологію ванни розплаву з урахуванням параметрів процесів SLM, включаючи потужність лазера, швидкість сканування та відстань розфокусування. Для того, щоб встановити зв'язок між морфологією ванни розплаву з надходженням тепла, було розглянуто об'ємну щільність енергії, нормалізовану ентальпію та аналітичний підхід з використанням рівняння Розенталя. Це рівняння було отримано для класичних методів зварювання плавленням, однак через близькість цих процесів до тих, що відбуваються під час SLM, Metelkova та ін. [25] вирішили використати розрахункові параметри, отримані за допомогою використання даного розрахункового рівняння з його умовами для розрахунку процесів SLM. Під час роботи було

підкреслено придатність використання нормалізованої ентальпії як проектного параметра для прогнозування глибини ванни розплаву, а також доведено можливість використання рівняння Розенталя для прогнозування її ширини. Це дослідження показує, що реалізація правильної величини розфокусування може призвести до істотного збільшення потенційної продуктивності лазерної установки. Однак при цьому можна помітити, що ріст продуктивності досягається за рахунок часткового збільшення шорсткості (рис. 1).

Для оцінки впливу величини розфокусування на ширину, висоту та глибину зони розплаву, шорсткість поверхні, її щільність, міцність на розтяг деталей, SLM у роботі [26] було проведено оцінку

впливу негативних ( $-0,5$  мм,  $-0,3$  мм) та позитивних ( $0,3$  мм,  $0,5$  мм) величин відстані розфокусування при виготовленні деталей за допомогою SLM (рис. 2).

З результатів роботи [27] можна побачити, що відстань розфокусування має великий вплив на якість поверхні. Використання негативних відстаней розфокусування створює режим плавлення у Inconel 625, у якому ванна розплаву має невелику глибину і сферичну форму. І навпаки, використання позитивних відстаней генерує режим плавлення “keyhole”, при якому глибина ванни розплаву перевищує половину його ширини.

Однак, McLouth та ін. [28] зазначив у результатах свого дослідження, що незважаючи на схо-

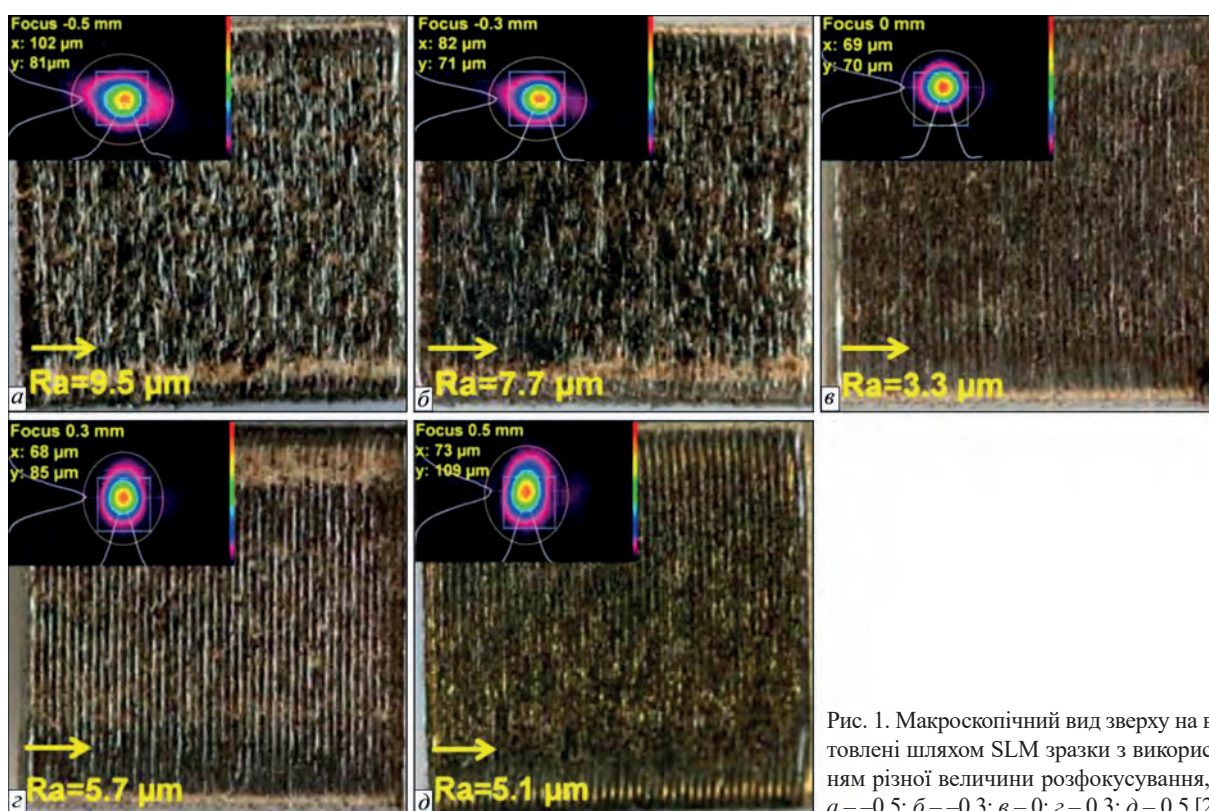


Рис. 1. Макроскопічний вид зверху на виготовлені шляхом SLM зразки з використанням різної величини розфокусування, мм: а –  $-0,5$ ; б –  $-0,3$ ; в –  $0$ ; г –  $0,3$ ; д –  $0,5$  [25]

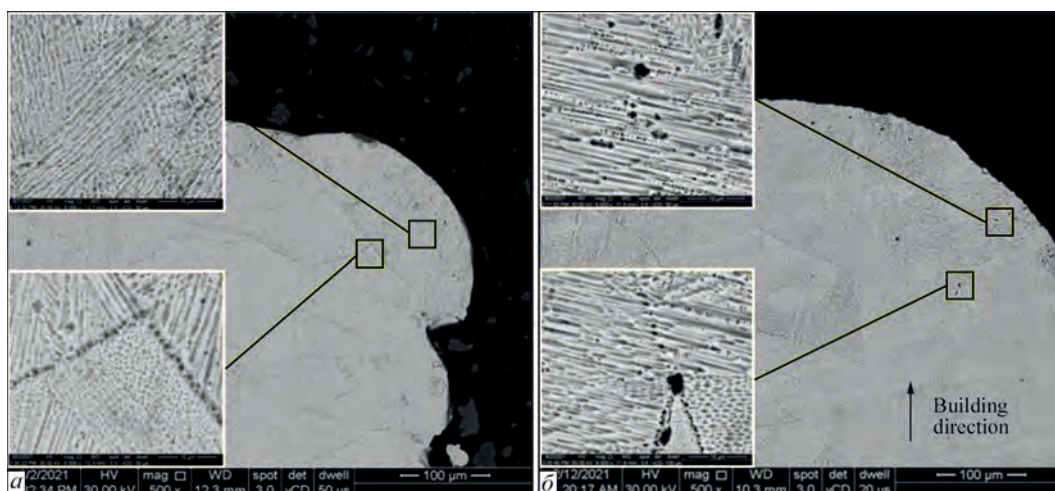


Рис. 2. Пористість при негативній (а) та позитивній (б) відстані розфокусування [27]

жість між різними процесами адитивного виробництва, вплив величини розфокусування на пористість і мікроструктуру не можна узагальнити серед процесів, навіть для одного типу сплавів, оскільки на цю величину впливає велика кількість параметрів.

**Вивчення режимів та методів SLM-обробки, а також кінцевої мікроструктури зразків. Вивчення корозійної стійкості виробів, виготовлених за допомогою SLM.** В поглибленні знань щодо SLM значну увагу привертає вивчення факторів, що впливають на корозійну стійкість матеріалів. Стійкість термічно обробленого зразка зі сталі 316L, де температура в ванні розплаву досягла докритичної величини в 950 °C була кращою, ніж у зразка, де температура досягла 1100 °C [27]. Інша робота [29] показала, що залишкові стискаючі напруження, викликані процесами SLM, можуть покращити ріст пасивної плівки та зменшити рушійну силу репасації, що призведе до незначного покращення стійкості нержавіючої сталі 316L до точкової корозії. Пори, знайдені у зразках, виготовлених за допомогою SLM, у порівнянні зі зразками, виготовленими традиційними технологічними методами, були описані як такі, що сприяють утворенню тріщин і пітингу, що, вірогідно, утворився у надзвичайно агресив-

них розчинах [30]. Інші дефекти, що утворюються під час процесу SLM, а саме – дефекти меж ванни розплаву, невірноважена мікроструктура та неоднорідний розподіл розчиненої речовини, також можуть призвести до погіршення корозійної стійкості [31, 32]. Таким чином, однорідна мікроструктура і більш товста поверхнева плівка, що може утворитися після перекристалізованої термічної обробки, можуть ефективно підвищити корозійну стійкість зразків, виготовлених за допомогою технологій SLM.

Стратегія лазерного сканування та напрямки побудови зерен та їх зв'язків також мають великий вплив на мікроструктуру та механічні властивості кінцевих деталей, виготовлених за допомогою технології SLM. Такий пошук оптимальної стратегії сканування (рис. 3) може бути використано при виготовленні деталей з більш високими механічними характеристиками шляхом SLM [33]. Крім того, при використанні стратегії сканування з поворотами на кожному наступному проході, на верхній поверхні виготовленої деталі було помічено пористу структуру, а на бічній – стовпчасті (дендритні) структури. Їх формування напряму впливає на механічні властивості деталі.

У роботі [34] було досліджено використання різних методик сканування в процесі SLM до-

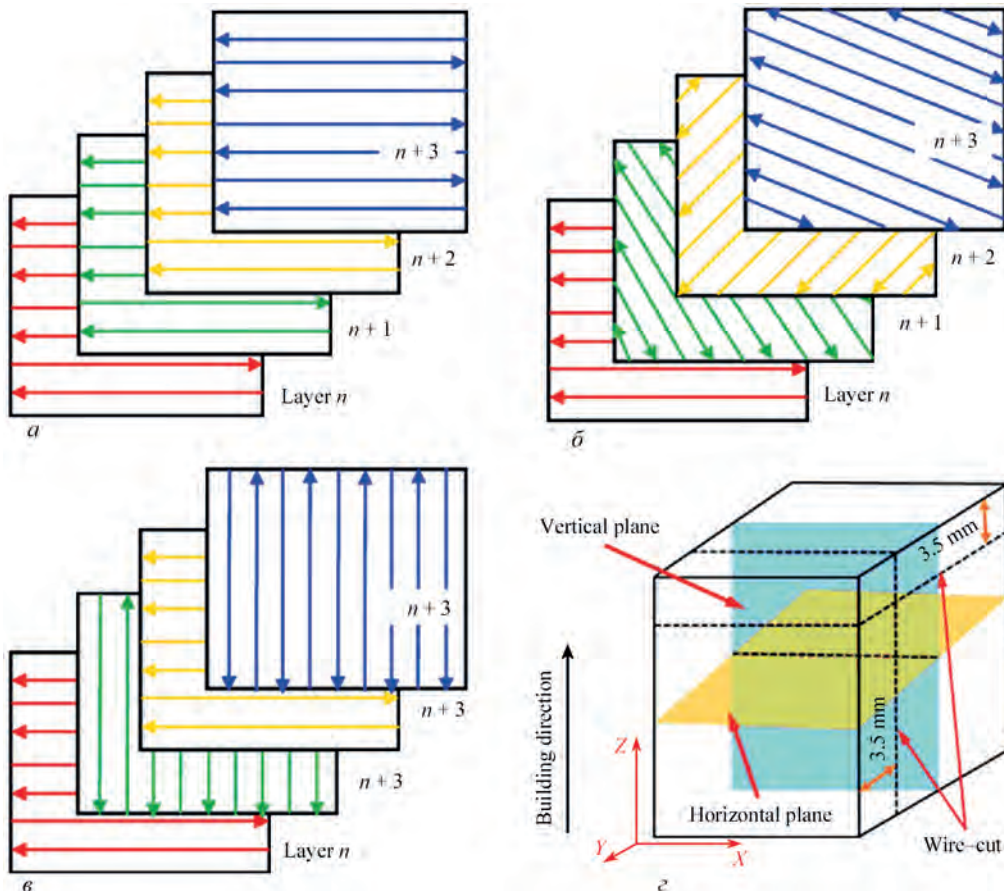


Рис. 3. Стратегії сканування, використані в роботі [33]: а – без повороту; б – з поворотом у 67,5°; в – з поворотом у 90°; г – індикація вертикальних та горизонтальних площин

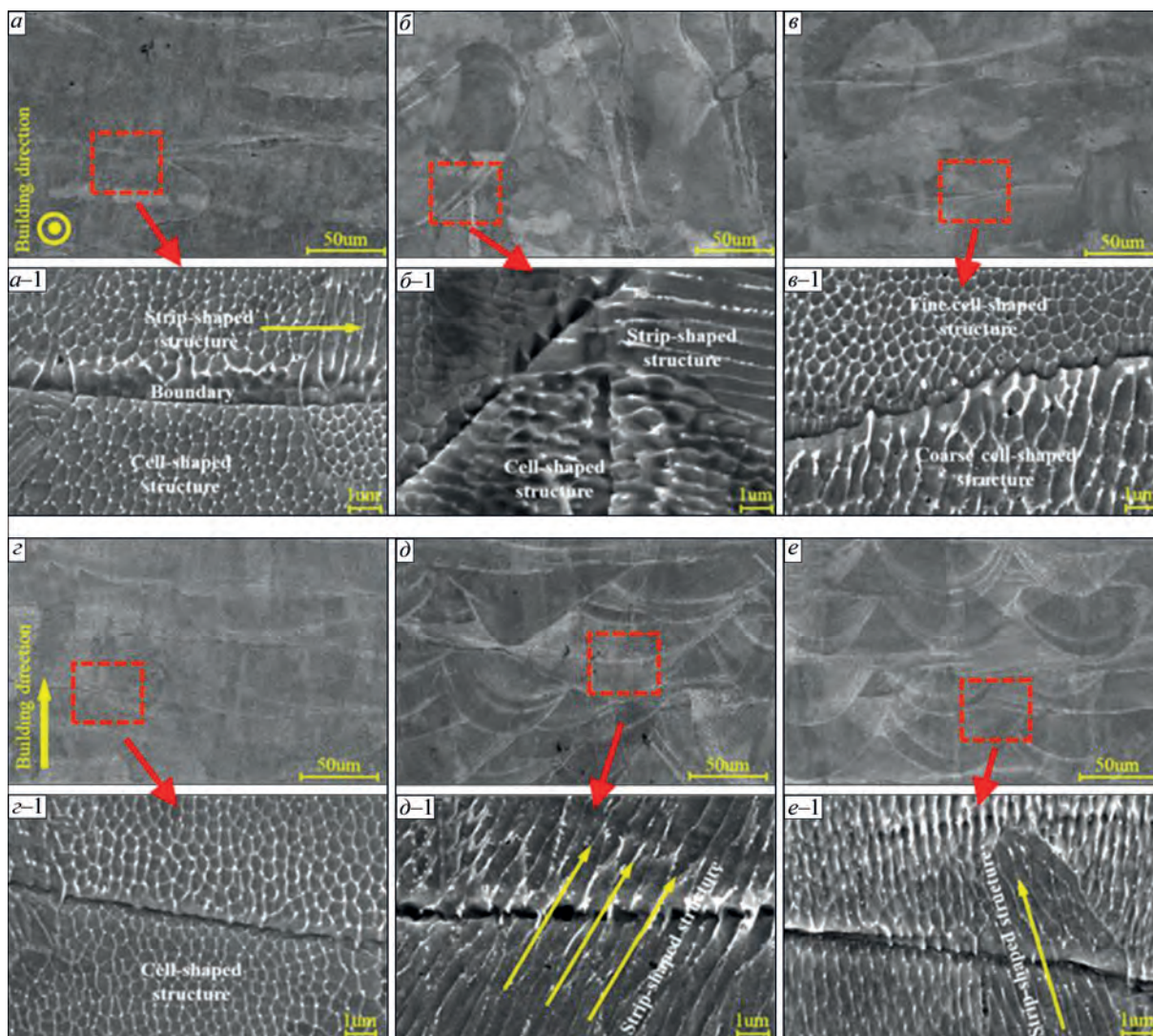


Рис. 4. Фото SEM-мікроскопії зразків: *a, z* – площини *XY* та *XZ* з куту ротaції стратегії в  $0^\circ$ ; *b, d* – площини *XY* та *XZ* з куту ротaції стратегії в  $67,5^\circ$ ; *c, e* – площини *XY* та *XZ* з куту ротaції стратегії в  $90^\circ$  [34]

слідних зразків, виготовлених зі сталі 316L з ціллю визначення оптимальної стратегії сканування при використанні даного матеріалу. Аналіз мікроструктури за допомогою EBSD та SEM-мікроскопії (рис. 4) показує, що стратегія сканування впливає на безперервність росту зерен через сусідні шари та зростання зерен всередині доріжки розплаву. Електрохімічні випробування вказали на явну різницю в корозійній стійкості перпендикулярно і паралельно напрямку та методики сканування. Точкова корозія є основною формою корозії нержавіючої сталі 316L і переважно виникає на кордонах ванни розплаву.

Існує багато експериментальних досліджень, що вивчають мікроструктури та механічні властивості зразків, виготовлених з Inconel 718 за допомогою SLM, однак при цьому існує всього декілька досліджень впливу параметрів лазерного випромінювання на мікроструктуру та механічні властивості таких деталей [35]. Ströbner та інші [36] довели, що мікроструктури зразків Inconel 718, виготовлених за допомогою SLM, були дуже

тонкими та орієнтованими вздовж напрямку побудови. Yi та ін. [37] виявили, що на нижньому краю ванни розплаву деталей, виготовлених зі сплаву Inconel 718, утворилась яскрава область у формі півмісяця, що складається з тонких колоноподібних дендритів, які мали таку саму орієнтацію, що й на поверхні ванни розплаву. Wan та ін. [38] досліджували вплив стратегії сканування на мікроструктуру та текстуру виготовленого SLM Inconel 718, виявивши ряд залежностей, що вказують на прямий вплив стратегії сканування на механічні властивості отриманих деталей. Popovich та ін. [39] довели здатність адитивного виробництва до виготовлення індивідуальних мікроструктур з заданими механічними властивостями. Крім цих досліджень, багато науковців зосередилися на вивченні впливу подальшої обробки, щоб комплексно покращити механічні характеристики деталей. Amato ін. [40] зазначили, що мікроструктура частини деталі, утвореної SLM, виявляє стовпчасті зерна незалежно від того, чи була вона паралельна або перпендикулярна напрямку побудови, до-

сліджували мікротвердість (за Віккерсом) із катаного матеріалу, отриманого за допомогою НІР та відпаленого матеріалу.

В роботі [41] було описано дослідження структури жароміцного сплаву Inconel 718, отриманого за допомогою SLM. Було детально проаналізовано вплив щільності вхідної енергії лазера ( $E$ , Дж/мм<sup>3</sup>) на щільність, фазовий склад, мікроструктуру, однорідність та механічні властивості зразків, створених за допомогою SLM. З експериментальних даних цього дослідження було зазначено, що морфологія поверхні та щільність зразків, створених за допомогою SLM, контролювалися за допомогою величини щільності потужності. Таким самим чином, за рахунок контролю величини щільності потужності, автори вважають, що можна контролювати і дендритну структуру, оскільки підвищення щільності потужності змушувало товщину дендритів експериментальних зразків.

Результати роботи [42] (рис. 5) показали, що сплав Inconel 718, виготовлений за допомогою SLM, демонструє невелике огрубіння границь зерен структури металу, а також послаблення вираженості його текстури, що відрізняється від явищ огрубіння границь зерен та невеликого посилення текстури кованого сплаву Inconel 718. Зразок, виготовлений за допомогою SLM, має менші залишкові напруження на стиск у порівнянні з деформованим сплавом, а значення зносу інструмента,

шорсткості поверхні та мікротвердості вищі, ніж такі у мікрофрезерованій деталі.

Більшість сучасних робіт, пов'язаних з корозійною стійкістю, показують, що деталі зі сталі 316L, виготовлені методами SLM, демонструють кращу корозійну стійкість відносно деталей зі сталі 316L зі структурою, отриманою при куванні матеріалу. Однак результати можуть бути відносно розрізненими [43–45]. У праці [46] було проаналізовано корозійну поведінку сталей 316L(WС – кована структура), 316L(SLM) та 316L(SLM-1050 – відпал при 1050 °С протягом 15 хв і гартування у воді) з урахуванням їх мікроструктури, залишкових напружень та фізико-хімічних властивостей пасивно сформованих плівок. Дана робота досить глибоко вивчила корозійну поведінку даних матеріалів, враховуючи легуючі та шкідливі домішки (рис. 6).

**Критика робіт.** У роботах, що вивчали вплив енергетичної складової процесів SLM на його результат, розглядалися поодинокі випадки аналізу процесу SLM для виконання певних завдань. Було помічено спроби створити загальну модель вивчення впливу змінних енергетичної складової процесів SLM. Так, результати моделювання структури верхніх шарів оброблюваної поверхні у роботі [16] було порівняно з результатами експериментів. Незважаючи на те, що ці результати добре узгоджувалися, дана модель не увійшла у широке використання через відсутність оцінки

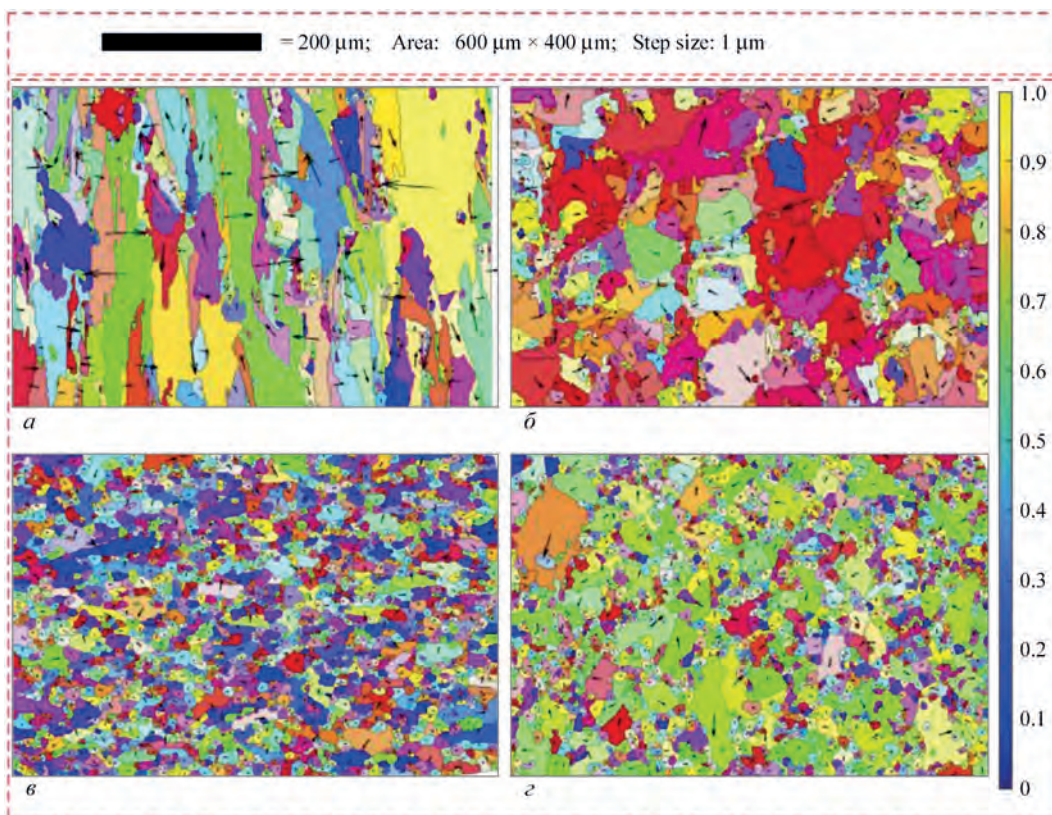


Рис. 5. Мікроструктура зерен у деформованих (б, з) та недеформованих (а, е) зразках сплаву Inconel 718, виготовлених за технологіями ковання (в, з) та селективного лазерного плавлення (а, б) [42]

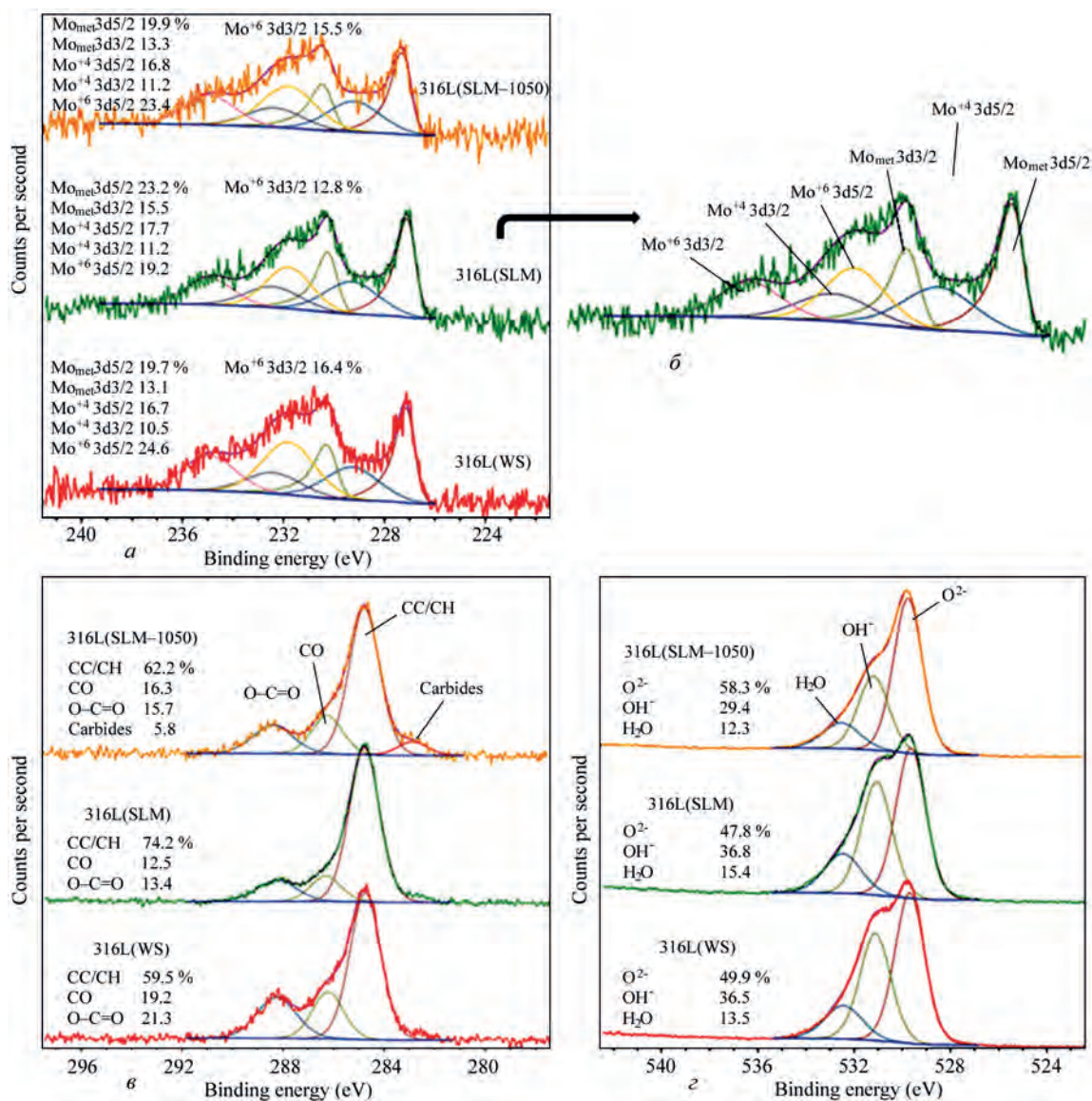


Рис. 6. Результати XPS-спектроскопії різних видів сталі 316L після обробки поверхонь: *a*, *б* – рівні молібденових домішок; *в* – рівні карбідів; *г* – рівні оксидів [46]

її можливостей в різних умовах. При цьому дана модель не була доведена до стану, щоб дозволяла використовувати її для загального розрахунку процесів SLM. Це, в свою чергу, призводить до того, що при вивченні схожих процесів у роботі [12] основою виступили кардинально інші праці.

Роботи, що вивчали можливості оптимізації SLM-процесу шляхом контролю величини розфокусування лазерного випромінювання, досить глибоко вивчили як переваги, так і недоліки, пов'язані з використанням процесу SLM таким шляхом. Однак через відносно невелику кількість робіт, що розглядали ці можливості, загальні виміри ефективності даної роботи у загальному плані є емпіричними і не доведеними до цілісної теорії, підкріпленої загальними закономірностями.

Розглянуті роботи, що вивчали методи збільшення технологічності мікроструктури зразків, отриманих шляхом SLM, концентрувались на

двох напрямках, а саме – контролю процесу утворення мікроструктури через знаходження оптимального шляху сканування та подачі порошку, а також виведення небажаних домішок у структурі зразка, побудованого шляхом SLM. Роботи, що звернули увагу на знаходження більш ефективного шляху сканування та подачі порошку, показали достатньо велику проблематику даної складової, оскільки схема рухання головки лазерного технологічного комплексу (ЛТК) в даному процесі грає велику роль як у мікроструктурі, так і у подальших характеристиках деталі. Так, на великій кількості деталей, що були вивчені у роботі [36], було помічено точкову корозію та пітинг, які негативно впливають на експлуатаційні характеристики деталі. І хоча інші роботи показують, що в певних випадках деталі, виготовлені методами SLM, демонструють кращу корозійну стійкість, ніж деталі з кованою структурою металу, питання загальної



стійкості деталей, виготовлених методами SLM, залишається досить актуальним.

З аналізу досліджень SLM-виробництва деталей ряду широко використовуваних металів було виявлено, що існує багато експериментальних досліджень, що аналізують кінцеву мікроструктуру та механічні властивості деталей, виготовлених за допомогою SLM. При цьому, на думку автора, існує недостатньо досліджень, зосереджених на вивченні впливу параметрів лазерного випромінювання на кінцеву мікроструктуру та механічні властивості деталей. Було помічено певну закономірність: контроль над процесом SLM розглядається у формі спеціальних індивідуальних до кожного технічного завдання режимів обробки. Однак отриманих в результаті досліджень даних недостатньо для того, щоб сформулювати закономірності щодо впливу окремих характеристик лазерного випромінювання на мікроструктуру в деталях, виготовлених за допомогою SLM.

### Висновки

*Проблеми поглиблення знань щодо процесу SLM.* Головною проблемою подальшої оптимізації процесу SLM є відсутність загальних закономірностей впливу параметрів SLM на структуроутворення, геометрію та рівень механічних характеристик одержаних зразків, які б можна було враховувати при розробці відповідної методики управління параметрами технологічного процесу. Це дозволило б підвищити якість та рівень експлуатаційних та функціональних властивостей одержаних зразків та розробити технологічні рекомендації із виготовлення виробів для різних галузей промисловості, з врахуванням відповідних експлуатаційних вимог. Для перевірки цього тезису було проведено літературний аналіз стану дослідження процесів виробництва методами SLM.

З огляду на це, вважається доцільним підкреслити необхідність утворення систематизованого комплексного підходу до оптимізації процесу SLM. Отримані за допомогою такого підходу закономірності впливу характеристик лазерного випромінювання на мікроструктуру та механічні властивості деталей, виготовлених за допомогою технології SLM, можна використати для створення комплексу технологічних заходів для виробничих процесів SLM. Впровадження цього комплексу технологічних заходів SLM, на думку автора, дозволить вирішити широкий комплекс завдань, які ставлять різні галузі промисловості при виготовленні широкого спектру виробів.

### Список літератури/References

- 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.
- 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.
- Yang, W., Tarn, 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.
- Mukherjee, T., Manvatkar, V., De, A., DebRoy, T. (2017) Dimensionless numbers in additive manufacturing. *Journal of Applied Physics*, **121**(6), id.064904.
- Ion, J., Shercliff, H., Ashby, M. (1992) Diagrams for laser materials processing. *Acta Metallurgica et Materialia*, **40**(7), 1539–1551.
- Thomas, M., Baxter, G., Todd, I. (2016) Normalised model-based processing diagrams for additive layer manufacture of engineering alloys. *Acta Materialia*, **108**, 26–35.
- Jiang, H., Li, Z., Feng, T. et al. (2019) Factor analysis of selective laser melting process parameters with normalised quantities and Taguchi method. *Optics & Laser Technology*, **119**, id.105592.
- Darvish, K., Chen, Z., Pasang, T. (2016) Reducing lack of fusion during selective laser melting of CoCrMo alloy: Effect of laser power on geometrical features of tracks. *Materials & Design*, **112**, 357–366.
- Li, Z., Voisin, T., McKeown, J. et al. (2019) Tensile properties, strain rate sensitivity, and activation volume of additively manufactured 316L stainless steels. *International Journal of Plasticity*, **120**, 395–410.
- Hou, H., Simsek, E., Ma, T. et al. (2019) Fatigue-resistant high-performance elastocaloric materials made by additive manufacturing. *Science*, **366**(6469), 1116–1121.
- Ma, M., Wang, Z., Zeng, X. (2017) A comparison on metallurgical behaviors of 316L stainless steel by selective laser melting and laser cladding deposition. *Materials Science and Engineering: A*, **685**, 265–273.
- Jiang, H., Li, Z., Feng, T. et al. (2020) Effect of Process Parameters on Defects, Melt Pool Shape, Microstructure, and Tensile Behavior of 316L Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, **34**(4), 495–510.
- Kurzynowski, T., Gruber, K., Stopyra, W. et al. (2018) Correlation between process parameters, microstructure and properties of 316 L stainless steel processed by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, **718**, 64–73.
- Martin, A., Calta, N., Khairallah, S. et al. (2019) Dynamics of pore formation during laser powder bed fusion additive manufacturing. *Nature Communications*, **10**(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10009-2>
- Tang, C., Tan, J., Wong, C. (2018) A numerical investigation on the physical mechanisms of single-track defects in selective laser melting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **126**, 957–968.
- Zheng, M., Wei, L., Chen, J. et al. (2021) On the role of energy input in the surface morphology and microstructure during selective laser melting of Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, **11**, 392–403.
- Zheng, M., Wei, L., Chen, J. et al. (2019) A novel method for the molten pool and porosity formation modelling in selective laser melting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **140**, 1091–1105.
- Zheng, M., Wei, L., Chen, J. et al. (2019) Surface morphology evolution during pulsed selective laser melting: Numerical and experimental investigations. *Applied Surface Science*, **496**, id.143649.
- Deng, C., Kang, J., Feng, T. et al. (2018) Study on the Selective Laser Melting of CuSn10 Powder. *Materials*, **11**(4), 614.
- Kempen, K. (2015) *Expanding the materials palette for Selective Laser Melting of metals (Ph.D.)*. KU Leuven University, Belgium.
- Wang, L., Wei, Q., Shi, Y. et al. (2011) Experimental Investigation into the Single-Track of Selective Laser Melting of IN625. *Advanced Materials Research*, **233-235**, 2844–2848.
- Yadroitsev, I., Yadroitsava, I., Bertrand, P., Smurov, I. (2012) Factor analysis of selective laser melting process parameters

- and geometrical characteristics of synthesized single tracks. *Rapid Prototyping Journal*, 18(3), 201–208.
23. Promopattum, P., Yao, S., Pistorius, P., Rollett, A. (2017) A Comprehensive Comparison of the Analytical and Numerical Prediction of the Thermal History and Solidification Microstructure of Inconel 718 Products Made by Laser Powder-Bed Fusion. *Engineering*, 3(5), 685–694.
  24. Brandt, M. (2016) *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications*. Duxford: Woodhead Publishing, 259–279.
  25. Metelkova, J., Kinds, Y., Kempen, K. et al. (2018) On the influence of laser defocusing in Selective Laser Melting of 316L. *Additive Manufacturing*, 23, 161–169.
  26. Paraschiv, A., Matache, G., Condruz, M. et al. (2021) The Influence of Laser Defocusing in Selective Laser Melted IN 625. *Materials*, 14(13), 34–47.
  27. Zhou, C., Hu, S., Shi, Q. et al. (2020) Improvement of corrosion resistance of SS316L manufactured by selective laser melting through subcritical annealing. *Corrosion Science*, 164, id.108353.
  28. McLouth, T., Bean, G., Witkin, D. et al. (2018) The effect of laser focus shift on microstructural variation of Inconel 718 produced by selective laser melting. *Materials & Design*, 149, 205–213.
  29. Laleh, M., Hughes, A., Xu, W. et al. (2020) Unanticipated drastic decline in pitting corrosion resistance of additively manufactured 316L stainless steel after high-temperature post-processing. *Corrosion Science*, 165, id.108412.
  30. Duan, Z., Man, C., Dong, C. et al. (2020) Pitting behavior of SLM 316L stainless steel exposed to chloride environments with different aggressiveness: Pitting mechanism induced by gas pores. *Corrosion Science*, 167, id.108520.
  31. Kong, D., Ni, X., Dong, C. et al. (2018) Heat treatment effect on the microstructure and corrosion behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting for proton exchange membrane fuel cells. *Electrochimica Acta*, 276, 293–303.
  32. Trelewicz, J., Halada, G., Donaldson, O., Manogharan, G. (2016) Microstructure and Corrosion Resistance of Laser Additively Manufactured 316L Stainless Steel. *JOM*, 68(3), 850–859.
  33. 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.
  34. 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.
  35. Wang, X., Kang, J., Wang, T. et al. (2019) Effect of Layer-Wise Varying Parameters on the Microstructure and Soundness of Selective Laser Melted INCONEL 718 Alloy. *Materials*, 12(13), id.2165.
  36. Ströbner, J., Terock, M., Glatzel, U. (2015) Mechanical and Microstructural Investigation of Nickel-Based Superalloy IN718 Manufactured by Selective Laser Melting (SLM). *Advanced Engineering Materials*, 17(8), 1099–1105.
  37. Yi, J., Kang, J., Wang, T. et al. (2021) Microstructure and mechanical behavior of bright crescent areas in Inconel 718 sample fabricated by selective laser melting. *Materials & Design*, 197, id.109259.
  38. Wan, H., Zhou, Z., Li, C. et al. (2018) Effect of scanning strategy on grain structure and crystallographic texture of Inconel 718 processed by selective laser melting. *Journal of Materials Science & Technology*, 34(10), 1799–1804.
  39. Popovich, V., Borisov, E., Popovich, A. et al. (2017) Functionally graded Inconel 718 processed by additive manufacturing: Crystallographic texture, anisotropy of microstructure and mechanical properties. *Materials & Design*, 114, 441–449.
  40. Amato, K., Gaytan, S., Murr, L. et al. (2012) Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting. *Acta Materialia*, 60(5), 2229–2239.
  41. Liu, X., Wang, K., Hu, P. (2021) Formability, Microstructure and Properties of Inconel 718 Superalloy Fabricated by Selective Laser Melting Additive Manufacture Technology. *Materials*, 14(4), 991.
  42. Ji, H., Gupta, M., Song, Q. et al. (2021) Microstructure and machinability evaluation in micro milling of selective laser melted Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 348–362.
  43. Sander, G., Thomas, S., Cruz, V. et al. (2017) On The Corrosion and Metastable Pitting Characteristics of 316L Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(6), 250–257.
  44. Chao, Q., Cruz, V., Thomas, S. et al. (2017) On the enhanced corrosion resistance of a selective laser melted austenitic stainless steel. *Scripta Materialia*, 141, 94–98.
  45. Zhang, Y., Liu, F., Chen, J., Yuan, Y. (2017) Effects of surface quality on corrosion resistance of 316L stainless steel parts manufactured via SLM. *Journal of Laser Applications*, 29(2), 022306.
  46. Vignal, V., Voltz, C., Thiébaud, S. et al. (2021) Pitting Corrosion of Type 316L Stainless Steel Elaborated by the Selective Laser Melting Method: Influence of Microstructure. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(7), 5050–5058.

## PROBLEMS AND PROSPECTS OF STUDYING THE PROCESSES OF SELECTIVE LASER MELTING OF MATERIALS FOR AEROSPACE ENGINEERING (Review)

M.V. Sokolovskyi

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: m\_sokolovskyi@paton.kiev.ua

In this work in order to determine the relevant directions of research of different scientific components of the process of selective laser melting (SLM), as well as technological measures affecting the final structure, mechanical and service characteristics of a manufactured part, a literary review of the materials was made devoted to different directions of research of SLM technology. The directions of scientific works considered in this review were: research and deepening knowledge on the influence of the energy component of SLM process; possibilities of SLM process modification by the control of laser focus value; study of modes and methods of SLM processing as well as final microstructure of samples; study of corrosion resistance of products, manufactured using SLM. Based on the results of the literary analysis, the problems and prospects of studying SLM processes for materials of aerospace industry are shown, the need in creating a systematic comprehensive approach to the study of the components of SLM process, as well as deepening knowledge about the technological capabilities of its use. 46 Ref., 6 Fig.

*Keywords: selective laser melting (SLM), additive manufacturing, powder metallurgy, control of focal spot size, scanning strategy, metals of aerospace industry.*

Надійшла до редакції 30.06.2022