

УДК 621.9.048:621.791.262

**С. В. Аджамський**<sup>1,2</sup>, д-р філософії, ORCID 0000-0002-6095-8646**Т. В. Балаханова**<sup>3,\*</sup>, к.т.н., ORCID 0000-0003-2493-218X**О. Є. Барановська**<sup>3</sup>, к.т.н., ORCID 0000-0002-4106-5797**Р. В. Подольський**<sup>2,3,4</sup>, д-р філософії, ORCID 0000-0002-0288-0641<sup>1</sup> Інститут транспортних систем та технологій НАН України<sup>2</sup> Адитивні лазерні технології України<sup>3</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України<sup>4</sup> Інститут прикладних систем управління НАН України\* Автор для листування: [tatja.balakhanova@gmail.com](mailto:tatja.balakhanova@gmail.com)

## СУПЕРЕЧЛИВІСТЬ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СКАНУВАННЯ НА ГЕОМЕТРІЮ ТА РОЗМІРИ ВАННИ РОЗПЛАВУ ПІД ЧАС ПРОЦЕСУ LPBF (ОГЛЯД)

**Анотація.** Лазерне плавлення в порошковому шарі (LPBF) є однією з провідних технологій адитивного виробництва металевих деталей складної геометрії, що дозволяє виготовляти як суцільні, так і конструкційно задані пористі конструкції із заданими характеристиками. Проте широке промислове застосування технології LPBF стримується наявністю дефектів – пористості, залишкових напружень, неповного розплавлення порошку та нерівномірності шарів. Ці дефекти суттєво впливають на механічні властивості, точність розмірів і корозійну стійкість готових виробів. Центральним елементом процесу є ванна розплаву, стабільність якої визначає формування мікроструктури, якість сплаву та поведінку багатошарових конструкцій. Проте дані про поведінку ванни розплаву залишаються суперечливими: результати експериментів і чисельного моделювання часто не збігаються, що ускладнює однозначну оцінку впливу технологічних параметрів. Відомо, що взаємодія таких факторів, як потужність лазера, швидкість сканування, розташування зразка на платформі, нахил променя та газовий потік, часто має нелінійний та складнопредбачуваний характер. Через це формування дефектів і морфологія треків можуть суттєво відрізнятися навіть при аналогічних параметрах процесу, що підкреслює високий рівень невизначеності та суперечливості даних. У статті узагальнено наявні дослідження, що аналізують формування одиничних треків та багатошарових структур, підкреслено невідповідності між експериментальними спостереженнями та чисельними моделями, а також виділено ключові фактори, які потребують подальшого вивчення. Таким чином, можна відзначити значний вплив численних параметрів лазерного плавлення, а

© А. В. Аджамський, Т. В. Балаханова, О. Є. Барановська, Р. В. Подольський, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

також складність і багатофакторність процесу. Окрім впливу окремих параметрів, важливу роль відіграє їх взаємодія, яка досліджена значно менше через необхідність проведення масштабних експериментів із високою точністю. Отримані знання про взаємозв'язок нестабільності процесу з кутом нахилу лазерного променя та напрямком газових потоків у поєднанні з іншими параметрами допоможуть глибше зрозуміти причини змін характеристик металевих виробів. Аналіз проблем і перспектив дослідження одиничних та багатощарових треків у ваннах розплаву дозволяє поглибити розуміння процесів LPBF, сприяти визначенню оптимальних параметрів технології та підвищенню якості виробів, що у підсумку забезпечує більш точне налаштування процесу та ефективну оцінку властивостей порошкових сплавів.

**Ключові слова:** лазерне плавлення порошкових матеріалів, одиничні треки, ванна розплаву, замкова щілина, параметри процесу LPBF.

**Посилання для цитування:** Суперечливість впливу параметрів сканування на геометрію та розміри ванни розплаву під час процесу LPBF (огляд) / А. В. Аджамський, Т. В. Балаханова, О. Є. Барановська, Р. В. Подольський // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2026. Вип. 40. С. 79-97. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-005>

**Актуальність проблеми.** У процесі лазерного сплавлення порошкових матеріалів (LPBF) взаємодія лазера з матеріалом призводить до утворення ванни розплаву, яка є основою формування заданої геометрії шляхом пошарового нарощування. Якість кінцевої конструкції безпосередньо залежить від цього процесу. Якщо підведення тепла недостатнє або надмірне, можуть виникати дефекти, такі як неспровари або пористість за типом «замкової щілини». Висока активність гідродинаміки процесів у ванні розплаву може сприяти розбризкуванню, утворенню грудочок або нерівностей, що негативно впливає на міцність і цілісність матеріалу. Тому детальне вивчення взаємодії на рівні ванни розплаву та її впливу на поверхню відіграє ключову роль у вдосконаленні технології.

**Мета роботи.** Метою даної роботи є узагальнення сучасних результатів досліджень щодо технології, технологічних особливостей, дефектності, впливу різних лазерних систем та фокусної плями на кінцеву якість деталей, виготовлених методом лазерного плавлення в порошковому шарі (LPBF), а також систематизація знань про ключові процеси, що визначають їх мікроструктуру, фізико-механічні властивості та якість виробів. Особлива увага приділяється аналізу факторів, що впливають на стабільність ванни розплаву, формування одиничних та багатощарових треків, а також виявленню суперечливості та невизначеності даних у сучасних дослідженнях. Робота спрямована

на створення цілісного огляду, який дозволяє визначити основні тенденції, відкриті наукові питання та перспективи подальших досліджень у галузі LPBF.

**Матеріали і методи досліджень.** Представлена робота заснована на ретельному бібліографічному огляді сучасних науково-технічних публікацій, що стосуються особливостей процесу LPBF і властивостей отриманих матеріалів. Вихідними даними слугували бази даних платформ Springer, ResearchGate, ScienceDirect, MDPI, Google Scholar по публікаціям за період 2020-2025 рік по ключовим словам, що застосовані в статтях. В результаті проведеного аналізу публікацій з вище згаданих баз даних, з виключенням дублюючих публікацій, було отримано масив даних – 6406 публікації. Для підвищення точності пошуку та коректного відбору релевантних джерел первинний аналіз бібліографічних даних виконувався в програмному забезпеченні VOSviewer [1] з метою звуження кола результатів пошуку та забезпечення комплексного аналізу сучасного стану досліджень у сфері LPBF, визначення кількості публікацій, що публікуються з найбільшою кількістю однакових ключових слів, їх спорідненостями з іншими ключовими словами (рис. 1) та послідовного розподілу по кластерам за роком та частотою використання слів в статтях (рис. 2) відповідно до поставленої мети дослідження (огляду).

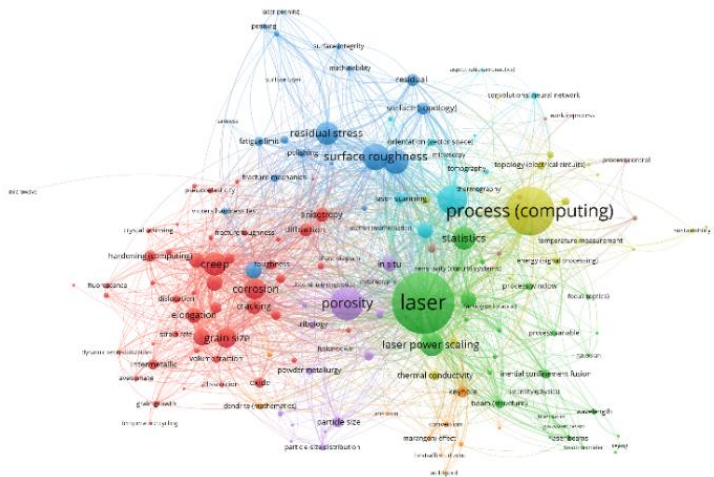


Рисунок 1 – Розподіл по кластерам найбільшої кількості ключових слів, їх взаємозв'язок та спільне використання в застосованих в роботах стосовно LPBF-технології



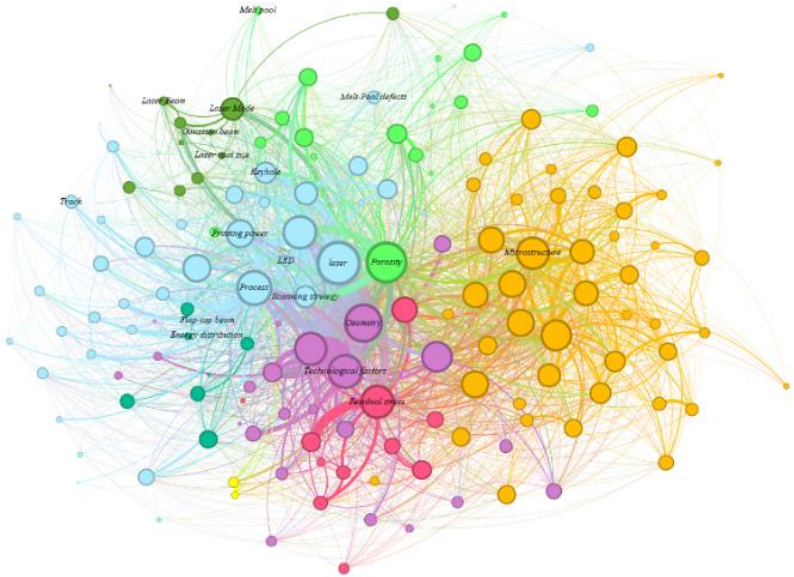


Рисунок 3 – Розташування в кластері ключових слів з літературних джерел, за якими виконаний аналіз; місце в кластері відповідає частоті використання

**Результати досліджень та їх обговорення.** В LPBF технологіях об'єм деталі створюється шляхом послідовного наплавлення порошкового матеріалу, який під дією лазерної енергії швидко плавиться і твердне, визначаючи фінальні характеристики виробу (рис. 4).

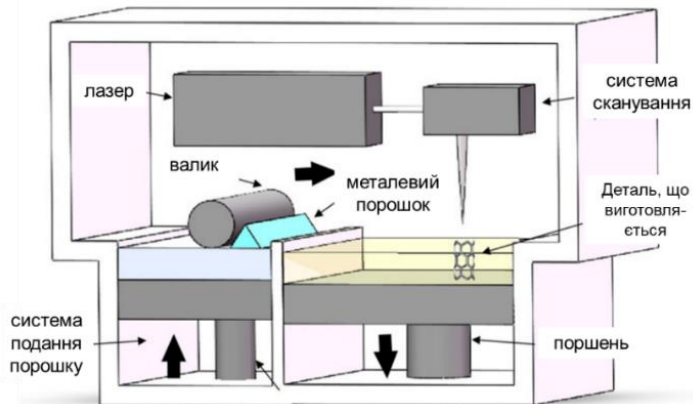


Рисунок 4. – Схематичне зображення процесу LPBF [3]

Дослідження таких параметрів, як потужність лазера, швидкість сканування, властивості порошку та стратегія обробки, допомагає краще зрозуміти вплив взаємодії лазера з матеріалом на формування наплавленого шару.

Штучний інтелект, зокрема методи машинного навчання, може допомогти виявити такі закономірності, але його застосування в цій сфері пов'язане з низкою труднощів. Серед них – складність збору даних, необхідність підбору відповідного алгоритму та детальний аналіз взаємозв'язку між різними параметрами процесу. Вплив основних параметрів процесу – потужності, швидкості сканування, діаметра плями лазера – досліджений досить детально. Складено карти-матриці впливу цих параметрів на характеристики ванни розплаву (як елементарного еталона оцінки взаємодії), механічні властивості, твердість, щільність, шорсткість та інші характеристики [3, 4]. Карти потужності та швидкості забезпечують швидку візуалізацію аналітичних моделей, що визначають області дефектів пористості в LPBF. Однак при застосуванні цих даних для машинного навчання дослідники стикаються з низкою труднощів. Часто дані отримані розрахунковим шляхом на основі мінімальної кількості експериментальних результатів. Крім того, вони суттєво відрізняються після виготовлення на різних машинах 3D-друку [5].

Ступінь впливу основних факторів на характеристики металевих конструкцій відрізняється, проте простежуються деякі загальні тенденції.

Технологічні параметри, такі як потужність лазера та швидкість сканування, мають значний вплив на процес адитивного виробництва та формування кінцевих властивостей деталей [6-8]. Потужність лазера визначає інтенсивність енергії, що передається на матеріал, що впливає на глибину та ширину розплавленої ванни [9]. Зміна основних параметрів сканування, зокрема потужності лазера, швидкості переміщення променя, безпосередньо впливає на тепловий баланс у зоні обробки, що призводить до зміни режиму плавлення ванни розплаву (рис. 5).

Зі збільшенням потужності зростає кількість енергії, спрямованої в матеріал, що може покращити механічні властивості. Однак також існує ризик виникнення дефектів, таких як пористість і надмірна сегрегація компонентів матеріалу.

Швидкість сканування, своєю чергою, регулює час, протягом якого лазер діє на одну область, що впливає на кількість підведеної енергії, яка визначає процеси охолодження та кристалізації розплаву. Висока швидкість сканування може призвести до недостатнього прогріву

матеріалу, що знижує щільність і збільшує пористість, тоді як надто низька швидкість може сприяти перегріву, що викликає інші дефекти. Регулювання швидкості сканування безпосередньо впливає на продуктивність процесу виготовлення деталей. За вищих значень швидкість сканування лазера впливає на розмір ванни розплаву менше, ніж потужність лазера.

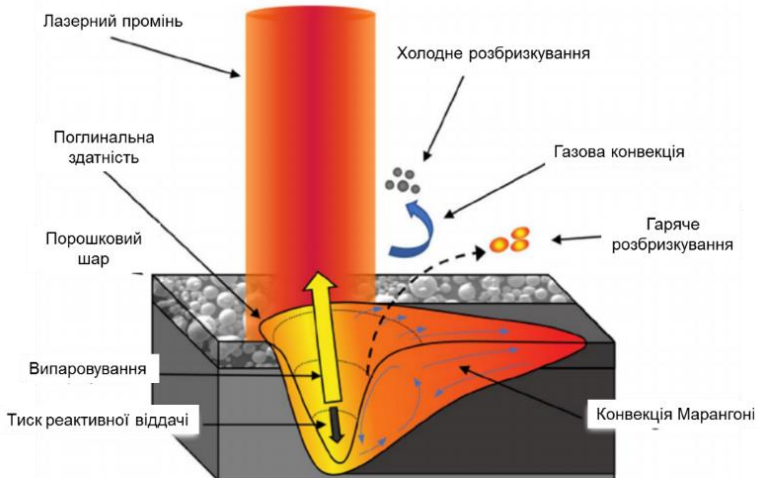


Рисунок 5 – Взаємодія лазерного променя з порошковим шаром та формування ванни розплаву з урахуванням основних фізичних явищ [9]

При дослідженні нітінола та інших сплавів на основі нікелю [11] були зафіксовані відхилення від цієї залежності, зокрема нелінійні зв'язки між параметрами лазера та формою ванни розплаву.

Регулювання діаметра плями лазера дозволяє контролювати точність формування металевого виробу. Збільшена пляма лазера за високої потужності сприяє більш ефективному використанню порошку та підвищенню продуктивності. При цьому необхідно враховувати діаметр, форму профілю розподілу енергії, напрямок руху, ступінь розфокусування лазерного променя та інші параметри [12]. При зменшенні діаметра лазерного променя, як правило, спостерігається збільшення глибини ванни розплаву. Попри високу точність формування треків, малий діаметр лазера не здатний забезпечити ванну розплаву великого розміру та розплавити великі частинки порошку.

На практиці широко використовується параметр питомої щільності енергії, розрахунок якого найчастіше включає саме ці три параметри (потужність та швидкість сканування, діаметр лазера). Ці параметри

застосовуються для оцінки окремих треків, тоді як для об'ємних зразків у розрахунок щільності енергії також включаються відстань між штрихами та товщина шару порошку (табл. 1). Загалом спостерігається тенденція до збільшення глибини та ширини ванни розплаву, при цьому зростання щільності енергії особливо впливає на глибину. Висока щільність енергії призводить до підвищення температури ванни розплаву, що викликає збільшення тиску віддачі, випаровування матеріалу та утворення бульбашок газу, захоплення у ванні розплаву. Це, своєю чергою, сприяє формуванню пористості.

Таблиця 1 – Основні формули для обчислення щільності енергії в процесі LPBF

Лінійна щільність енергії (LED) [13, 14]	$P/V$	визначає кількість енергії, що вноситься на одиницю траєкторії лазера
Площева щільність енергії (AED) Може включати як радіус лазера [7], або відстань між треками [15]	$\frac{P}{V \cdot r}$ $\frac{P}{V \cdot H}$	визначає розподіл енергії по площі
Об'ємна щільність енергії (VED) [16]	$\frac{P}{V \cdot H \cdot L}$	характеризує енергію, подану на одиницю об'єму, з урахуванням відстані між штрихами та товщини шару
Питома щільність енергії (SED) [14]	$\frac{P}{V \cdot W \cdot D}$	модифікована версія VED, у якій враховувалися фактичні розміри ванни розплаву. У певній мірі SED забезпечує більш точне визначення поданої енергії

де  $P$  – потужність лазера (Вт),  $V$  – швидкість сканування (мм/с),  $H$  – відстань між штрихами (мм),  $L$  – товщина шару (мм),  $W$  – ширина ванни розплаву (мм),  $D$  – глибина ванни розплаву (мм),  $r$  – радіус плями лазера (мм).

Параметри потужності та швидкості, а також їх взаємодія мають статистично значущий вплив. Однак використання лише цих параметрів не забезпечує достатньо точних прогнозів показників якості для окремих треків [17]. У дослідженнях основна увага приділяється таким параметрам, як швидкість сканування, потужність та розмір пучка лазера, оскільки вони демонструють високу кореляцію з характеристиками отриманих зразків. Урахування лише об'ємної щільності енергії (потужності, швидкості сканування, діаметра променя) може сприяти формуванню стабільних треків, мінімізації пористості та усуненню коливань рельєфу поверхні треків, але не гарантує їх досягнення. Інші параметри та умови також відіграють

важливу роль, зокрема кількість зразків, місцезнаходження та орієнтація зразків на платформі побудови, особливості оптичної системи, товщина та матеріал платформи побудови, стратегія від шару до шару, потік технологічного газу, використовувани машини та інші фактори [18]. Ключовими параметрами також є хімічний склад порошку, його форма і дисперсність, висота шару, розміри камери та платформи побудови, відстань між шарами, характеристики газового середовища (наявність, тип, швидкість), напрямок сканування та інші параметри.

Часто зустрічаються дані про вплив різних факторів на стабільність і якість процесу сканування, а також на характеристики отриманих зразків та металевих деталей. Наприклад, для різних матеріалів отримано розбіжні дані про вплив параметрів на шорсткість поверхні. При дослідженні титанових сплавів встановлено, що фактори, які впливають на ступінь шорсткості, розташовуються від найбільш значущого до найменш значущого наступним чином: термообробка > потужність лазера > кут шаблону сканування > схема штрихування > швидкість сканування. Шорсткість пов'язують як з формуванням нестабільної ванни розплаву, так і з іншими факторами, такими як швидкість охолодження та взаємодія лазера з порошковим матеріалом, що можуть викликати утворення нерівностей та дефектів на поверхні [20]. Також з шорсткістю пов'язують кут падіння лазерного променя, тобто розташування зразка на платформі. У роботі [21] показано, що найменша шорсткість спостерігається при нормальному падінні лазера (під кутом  $90^\circ$  до поверхні платформи побудови). Зразки, розміщені в протилежних квадрантах платформи побудови, продемонстрували сильну кореляцію з шорсткістю поверхні, що вказує на значний вплив розташування зразка. Таким чином, розташування зразків на платформі побудови є одним із значущих факторів, що впливають на якість та характеристики металевих конструкцій. У дослідженнях відзначена необхідність його врахування при аналізі процесу формування металевих деталей [23-25].

При аналізі розташування зразків на платформі побудови зазвичай розглядаються зміни напрямку лазерного променя, що призводить до зміни форми та площі його перерізу, а також відхилення від фокусу. Наприклад, у роботі [26] спостерігалось збільшення шорсткості при нормальному падінні лазера, але при нахиленому розташуванні платформи.

Дослідження впливу фокусу лазера досить широко представлені в літературі. Так, у роботах [27-29] показано, що розташування зразка на платформі побудови визначає кут нахилу лазерного променя відносно

порошкового шару. Ванни розплаву демонструють різну ширину та глибину, відхиляючись від номінальних значень залежно від розташування платформи, що призводить до зміни рівня пористості, шорсткості та загальної структури.

Зміна профілю інтенсивності лазерного променя призводить до трансформацій теплового поля та зміни гідродинамічних процесів у розплавленій ванні, що, у свою чергу, впливає на її розміри, форму ванни розплаву та морфологію зерен. Загалом, при нахилі лазерного променя його профіль стає більш витягнутим і набуває еліптичної форми (рис. 6), що знижує щільність енергії [30].

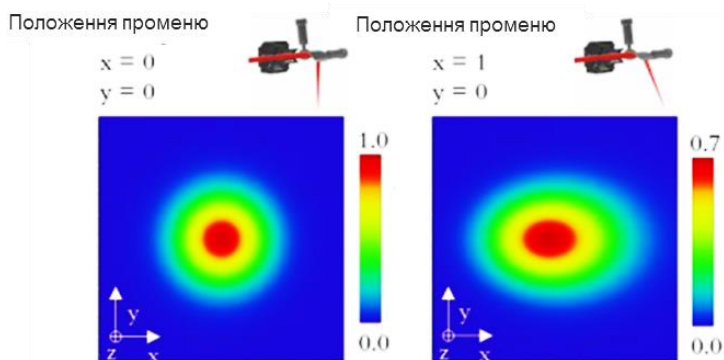


Рисунок 6 – Розподіл інтенсивності лазерного фокуса для нормального положення променя лазера та при відхиленні від осі [31]

При відхиленні променя від нормалі ( $0 - 20^\circ$ ) його профіль подовжується, що веде до зниження потужності. Вже при куті  $17^\circ$  пікова температура зменшується на 273 К і зміщується на 100 мкм уздовж напрямку сканування. У роботі [30] показано зниження потужності до 13,4% при нахилі лазерного променя від  $90^\circ$  до  $60^\circ$  або  $120^\circ$ . При цьому ступінь поглинання лазерного випромінювання суттєво не змінюється.

Окрім зміни перерізу лазерного променя, необхідно враховувати його збіжний чи розбіжний характер [24], тобто позитивне або негативне розфокусування, що також впливає на морфологію ванни розплаву, що формується.

У результаті формування еліптичної форми плями лазера на ділянках, віддалених від центру, нагріта область шару порошку відрізняється від центральної області, і плавлення цього порошку відбувається по-різному. Нахил променя викликає нахил розплавленої ванни. Спостерігається формування ванни розплаву під кутом при

падінні променя 15-20°. Тому поперечний переріз розплавленої ванни нахилений, особливо в випадках формування «замкової щілини» нахил стає помітним.

При цьому показано, що суттєвого впливу нахилу ванни розплаву на загальну мікроструктуру та механічні властивості не спостерігалось, на відміну від шорсткості, яка спостерігалася на периферії платформи побудови [32].

Вплив нахилу лазерного променя на морфологію ванни розплаву одиничних треків не має однозначного трактування. У дослідженні [30] чисельна модель передбачає, що при нахилі лазерного променя глибина розплавленої ванни дещо зменшується через зниження щільності енергії, тоді як її ширина незначно збільшується.

Результати рентгенівської КТ та LOM-візуалізації показали, що зразки, розташовані на периферії (кут відхилення лазерного променя 17°), характеризуються підвищеною пористістю та меншою глибиною ванни розплаву порівняно зі зразками, які знаходяться в центрі.

Водночас повідомляється, що за умови, коли напрямком руху лазерного променя збігається з напрямком сканування, спостерігається збільшення глибини ванни розплаву. Також спостерігалися зміни глибини залягання пор в залежності від кута падіння лазера, що було пов'язано з величиною заглиблення при формуванні ванни розплаву.

Радіальну відстань від центру робочої пластини називають одним з факторів, який має найбільший вплив на механічні характеристики, включаючи міцність і подовження. Однак це дещо суперечить висновкам, представленим у роботі [32]. У дослідженні [34] виявлено, що фокальна площа має чашоподібну форму з найменшою висотою в центрі робочої зони та радіальною симетрією. Це свідчить про можливі проблеми, пов'язані з розфокусуванням лазера в процесі LPBF.

При вивченні впливу розташування зразка в камері побудови встановлено, що зміни в горизонтальному напрямку мають більш значний вплив на формування структури, ніж висота зразків. Подібні висновки представлені в роботі [35], що вказує на більш значний вплив інших параметрів порівняно зі зміною фокуса лазера.

При обговоренні впливу розташування зразків на платформі побудови найчастіше розглядаються зміни профілю розподілу енергії у лазерному промені, його діаметра та, відповідно, щільності енергії. При вивченні впливу положення зразків на платформі слід враховувати не тільки зміну фокусної відстані (її подовження), а також зміну форми лазерної плями і розподілу енергії в ній. Крім цього, на зразок у камері впливає наявність «глухих зон», швидкість та напрям потоку і щільність інертного газу [36], розподіл порошку [37], змінний температурний

градієнт, на що впливає навіть розташування зразків відносно вікна камери [38] та режими подання та дозування порошку [33], а також інші параметри (рис. 7).

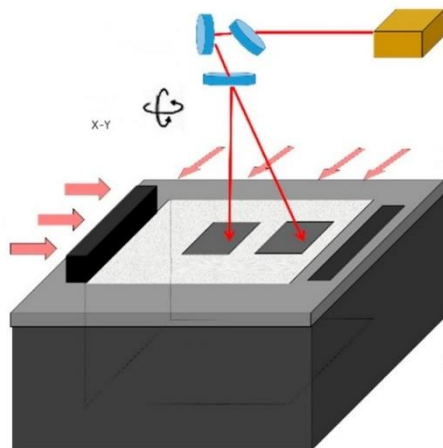


Рисунок 7 – Схема LPBF: рух сканера та кут падіння лазера на різних ділянках платформи [32]

Розташування зразків у камері під час побудови впливає на їх охолодження і їхню кінцеву форму. Так, згідно з [39, 40], зразки, розташовані на краю платформи, відрізняються від внутрішніх через вищу швидкість охолодження. Однак дослідження, присвячені оптимальним параметрам, дають суперечливі результати [40-42]. Розташування зразків відносно газового потоку впливає на стабільність розплаву і ймовірність утворення дефектів. Потік газу виконує не тільки захисну функцію, але і видаляє побічні продукти процесу (сажу, випари металу, зварювальні дими). Якщо видалення недостатнє або потік розподіляється нерівномірно, посилюється взаємодія лазера з цими продуктами, ослаблюється сила лазера, а частинки осідають на поверхні, яка піддається подальшому впливу лазера. Дослідження [37, 43, 44] показують, що нижче за потоком газу можуть накопичуватися частинки конденсату парів і кисню, що збільшує ймовірність дефектів. Недостатнє видалення викидів із зони плавлення призводить до їх накопичення вздовж потоку. Зниження швидкості потоку газу зменшує глибину розплавленої ванни, збільшує пористість несплавлення через блокування променя паровим шлейфом. Робота [43] показує, що зменшення швидкості поперечного потоку газу призводить до більш

широких і дрібних ванн розплаву.

Згідно з [44], різниця геометрії ванни розплаву не корелює з потоком газу і розташуванням збірки. Однак віддалені від сопел деталі демонструють найменшу розмірну точність [19]. Протилежні результати представлені в [40]: чим далі зразок від сопла, тим вища його точність. Близькі до сопла зразки мають більше відхилення через тиск газу. Також показано, що розташування впускного отвору для газу впливає на однорідність потоку, знижуючи неоднорідність на 40%. Щільність зразків максимальна в центрі платформи і в найбільш віддалених від впускного отвору зонах.

Швидкість потоку газу сильніше впливає на міцність при розтягуванні, ніж розташування деталей [45]. Висока шорсткість спостерігається поблизу отвору зсипання порошку і виходу газу [33].

Дослідження [46] виявило суттєвий вплив радіуса вхідного отвору. Крім того, визначено значний вплив типу газу. Розмір камери побудови також грає важливу роль – чим вона менша і нижче розташоване вікно, тим інтенсивнішим має бути потік газу. В іншому випадку газу стають щільнішими, викликаючи більше відбиття і переривання лазерного променя, що знижує його потужність.

В ряді робіт [47] показано, що розташування зразків має менший вплив на їхні властивості, ніж тип машини та орієнтація деталей під час сканування. Дослідження [48] продемонструвало, що п'ять різних положень на платформі (центр і чотири кути) не мають значного впливу на розмірні відхилення, а процес побудови відбувається стабільно на всій платформі. Робота [38] не виявила значного впливу напрямку потоку допоміжного газу на розмірні відхилення металевих конструкцій.

Статистичний аналіз не виявив значної різниці для втомної міцності зразків, виготовлених у різних зонах потоку азоту. Дослідження впливу малого діаметру лазерної плями на механічні властивості сталі 316L, виготовленої методом LPBF, не виявило значного впливу кута побудови на якість зразків, однак мікроструктура одиничних треків і ванни розплаву в цій роботі не вивчалась [49].

## **Висновки**

За результатами проведеного аналізу сучасних науково-технічних джерел можна відзначити суттєвий вплив безлічі параметрів лазерного наплавлення, а також складність і різноманітність факторів, що визначають процес. Окрім впливу окремих параметрів як самостійних величин, існує і їх взаємодія, яка вивчена меншою мірою, оскільки потребує проведення масштабних експериментальних досліджень з мінімальною похибкою.

Знання, отримані в рамках досліджень які пов'язують нестабільність процесу адитивного виробництва з кутом нахилу лазерного променя та напрямком газових потоків у взаємодії з іншими параметрами процесу, допоможуть краще зрозуміти різні причини змін характеристик металеві конструкції. Контроль цих варіацій під час процесу LPBF дозволить виготовляти більш надійні деталі з прогнозованими механічними властивостями, що має велике значення для сертифікації компонентів та атестації виробів відповідального призначення. Таким чином, існує потреба у проведенні комплексних досліджень щодо можливості надійного багатопараметричного керування процесом.

### Перелік посилань / References

1. VOSviewer. (2025 April 15), Visualizing scientific landscapes. Centre for Science and Technology Studies, Leiden University. Retrieved, from <https://www.vosviewer.com>
2. Gephi. (Version 0.10.1) [Computer software]. (n.d.). Retrieved April 15, 2025, <https://gephi.org/>
3. Li, Y., Shi, Y., Lu, Y., Li, X., Zhou, J., Zadpoor, A. A., & Wang, L. (2023). Additive manufacturing of vascular stents. *Acta Biomater*, 167, 16-37. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2023.06.014>
4. Gonnabattula, A., Thanumoorthy, R. S., Bontha, S., Balan, A.S., Anil Kumar, V., & Kanjarla, A. (2024). Process parameter optimization for laser directed energy deposition (LDED) of Ti6Al4V using single-track experiments with small laser spot size. *Optics & Laser Technology*, 175, 110-123. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110861>
5. Stopka, K., Desrosiers, A., Nicodemus, T., Krutz, N., Andreaco, A., & Sangid, M. (2023). Intentionally Seeding Pores in Additively Manufactured Alloy 718: Process Parameters, Microstructure, Defects, and Fatigue. *Additive Manufacturing*, 66, 34-39. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103450>
6. Zhang, J., Zong, X., Chen, Z., & Fu, H. A (2021). Numerical Simulation and Process Optimization of a Hastelloy X Alloy Single Track Produced by Selective Laser Melting. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 75, 101-111. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02407-2>
7. Jaramillo-Isaza, C., Higuera Cobos, O., Taborda Rios, J., Lopez-Botello, O., & Robledo, P. (2023). Correlation of Energy Density and Manufacturing Variables of AA6061 through Laser Powder Bed Fusion and Its Effect on the Densification Mechanism. *Metals*, 13, 1904. <https://doi.org/10.3390/met13111904>
8. Yadroitsev, I., Gusarov, A., Yadroitsava, I., & Smurov, I. (2010). Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 1624-1631. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.010>
9. Tat, K., Le, V. T., & Van, N. (2024). Prediction models and multi-objective optimization of the single deposited tracks in laser direct metal deposition of 316L stainless steel. *Manufacturing Review*, 11. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2024012>

10. Yadroitsev, I., Yadroitsava, I., Du Plessis, A., & Macdonald, E. (2021). *Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals*, 5, 654
11. Rangaswamy, S., Bourke, D., Monu, M. C., Healy, P., Gu, H., Ahad, I. U., & Brabazon, D. (2024). Investigating Melt Pool Dimensions in Laser Powder Bed Fusion of Nitinol: An Analytical Approach. *Advanced Engineering Materials*, 26, 24-31. <https://doi.org/10.1002/adem.202401636>
12. Bakhtari, A.R., Sezer, H. K., Canyurt, O. E., Eren, O., Shah, M., & Marimuthu, S. (2024). A Review on Laser Beam Shaping Application in Laser-Powder Bed Fusion. *Advanced Engineering Materials*, 26(14). <https://doi.org/10.1002/adem.202302013>
13. Yang, T., Liu, T., Liao, W., Macdonald, E., Wei, H., Zhang, C., Chen, X., & Zhang, K. (2020). Laser powder bed fusion of AlSi10Mg: Influence of energy intensities on spatter and porosity evolution, microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 849. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156300>
14. Manikandan, P., Venkatesan, K. (2024). The influence of linear energy density on density, defect formation, residual stress, microstructure, and texture in 310 austenitic stainless steel by laser powder bed fusion. *Journal of Manufacturing Processes*, 131, 2191–2207. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.10.022>
15. Paraschiv, A., Matache, G., Condruz, M. R., Frigioescu, T. F., & Pambaguan, L. (2022). Laser Powder Bed Fusion Process Parameters' Optimization for Fabrication of Dense IN 625. *Materials*, 15(16), 5777. <https://doi.org/10.3390/ma15165777>
16. Caiazzo, F., Alfieri, V., & Casalino, G. (2020). On the Relevance of Volumetric Energy Density in the Investigation of Inconel 718 Laser Powder Bed Fusion. *Materials*, 3(3), 538. <https://doi.org/10.3390/ma13030538>
17. Gaikwad, A., Giera, B., Guss, G., Forien, J.-B., Matthews, M., & Rao, P. (2020). Heterogeneous sensing and scientific machine learning for quality assurance in laser powder bed fusion – A single-track study. *Additive Manufacturing*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101659>
18. Yang, A., Zhao, Z., & Zhang, X. (2025). A bidirectional prediction framework for melt pool size and process parameters in LPBF. *Engineering Research Express*, 7. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/adb0a2>
19. Khorasani, A., Gibson, I., Ghasemi, A., & Ghaderi, A. (2019). Modelling of Laser Powder Bed Fusion Process and Analysing the Effective Parameters on Surface Characteristics of Ti-6Al-4V. *International Journal of Mechanical Sciences*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105299>
20. Glaubitz, E., Fox, J., Kafka, O., & Gockel, J. (2025). Contour parameters, melt pool behavior, and surface roughness relationships across laser powder bed fusion platforms and metallic alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 136, 4419–4437. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15066-0>
21. Fiegl, T., Franke, M., & Körner, C. (2019). Impact of build envelope on the properties of additive manufactured parts from AlSi10Mg. *Optics & Laser Technology*, 111, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.08.050>
22. Kleszczynski, S., Ladewig, A., Friedberger, K., Merhof D., & Witt, G. (2015). *Position Dependency of Surface Roughness in Parts from Laser Beam Melting Systems*. <https://hdl.handle.net/2152/89333>

23. Yang, X. H., Jiang, C. M., Ho, J. R., Tung, P. C., & Lin, C. K. (2021). Effects of Laser Spot Size on the Mechanical Properties of AISI 420 Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting. *Materials* (Basel), 14(16), 4593. <https://doi.org/10.3390/ma14164593>

24. Metelkova, J., Kinds, Y., Kempen, K., de Formanoir, C., Witvrouw, A., & Hooreweder, B. (2018). On the influence of laser defocusing in Selective Laser Melting of 316L. *Additive Manufacturing*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.006>.

25. Bedmar, J., Riquelme, A., Rodrigo, P., Torres, B., & Rams J. (2021). Comparison of Different Additive Manufacturing Methods for 316L Stainless Steel. *Materials*, 14(21), 6504. <https://doi.org/10.3390/ma14216504>.

26. Mo, Bin, Li, Tao, Deng, Linhui, Shi, Feifan, Liu, Weiwei, & Zhang, HongChao. (2024). Mechanisms and influencing factors of defect formations during laser-based directed energy deposition with coaxial powder feeding: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 19. <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2404155>

27. Reijonen, Joni, Revuelta, Alejandro, Metsä-Kortelainen, Sini, & Salminen, Antti. (2024). Effect of laser focal point position on porosity and melt pool geometry in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 85. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104180>

28. Mazzarisi, Marco, Errico, Vito, Angellastro, Antonio, & Mazzarisi, Marco. (2022). Influence of standoff distance and laser defocusing distance on direct laser metal deposition of a nickel-based superalloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120, 2407–2428. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08945-3>

29. Wang, S, Wang, L, Liu, J, Yang, R, Li, J, & Wang, G. (2023). Effects of laser energy density on morphology features and microstructures of the single molten track in selective laser melting. *Frontiers in Materials*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1110844>

30. Godineau, Kevin, Lavernhe, Sylvain, & Tournier, Christophe. (2019). Influence of the opto-mechanical chain on the energy provided by the laser spot to the material in laser powder bed fusion processes. *Additive Manufacturing*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.102333>

31. Brandau, B. (2022). *Spectral analysis in laser powder bed fusion* (Licentiate thesis). Luleå University of Technology. Available. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1656943/FULLTEXT01.pdf>

32. Sendino, S., Gardon, M., Lartategui, F., Martinez, S., & Lamikiz, A. (2020). The Effect of the Laser Incidence Angle in the Surface of LPBF Processed Parts. *Coatings*, 10(11), 1024. <https://doi.org/10.3390/coatings10111024>

33. Alphonso, W. E., Bayat, M., Rothfelder, R., Schmidt, M., & Hattel, J. H. (2024). A Systematic Investigation of Laser Beam Shape Variation on the Thermal and Melt Pool Dynamics in Laser Powder Bed Fusion of 316L Stainless Steel. *Abstract from 26th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Daegu, Republic of Korea*

34. Berez, J., Dushaj, E., Jost, E., Saldaña, C., & Fu, K. (2024). Measurement of focal plane error in laser powder bed fusion machines. *Additive Manufacturing Letters*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2024.100196>

35. Lee, J., Lee, M., Jung, I. D., Choe, J., Yu, J. H., Kim, S., & Sung, H. (2020). Correlation Between Microstructure and Tensile Properties of STS 316L and Inconel 718 Fabricated by Selective Laser Melting (SLM). *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20(11), 6807–6814
36. Adyamskyi, S., Kononenko, G., Podolskyi, R., & Badyuk, S. (2022). *Vprovadzhenia tekhnologii selektyvnoho lazernoho plavlennia v Ukraini*. [Implementation of Selective Laser Melting Technology in Ukraine]. Naukova Dumka.
37. Mussatto, A., Groarke, R., Vijayaraghavan, R. K., Hughes, C., Obeidi, M. A., Doğu, M. N., Yalçın, M. A., McNally, P. J., Delaure, Y. M., & Brabazon, D. (2022). Assessing dependency of part properties on the printing location in laser-powder bed fusion metal additive manufacturing. *Materials Today Communications*. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103209>
38. Kozhuthala Veetil, J., Khorasani, A., Ghasemi, A., Rolfe, B., Vrooijink, I., van Beurden, K., Moes, S., & Gibson, I. (2020). Build position-based dimensional deviations of laser powder-bed fusion of stainless steel 316L. *Precision Engineering*, 67, 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.09.024>
39. Karimi, P., Sadeghi, E., Ålgårdh, J., Harlin, P., & Andersson, J. (2020). Effect of build location on microstructural characteristics and corrosion behavior of EB-PBF built Alloy 718. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106, 3597–3607. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04859-9>
40. Costes, M., Arnaud, L., Lefebvre, P., & Mandou, Q. (2024). Experimental study of laser powder bed fusion (LPBF) gas shield inlet optimization and its effects on part quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 133, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14035-3>
41. Oliveira, A., Castro, H., Santos, S., Jardini, A., & Del Conte, E. (2023). Effects of spatter deposition and build location in laser powder bed fusion of maraging steel parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12445-3>
42. Biswas, P., & Ma, J. (2022). Spatial pore distribution: an approach to uncouple the strength–porosity trade-offs. *J Mater Sci*, 57, 411–421. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06587-6>
43. Soltani-Tehrani, A., Isaac, J. P., Tippur, H. V., Silva, D. F., Shao, S., & Shamsaei, N. (2023). Ti-6Al-4V powder reuse in laser powder bed fusion (LPBF): The effect on porosity, microstructure, and mechanical behavior. *International Journal of Fatigue*, 167, Part B. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107343>
44. Reijonen, J., Revuelta, A., Riipinen, T., Ruusuvoori, K., & Puukko, P. (2020). On the effect of shielding gas flow on porosity and melt pool geometry in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.101030>
45. Anwar, A., & Pham, Q. C. (2016). Selective laser melting of AlSi10Mg: Effects of scan direction, part placement and inert gas flow velocity on tensile strength. *Journal of Materials Processing Technology*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.10.015>
46. Steve, B. (2017). *A study into the effects of gas flow inlet design in a Renishaw AM250 laser powder bed fusion machine using computational modelling*

47. Weaver, J. S., Deisenroth, D., & Mekhontsev, S. (2024). Cross-sectional melt pool geometry of laser scanned tracks and pads on nickel alloy 718 for the 2022 additive manufacturing benchmark challenges. *Integr. Mater. Manuf. Innov.*, 13, 363-379. <https://doi.org/10.1007/s40192-024-00355-5>

48. Krasniqi, M., & Löffler, F. (2023). Dimensional accuracy of additively manufactured AlSi10Mg parts: Study of the influence of build platform position, process parameters and repeatability. *Joint Special Interest Group meeting between euspen and ASPE Advancing Precision in Additive Manufacturing KU Leuven, Belgium, September 2023*

49. Yildiz, R. A., Popa, A.-A., & Malekan, M. (2024). On the effect of small laser spot size on the mechanical behaviour of 316L stainless steel fabricated by LPBF additive manufacturing. *Materials Today Communications*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108168>

**S. V. Adzhamskyi**<sup>1,2</sup>, Ph. D. (Tech. Sci.), ORCID 0000-0002-6095-8646

**T. V. Balakhanova**<sup>3,\*</sup>, Cand. Tech. Sci., ORCID 0000-0003-2493-218X

**O. E. Baranovska**<sup>3</sup>, Cand. Tech. Sci., ORCID 0000-0002-4106-5797

**R. V. Podolskyi**<sup>2,3,4</sup>, Ph. D. (Tech. Sci.), ORCID 0000-0002-0288-0641

<sup>1</sup> LLC "Additive Laser Technology of Ukraine"

<sup>2</sup> Institute of Transport Systems and Technologies of the NAS of Ukraine

<sup>3</sup> Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine

<sup>4</sup> Institute of Applied Control Systems of the NAS of Ukraine

\* Corresponding author: [tatja.balakhanova@gmail.com](mailto:tatja.balakhanova@gmail.com)

## **CONFLICTING INFLUENCE OF SCANNING PARAMETERS ON THE GEOMETRY AND SIZE OF THE MELT POOL DURING THE LPBF PROCESS (REVIEW)**

**Abstract.** Laser powder bed fusion (LPBF) is one of the leading technologies for additive manufacturing of metal parts with complex geometries, enabling the production of both solid and porous structures with tailored characteristics. However, the widespread industrial adoption of LPBF is limited by defects such as porosity, residual stresses, incomplete powder melting, and layer unevenness. These defects significantly affect the mechanical properties, dimensional accuracy, and corrosion resistance of the final products. A central element of the process is the melt pool, whose stability governs the formation of the microstructure, alloy quality, and behavior of multilayer structures. However, data on melt pool behavior remain controversial: results from experiments and numerical simulations often do not coincide, making it difficult to unambiguously assess the effects of process parameters. The interaction of factors such as laser power, scanning speed, sample placement on the build platform, beam inclination, and gas flow is often nonlinear and unpredictable. Consequently, defect formation and track morphology can vary considerably even under similar process conditions, highlighting the high level of uncertainty and inconsistency in the data. This paper summarizes existing studies

analyzing the formation of single tracks and multilayer structures, emphasizes discrepancies between experimental observations and numerical models, and identifies key factors requiring further investigation. The significant influence of numerous LPBF parameters, as well as the complex and multifactorial nature of the process, is evident. Beyond the effects of individual parameters, their interactions play a critical role, but have been studied less extensively due to the need for large-scale, high-precision experiments. Knowledge of the relationships between process instability, laser beam angle, and gas flow direction, in combination with other parameters, can help to better understand the causes of variations in the properties of metal products. Analyzing the challenges and prospects of studying single and multilayer tracks in melt pools allows for a deeper understanding of LPBF processes, supports the determination of optimal process parameters, and improves product quality, ultimately enabling more precise process control and effective evaluation of powder alloy properties.

**Key words:** laser powder bed fusion, single tracks, melt pool, keyhole, LPBF process parameters

**For citation:** Adzhamskyi, S. V., Balakhanova, T. V., Baranovska, O. Ye., & Podolskyi, R. V. (2026). Conflicting influence of scanning parameters on the geometry and size of the melt pool during the LPBF process (review). *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 40, 79-97. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-005>

*Рукопис надійшов до редакції / Received 01.03.2026*

*Рекомендовано до друку / Accepted 28.05.2026*

*Опубліковано / Published 30.05.2026*