

ВПЛИВ ДІАМЕТРА ФОКУСНОЇ ПЛЯМИ НА ФОРМУВАННЯ ТРЕКІВ І ФОРМУ ПРОПЛАВЛЕННЯ РОЗПЛАВУ В LPBF-ПРОЦЕСІ СТАЛІ 316L

С.В. Аджамський^{1,2}, Р.В. Подольський^{1,3,4}, Т.В. Балаханова³, О.Є. Барановська³, С.І. Бадюк^{1,4}, Н.П. Тогобицька⁵

¹LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 49000, м. Дніпро, вул. Сергія Подолинського, 31в.

E-mail: as@alt-print.com

²Інститут транспортних систем і технологій НАН України. 49000, м. Дніпро, вул. Писаржевського, 5.

E-mail: itst@westa-inter.com

³Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України. 49000, м. Дніпро, пл. Академіка Стародубова, 1.

E-mail: rostislavpodolskij@gmail.com

⁴Інститут прикладних систем управління НАН України. 03187, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42.

E-mail: IACS@nas.gov.ua

⁵HTW University of Applied Sciences. 8 Triskovallie Str., 10318, Berlin, Germany.

E-mail: Nataliya.Togobytska@htw-berlin.de

Систематично досліджувався вплив ключових параметрів процесу лазерного плавлення, а саме: діаметра фокусної плями, потужності лазера та швидкості сканування, на геометрію фронту кристалізації окремих треків, отриманих в аустенітній нержавкій сталі 316L. Особлива увага приділялася оцінці впливу діаметра фокусної плями. Дослідження проводилося експериментально з використанням лазерної обробної системи, що оснащена волоконними ітербівієвими лазерами, з гаусовим профілем розподілу енергії (Gaussian Beam Profile). Однотрекові експерименти проводилися в широкому діапазоні умов обробки. Наприклад, потужність лазера варіювалася від 150 до 500 Вт, швидкість сканування – від 700 до 1000 мм/с, а діаметр фокусної плями – від 75 до 175 мкм. Результати досліджень показали, що найвища безперервність треків і стабільність процесу були досягнуті при використанні малого діаметра фокусної плями 75 мкм у поєднанні з потужністю лазера 175...200 Вт та швидкістю сканування 1000 мм/с. Збільшення діаметра фокусної плями понад 125 мкм вимагало значного збільшення потужності лазера для підтримки плавлення, що супроводжувалось помітним зниженням стабільності треку. При використанні діаметра фокусної плями 175 мкм спостерігалась капілярна нестабільність та утворення крапель навіть при високій потужності лазера та помірних швидкостях сканування. Подальший аналіз показав, що оптимальне співвідношення глибини до ширини ванни розплаву, яке перевищує 0,8, що є характерним для режиму плавлення типу «замкова щілина», було досягнуто виключно при діаметрі фокусної плями 75 мкм. Навпаки, більші діаметри фокусної плями призводили до утворення менш глибоких ванн розплаву, тим самим збільшуючи ймовірність утворення дефектів у кінцевих компонентах. Бібліогр. 21, табл. 4., рис. 8.

Ключові слова: LPBF – технологія, одноколіїне сканування, діаметр фокусної плями, параметри процесу сканування

Вступ. Промисловий попит на деталі на замовлення та легкі конструкції зростає, що сприяє розвитку технологій адитивного виробництва (АМ). Серед них лазерне порошкове плавлення (LPBF) займає провідні позиції як одна з найбільш універсальних і широко використовуваних технік. Цей спосіб використовується для виробництва металевих виробів заданої форми, що є особливо актуальним в аерокосмічній, медичній та автомобільній промисловості.

Якість продукції визначається багатьма факторами, зокрема технологічними параметрами обладнання і режимами друку [1–3]. Одним із ключових чинників є діаметр фокусної плями під час LPBF, який безпосередньо впливає на точність, роздільну здатність і, у свою чергу, на кінцеві ме-

ханічні властивості готового виробу. Цей параметр визначає розподіл енергії в зоні удару та безпосередньо впливає на формування ванни розплаву. Діаметр фокусної плями визначається оптичною системою обладнання та відстанню до робочої поверхні. Менший діаметр фокусної плями забезпечує більш концентроване джерело енергії і призводить до формування вузьких і чітко визначених треків, але збільшує ймовірність дефектів через недостатню ширину треку при великих інтервалах сканування. Більший діаметр фокусної плями створює ширші треки, збільшує перекриття між сусідніми треками, проте може призвести до зниження роздільної здатності й точності дрібних деталей.

Наразі виробництво компонентів за допомогою LPBF-технології з адаптованою формою та діаметром фокусної плями є однією з найактуальніших тем. Лазерний промінь може мати різну фор-

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND

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

му просторового розподілу інтенсивності енергії, що суттєво впливає на поведінку ванни розплаву та кінцеву якість продукту. Серед основних типів променя виділяють наступні профілі лазерного пучка: гаусів профіль пучка (Gaussian Beam Profile), профіль з плоскою вершиною (Top-Hat), кільцевий (Doughnut Beam Profile), багатомодальний (Multimode Beam Profile) та асиметричний (Asymmetric Beam Profile). Найуніверсальнішим та найпоширенішим профілем у LPBF-технології є використання лазерного пучка з гаусовим профілем. Інтенсивність лазерного випромінювання в поперечному профілі пучка відповідає гаусовій кривій з максимальною інтенсивністю в центрі та поступовим зменшенням до країв. Цей профіль променя дозволяє концентрувати подачу енергії в невеликому об'ємі, що робить його ідеальним для прецизійної роботи, пошарового будівництва та високої деталізації. Однак, коли потужність лазера перевищує певний поріг, температура всередині ванни розплаву може досягти точки кипіння, що призводить до надмірного випаровування металу, гідродинамічної нестабільності та небажаних ефектів, зокрема утворення замкової щілини [4]. Тому, за умови використання гаусового типу профілю пучка, існує потенціал для підвищення ефективності виробництва шляхом регулювання розміру фокальної плями без шкоди для якості за умови підтримки оптимальних параметрів потужності лазера та швидкості сканування.

Ряд досліджень описують вплив розміру діаметра фокальної плями та дефокусування на якість окремих треків. У [5] було розглянуто вплив розміру фокусної плями та ключових параметрів процесу (потужність лазера, товщина шару, орієнтація нарощування та швидкість сканування) на механічні властивості сталі 316L. Результати показали, що зменшення діаметра плями від 100 до 50 мкм збільшує глибину окремих треків, що призводить до покращення механічних властивостей.

Зміна відстані фокусування суттєво впливає на геометрію ванни розплаву, стабільність треків, режим плавлення та кінцеві характеристики отриманого виробу [6]. Під час дефокусування відбувається зміна розподілу енергії та розміру фокусної плями [7], що робить його ефективним параметром впливу та інструментом контролю розмірів ванни розплаву, швидкості охолодження тощо в процесі плавлення. При цьому встановлено більший вплив дефокусування саме на глибину ванни розплаву, особливо за умов високого рівня підведення тепла [8]. Показано [9], що позитивне та негативне дефокусування може по-різному впливати

на процес лазерного плавлення. Негативне дефокусування сприяє реалізації режиму провідності плавлення ванни розплаву, тоді як при позитивному фокусуванні існує висока вірогідність переходу в режим плавлення «замкова щілина», що в подальшому може призвести до утворення таких дефектів як гарячі тріщини та сприяти утворенню дефектів типу «замкова щілина» [9, 10]. Водночас негативне дефокусування (тобто зміщення вище за вихідний рівень) може призводити до виникнення дефектів несплавлення при застосуванні низькоенергетичних режимів [11]. Формування структури окремих треків при відстані фокусування в подальшому визначає міцнісні та пластичні властивості матеріалу [12].

Із вищезазначеного випливає, що питання зміни розміру фокусної плями з використанням лазерного променя з гаусовим профілем пучка під час процесу LPBF було широко досліджено. Однак аналіз наявних наукових джерел показує, що більшість досліджень зосереджені на діаметрах фокусних плям до 100 мкм, що зумовлено технологічними обмеженнями виробничого обладнання. Таким чином, умови формування якісних треків під час процесу LPBF за умови використання лазерного променя з гаусовим профілем та збільшеним розміром фокусної плями є недостатньо вивченими, але перспективним, оскільки збільшення діаметра фокусної плями може підвищити продуктивність процесу нарощування.

Мета дослідження – встановити вплив розміру фокусної плями за одночасної варіації ключових параметрів лазерного плавлення на геометрію фронту кристалізації окремих треків у нержавкої сталі аустенітного класу 316L та розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору технологічних параметрів, які забезпечують виготовлення металевих виробів.

Матеріал і методика досліджень. Експериментальна робота проводилася на установці, яка оснащена двома сканувальними системами з використанням одномодових волоконних ітербієвих лазерів з гаусовим профілем. Діаметр фокусної плями під оптичною системою 100 мкм. Фокусну відстань корегували високошвидкісним динамічним об'єктивом з електроприводом ScanLab VarioSCAN de40i [13]. Конструкція лазерної системи забезпечувала стабільність оптичної осі на всіх етапах експерименту. Матеріалом для виготовлення зразків слугував порошок сплаву 316L (табл. 1) з розподілом розмірів частинок 15...60 мкм (рис. 1).

Таблиця 1. Фактичний хімічний склад досліджуваної сталі 316L, ваг. %

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo
0,016	0,78	0,64	0,005	0,008	17,79	12,63	0,04	2,35

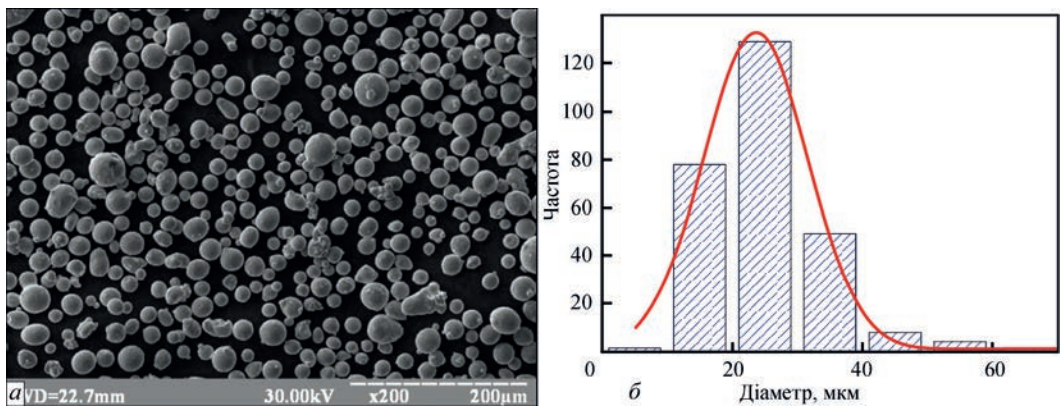


Рис. 1. Частинки вихідного матеріалу 316L при збільшенні $\times 200$ (а) і результати гранулометричного аналізу (б)

У рамках дослідження було проведено аналіз окремих треків, що є поширеним практичним підходом для визначення оптимальних параметрів виробництва. У дослідженні було застосовано наступні змінні параметри: потужність лазера 150...500 Вт, швидкість сканування 700...1000 мм/с і діаметр фокусної плями 75...175 мкм з кроком 25 мкм. Постійним параметром була товщина шару 40 мкм. Такий підхід дозволив оцінити вплив діаметра фокусної плями на формування треків. На рис. 2 наведено матрицю всіх параметрів процесу, що використовувались в експерименті. Діаметр фокусної плями відповідає розміру сфер і був встановлений на рівні 75, 100, 125, 150 і 175 мкм, що дозволяє оцінити вплив діаметра фокусної плями на формування треків.

Сканування всіх одиночних треків проводилося в напрямку, протилежному до потоку захисного газу. Такий підхід мінімізував ймовірність взаємодії лазерного променя з технологічними парами та запобігав осадженню продуктів реакції на оброблюваній поверхні. Розташування зразків на платформі залишалося незмінним протягом усіх етапів дослідження, що забезпечувало повторюваність експерименту. Одиночні треки виготовлялися на підкладці завтовшки 4 мм, виготовленій із того ж матеріалу, що й самі треки. Підкладка для друку одиночних треків виготовлялася з використанням

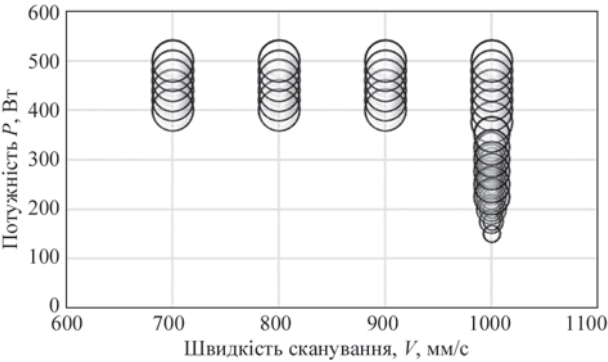


Рис. 2. Матриця експериментальних параметрів. Розмір сфери відповідає діаметру фокусної плями та становить 75, 100, 125, 150 і 175 мкм

таких постійних параметрів: товщина шару – 40 мкм, крок між треками – 0,12 мм, швидкість сканування – 1000 мм/с, потужність лазера – 260 Вт, діаметр фокусної плями – 100 мкм.

Проведено щонайменше три незалежних експерименти для кожного режиму сканування. Дані представлені у вигляді середніх значень; статистичний розкид знаходився в межах стандартного відхилення, що підтверджує відтворюваність результатів.

Під час дослідження візуально-оптичним методом аналізували як макроструктуру одиночних треків, так і їхню мікроструктуру в поперечних перерізах. Макроструктурні характеристики одиночних треків оцінювалися на основі таких параметрів: цілісність треку (визначається якістю осадження та відсутністю зазорів) і стабільність треку (відсутність утворення крапель). На ці особливості впливали зміни параметрів процесу, зокрема швидкості сканування та діаметра фокусної плями.

Поперечні перерізи треків використовувались для оцінки геометричних параметрів ванни розплаву на мікроструктурному рівні, що містили ширину, глибину та загальну форму. Зазвичай цілісність треків оцінюється шляхом вимірювання максимальної довжини безперервного шляху. Тому в цьому дослідженні, якщо трек було утворено лише окремими краплями, він не вважався повним або майже повним треком, незалежно від кількості крапель.

Для візуальної наочності була розроблена шкала оцінки цілісності треків, дані якої наведені на рис. 3. Крім того, була досліджена стабільність отриманих окремих треків (рис. 4). Змінний поперечний переріз окремого треку, у свою чергу, може сприяти утворенню розривів [14]. Слід зазначити, що стабільність отриманих окремих треків суттєво впливає на наявність або відсутність дефекту несплавлення (Lack of Fusion).

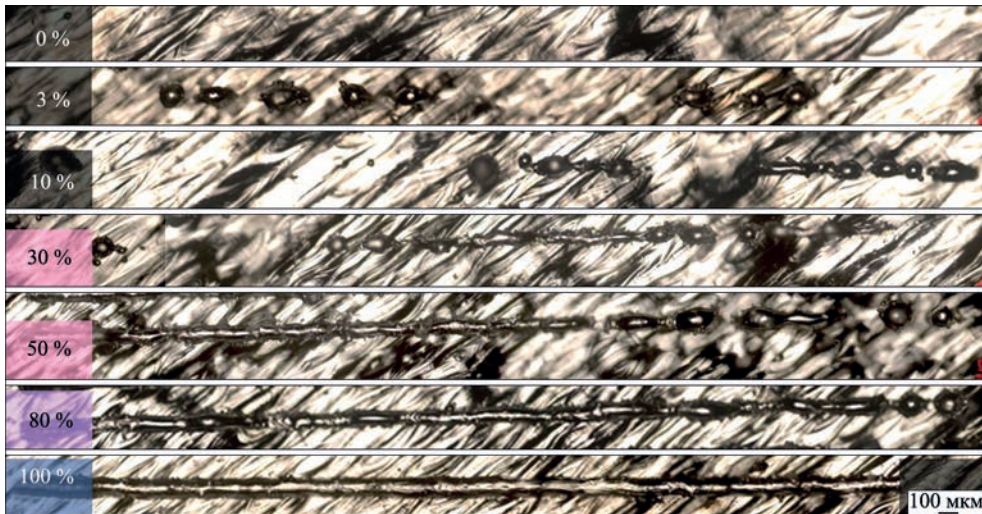


Рис. 3. Характеристика цілісності одиночних треків

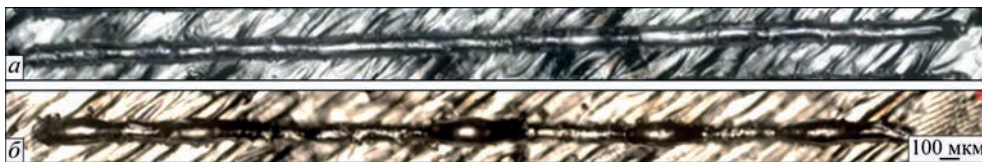


Рис. 4. Стабільний (а) і нестабільний трек (б)

Підготовку зразків до аналізу мікроструктури проводили з використанням стандартних процесів очищення (ультразвукова ванна), шліфування, полірування та травлення структури з використанням реактиву Каллінга № 2. Аналіз мікроструктури проводили за допомогою оптичного мікроскопа AXIOVERT 200M MAT, що дозволило визначити форму треків, характеристики їхніх геометричних параметрів, фронти кристалізації та виявити наявність дефектів.

Ширину, висоту та глибину кожної ванни розплаву визначали як максимальні розміри її поперечного перерізу у вертикальній та горизонтальній площинах відповідно (рис. 5). Із досліджень [15–18] відомо, що оптимальні режими плавлення відповідають трекам зі співвідношенням сторін 0,8.

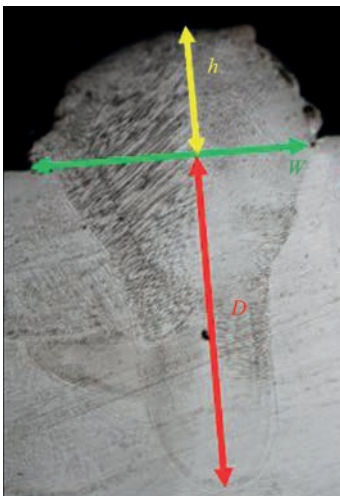


Рис. 5. Приклади вимірювання геометричних характеристик треку в поперечному перерізі розплавленої ванни: h – висота над поверхнею, W – ширина, D – глибина треку

Результати досліджень. На основі аналізу отриманих даних було визначено, що оптимальна швидкість сканування при змінному діаметрі фокусної плями, яка забезпечує стабільні та цілісні треки, становить 1000 мм/с. Однак слід зазначити, що при збільшенні діаметра до 175 мкм потрібна технічна можливість збільшення потужності лазерного променя приблизно на 30...40 %.

На рис. 6 наведено мікроструктури окремих треків із розмірами, що наближені до оптимальних та які виготовлені з постійною швидкістю сканування зі зміною потужності й діаметра фокусної плями. Аналіз результатів показав, що зміна діаметра фокусної плями в діапазоні 75...100 мкм має незначний вплив на формування треків. Це свідчить про доцільність застосування виробничих параметрів (потужності та швидкості сканування) в умовах динамічного фокусування, зі зміною розміру фокальної плями до 100 мкм.

Однак, коли діаметр фокусної плями перевищує 125 мкм, потрібні більш енергомісткі режими виробництва, зокрема, збільшення потужності. Для діаметра фокусної плями 125 мкм необхідна потужність збільшується на 23 %, а для 150 мкм – на 28 % порівняно з одиночними треками, отриманими з діаметром фокусної плями в діапазоні 75...100 мкм.

Аналіз одиночних треків, отриманих з діаметром фокусної плями 175 мкм за умови використання більш енергомістких параметрів сканування (рис. 6) показав, що безперервне формування треків при цьому діаметрі було досягнуто для всіх

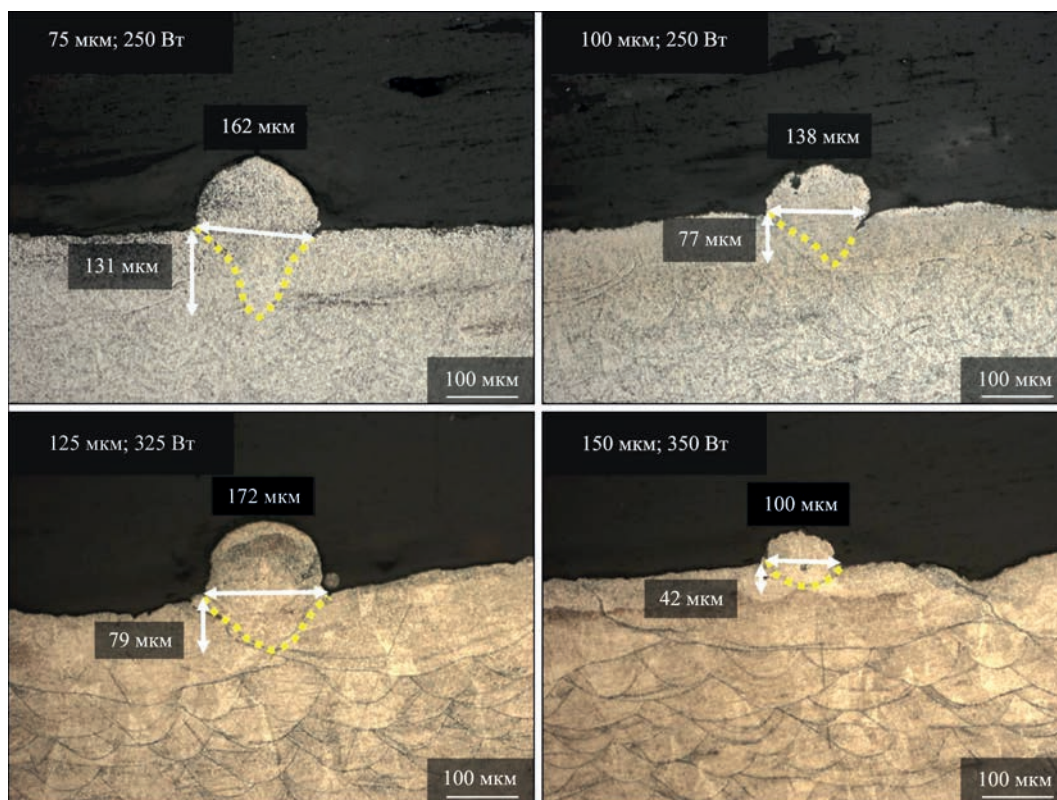


Рис. 6. Зміна морфології розплавленої ванни залежно від зміни діаметра фокусної плями та потужності лазерного променя, швидкість сканування 1000 мм/с

режимів сканування. Проте стабільних треків без утворення крапель не спостерігалось.

Зі збільшенням потужності лазера та швидкості сканування розплавлена ванна розширюється, і тенденція до утворення дефектів, таких як здуття або підрізання, зростає. Висока потужність збільшує тиск на поверхню розплавленого металу, сприяє випаровуванню та посилює тиск віддачі, що може призводити до викиду рідини з ванни розплаву. Зазвичай зниження швидкості лазерного сканування забезпечує більше часу для теплопередачі, що дозволяє рідині ефективніше заповнювати пори, які утворюються внаслідок тиску віддачі, тим самим зменшуючи утворення пор і шорсткість поверхні. Однак у цьому експерименті при низьких рівнях потужності (400 Вт) зниження швидкості сканування дещо посилює цей дефект, тоді як при вищих рівнях потужності швидкість сканування не мала суттєвого впливу на утворення дефектів (рис. 7).

Попередні дослідження [1] показують, що утворення крапель пов'язане з динамікою рідини, морфологією розплавленої ванни та явищами поверхневого натягу. Як згадувалося раніше, утворення крапель є результатом надмірно високої потужності лазера або швидкості сканування, що викликає інтенсивне локалізоване плавлення та посилений рух рідини. Таким чином, поєднання достатньої потужності та малого діаметра фо-

кусної плями дозволяє формувати стабільні та безперервні треки.

Використання великого діаметра фокусної плями, навіть за високої потужності та швидкостей сканування в межах заданого діапазону енергетичних параметрів, не здатне забезпечити стабільне формування треків попри їхню безперервну цілісність.

Безперервні, гладкі треки без розривів були отримані при використанні найменшого діаметра фокусної плями 75 мкм у поєднанні з достатньою потужністю (табл. 2).

Поступове збільшення розміру променя, навіть при одночасному збільшенні потужності сканування в досліджуваному діапазоні, призводить до утворення неповних треків. Таке активне утворення крапель на поверхні треку (капілярна нестабільність за механізмом Плато-Релея) є наслідком динамічної нестабільності розплавленої ванни, що призводить до утворення нерівностей у вигляді горбків або сферичних крапель. Характеристики морфології розплавленої ванни залежно від швидкості та потужності сканування при незмінному діаметрі фокусної плями наведено в табл. 3.

Згідно з даними табл. 3 формування ванни розплаву окремих треків відбувалося за режимом провідності, за якого ймовірність утворення газових пор і пор типу «замкова щілина» є найнижчою.

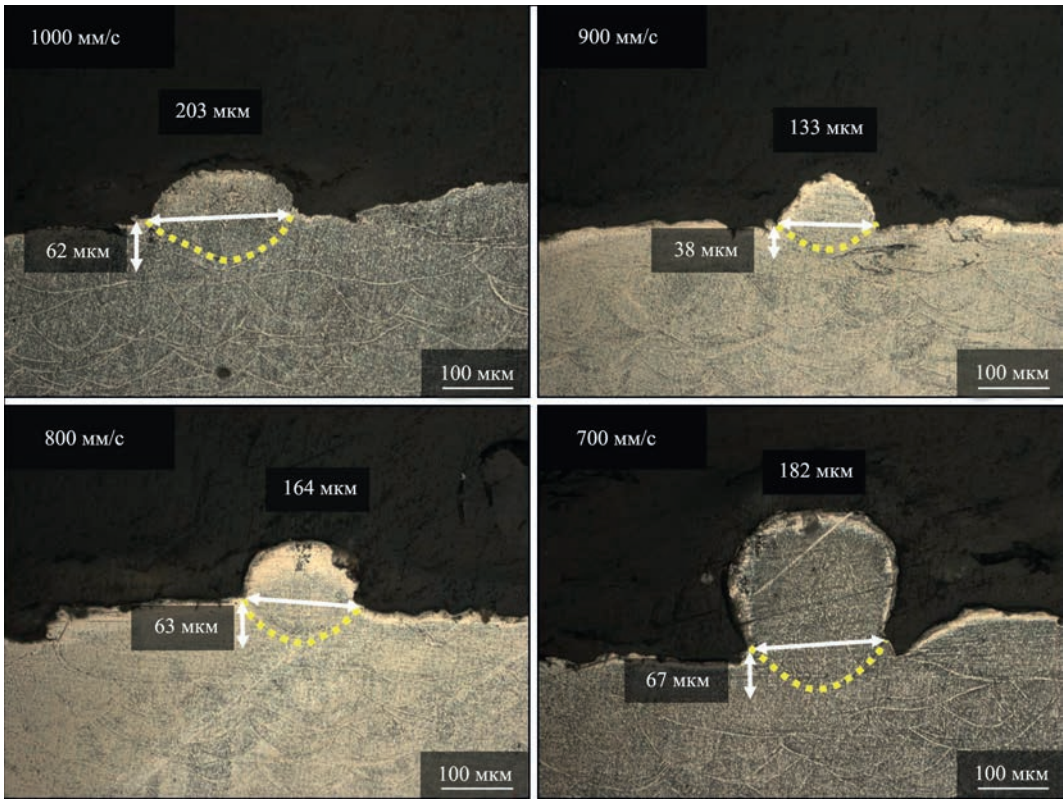


Рис. 7. Зміна морфології розплавленої ванни при застосуванні потужності 400 Вт і діаметра фокусної плями 175 мкм залежно від зміни швидкості сканування

Таблиця 2. Характеристика зовнішнього вигляду треку з точки зору його цілісності та стабільності залежно від зміни потужності сканування та діаметра фокусної плями, швидкість сканування 1000 мм/с

Діаметр фокусної плями, мкм	Потужність, Вт								
	150	175	200	225	250	275	300	325	350
75	нест. тр.	нест. тр.	нест. тр.	нест. тр.	нест. тр.	нест. тр.			
100		нест. тр.	нест. тр.	нест. тр.	нест. тр.	нест. тр.	нест. тр.		
125			нест. тр.	нест. тр.	нест. тр.	нест. тр.	нест. тр.	нест. тр.	
150				нест. тр.	нест. тр.	нест. тр.	нест. тр.	нест. тр.	нест. тр.

Примітка: Порожні комірки – тестування не проводилося, колір комірок характеризує стабільність треків згідно зі шкалою, наведений на рис. 2. Нест.тр. – нестабільний трек.

При використанні зазначених режимів з діаметром фокусної плями 175 мкм утворення ванни у формі замкової щілини не спостерігалось. Залежності від співвідношення глибини до ширини ванни також не було виявлено. Усі треки мали невелику глибину, спостерігалися такі дефекти, як здуття/підрізання, з частими випадками початку розшарування (рис. 7). Зменшення швидкості сканування одночасно зі збільшенням потужності вплинуло не стільки на збільшення глибини, скільки на зростання ймовірності утворення цього дефекту.

Таблиця 3. Співвідношення глибини до ширини розплавленої ванни залежно від зміни потужності та швидкості сканування при діаметрі фокусної плями 175 мкм

Швидкість сканування, мм/с	Потужність, Вт					
	400	420	440	460	480	500
1000	0,30	0,36	0,28	0,53	0,38	0,27
900	0,29	0,25	0,42	0,28	0,32	0,33
800	0,37	0,31	0,37	0,38	0,44	0,32
700	0,36	0,42	0,40	0,38	0,40	0,36

Логічно припустити, що збільшення діаметра фокусної плями може підвищити ефективність процесу та дозволити використовувати порошки з ширшим діапазоном розмірів частинок [8, 19]. Однак використання лазерного променя з гаусовим розподілом інтенсивності енергії великого діаметра у поєднанні із застосованими режимами не забезпечує високу якість продукції. Результати експерименту, проведеного в цій роботі, підтверджують висновки, зроблені авторами інших досліджень [4, 20].

Режим плавлення типу «замкова щілина» спостерігався лише при використанні малого діаметра фокусної плями лазера 75 мкм (табл. 4). Саме в цьому режимі спостерігалася пропорційна залежність співвідношення глибини до ширини від потужності сканування. При подальшому збільшенні розміру діаметра фокусної плями такої залежності не спостерігалось.

Таблиця 4. Співвідношення глибини до ширини розплавленої ванни залежно від зміни потужності та швидкості сканування, швидкість сканування 1000 мм/с

Діаметр фокусної плями, мкм	Потужність, Вт								
	150	175	200	225	250	275	300	325	350
75	*	0,53	0,17	0,69	1,07	0,91			
100		*	0,29	0,4	*	0,51	0,33		
125			*	*	0,28	0,49	0,32	0,43	
150				*	*	0,22	0,34	*	0,24

Примітка: * – трек в поперечному перерізі не ідентифіковано, порожні комірки – тест не проводився.

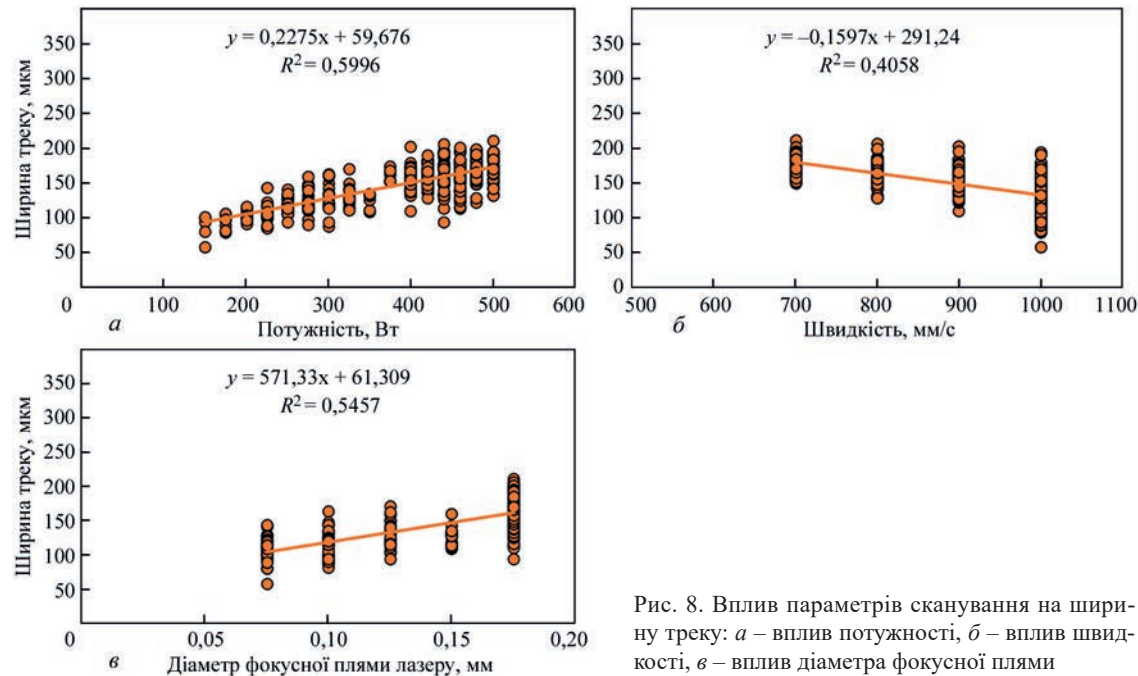


Рис. 8. Вплив параметрів сканування на ширину треку: а – вплив потужності, б – вплив швидкості, в – вплив діаметра фокусної плями

У цьому випадку збільшення діаметра не справило суттєвого впливу на морфологію структури навіть при варіюванні значень потужності. При діаметрі фокусної плями 100 мкм і більше спостерігалася нестабільність у формуванні треків та утворення крапель на поверхні. Глибина треків у більшості випадків була настільки малою порівняно з висотою, що у виявлених треках спостерігалася ознака розшарування.

Таким чином, можна зробити висновок, що зміна як рівня потужності, так і швидкості сканування в досліджуваному діапазоні впливають лише на ширину треків. Статистично значущої залежності цих параметрів на глибину або висоту треків не виявлено. Вплив потужності на глибину при постійних значеннях швидкості сканування або діаметра фокусної плями не підтвердився, за винятком випадків використання найменшого діаметра фокусної плями 75 мкм. Можна припустити, що застосування вищого рівня потужності могло б збільшити глибину треку, але наразі співвідношення глибини до висоти перевищувало одиницю лише для треків, сканованих променем з потужністю 400 та 420 Вт і діаметром фокусної плями 175 мкм, а також для плями діаметром 75 мкм з

потужністю понад 175 Вт. Швидкість сканування в обох випадках становила 1000 мм/с. Для забезпечення стабільності процесу, запобігання дефектам несплавлення та покращення міжшарового з'єднання рекомендується співвідношення глибини до висоти більше за одиницю. Деякі джерела вказують на оптимальне значення цього співвідношення близько 1,5 [14, 21]. Для статистичного аналізу впливу технологічних факторів на геометрію розплавленої ванни зразки відбирались не лише з одного краю будівельної платформи, але й з різних ділянок її поверхні. Для забезпечення адекватності результатів розглядалися лише ті треки, які були заповнені більш ніж на 80 %, тобто повністю та майже повністю. Аналіз показав, що потужність лазерного променя має значний вплив на ширину треку. Швидкість сканування та діаметр фокусної плями мають дещо менший вплив (рис. 8).

Вплив потужності на ширину треку помітний до 400 Вт, подальше збільшення потужності не призводить до змін ширини треку. Це може бути пов'язано з тим, що до 400 Вт діаметр фокусної плями змінювався, тоді як подальше збільшення потужності супроводжувалося зменшенням діаметра фокусної плями.

Крім того, було виявлено, що якість треків і стабільність процесу сильно залежать від вибору оптимальних параметрів для кожного конкретного режиму. Тому збільшення потужності або швидкості сканування без регулювання діаметра фокусної плями може призвести до утворення дефектів, таких як неповне плавлення або нестабільність геометрії. Для покращення стабільності процесу важливо враховувати комбінацію всіх технологічних параметрів сканування та їхню взаємодію.

Висновки.

1. Найстабільніше формування треків досягається при використанні малого діаметра фокусної плями (75 мкм) та помірних значень потужності (175...200 Вт) при високих швидкостях сканування (1000 мм/с). Збільшення діаметра фокусної плями призводить до більшої нестабільності формування треків і утворення крапель на поверхні при збереженні постійної швидкості та потужності сканування.

2. Морфологія ванни розплаву значною мірою залежить від діаметра фокусної плями, потужності лазера та швидкості сканування. Найбільша ймовірність дефектів, таких як здуття та підрізання, спостерігалася при діаметрі фокусної плями 175 мкм.

3. Оптимальне співвідношення глибини до ширини ванни розплаву (понад 0,8) для режиму «замкової щілини» досягається лише при діаметрі фокусної плями 75 мкм. В інших випадках спостерігалася тенденція до утворення менш глибоких треків, що збільшувало ризик дефектів у кінцевих продуктах.

4. Зміни потужності лазера переважно впливають на ширину треку, тоді як глибина та висота залишаються менш залежними від цього параметра. Висока потужність (> 400 Вт) у поєднанні з високими швидкостями сканування сприяє капілярній нестабільності.

Список літератури/References

- Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskiy, R., Badyuk, S. (2022) *Implementation of selective laser melting technology in Ukraine*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
- Wang, X., Gong, X., Chou, K. (2017) Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Pt B: J. of Engineering Manufacture*, 231(11), 1890–1903. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954405415619883>
- Sames, W.J., List, F.A., Pannala, S., Dehoff, R.R., Babu, S.S. (2016) The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *Intern. Mat. Rev.*, 61(5), 315–360. DOI: <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>
- Holla, V., Kopp, P., Grünwald, J., Wudy, K., Kollmannsberger, S. (2023) Laser beam shape optimization in powder bed fusion of metals. *Additive Manufacturing*, 72, 103609. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103609>
- Yildiz, R.A., Popa, A.-A., Malekan, M. (2024) On the effect of small laser spot size on the mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by L-PBF additive manufacturing. *Materials Today Communications*, 38, 108168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108168>
- Nie, X., Chen, Z., Qi, Y., Zhang, H., Zhang, C., Xiao, Z., Zhu, H. (2020) Effect of defocusing distance on laser powder bed fusion of high strength Al–Cu–Mg–Mn alloy. *Virtual and Physical Prototyping*, 15(5), 325–339. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2020.1760895>
- Liu, B., Fang, G., Lei, L., Liu, W. (2022) Experimental and numerical exploration of defocusing in Laser Powder Bed Fusion (LPBF) as an effective processing parameter. *Optics and Laser Technology*, 149, 107846. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.107846>
- Metelkova, J., Kinds, Y., Kempen, K., Formanoir, C., Witvrouw, A., Van Hooreweder, B. (2018) On the influence of laser defocusing in selective laser melting of 316L. *Additive Manufacturing*, 23, 161–169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.006>
- Paraschiv, A., Matache, G., Condruz, R.M., Frigioescu, T.F., Ionică, I. (2021) The influence of laser defocusing in selective laser melted IN 625. *Materials*, 14(13), 3447. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14133447>
- Gerstgrasser, M., Cloots, M., Stirnimann, J., Wegener, K. (2021) Focus shift analysis to manufacture dense and crack-free SLM-processed CM247LC samples. *J. of Mater. Proces. Technology*, 289, 116948. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116948>
- Bean, G.E., Witkin, D.B., McLouth, T.D., Patel, D.N., Zaldivar, R.J. (2018) Effect of laser focus shift on surface quality and density of Inconel 718 parts produced via selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 22, 207–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.024>
- Zhou S., Su, Y., Gu, R., Wang, Z., Zhou, Y., Ma, Q., Yan, M. (2019) Impacts of defocusing amount and molten pool boundaries on mechanical properties and microstructure of selective laser melted AlSi10Mg. *Materials*, 12(1), 73. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12010073>
- Adzhamskiy, S.V., Kononenko, G.A., Podolskiy, R.V. (2023) Mechanical properties of Inconel 718 alloy produced using selective laser melting technology with dynamic focusing on application surface. *Mater. Sci.*, 59, 420–425. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00793-8>
- Agrawal, A.K., Rankouhi, B., Thoma, D.J. (2022) Predictive process mapping for laser powder bed fusion: A review of existing analytical solutions. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 26(6), 101024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2022.101024>
- Zhang, Z., Zhang, T., Sun, C., Karna, S., Yuan, L. (2024) Understanding melt pool behavior of 316L stainless steel in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Micromachines*, 15(2). DOI: <https://doi.org/10.3390/mi15020170>
- Scime, L., Beuth, J. (2019) Melt pool geometry and morphology variability for the Inconel 718 alloy in a laser powder bed fusion additive manufacturing process. *Additive Manufacturing*, 29, 100830. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100830>
- Weaver, J.S., Heigel, J.C., Lane, B.M. (2022) Laser spot size and scaling laws for laser beam additive manufacturing. *J. of Manufacturing Processes*, 73, 26–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.10.053>
- Bergmüller, S., Gerhold, L., Fuchs, L., Kaserer, L., Leichtfried, G. (2023) Systematic approach to process parameter optimization for laser powder bed fusion of low-alloy steel based on melting modes. *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, 126, 4385–4398. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11377-2>
- Stoll, T., Prudlik, R., Birg, M. et al. (2025) Influence of different beam shapes on melt pool geometry of single melt tracks on IN718. *Prog. Addit. Manuf.*, 10, 2675–2690. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00775-x>
- Xiao, B., You, B.H., Jin, T. (2024) Computational analysis of selective laser sintering of Inconel 625. *Frontiers in Heat and Mass Transfer.*, 22(2), 417–432. DOI: <https://doi.org/10.32604/fhmt.2024.048739>

21. Zhang, B., Seede, R., Xue, L., Atli, K.C., Zhang, C., Whitt, A., Karaman, I., Arroyave, R., Elwany, A. (2021) An efficient framework for printability assessment in laser powder bed fusion metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 46(1), 102018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102018>

der bed fusion metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 46(1), 102018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102018>

INFLUENCE OF FOCAL SPOT DIAMETER ON TRACK FORMATION AND MELT PENETRATION SHAPE IN LPBF-PROCESS OF 316L STEEL

S.V. Adzhamskyi^{1,2}, R.V. Podolskyi^{1,3,4}, T.V. Balakhanova³, O.E. Baranovskaya³, S.I. Badyuk^{1,4}, N.P. Togobytska⁵

¹LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 31v Serhiy Podolynskyi Str., 49000, Dnipro, Ukraine. E-mail: as@alt-print.com

²Institute of Transport Systems and Technologies, NAS of Ukraine. 5 Pysarzhevskyi Str., 49000, Dnipro, Ukraine. E-mail: itst@westa-inter.com

³Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the NAS of Ukraine. 1 Akad. Starodubova Squ., 49000, Dnipro, Ukraine. E-mail: rostislavpodolskij@gmail.com

⁴Institute of Applied Control Systems of the NAS of Ukraine. 42 Akad. Glushkova Ave., 03187, Kyiv, Ukraine. E-mail: IACS@nas.gov.ua

⁵HTW University of Applied Sciences. 8 Triskovallie Str., 10318, Berlin, Germany. E-mail: Nataliya.Togobytska@htw-berlin.de

This study systematically investigates the influence of key laser powder bed fusion (LPBF) process parameters, namely laser spot diameter, laser power, and scanning speed, on the crystallization front geometry of single tracks produced in 316L austenitic stainless steel. Particular attention was paid to evaluating the effect of laser spot diameter. Experimental investigations were performed using a laser processing system equipped with ytterbium fiber lasers featuring a Gaussian beam profile. Single-track experiments were conducted over a wide range of processing conditions, with laser power varying from 150 to 500 W, scanning speed from 700 to 1000 mm/s, and laser spot diameter from 75 to 175 μm . The results demonstrated that the highest track continuity and process stability were achieved with a 75 μm laser spot diameter combined with a laser power of 175...200 W and a scanning speed of 1000 mm/s. Increasing the laser spot diameter beyond 125 μm required a significant increase in laser power to maintain stable melting, accompanied by a noticeable reduction in track stability. At a spot diameter of 175 μm , capillary instability and droplet formation were observed even at high laser power and moderate scanning speeds. Further analysis showed that the optimal melt pool depth-to-width ratio exceeding 0.8, characteristic of the keyhole melting mode, was achieved exclusively with the 75 μm laser spot diameter. In contrast, larger spot diameters produced shallower melt pools, thereby increasing the probability of defect formation in the final components. 21 Ref., 4 Tabl., 8 Fig.

Keywords: LPBF-technology, single track scanning, laser diameter, scanning process parameters

ORCID

Аджамський С.В. – <https://orcid.org/0000-0002-6095-8646>, Подольський Р.В. – <https://orcid.org/0000-0002-0288-0641>, Балаханова Т.В. – <https://orcid.org/0000-0003-4138-9238>, Барановська О.Є. – <https://orcid.org/0000-0002-4106-5797>, Бадюк С.І. – <https://orcid.org/0000-0002-1074-3057>, Тогобицька Н.П. – <https://orcid.org/0000-0002-9490-2368>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛІА ЛІСТУВАННЯ

Р.В. Подольський Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України. 49000, м. Дніпро, пл. Академіка Стародубова, 1. E-mail: rostislavpodolskij@gmail.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

С.В. Аджамський, Р.В. Подольський, Т.В. Балаханова, О.Є. Барановська, С.І. Бадюк, Н.П. Тогобицька (2026) Вплив діаметра фокусної плями на формування треків і форму проплавлення розплаву в LPBF-процесі сталі 316L. *Автоматичне зварювання*, 04, 56–64. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2026.04.06>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

Отримано 26.02.2026

Отримано у переглянутому вигляді 27.04.2026

Підписано до друку 20.07.2026

Оприлюднено 24.07.2026

