

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.02

УДК 621.763. 623.78.632.64

С.В. Аджамський, Т.В. Балаханова, О. Є. Барановська,
Р.В.Подольський, С.І. Бадюк

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ДЕФЕКТУ KEY HOLE В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗА LPBF-ТЕХНОЛОГІЄЮ

Анотація. У процесі LPBF формування деталі відбувається через локальне плавлення порошку лазером, що створює ванну розплаву. Її стабільність визначає якість поверхні. Одним з критичних дефектів процесу LPBF є пористість, оскільки вона погіршує втомну міцність та надійність конструкцій. У роботі досліджено вплив параметрів лазерного плавлення порошкового матеріалу 316L на морфологію розплавленої ванни та утворення пористості, зокрема дефектів типу «Key Hole». Матеріалом для досліджень слугували дослідні зразки, що виготовленні з нержавіючої сталі аустенітного класу 316L з хімічним складом в % по масі: Cr=17,79; Ni=12,63; Mo=2,35; Mn=0,78; Si=0,64; C=0,016, з розміром частинок: 45 ± 15 μm . Експериментальні дослідження виконувалися на установці з одномодовим волоконним ітербієвим лазером з профілем енергії Flet-top, який характеризується рівномірним розподілом енергії за перерізом променя лазера. Параметри процесу включали змінну потужність лазера (80–270 Вт), швидкість сканування (200–1050 мм/с) і діаметр лазерного променя (75–175 мкм). Проаналізовано 808 треків, із яких у 46 випадках зафіксовано пористість цього типу. Встановлено, що вона не виникає при швидкості сканування понад 600 мм/с, а збільшення щільності енергії сприяє її утворенню. Встановлено, що зменшення кількості дефектів зі збільшенням потужності лазера пов'язано з покращенням плинності розплаву та його здатністю ефективніше поглинати енергію випромінювання. За таких умов газові включення встигають вийти на поверхню до моменту закриття «Key Hole», що знижує ймовірність утворення пористості. Експериментальні дослідження показали, що порогове значення наближається до 0,8, проте воно не є фіксованим і залежить від інших параметрів процесу сканування, таких як потужність лазера, швидкість переміщення променя та фізико-хімічні властивості матеріалу.

Ключові слова: адитивне виробництво, пористість, дефект «Key Hole», режим плавлення, ванна розплаву.

Вступ

У процесі лазерного плавлення порошкового шару (LPBF) поверхня деталі формується завдяки послідовному плавленню порошкового матеріалу під дією лазерного променя. Взаємодія променя з матеріалом створює ванну розплаву, де кількість розплаву та стабільність процесу безпосередньо впливають на якість кінцевої конструкції. Недостатній проплав або надмірне нагрівання можуть призводити до утворення дефектів, що вимагає детального вивчення цих взаємодій на рівні ванни розплаву та їх впливу на якість. Серед основних дефектів, які виникають у процесі LPBF, можна виділити неповне сплавлення, пористість, гарячі тріщини, нерівномірне нанесення порошку та кулькоутворення. Як відомо [1], наявність значної кількості пор у матеріалі негативно впливає на його втомну міцність та інші механічні властивості, що є критичним для застосування таких конструкцій у промисловості.

Аналіз останніх досліджень

Пористість розрізняють за трьома основними видами: газова, пористість через несплавлення та «Key Hole» (рис. 1). Неповне сплавлення виникає через недостатню потужність лазера, що не дозволяє повністю розплавити матеріал. Пори типу «Key Hole» – утворюються через надмірну енергію лазера, яка випаровує матеріал і залишає газові бульбашки. Порожнечи виникають через швидке охолодження матеріалу та залишкові напруження, що призводять до утворення пор [2].

На відміну від пор, що виникають через несплавлення, пори у вигляді «Key Hole» важко усунути шляхом повторного плавлення верхніх шарів, оскільки вони знаходяться занадто глибоко. Тому найважливішим є попередження утворення пор «Key Hole» на ранніх етапах виробничого процесу. На початкових етапах формування структури важливу роль відіграє однопрохідна ванна розплаву, яка є основною структурною одиницею для багатопохідних і багат шарових конструкцій у LPBF. Морфологія та розміри одиничного сліду плавлення мають значний вплив на мікроструктуру, пористість і властивості виготовлених деталей [3]. Забезпечення високої якості виробів залежить від точного контролю та моніторингу ванни розплаву – локалізованої області, в

якій металевий порошок плавиться та твердне під впливом направленої джерела енергії. Аналіз характеристик розплавленої ванни є важливим, оскільки численні дослідження встановили чітку залежність між особливостями цієї ванни та різними типами дефектів готового металевих виробу [4].

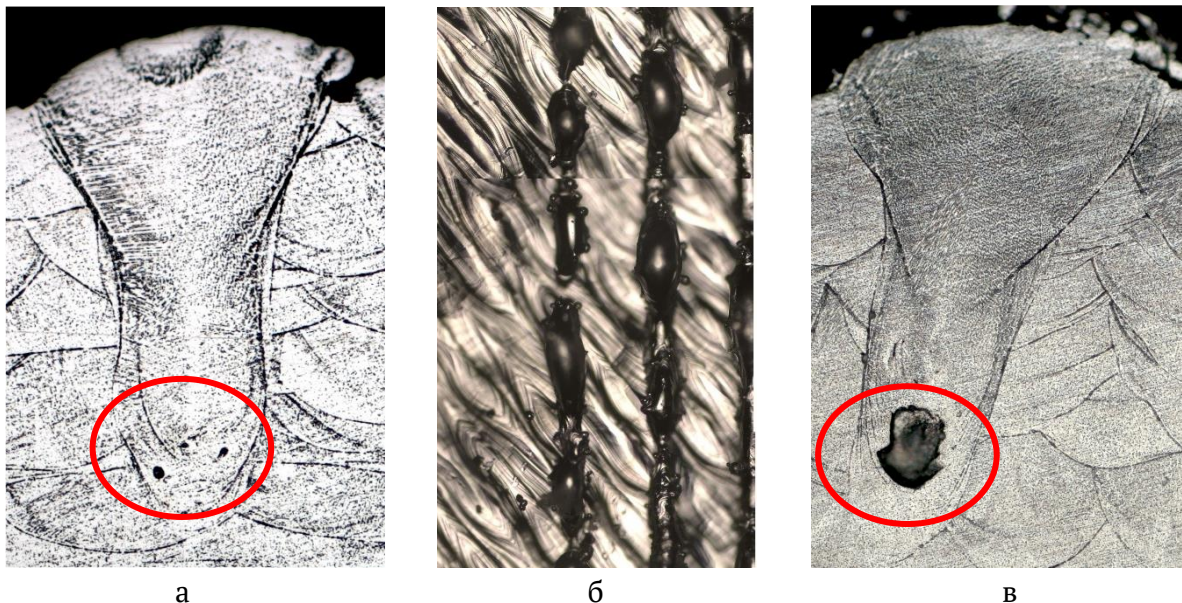


Рисунок 1 - Мікрофотографії дефектів, виявлених у LPBF:
а – газова пористість, б – дефект несплавлення, в – пористість «Key Hole»

Газова пористість і пористість у вигляді «Key Hole» виникають у розплавленій ванні в режимі «Key Hole». Пористість, що з'являється через несплавлення, утворюється в режимі провідності розплавленої ванни [5].

Перехід від одного режиму плавлення до іншого є одним з важливих аспектів, однак він залишається однією з основних проблем у моделюванні процесу LPBF [6]. Поріг «Key Hole» значною мірою залежить від типу машини та параметрів процесу [7], що ускладнює точне прогнозування її утворення. Існує кілька підходів до визначення параметрів процесу, зокрема на основі нормалізованої ентальпії або режиму плавлення [8]. Перехід між режимами плавлення визначають зазвичай через пікову температуру, яка своєю чергою залежить від основних параметрів процесу – потужності та швидкості сканування [9]. Висока потужність лазера і низька швидкість сканування збільшують глибину ванни розплаву, що підвищує ймовірність утворення

дефектів. Для загальної характеристики найчастіше використовують такий параметр як «щільність енергії». Щільність енергії лазера може бути оцінена за кількома параметрами: LED – енергія на одиницю довжини (Дж/мм), AED – враховує площу лазерного променя (Дж/мм²), VED – енергія на одиницю об’єму (Дж/мм³), враховує відстань між штрихами та товщину шару [27]. І хоча VED – найпоширеніший параметр для цієї технології, при дослідженні поодиноких треків найчастіше використовують LED або AED. Незважаючи на велику кількість досліджень у цій галузі [10], думки щодо переходу від режиму проводимості до режиму «Key Hole» різняться, що вказує на необхідність подальших розробок і уточнень.

Мета дослідження

Метою статті є дослідження особливостей кристалізації ванни розплаву та встановлення умов утворення дефектів типу «Key Hole» в поодиноких треках.

Методика проведення досліджень

Ця стаття поділяється на два основні розділи: перша частина присвячена аналітичному дослідженню, а друга – вивченню форм плавильної ванни та умов утворення пористості типу «Key Hole» в поодиноких треках, отриманих з порошку 316L в % по масі: Cr=17,79; Ni=12,63; Mo=2,35; Mn=0,78; Si=0,64; C=0,016, розподіл частинок становив від 15 до 45 мкм.

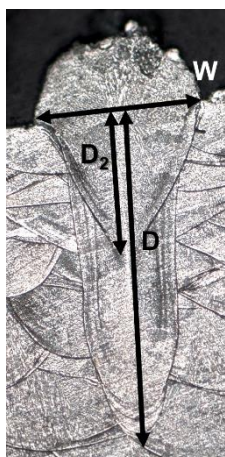
Експериментальні дослідження виконувалися на установці з одномодовим волоконним ітербієвим лазером з профілем енергії Flet-top, який характеризується рівномірним розподілом енергії за перерізом променя лазера [12]. Параметри процесу включали змінну потужність лазера (80–270 Вт), швидкість сканування (200–1050 мм/с) і діаметр лазерного променя (75–175 мкм). Усього досліджено 808 цільних треків, з яких у досліджених режимах зафіксовано 46 випадків пористості типу «Key Hole». Аналіз поперечних перерізів треків використовували для оцінки геометричних параметрів ванни плавлення на мікроструктурному рівні: ширини, глибини та загальної форми. Підготовку зразків для аналізу мікроструктури проводили за стандартною методикою шліфування та полірування, для травлення застосовано реактив Каллінга №2.

Результати досліджень

Глибина зони плавлення та характеристики плавильної ванни визначаються тепловим полем та механізмом теплопередачі [11]. Формування ванни розплаву в режимі «Key Hole» відбувається при високій інтенсивності лазерного нагріву, коли парціальний тиск металу, що випаровується, утворює поглиблення в розплаві. Зі збільшенням енерговкладення геометрія зони розплаву змінюється від мілкої напівсферичної форми до глибокої циліндричної. Однак поширене припущення про напівсферичну форму плавильної ванни є спрощенням, яке може не завжди відповідати експериментальним даним [12-13]. Перехід від плоскої ванни до режиму «Key Hole» зумовлений кількома фізичними процесами: збільшенням потоку металевих парів; підвищенням локального тиску парової віддачі; взаємодією капілярних сил та термокапілярної конвекції [13]. Утворення пор відбувається через локальні холодні зони з високим поверхневим натягом і недостатнім тиском парової віддачі. Частина пор може виходити на поверхню металу або розчинятись у зворотному потоці.

Як вже було показано, при дослідженні переходу від режиму плавлення до режиму «Key Hole» зазвичай використовують геометричні характеристики ванни розплаву як глибина (D) та ширина (W) (рис. 2). Додатково в даній роботі звернули увагу на глибину залягання перших чітких границь ванни розплаву D_2 , оскільки нижче них найчастіше відбувається зміна морфології та форми поперечного перерізу поодинокого трека.

Морфологія розплавлених поодиноких треків може значно відрізнятись навіть за подібної геометрії (рис. 3). Зокрема, чашоподібна форма ванни розплаву з нерівномірним звуженням углиб може спричиняти утворення пористості.



W – ширина, D – глибина, D2 – глибина залягання перших чітких границь
Рисунок 2 – Приклади вимірювання геометричних характеристик ванни розплаву треків



а



б



в

Рисунок 3 - Мікроструктури треків з близьким значенням глибини до ширини ванни розплаву ≈ 1 , $\times 200$: а – Р 270Вт, V 800 мм/с, AED 76,39 Дж/мм²; б – Р 110 Вт, V 400 мм/с, AED 62,25 Дж/мм²; в – Р 150 Вт, V 400 мм/с, AED 84,88 Дж/мм²

Аналіз впливу основних параметрів процесу – швидкості та потужності сканування – показав, що пористість частіше виникала не при максимальному відношенні глибини до ширини ванни розплаву. Розподіл значень має гаусівський характер із середнім значенням 1,44. Також встановлено, що пористість спостерігалася в усьому дослідженому діапазоні потужності. Водночас при швидкості сканування понад 600 мм/с пористість типу «Key Hole» не утворювалася (рис. 4).

Тенденція до збільшення пористості спостерігається зі зростанням щільності лінійної та площинної енергії, що узгоджується з літературними даними. Однак утворення дефектів не можна пов'язувати виключно з розплавленими ваннами, де відношення глибини до товщини менше 1. При відношенні глибини до ширини менше 1 значення глибини є стабільнішими та легше контрольованими. Коли ж це відношення наближається до 1, глибина може суттєво змінюватися навіть у межах одного положення на платформі.

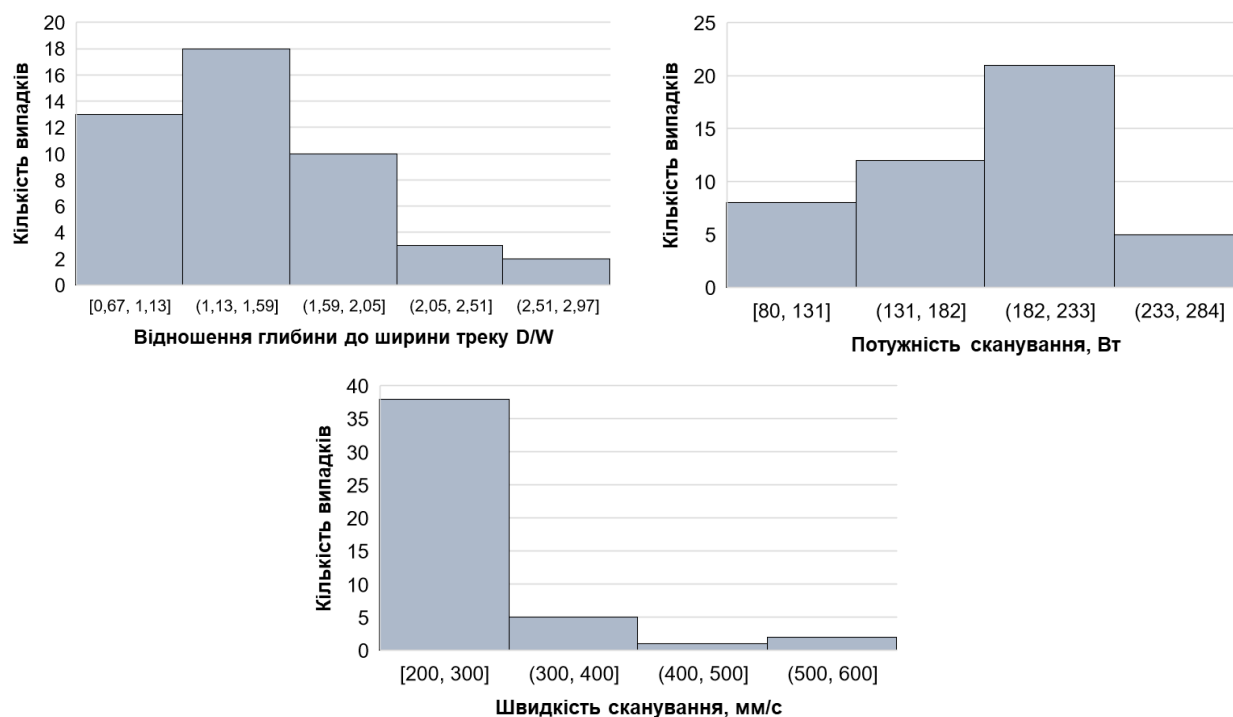


Рисунок 4 - Випадки виникнення пористості за типом «Key Hole» при різних значеннях: а – відношення глибини до товщини треків, б – потужності сканування, в – швидкості сканування

Прискорення сканування суттєво зменшує глибину ванни та відповідне відношення глибини до товщини – приблизно до швидкості 500 мм/с. Подальше збільшення швидкості майже не впливає на ці параметри. Водночас на порогову швидкість можуть впливати й інші технологічні фактори. Потужність також має лінійний, хоча й менш виражений вплив. У зразках поодиноких треків часто спостерігається чітка границя контуру ванни розплаву, а також більш груба дендритна структура. Було виявлено, що

швидкість сканування майже не впливає на утворення так званого «подвійного дна» – глибина залишається на рівні плато, що відображається у загальній залежності між швидкістю сканування та глибиною треків. Вплив потужності є більш рівномірним, оскільки вона лінійно змінює як товщину, так і глибину треків, хоча при малих значеннях відношення глибини до товщини спостерігається менша варіативність. Середнє значення відношення глибини проміжної ванни розплаву до товщини треків становило 0,68 (максимум – 1,24), тоді як середнє відношення основної глибини треків до товщини складало 0,9, а максимальне – 3,24.

Висновки

1. Експериментальні дослідження показали, що порогове значення дефекту Key Hole наближається до 0,8, проте воно не є фіксованим і залежить від інших параметрів процесу сканування, таких як потужність лазера, швидкість переміщення променя та фізико-хімічні властивості матеріалу.

2. Наявність чітко вираженої межі між основною та малою ванною розплаву свідчить про значну різницю температур у різних ділянках зони плавлення. Імовірно, початкова мала ванна розплаву з глибиною D2 утворилася за механізмом теплопровідності (конвекції), а подальше збільшення глибини відбувалося вже за механізмом «Key Hole». Структура, що охарактеризована, як зона D не завжди має чіткі контури, але в тій чи іншій мірі присутня у всіх треках, особливо в тих випадках, коли ванна розплаву набуває чашоподібної форми.

3. Спостерігається тенденція до зменшення кількості дефектів зі збільшенням потужності лазера, що, ймовірно, пов'язано з покращенням плинності розплаву та його здатністю ефективніше поглинати енергію випромінювання. За таких умов газові включення встигають вийти на поверхню до моменту закриття «Key Hole», що знижує ймовірність утворення пористості.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Miner J., Ngo A., Gobert C., Reddy T., Lewandowski J., Rollett A., Beuth J., Narra S. Impact of melt pool geometry variability on lack-of-fusion porosity and fatigue life in Powder Bed Fusion - Laser Beam Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*. 2024. Vol. 95. P. 104506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104506>
2. Gordon J., Narra S., Cunningham R., Liu H., Chen H., Suter R., Beuth J., Rollett A. Defect structure process maps for laser powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 36. P.101552. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101552>
3. Wang J.-C., Zhu R., Liu Y.-J., Zhang L.-C. Understanding melt pool characteristics in laser powder bed fusion: An overview of single and multi-track melt pools for process optimization. *Advanced Powder Materials*. 2023. Vol. 2. P. 100137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2023.100137>
4. Yang A., Zhao Z., Zhang X. A bidirectional prediction framework for melt pool size and process parameters in LPBF. *Engineering Research Express*. 2025. Vol. 7 P. 015549. DOI: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/adb0a2>
5. Wang T., Wang Y., Chen C., Zhu H. Relationships between the characteristics of porosity, melt pool and process parameters in laser powder bed fusion Al-Zn alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 68. P. 1236-1244. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.027>
6. Naderi M., Weaver J., Deisenroth D., Iyyer N., McCauley R. On the fidelity of the scaling laws for melt pool depth analysis during laser powder bed fusion. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*. 2023. Vol. 12. P. 11–26. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40192-022-00289-w>
7. Metelkova J., Kinds Y., Kempen K., de Formanoir C., Witvrouw A., Hooreweder B. On the influence of laser defocusing in Selective Laser Melting of 316L. *Additive Manufacturing*. 2018. Vol. P. 161-169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.006>
8. Bergmüller S., Gerhold L., Fuchs L., Kaserer L., Leichtfried G. Systematic approach to process parameter optimization for laser powder bed fusion of low-alloy steel based on melting modes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 126. P. 4385–4398. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11377-2>
9. Cunningham R., Parab N., Kantzos C., Pauza J., Fezzaa K., Sun, T., Rollett A. Keyhole threshold and morphology in laser melting revealed by ultrahigh-speed x-ray imaging. *Science*. 2019. Vol. 363. P. 849-852. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aav4687>
10. Agrawal A., Rankouhi B., Thoma D. Predictive process mapping for laser powder bed fusion: A review of existing analytical solutions. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2022. Vol. 26. P. 101024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2022.101024>
11. Johnson G., Dolde M., Zaugg J., Quintana M.J., Collins P. Monitoring, modeling, and statistical analysis in metal additive manufacturing: A review. *Materials*. 2024. Vol. 17. P. 5872. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17235872>
12. Galbusera F., Caprio L., Previtali B., Demir A.G. The influence of novel beam shapes on melt pool shape and mechanical properties of LPBF produced Al-alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023. Vol. 85. P. 1024-1036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.007>
13. Kasperovich G., Haubrich J., Gussone J., Requena G. Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting. *Materials & Design*. 2016. Vol. 105. P. 160-170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.070>

Received 08.04.2025.

Accepted 28.04.2025.

UDC 621.763. 623.78.632.64

Sergey Adzhamsky, Tetana Balakhanova, Olena Baranovskaya,
Rostyslav Podolsky, Sergey Baduk

**STUDY OF THE FEATURES OF KEY HOLE DEFECT FORMATION
DEPENDING ON THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF
MANUFACTURING USING LPBF TECHNOLOGY**

In the LPBF process, the part is formed by local melting of the powder by a laser, which creates a melt pool. Its stability determines the surface quality. One of the critical defects in the LPBF process is porosity, as it worsens the fatigue strength and reliability of structures. The work investigated the effect of laser melting parameters of the 316L powder material on the morphology of the molten pool and the formation of porosity, in particular, defects of the “Key Hole” type. The material for the research was experimental samples made of austenitic stainless steel 316L with a chemical composition in wt%: Cr=17.79; Ni=12.63; Mo=2.35; Mn=0.78; Si=0.64; C=0.016, with a particle size: $45 \pm 15 \mu\text{m}$. Experimental studies were performed on a single-mode fiber ytterbium laser with a Flet-top energy profile, which is characterized by a uniform energy distribution across the laser beam cross-section. The process parameters included variable laser power (80–270 W), scanning speed (200–1050 mm/s), and laser beam diameter (75–175 μm). 808 tracks were analyzed, of which 46 cases recorded porosity of this type. It was established that it does not occur at scanning speeds above 600 mm/s, and an increase in energy density contributes to its formation. It was established that the decrease in the number of defects with increasing laser power is associated with improved melt fluidity and its ability to more effectively absorb radiation energy. Under such conditions, gas inclusions have time to reach the surface by the time the “Key Hole” closes, which reduces the likelihood of porosity formation. Experimental studies have shown that the threshold value is close to 0.8, but it is not fixed and depends on other parameters of the scanning process, such as laser power, beam speed, and physicochemical properties of the material.

Keywords: additive manufacturing, porosity, key hole defect, melting mode, melt pool.

Аджамський Сергій Вікторович – PhD, технічний директор LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», старший науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна

Балаханова Тетяна Валеріївна - канд.техн.наук, старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна

Барановська Олена Євгенівна - канд.техн.наук, науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна

Подольський Ростислав Вячеславович – докт. філ., в.о зав. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, інженер-матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», старший науковий співробітник Інститут прикладних систем управління НАН України, Дніпро, Україна

Бадюк Сергій Іванович – канд.техн.наук, інженер-технолог LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», старший науковий співробітник Інститут прикладних систем управління НАН України, Дніпро, Україна

Adjamskiy Sergey – PhD, Technical Director of Additive Laser Technology of Ukraine LLC, senior researcher at the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Balahanova Tetana - Cand. technical science, senior researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Baranovska Olena - Cand. technical science, researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Podolskyi Rostyslav – PhD, Acting Head of the Department of Problems of Deformation and Heat Treatment of Structural Steels of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Senior Researcher at the Institute of Applied Control Systems NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Baduk Sergey – Cand. technical science, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Process engineer LLC "Additive Laser Technology of Ukraine", senior researcher, Institute of Applied Control Systems, NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine