

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ДЕФЕКТУ НЕСУЦІЛЬНОСТІ «KEY HOLE» В LPBF-ТЕХНОЛОГІЇ

Аджамський С.В.¹, Балаханова Т.В.², Барановська О.Є.², Подольський Р.В.³

¹ТОВ «АЛТ України», ІТСТ НАН України, докт. філ. Україна

²ІЧМ НАН України, канд. техн. наук. Україна

⁴ТОВ «АЛТ України», ІЧМ НАН України, ІПСУ НАН України докт. філ. Україна

Анотація. У роботі вивчено вплив параметрів лазерного плавлення порошкового матеріалу 316L на форму ванни розплаву та утворення дефектів типу «Key Hole». Аналіз 808 треків виявив 46 випадків пористості. Попри значну увагу дослідників до процесів LPBF, перехід від режиму проводимості до режиму «Key Hole» залишається суперечливим і недостатньо вивченим. Це підкреслює складність фізичних явищ, що відбуваються у ванні розплаву, та необхідність подальших досліджень. Аналіз отриманих результатів показав, що дефекти типу «Key Hole» не завжди з'являються на максимальній глибині ванни розплаву. Було встановлено, що пористість може утворюватися в широкому діапазоні потужностей, однак ці дефекти спостерігаються лише при швидкості сканування менше ніж 600 мм/с.

Ключові слова: лазерне плавлення в порошковому шарі, мікроструктура, ванна розплаву, режим плавлення, пористість, Key Hole.

Під час лазерного порошкового сплавлення (LPBF) поверхня деталі формується шляхом локального плавлення порошку лазером. Послідовне нарощування формує металеву конструкцію якість якої значною мірою залежить від стабільності ванни розплаву.

У процесі лазерного порошкового сплавлення тип і кількість пористості залежать від режиму плавлення. Якщо енергії недостатньо, порошок не встигає повністю розплавитись – з'являються пори від несплавлення, а коли лазер надто потужний, розплав перегрівається, формується так званий режим «Key Hole», і тоді в матеріалі можуть залишатись глибокі пори, які важко усунути повторним плавленням. Саме тому важливо ще на ранніх етапах процесу забезпечити стабільну форму ванни розплаву – від неї залежить якість усієї майбутньої конструкції.

Форма і поведінка цієї ванни залежать не лише від потужності й швидкості лазера, а й від таких факторів другого порядку, як розмір променя, склад і форма частинок порошку. Для опису умов плавлення використовують показники щільності енергії, які враховують різні аспекти взаємодії лазера з матеріалом. Але перехід між режимами плавлення – не різкий, а поступовий, що ускладнює точне передбачення дефектів.

Незважаючи на розвиток методів моніторингу в реальному часі [1], точно визначити ймовірність появи пор поки складно. Дефекти зазвичай класифікують постфактум – за допомогою мікроскопії, яка хоч і вимагає руйнування зразка, залишається найнадійнішим методом аналізу.

Оцінка форми та стабільності ванни розплаву під час лазерного плавлення залишається предметом активного наукового обговорення. Хоча класичний підхід передбачає напівсферичну геометрію ванни в режимі теплопровідності та витягнуту форму з паровою порожниною в режимі «Key Hole», експериментальні дані часто демонструють значне відхилення від таких ідеалізованих моделей.

Різні підходи до визначення порогових значень співвідношення ширини до глибини (W/D) плавної ванни використовуються для оцінки переходу між режимами плавлення. Згідно з деякими дослідженнями, пороговим значенням для переходу від стабільного теплопровідного плавлення до «Key Hole» є $W/D \approx 2$, що відповідає напівсферичній формі ванни, характерній для стабільного процесу. Інші автори визначають порогове значення $W/D \approx 1,5$, вказуючи на перехідний режим, де зростає ймовірність утворення пор. За іншими даними, значення може бути знижене до $W/D \approx 1,25$, що вказує на виражений перехід до «Key Hole» з високим випаровуванням металу. Окрім цього, важливу роль у стабільності плавлення відіграє форма ванни: циліндрична форма може зберігати стабільність навіть при малих значеннях W/D , а U- або клиноподібна ванна сприяє турбулентності і дефектам. Нові роботи розглядають ванни розплаву як фігуру складнішої форми, такі як «7», «Т» або «J», що відображають динаміку рідкого металу під впливом турбулентних потоків та капілярних сил. Деякі дослідники вказують на

можливість стабільного існування «Key Hole» без суттєвого утворення пор, якщо динаміка потоку залишається субкритичною. Натомість інші вважають навіть невелике заглиблення ознакою підвищеного ризику дефектів.

Таким чином, єдиної думки щодо точних критеріїв переходу між режимами плавлення не існує. Сучасний підхід враховує не лише геометрію, а й гідродинамічні процеси у ванні розплаву, що вимагає комплексного аналізу для точного прогнозування дефектів. Метою роботи є виявлення умов, що призводять до утворення пористості типу «Key Hole» в поодиноких треках, сформованих із порошку сталі 316L.

У дослідженні переходу від режиму теплопровідного плавлення до «Key Hole» акцентується увага на геометричних характеристиках плавильної ванни, таких як глибина (D) і ширина (W).

Морфологія треків може значно варіюватися, навіть за схожих геометричних умов. Наприклад, чашоподібна форма ванни з нерівномірним звуженням може призводити до утворення пористості (рис. 1).

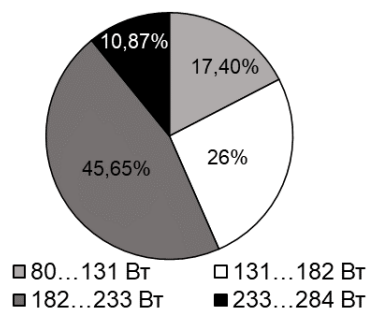
Дослідження 808 треків показали, що пористість типу «Key Hole» виявляється не так часто, але її виникнення залежить від параметрів процесу, таких як швидкість і потужність сканування (рис. 2).

Аналіз показав, що пористість не завжди виникає при максимальному значенні співвідношення глибини до ширини ванни, а має гаусівський розподіл зі середнім значенням 1,44. Також відзначено, що з підвищенням швидкості сканування (понад 600 мм/с) пористість практично не утворюється. Зростання щільності енергії також сприяє збільшенню пористості, що відповідає науковим дослідженням.



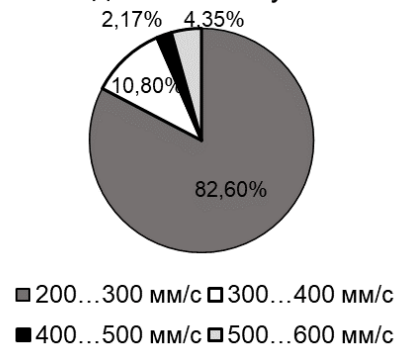
Рисунок 1 – Мікроструктури треків з близьким значенням глибини до ширини ванни розплаву ≈ 1 , $\times 200$: а – Р 270 Вт, V 800 мм/с, лінійна щільність енергії 76,39 Дж/мм²; б – Р 110 Вт, V 400 мм/с, лінійна щільність енергії 62,25 Дж/мм²; в – Р 150 Вт, V 400 мм/с, лінійна щільність енергії 84,88 Дж/мм²

Випадки пористості при різних потужностях сканування



а

Випадки пористості при різних швидкостях сканування



б

Рисунок 2 – Випадки виникнення пористості за типом «Key Hole» при різних значеннях: а – відношення глибини до товщини треків, б – потужності сканування, в – швидкості сканування

Сканування при швидкості більше ніж 500 мм/с суттєво зменшує глибину ванни, після чого подальше збільшення швидкості не має значного впливу. Водночас потужність змінює як товщину, так і глибину треків, причому її вплив є лінійним.

Мікротвердість треків показала нерівномірність температурного поля, що підтверджує різницю в характеристиках треків залежно від щільності енергії. Важливо зазначити, що пори не завжди розташовуються в найглибшій точці ванни. У випадку нахиленого руху лазера асиметрія треку збільшується, і ванна зміщується в бік направлення променя, що також впливає на розташування пор.

Висновки. Попри значну увагу дослідників до процесів LPBF, перехід від режиму проводимості до режиму «Key Hole» залишається суперечливим і недостатньо вивченим. Це підкреслює складність фізичних явищ, що відбуваються у ванні розплаву, та необхідність подальших досліджень. Аналіз отриманих результатів також виявив, що дефекти типу «Key Hole» не завжди з'являються на максимальній глибині ванни розплаву. Було встановлено, що пористість може утворюватися в широкому діапазоні потужностей, однак ці дефекти спостерігаються лише при швидкості сканування менше ніж 600 мм/с.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. 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, 85. P. 1024-1036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.007>

FEATURES OF FORMATION OF THE “KEY HOLE” DISINTEGRITY DEFECT IN LPBF TECHNOLOGY

Adjamsky S.V., Balakhanova T.V., Baranovskaya O.E., Podolskyi R.V.

Annotation. *The paper studies the influence of laser melting parameters of 316L powder material on the shape of the melt pool and the formation of Key Hole defects. Analysis of 808 tracks revealed 46 cases of porosity. Despite the considerable attention of researchers to LPBF processes, the transition from the conduction mode to the Key Hole mode remains controversial and insufficiently studied. This emphasizes the complexity of the physical phenomena occurring in the melt pool and the need for further research. Analysis of the obtained results showed that Key Hole defects do not always appear at the maximum depth of the melt pool. It was found that porosity can form in a wide range of powers, but these defects are observed only at scanning speeds less than 600 mm/s.*

Keywords: *laser powder bed fusion, microstructure, melt pool, melting mode, porosity, Key Hole.*