Ο ΜΙΗ ΔΟ ΟΒΙΔΟΜ

УДК: 621.7: 62-293

С.В. Аджамський^{1,2}, Ю.В. Ткачов¹, Г.А. Кононенко^{2,3}

¹Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Гагаріна, 72, м. Дніпро, Україна, 49000 E-mail: dsit@dnu.edu.ua ²LLC "Additive Laser Technology of Ukraine", ул. Рибінська, 144, м. Дніпро, Україна, 49000 E-mail: info@alt-print.com ³Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, м. Дніпро, Україна, 49107 E-mail: office.isi@nas.gov.ua

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ НА ФОРМУВАННЯ ВАННИ РОЗПЛАВУ ОДИНИЧНОГО ТРЕКУ ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ "INCONEL 718"

Для визначення оптимальних параметрів процесу селективного лазерного плавлення досліджено характеристики ванн одиничних треків (розмір, форма і стабільність), які сформувались в результаті плавлення порошку жароміцного нікелевого сплаву "Inconel 718". Дослідження проведено з метою визначити діапазон параметрів процесу селективного лазерного плавлення, які забезпечили б стабільний трек з глибиною проплаву 2-3 шари. Поодинокі треки були побудовані з використанням різних комбінацій параметрів процесу: потужність лазера 50-400 Вт з кроком 30 Вт, швидкість сканування 450–1000 мм/с з кроком 50 мм/с (всього 144 режими). За допомогою світлового мікроскопа "Axiovert 200M MAT" ("Carl Zeiss") вивчено поперечний переріз одиничних треків і оцінено геометричні параметри ванн розплаву. Статистичний аналіз виконано в пакеті "Excel Microsoft Office". Експериментально вивчено закономірності впливу швидкості сканування і потужності лазера на глибину і ширину одиничного треку, а також іх співвідношення. Встановлено, що при невисокій потужності (P = 50 Bm) і малій швидкості сканування (V = 450–500 мм/с) формувався нестабільний трек, при більших швидкостях трек взагалі не сформувався. При потужності P = 80-200 Вт на малих швидкостях формується стабільний трек (V = 500-900 мм/с), а при збільшенні швидкості до V =1000 мм/сек він стає нестабільним, переривчастим. При збільшенні потужності лазера (P = 230-400 Вm) і невеликих швидкостях процесу формусться суцільний трек, але він має змінну збільшену ширину, що свідчить про відхилення від умов стабільного формування треку. Вперше встановлено, шо інтенсивність впливу швидкості сканування (450–1000 мм/с) на глибину проникнення одиничного треку змінюється в залежності від потужності лазера (50–400 Вт) більш ніж в 2,5 рази. Визначено параметри процесу, що забезпечують формування оптимального (з точки зору геометричних параметрів) одиничного треку.

Ключові слова: селективне лазерне плавлення, "Inconel 718", одиничний трек, геометрія ванни розплаву, оптимальні режими.

© С.В. АДЖАМСЬКИЙ, Ю.В. ТКАЧОВ, Г.А. КОНОНЕНКО, 2020

ISSN 0032-4795. Порошкова металургія, 2020, № 9/10

Вступ

Метод селективного лазерного плавлення (СЛП) дає можливість формувати вироби шар за шаром, завдяки чому стало доступним створення деталей складної геометричної форми, виготовлення яких було витратним або взагалі неможливим за стандартними технологіями. Високі міцність на розрив, в'язкість руйнування і зносостійкість при відносно високій температурі роблять сплав "Inconel 718" з 0,50–0,55% Ni, 17–21% Cr, 4,75–5,5% Nb, 2,8–3,3% Co у складі привабливим для застосування в умовах високих температур, зношення, в агресивних середовищах (це, зокрема, турбіни, ядерні реактори, реактивні двигуни і камери згоряння). Водночас означені властивості надзвичайно ускладнюють подальшу обробку виробу [1–3].

Отже, для виробництва деталей зі сплаву "Inconel 718" актуальним є метод селективного лазерного плавлення. Це один з небагатьох промислово привабливих методів адитивного виробництва, за допомогою якого можна виготовляти деталі зі сплавів на основі нікелю з пористістю, близькою до нуля [4–6]. Ця технологія використовує локалізований і сфокусований лазерний промінь для плавлення частинок порошку з утворенням ванни рідкого металу мікронних розмірів, яка згодом твердне з високою швидкістю і формує шар.

Принципову схему роботи 3D-принтера подано на рис. 1. На такому обладнанні плавленням створюються деталі складної геометрії шар за шаром з використанням цифрової 3D-моделі як вихідної інформації. Товщина шару знаходиться в межах від 15 до 150 мкм залежно від матеріалу. Для плавлення металу у вигляді порошку використовують іттербієві волоконні лазери потужністю від 200 до 1000 Вт, випромінювання яких за допомогою дзеркал на швидкодіючому приводі фокусується в потрібне місце формування контуру деталі [7, 8]. Камера заповнюється інертним газом (азотом



Рис. 1. Принципова схема роботи 3D принтера

чи аргоном), щоб запобігти небажаному окисненню деталі під час виготовлення. Кожний наступний шар отримують методом опускання платформи з деталлю на рівень висоти шару. Після цього з бункера приводним лезом наноситься новий шар порошку. Весь цикл повторюється до моменту повного формування деталі по висоті.

У процесі селективного лазерного плавлення металеві порошки в шарі швидко розплавляються під дією променю лазера, який переміщається з високою швидкістю, а потім швидко тверднуть в ванні розплаву (швидкість охолодження — від 10^3 до 10^8 K/c [9]) з короткочасним нерівноважним переходом фаз, формуючи високодисперсну мікроструктуру.

Вплив характеристик ванни розплаву на якість побудови тривимірних деталей з різних матеріалів вивчено детально [10–13]. Встановлено, що малий розмір ванни розплаву призводить до зниження ефективності процесу через збільшення часу виготовлення. Велика ванна розплаву може підвищити ефективність виробництва, але, одночасно, спричинити випаровування підкладки або порошку, що призведе до утворення пор і збільшення загальної пористості матеріалів [11, 14]. Тому якість виробу, включно з кінцевою щільністю і шорсткістю поверхні, передусім залежить від характеристик ванни розплаву (форми і розміру), які значною мірою контролюються зміною щільності енергії лазерного променю. По суті, вона є мірою енергії, що підводиться при обробці. Керування щільністю енергії здійснюється зміною відповідних контрольованих параметрів. Потужність лазера Р (Вт), швидкість сканування V (мм/с), відстань між треками (перекриття ванни розплаву) d (мм) і товщина шару t (мм) є найбільш важливими параметрами, які пов'язані зі щільністю енергії лазера [14, 15]: $E = P/(V \cdot d \cdot t)$. Актуальною є розробка раціональних режимів, при яких забезпечується заданий рівень якості деталей і продуктивність технологічного процесу.

Аналіз досліджень останніх років

Дослідження Гу зі співавторами [15], проведені на нержавіючій сталі, продемонстрували, що такі параметри, як потужність лазера і швидкість сканування, впливають по-різному на пористість і еволюцію мікроструктури. Ян і співавтори [16] експериментально показали, що якість виробу передусім залежить від швидкості сканування, потужності лазера і товщини шару. Відносна значимість кожного параметра процесу була вивчена у статистичному дослідженні, і встановлено, що швидкість сканування є параметром, який впливає найбільш інтенсивно [17]. Низька швидкість сканування забезпечує повне плавлення частинок і щільну структуру, проте продуктивність процесу суттєво знижується. При дуже низьких швидкостях сканування нестабільність ванни розплаву викликає нерівномірне плавлення уздовж кожної доріжки, що призводить до високої шорсткості поверхні і великої об'ємної пористості через ефект утворення кульок [10, 11]. На високих швидкостях сканування короткочасна взаємодія між матеріалом і променем лазера спричинює утворення вузьких ванн розплаву, що так само збільшує шорсткість поверхні [11]. До того ж, дуже висока швидкість сканування може сприяти збільшенню пористості, а також утворенню термічних тріщин внаслідок високих швидкостей охолодження [18]. Отже, пошук оптимальної швидкості сканування є компромісом між продуктивністю і якістю процесу побудови виробу.

Достатньо вивчений вплив лазерного плавлення "Inconel 718" [12, 19– 21] на мікроструктурні перетворення і пов'язані з ними зміни механічних властивостей виробу. Проте дослідження впливу зміни параметрів лазерної обробки на пористість і мікроструктуру сплаву "Inconel 718" нечисленні [22]. Згідно з результатами вивчення зразків, виготовлених з різною швидкістю сканування в комбінаціях потужності лазера, ущільнення сплаву пов'язано зі щільністю енергії лазера, і максимальна щільність виробу досягається при оптимальній щільності енергії лазера. Проте ефективність основних параметрів процесу, таких як потужність лазера, швидкість сканування і, загалом, стратегія сканування, на пористість і мікроструктуру сплаву в цьому дослідженні розкриті не повністю.

Тому нами поставлена мета — дослідити вплив параметрів процесу селективного лазерного плавлення (потужність лазера і швидкість сканування) на характеристики ванни розплаву (глибина, ширина і співвідношення між ними) для сплаву "Inconel 718". Отримані дані в подальшому допоможуть визначити оптимальні технологічні режими селективного лазерного плавлення при виробництві тривимірних виробів з "Inconel 718" з бажаними щільністю і мікроструктурою.

Матеріал і методика досліджень

Матеріалом для виготовлення зразків методом селективного лазерного плавлення був порошок марки "AMPERPRINT 0181.074" сплаву "Inconel 718" (від виробника H.C. Starck) з розміром частинок –45+15 мкм.

Вихідний матеріал (форма і розмір частинок) був досліджений за допомогою растрового електронного мікроскопа PEM-106 (рис. 2).

Експеримент проводили на установці ALT Alfa-150 виробництва LLC "Additive Laser Technology of Ukraine" в захисній атмосфері азоту. Установка оснащена іттербієвим лазером з максимальною потужністю 500 Вт, область друку: 150 мм × 150 мм × 180 мм. За допомогою цієї установки були





Рис. 2. Частинки вихідного матеріалу "Іпсопеl 718" при збільшенні 100 (*a*) і 500 (*б*); результати гранулометричного аналізу (*в*)





отримані одиничні треки з використанням різних комбінацій потужності лазера і швидкості сканування. Типовий одиничний трек повторюється з чітко заданим перекриттям до повної побудови деталі. Деякі дослідження, присвячені одиничним трекам, були проведені на опорній плиті з іншого сплаву [23]. Однак за таких умов експерименту має місце ефект зміни хімічного складу через розведення (змішування) досліджуваного матеріалу і металу опірної плити, що спричинює зміну температури плавлення порошку сплаву.

У даній роботі запроваджено інший підхід до виготовлення одиничного треку: він створювався на базовому майданчику, виготовленому з того самого матеріалу. При цьому потужність змінювали в діапазоні 50–400 Вт з кроком 30 Вт, а швидкість — в діапазоні 450–1000 мм/с з кроком 50 мм/с. Всього було досліджено 144 режими одиничних треків, розташованих на відстані 1,5–2 мм один від одного. Кожен блок містить шість груп з трьох одиничних треків (рис. 3), виготовлених в однаковому режимі. Товщина шару, що застосовується в експериментах, — 50 мкм.



Морфологія поверхні, розміри одиничних треків, їх поперечний переріз і геометричні параметри (рис. 4) ванни розплаву були охарактеризовані за допомогою світлового мікроскопа "Axiovert 200M MAT" ("Carl Zeiss").

ISSN 0032-4795. Порошкова металургія, 2020, № 9/10

Результати досліджень

Зовнішній вигляд деяких з досліджуваних одиничних треків показаний на рис. 5. При невисокій потужності (P = 50 Вт) і малій швидкості сканування ($V = 450{-}500$ мм/с) формувався нестабільний трек, при великих швидкостях трек взагалі не сформувався.

При потужності P = 80-200 Вт на малих швидкостях формусться стабільний трек, а при збільшенні швидкості він стає нестабільним, переривчастим (рис. 5). При подальшому збільшенні потужності лазера (P = 230-400 Вт) і невеликих швидкостях процесу формується зовні якісний трек, але з підвищенням швидкості сканування можна помітити зменшення його ширини (рис. 5). Результати оцінки стабільності отриманих треків за зовнішнім виглядом наведені в таблиці. Однак при селективному лазерному плавленні глибина проплаву не повинна перевищувати товщини двох шарів. Для визначення робочого вікна процесу (режимів, за яких формується стабільний трек) необхідно встановити геометричні розміри ванни розплаву для кожного з режимів. На рис. 6 показана мікроструктура дослідних треків при різній швидкості сканування і постійній потужності лазера (P =200 Вт). При швидкості 1000 мм/с формується нестабільний трек, і на рис. 6 видно, що відбувається краплеутворення: розплавлений метал, маючи низьку температуру, не розтікається по підкладці.

На рис. 7 показані мікроструктури треків, сформованих на режимах з достатньо високою потужністю і низькою швидкістю сканування. Можна бачити, що глибина ванни одиничного треку перевищує оптимальні значення (2–3 шари).

Були розраховані геометричні розміри одиничних треків. Середні значення ширини і глибини ванни одиничного треку наведені на рис. 8. Отримані результати свідчать про те, що швидкість сканування великою мірою

Потуж- ність, Вт	Швидкість, мм/с											
	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
50	HCT	HCT	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В
80	HCT	HCT	HCT	HCT	HCT	HCT	HCT	HCT	HCT	HCT	HCT	HCT
110	CT	CT	HCT									
140	CT	CT	CT	CT	CT	HCT						
170	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	HCT	HCT	HCT
200	CT	СТ	CT	CT	СТ	СТ	CT	CT	СТ	CT	HCT	HCT
230	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT
260	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT
290	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT
320	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT
350	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT
400	CT	СТ	CT	СТ	CT	СТ						

Стабільність одиничних треків при різному рівні потужності лазера і швидкості сканування

Примітки: В – відсутній; НСТ – нестабільний, СТ – стабільний трек.





впливає на зміну геометричних параметрів ванни треку, причому для глибини треку цей вплив більш виразний, ніж для його ширини.

Співвідношення глибини і ширини ванни одиничного треку наведено на рис. 9.

ISSN 0032-4795. Порошкова металургія, 2020, № 9/10

С.В. Аджамський, Ю.В. Ткачов, Г.А. Кононенко



Рис. 6. Мікроструктура поперечного перерізу одиничних треків, виконаних на підкладці при потужності лазера P = 200 Вт і різних швидкостях сканування; ×100



Puc. 7. Мікроструктура поперечного перерізу треків, виконаних на підкладці: *a*) P = 400 Вт, V = 500 мм/с; *б*) P = 400 Вт, V = 450 мм/с; *в*) P = 350 Вт, V = 450 мм/с; ×50



Рис. 8. Ширина (*a*, *б*) і глибина (*в*, *г*) одиничного треку при різній потужності лазера (80–400 Вт) і швидкості сканування 450–700 (*a*, *в*) і 750–1000 мм/с (*б*, *г*)



Результати вказують на те, що потужність лазера і швидкість сканування значною мірою впливають на глибину треку. При високій щільності енергії (висока потужність і низька швидкість) спостерігається більш глибоке проникнення, яке може досягати від 5 до 25 шарів. У такій ситуації один і той самий мікрооб'єм металу піддається багаторазовому переплаву, що несприятливо позначається на якості металу. До того ж, при великій глибині ванни розплаву, а отже, і великому її обсязі виникає значний температурний градієнт між остиглим металом нижніх шарів і рідким металом верхніх шарів, що призводить до формування крупнокристалічної мікроструктури і появи високих напружень, в деяких випадках — навіть до формування мікротріщин. Крім того, за умов глибокого проплавлення трек набуває витягнутої форми, змінюється співвідношення глибини і ширини, спостерігаються характерні дефекти, відомі з літератури як "замкова щілина" (рис. 7). Зовні трек, виконаний в цій області, виглядає стабільно, майже без зовнішніх дефектів. Однак в глибині перерізу треку, через спадання лунки, утворюються великі пори, розсіяні уздовж всього треку, що для надрукованої деталі є невиправною вадою.

Висновки

Досліджено одиничні треки сплаву "Inconel 718", нанесені за різних режимів процесу селективного лазерного плавлення, для розуміння їхнього впливу на характеристики ванни розплаву. Такі дослідження одиничних треків можуть звузити вікно параметрів процесу і прискорити трудомісткі експерименти з розробки раціональних режимів процесу.

Встановлено експериментальні залежності зміни глибини і ширини ванни одиничного треку при різних поєднаннях потужності і швидкості сканування. Показано, що інтенсивність впливу зміни швидкості сканування більш інтенсивно впливає на глибину ванни одиничного треку, ніж зміна потужності.

Визначено оптимальні режими роботи, що забезпечують глибину проникнення не більше двох шарів і широку ванну розплаву (зі співвідношенням глибини ванни розплаву до ширини не більше 2). Такі параметри свідчать про достатню змочуваність розплавом поверхні підкладки і повинні забезпечувати мінімальну кількість дефектів внутрішньої будови і низьку шорсткість. У майбутньому отримані результати можуть стати основою для моделювання процесу селективного лазерного плавлення при різних комбінаціях потужності лазера і швидкості сканування. Так само результати можуть бути корисними при визначенні оптимальних режимів створення одиничного шару для створення якісних об'ємних деталей.

S.V. Adjamsky, Yu.V. Tkachev, G.A. Kononenko

EFFECT OF SELECTIVE LASER MELTING PARAMETERS ON THE MELT POOL FORMED BY SINGLE TRACKS OF THE HEAT-RESISTANT INCONEL 718 NICKEL ALLOY

The characteristics of single-track melt pools, such as size, shape, and stability, formed by the heat-resistant Inconel 718 nickel alloy powder subjected to selective laser melting (SLM) were studied. The objective was to determine the range of optimal SLM parameters to provide a stable track with a depth of two to three layers. Single tracks were built using various combinations of process parameters: laser power from 50 to 400 W with a step of 30 W and scanning speed from 450 to 1000 mm/sec with a step of 50 mm/sec (144 modes in total). An Axiovert 200M MAT light microscope (Carl Zeiss) was employed to examine the cross sections of single tracks and evaluate the geometrical parameters of the melt pools. Statistical analysis was performed in the Microsoft Office Excel analysis package. Regular features pertaining to the effect of the scanning speed and laser power on single-trach depth and width and their ratio were experimentally studied. An unstable track formed at low power (P == 50 W) and low scanning speed (V = 450-500 mm/sec), while no track appeared at all at higher speeds. A stable track formed at power P = 80-200 W at low speeds (V = 500-900 mm/sec) and became unstable and intermittent when speed increased to V == 1000 mm/sec. With higher laser power (P = 230-400 W) and low process speeds, a continuous track formed but had an increased variable width, being indicative of a deviation from the stable track formation conditions. It was first established that the effect of scanning speed (450-1000 mm/sec) on the penetration depth of a single track became more than 2.5 times more intensive depending on laser power (50-400 W). The process parameters that would ensure the formation of an optimal single track in terms of geometric parameters were determined.

Keywords: selective laser melting, Inconel 718, single track, melt pool geometry, optimum conditions.

Список літератури

- Sharman A.R.C., Amarasinghe A., Ridgway K. Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718. J. Mater. Process Technol. 2008. Vol. 200. P. 424–432.
- 2. Parida A.K., Maity K. Comparison the machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in hot turning operation. *Eng. Sci. Technol. Int. J.* 2018. Vol. 21. P. 364–370
- 3. Narutaki N., Yamane Y., Hayashi K., Kitagawa T. High-speed machining of Inconel 718 with ceramic tools. *CIRP Annals.* 1993. Vol. 42. P. 103–106.
- Arisoy Y.M., Criales L.E., Özel T., Lane B. Influence of scan strategy and process parameters on microstructure and its optimization in additively manufactured nickel alloy 625 via laser powder bed fusion. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017. Vol. 90. P. 1393–1417.
- Criales L.E., Arisoy Y.M., Lane B., Özel T. Laser powder bed fusion of nickel alloy 625: Experimental investigations of effects of process parameters on melt pool size and shape with spatter analysis. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2017. Vol. 121. P. 22–36.
- Wang X., Gong X., Chou K. Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts. Proc. Inst. Mech. Eng. B J. Eng. Manuf. 2017. Vol. 231. P. 1890–1903.
- 7. Williams C.B., Mistree F., Rosen D.W. Towards the design of a layerbased additive manufacturing process for the realization of metal parts of designed mesostructured. *Proc. 16th Solid Free. Fabr. Symp.* 2005. P. 217–230

- 8. Concept Laser GmbH [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.concept-laser.de/technologie.html.
- Loong L.-E., Chua C.-K., Yeong W.-Y., Song J., Mapar M., Sing S.L., Liu Zh.-H., Zhang D.-Q. Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061. *Int. J. Heat Mass. Transf.* 2015. Vol. 80. P. 288–300.
- Kempen K., Thijs L., Yasa E., Badrossamay M., Kruth J.-P. Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2011. Vol. 22. P. 484–495.
- Kamath C., Eldasher B., Gallegos G.F., King W., Sisto A. Density of additivelymanufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014. Vol. 74. P. 65–78.
- 12. Jia Q., Gu D. Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: densification, microstructure and properties. *J. Alloys Compd.* 2014. Vol. 585. P. 713–721.
- Song B., Dong S., Liao H., Coddet C. Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2012. Vol. 61. P. 967–974.
- Dilip J.J.S., Zhang S., Teng C., Zeng K., Robinson C., Pal D., Stucker B. Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti– 6Al–4V alloy parts fabricated by selective laser melting. *Prog. Additive Manuf.* 2017. Vol. 2. P. 157–167.
- Gu H., Gong H., Pal D., Rafi H. K., Starr T., Stucker B. Influences of energy density on porosity and microstructure of selective laser melted 17-4PH stainless steel. *Solid Freeform Fabrication Symposium.* 2013. P. 474–489.
- Yang J., Han J., Yu H., Yin J., Gao M., Wang Z., Zeng X. Role of molten pool mode on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti–6Al– 4V alloy. *Mater. Des.* 2016. Vol. 110. P. 558–570.
- 17. Kamath C. Data mining and statistical inference in selective laser melting. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016. Vol. 86. P. 1659–1677.
- 18. Sames W.J., List F., Pannala S., List F.A., Dehoff R.R. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *Int. Mater. Rev.* 2016. Vol. 61. P. 315–360.
- Amato K.N., Gaytan S.M., Murr L.E. Martinez E., Shindo P.W., Hernandez J., Collins S., Medina F. Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting. *Acta Mater.* 2012. Vol. 60. P. 2229–2239.
- Pröbstle M., Neumeier S., Hopfenmüller J., Freund L.P., Niendorf T., Schwarze D., Göken M. Superior creep strength of a nickel-based superalloy produced by selective laser melting. *Mater. Sci. Eng. A.* 2016. Vol. 674. P. 299–307.
- Bean G.E., Witkin D.B., McLouth T.D., Zaldivar R.J. The effect of laser focus and process parameters on microstructure and mechanical properties of SLM Inconel 718. *Int. Soc. Optics Photonics*. 2018. Vol. 10523. P. 105230Y.
- Choi J.-P., Shin G.-H., Yang S., Yang D.-Y., Lee J.-S., Brochu M., Yuad J.-H. Densification and microstructural investigation of Inconel 718 parts fabricated by selective laser melting. *Powder Technol.* 2017. Vol. 310. P. 60–66.
- Haijun Gong, Hengfeng Gu, Kai Zeng, J.J.S. Dilip, Deepankar Pal, Brent Stucker. Melt pool characterization for selective laser melting of Ti–6Al–4V pre-alloyed powder. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2014. P. 256–267.

Стаття надійшла 21.10.2019