

С.В. Аджамський, Г.А. Кононенко, Р.В. Подольський

**ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ  
ДЛЯ ФОРМУВАННЯ СТАБІЛЬНОГО ОДИНИЧНОГО ТРЕКУ  
ПРИ ТОВЩИНІ ШАРУ 30 МКМ ЗІ СПЛАВУ INCONEL 718**

*Анотація. При селективному лазерному плавленні (далі -СЛП) виріб складається з множини одиничних шарів, які в свою чергу створюються з множини одиничних треків. Вплив характеристик ванни розплаву на якість побудови тривимірних деталей з різних матеріалів було широко вивчено. Пошук оптимальних технологічних параметрів є компромісом між продуктивністю і якістю процесу побудови. Для певних чинників друку (матеріалу/ обладнання/ деталі) необхідно знаходити цей оптимум, оскільки це є одним з можливих шляхів поліпшення структури та властивостей. Матеріалом, використаним в цьому дослідженні, був металевий порошок з розміром частинок від 10 до 45 мкм. Хімічний склад порошку Inconel 718 в % по масі: Cr=17,79; Ni=53,5; Mo=3,12; Mo=3,01; Ti=0,85; Nb=5,12. У даній роботі одиничні треки створювалися на базовому майданчику, виготовленому з того ж матеріалу. При цьому потужність лазера змінювали в діапазоні 100...150 Вт з кроком 10 Вт, а швидкість руху променя лазера – в діапазоні 1300...3500 мм/с з кроком 100 мм/с. Всього було досліджено 108 режимів друку одиничних треків, розташованих на відстані 1,5...2 мм один від одного. Побудовано номограму параметрів друку одиничних треків зі сплаву Inconel 718 при товщині шару 30 мкм. З аналізу зовнішнього вигляду дослідних зразків встановлено, що при потужностях 100..150 Вт та швидкостях сканування 1800...3400 мм/с формується стабільний трек, а при зменшенні швидкості відбувається розбризкування та переплавлення основного металу. Слід зазначити, що зразки з перекриттям 0,05 та 0,06 мм при збільшенні швидкості сканування утворюють нестабільний трек: переривчастий, з краплеутворенням. Встановлено область раціональної щільності енергії 37...41 Дж/мм<sup>3</sup> для побудови деталей зі сплаву Inconel 718 при товщині шару 30 мкм.*

*Ключові слова: селективне лазерне плавлення, одиничний трек, параметри, номограма, Inconel 718.*

**Вступ**

При селективному лазерному плавленні (далі -СЛП) виріб складається з множини одиничних шарів, які в свою чергу створюються з множини одиничних треків. Вплив характеристик ванни розплаву на якість побудови тривимірних деталей з різних матеріалів було широко вивчено [1-4].

Малий розмір ванни розплаву призводить до зниження ефективності процесу через збільшення часу виготовлення. Велика ванна розплаву може підвищити ефективність виробництва, але може викликати випаровування підкладки або порошку, що веде до утворення пор і збільшення загальної кількості дефектів матеріалів.

Тому якість виробу, включаючи кінцеву щільність металу і шорсткість поверхні, в першу чергу, залежить від характеристик ванни розплаву (форма і розмір), які в значній мірі управляються зміною щільності енергії лазерного променя, що є по суті мірою енергії, що підводиться в процесі друку [5-6]. Управління щільністю енергії може бути досягнуто зміною відповідних параметрів, що контролюються. Потужність лазера  $P$  (Вт), швидкість сканування  $v$  (мм / с), відстань між треками (перекриття ванни розплаву)  $d$  (мм) і товщина шару  $t$  (мм) є найбільш важливими параметрами і пов'язані з щільністю енергії лазера як:

$$E = P / (V \cdot d \cdot t) \quad (1)$$

Вплив такого технологічного фактору як потужність лазера на шорсткість може змінюватися в двох напрямках: з одного боку, більш високі потужності сприяють повному переплавленню шару і надають ефект згладжування, а також з іншого боку, надмірна потужність лазера сприяє розбризкуванню розплаву і прилипанню оточуючих частинок до розплаву, що твердне, дотичному з порошком.

При дослідженні впливу щільності енергії лазера було показано, що при низькому значенні цього параметра в'язкість ванни розплаву буде високою. Отже, менше порошку буде розплавлено, і згодом буде витрачено більше часу. Проте, при низькій швидкості сканування лазером буде досягатися високий час витримки над порошком, тому буде витрачатися менше часу. Як правило, при високій щільності лазерної енергії досягається крупніша і з більш високою температурою ванна розплаву [8]. А досить велика ванна розплаву призведе до хорошого розподілу розплаву і до повністю щільного друку.

При високій щільності енергії (висока потужність і низька швидкість), спостерігається більш глибоке проникнення, яке може досягати від 5 до 25 шарів. При такій ситуації один і той же мікрооб'єм металу піддається багаторазовому переплаву, що несприятливо позначається на якості металу. Крім того, при великій глибині ванни розплаву, а отже і великому її об'ємі, виникає значний температурний градієнт між остиглим металом більш нижніх шарів і рідким металом, що призводить до формування спрямованої крупнокристалічної

мікроструктури і високих напружень, в деяких випадках і до формування мікротріщин. Зовні трек, виконаний в цій області, виглядає стабільно, майже не має зовнішніх дефектів. Однак в глибині перерізу треку утворюються великі пори, розсіяні уздовж всього треку, що для надрукованої деталі є невиправним браком.

Таким чином, пошук оптимальної швидкості сканування є компромісом між продуктивністю і якістю процесу побудови. Для певних чинників друку (матеріалу/ обладнання/ деталі) необхідно знаходити цей оптимум і це є одним з можливих шляхів поліпшення структури та властивостей виробів.

### **Постановка мети і завдань дослідження**

Встановлення раціональних режимів друку одиничних треків, визначення оптимальної питомої енергії за робочої товщини шару порошку Inconel 718 – 30 мкм. Побудова номограми з визначенням раціональної області параметрів виготовлення треків за технологією селективного лазерного плавлення.

### **Методика проведення досліджень**

Дослідження проводились на зразках, виготовлених з порошкового матеріалу. Друк зразків проводився на 3D принтері Alfa-150 виробництва компанії ТОВ «АЛТ Україна» [7-9]. Матеріалом, використаним в цьому дослідженні, був металевий порошок з розміром частинок від 10 до 45 мкм. Хімічний склад порошку Inconel 718 в % по масі: Cr=17,79; Ni=53,5; Mo=3,12; Mo=3,01; Ti=0,85; Nb=5,12. У даній роботі одиничні треки створювалися на базовому майданчику, виготовленому з того ж матеріалу. При цьому потужність змінювали в діапазоні 100...150 Вт з кроком 10 Вт, а швидкість – в діапазоні 1300...3500 мм/с з кроком 100 мм/с. Всього було досліджено 108 режимів друку одиничних треків, розташованих на відстані 1,5...2 мм один від одного. Кожен блок містить 6 груп з 3 одиничних треків, виготовлених за однаковими режимами. Товщина шару, що застосовувалась в експериментах – 30 мкм, діаметр променя 0,12мм.

Вихідний матеріал був досліджений за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-106 (рис. 1, а) для визначення форми і розмірів частинок. На рис. 1, б наведено результати аналізу. На рис. 2 представлена схема розташування зразків з одиничними треками.

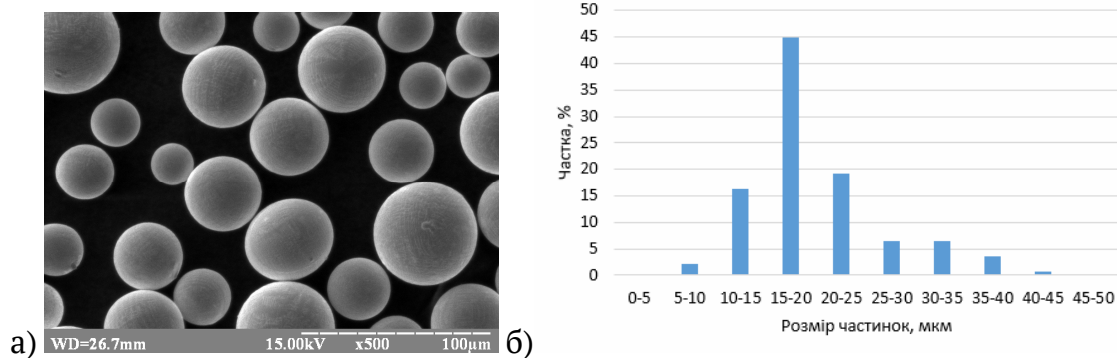


Рисунок 1 - Частинки вихідного матеріалу Inconel 718 при збільшенні 500 (а) та результати гранулометричного аналізу (б)

Розрахунок проводився на підставі умовно постійної відстані між треками 0,05 мм, 0,06 мм, 0,07 мм відповідно (табл. 1). Розміри базового майданчику: довжина – 32 мм, ширина – 7,6 мм, підтримки висотою 4-4,5 мм.

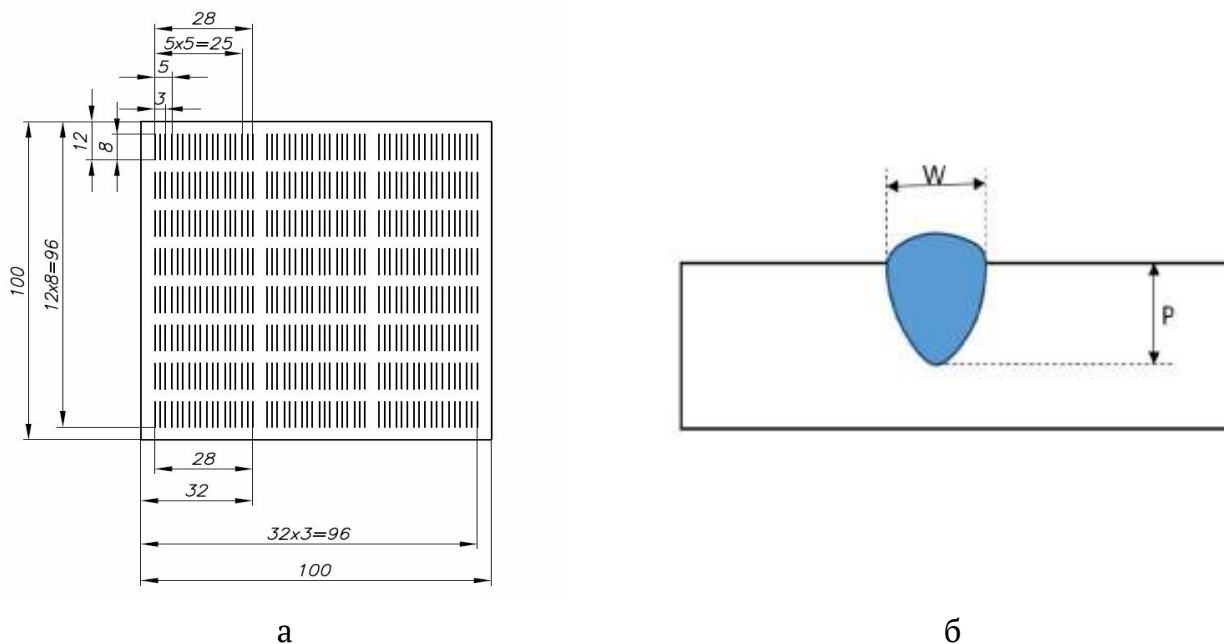


Рисунок 2 – Схема розташування досліджуваних зразків на підкладці треків (а), геометричні параметри одного треку (б):  
W – ширина треку, P – глибина треку [1,10]

Основними геометричними параметрами одного треку є глибина та ширина. Схематично зовнішній вигляд одиничних треків показаний на рис. 2,б. Аналіз зовнішнього вигляду треків приведений на рис. 3.

Встановлено, що при малій потужності лазера трек нестабільний на малих швидкостях (рис. 3, а) та призводить до дефекту каплеутворення, а зі збільшенням швидкості трек не формується. При збільшенні потужності стабіль-

ність треку зростає, на малих швидкостях головка треку стає більш вираженою (рис. 3, б). При подальшому збільшенні енергії променю на хвостах треків може формуватися лунка. Зі збільшенням потужності та зменшенням швидкості сканування відбувається переплав базового майданчику та розбризування треку (рис. 3, в).

Форма і розміри головки треку найбільш залежні від впливу випадкових чинників [11-12]. В ідеальних умовах розміри головки треку визначаються величиною питомої енергії. Зі зменшенням величини питомої енергії головка треку стає все більш вираженою – її ширина і висота збільшується по відношенню до ширини і висоти сталого треку. При високих значеннях питомої енергії ця різниця зменшується, але все одно залишається. Іноді висота головки треку може перевищувати товщину шару, що призводить до зіткнення з лезом ракеля і счесування верхівки головки.

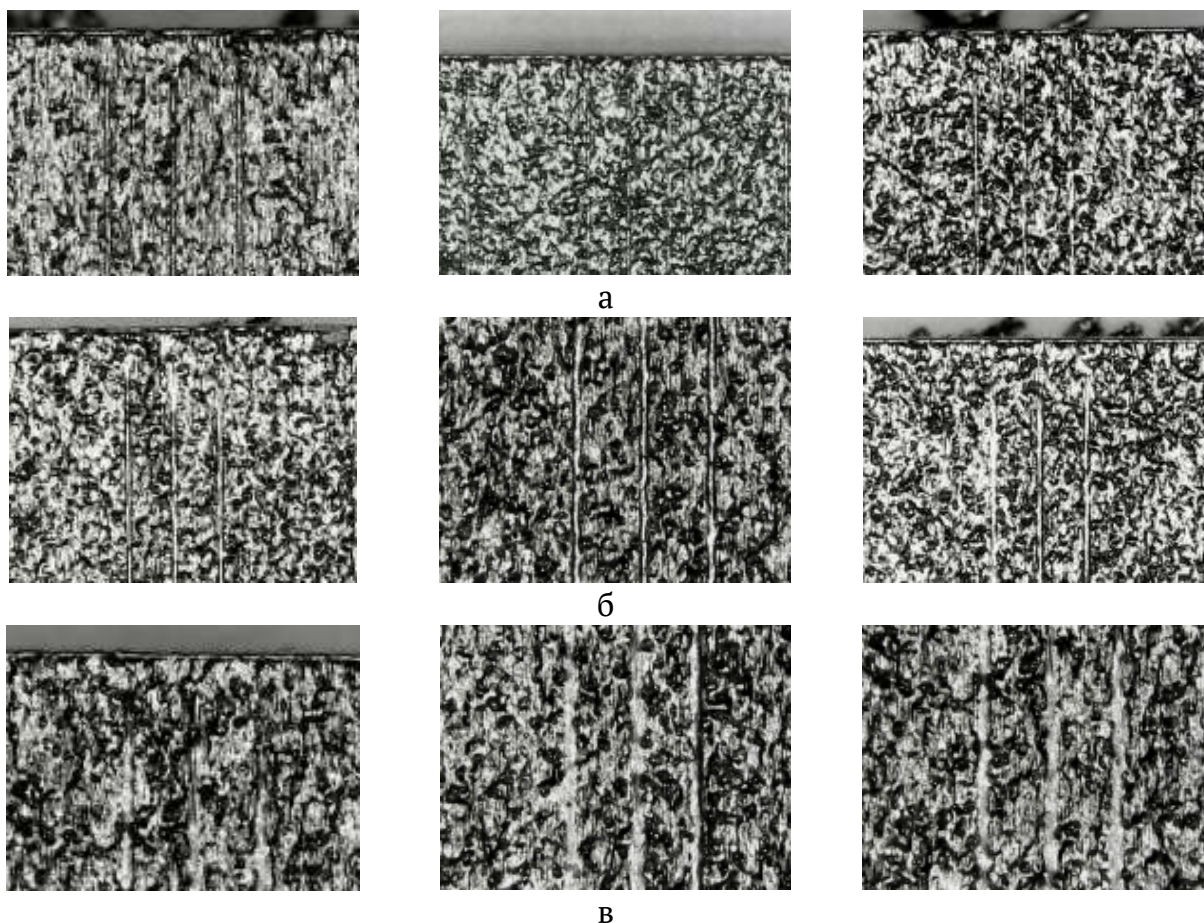


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд одиничного треку при різних комбінаціях параметрів: а – трек з дефектом каплеутворення, б – стабільний одиничний трек, в – переплавлення основного металу (розбризування треку)

За результатами досліджень було побудовано номограму параметрів друку одиничних треків з сплаву Inconel 718 (рис. 4). В результаті візуальної оцінки, встановлено область раціональних параметрів для друку деталей в області 37...41 Дж/мм<sup>3</sup>.

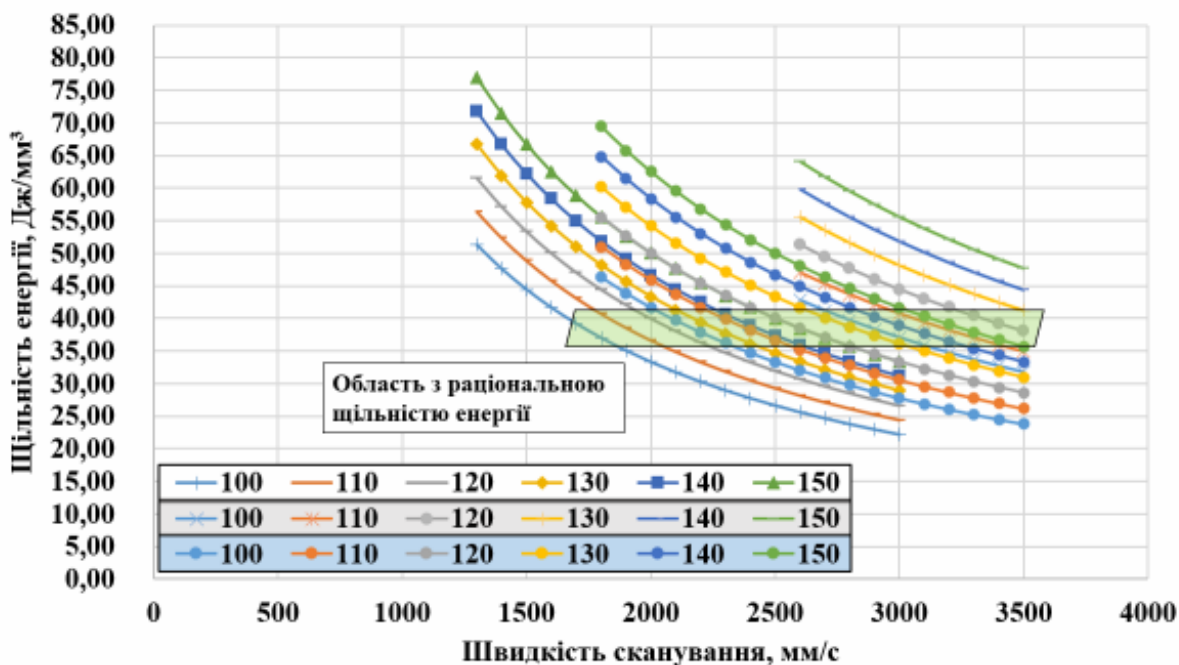


Рисунок 4 – Номограма з областю раціональних параметрів щільності енергії для побудови деталей за СЛП з Inconel 718 при 30 мкм

З аналізу зразків встановлено, що при потужностях 100...150 Вт та швидкостях сканування 1800...3400 мм/с формується стабільний трек, а при зменшенні швидкості відбувається розбризування та переплавлення основного металу, (рис. 3, в). Слід зазначити, що при збільшенні швидкості сканування утворюється нестабільний трек, преривчастий, з краплеутворенням (рис. 3, а).

#### Висновки

1. Побудовано номограму параметрів друку одиничних треків з сплаву Inconel 718 при товщині шару 30 мкм.

2. З аналізу встановлено, що при потужностях 100...150 Вт та швидкостях сканування 1800...3400 мм/с формується стабільний трек, а при зменшенні швидкості утворюється розбризування та переплавлення основного металу. Слід зазначити, що при збільшенні швидкості сканування утворюється нестабільний трек, преривчастий, з краплеутворенням.

3. Встановлено область раціональної щільності енергії 37...41 Дж/мм<sup>3</sup> для побудови деталей з сплаву Inconel 718 при товщині шару 30 мкм.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Kempen K., Thijs L., Yasa E. Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg. Solid Freeform Fabrication Symposium. 2011. 22. P. 484–495.
2. Kamath C., Eldasher B., Gallegos G.F. Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W. Int J Adv Manuf Technol. 2014. 74. P. 65–78.
3. Jia Q., Gu D. Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 super-alloy parts: densification, microstructure and properties. J Alloys Compd. 2014. 585. P.713–721.
4. 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. 61. P. 967–974.
5. Gu H., Gong H., Pal D. Influences of energy density on porosity and microstructure of selective laser melted 17-4PH stainless steel. Solid Freeform Fabrication Symposium. 2013. P. 474-489.
6. Dilip J.J.S., Zhang S., Teng C. Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. Progress in Additive Manufacturing. 2017. 2. P.157–167.
7. Adjamskiy,S., Kononenko,G., Podolskiy,R., Badyuk,S. Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine. Kyiv, Naukova Dumka. 2022. 116p. DOI: 10.15407/978-966-00-1856-3
8. Adjamsky, S., Kononenko, G., & Podolskiy, R. Of plastic properties of AISI 316L steel by method of registration of macrolocalization fields. Міжнародна науково-технічна конференція Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні, (16-18 березня 2021, Дніпро), Дніпро, 2021, С. 4-8. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.001
9. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. Симуляция влияния остаточных напряжений и параметров SLM-технологии на формирование области границ изделия из жаропрочного никелевого сплава INCONEL 718. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (17-19 марта 2020, Днепр), Днепр, 2020, С. 4–6. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2020.01.001.
10. Adjamskiy S.V., Kononenko G.A., Podolskiy R.V. Influence of SLM-process parameters on the formation of the boundaries of parts of heat-resistant nickel alloy INCONEL 718. Space Science and Technology. 2021. 27, 6. с. 105-114. DOI: 10.15407/knit2021.06.105
11. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskiy, R., Baduk, S. Studying the Influence of Orientation and Layer Thickness on the Physico-Mechanical Properties of Co-Cr-Mo

Alloy Manufactured by the SLM Method. Sci. innov., 18,5. 85–94.  
DOI:10.15407/scine18.05.085

12. Adjamskiy S.V., Kononenko G.A., Podolskiy R.V. Influence of technological parameters of SLM-process on porosity of metal products. The paton welding journal. 2020. 10. p.13-19. DOI: 10.37434/tpwj2020.10.03

#### REFERENCES

1. Kempen K., Thijs L., Yasa E. (2011). Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg. Solid Freeform Fabrication Symposium. 22. P. 484–495.
2. Kamath C., Eldasher B., Gallegos G.F. (2014). Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W. Int J Adv Manuf Technol. 74. P. 65–78.
3. Jia Q., Gu D. (2014). Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: densification, microstructure and properties. J Alloys Compd. 585. P.713–721.
4. Song B., Dong S., Liao H., Coddet C. (2012). Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering. Int J Adv Manuf Technol. 61. P. 967–974.
5. Gu H., Gong H., Pal D. (2013). Influences of energy density on porosity and microstructure of selective laser melted 17-4PH stainless steel. Solid Freeform Fabrication Symposium. P. 474-489.
6. Dilip J.J.S., Zhang S., Teng C. (2017). Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. Progress in Additive Manufacturing. 2. P.157–167.
7. Adjamskiy,S., Kononenko,G., Podolskiy,R., Badyuk,S. (2022). Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine. Kyiv, Naukova Dumka. 116p. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1856-3>
8. Adjamskiy, S., Kononenko, G., & Podolskiy, R. (2021). Of plastic properties of AISI 316L steel by method of registration of macrolocalization fields. Materiali mizhnarodnoi naukovo-tehnichnoi konferencii «Informacijni tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni», (16-18 bereznia 2021, Dnipro), Dnipro, S. 4-8. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.001>
9. Adzhamskiy S. V., Kononenko A. A., Podol'skiy R. V. (2020). Simuljacija vlijanija ostatochnyh naprjazhenij i parametrov SLM-tehnologii na formirovanie oblasti granic izdelija iz zharoprochnogo nikeljevogo splava inconel 718. Materiali mizhnarodnoï naukovo-tehnichnoï konferencii «Informacijni tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni» (17-19 marta 2020, Dnepr), Dnepr, S. 4–6 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2020.01.001>
10. Adjamskiy S.V., Kononenko G.A., Podolskiy R.V. Influence of SLM-process parameters on the formation of the boundaries of parts of heat-resistant nickel alloy

INCONEL 718. Space Science and Technology. 2021. 27, 6. с. 105-114. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.105>

11. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskiy, R., Baduk, S. Studying the Influence of Orientation and Layer Thickness on the Physico-Mechanical Properties of Co-Cr-Mo Alloy Manufactured by the SLM Method. Sci. innov., 18,5. 85–94. DOI:<https://doi.org/10.15407/scine18.05.085>

12. Adjamskiy S.V., Kononenko G.A., Podolskiy R.V. Influence of technological parameters of SLM-process on porosity of metal products. The paton welding journal. 2020. 10. p.13-19. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.10.03>

Received 01.03.2023.

Accepted 03.03.2023.

***Justification of technological modes for the formation of a stable single track at a thickness of a 30-  $\mu$ m layer of INCONEL 718 alloy***

*In selective laser melting (hereinafter - SLP), a single layer is created from a set of single tracks. The influence of the characteristics of the melt bath on the quality of construction of three-dimensional parts from various materials has been widely studied. Thus, finding the optimal scan speed is a trade-off between performance and quality of the build process. For certain printing factors (each material/equipment/part) it is necessary to find this optimum and this is one of the possible ways to improve the structure. The material used in this study was metal powder with a particle size of 10 to 45  $\mu$ m. Chemical composition of INCONEL 718 powder in % by mass: Cr=17.79; Ni=53.5; Mo=3.12; Mo = 3.01; Ti=0.85; Nb=5.12. In this work, single tracks were created on a base platform made of the same material. At the same time, the power was changed in the range of 100...150 W in steps of 10 W, and the speed - in the range of 1300...3500 mm/s in steps of 100 mm/s. A total of 108 printing modes of single tracks, located at a distance of 1.5...2 mm from each other, were investigated. The thickness of the layer used in the experiments is 30  $\mu$ m. A nomogram of printing parameters of single tracks made of INCONEL 718 alloy with a layer thickness of 30 microns was constructed. From the analysis of the nomogram, it was established that at the selected powers and scanning speeds of 1800...3400 mm/s, a stable track is formed, and when the speed is reduced, spattering and remelting of the base metal is formed. It should be noted that samples with an overlap of 0.05 and 0.06 form an unstable, discontinuous track with droplet formation when the scanning speed is increased. The range of rational energy density of 37...41 J/mm<sup>3</sup> was established for the construction of parts from the Inconel 718 alloy with a layer thickness of 30  $\mu$ m.*

**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.

**Кононенко Анна Андріївна** - докт. техн.наук, вчений секретар Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, інженер-матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Дніпро, Україна.

**Подольський Ростислав Вячеславович** – молодший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, інженер-матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», аспірант Українського державного університету науки і технологій, 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.

**Kononenko Ganna** - Doct. technical science, scientific secretary of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

**Podolskiy Rostislav** - junior researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, PhD-student of the Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine.