

УДК 621.923.047

doi: 10.32620/aktt.2023.4sup.2.10

С. В. АДЖАМСЬКИЙ^{1,2}, Г. А. КОНОНЕНКО^{1,3},
Р. В. ПОДОЛЬСЬКИЙ^{1,3}, С. І. БАДЮК¹

¹ LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Україна

² Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Україна

³ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ПОЛІРУВАННЯ ЗРАЗКІВ СКЕФФОЛД, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА АДИТИВНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ

В останні роки фактичне виробництво металевих виробів безпосередньо за електронними даними відповідно до тривимірної моделі на основі пошарового виготовлення перетворилося з швидкого прототипування на адитивне виробництво. Оскільки якість адитивно виготовлених металевих виробів продовжує зростати, а процеси їх виготовлення удосконалюватися і розвиватися, попит на адитивне виробництво зростає. Технологія адитивного виробництва, також відома як 3D-друк, останнім часом стає все більш популярною. З використанням адитивного виробництва практично будь-яка складна геометрія може бути виготовлена з високим ступенем точності. **Предмет досліджень.** Після виготовлення деталей за технологією SLM з металевого порошку застосовують пост-обробку, зокрема електрохімічне полірування, основне призначення якого зменшення шорсткості поверхні, підвищення блиску елементів поверхні, видалення металевих порошків, який частково вплавився на зовнішній поверхні виробу в місці контакту розплавленого металу границі деталі та порошку, який знаходиться поруч з розплавом. **Мета.** Дослідження похилих поверхонь, внутрішніх каналів та комірчастих структур з розвиненою зовнішньою поверхнею. **Методи.** Для проведення досліджень були виготовлені зразки за технологією SLM з порошку сталі аустенітного класу AISI 316L. Зразки мають фігуру куб з основою 10 мм, висотою 10 мм та товщиною 10 мм, ширина комірки 4 мм та 2 мм. Основне тіло обидвох зразків друкувалось за однаковими режимами при потужності лазера 220 Вт, швидкості сканування 1000 мм/с та відстанню між проходами лазера 0,14 мм. Друк зразків проводився на 3D принтері Alfa-280 виробництва компанії ТОВ «АЛТ Україна». Електрополірування проводилось у розчині ортофосфорної кислоти (H_3PO_4) з гліцерином ($C_3H_8O_3$) шляхом занурення дослідних зразків в електролітичний розчин при напруженні 17 В та щільності струму 3 А/см². Контроль ваги та геометричних параметрів проводився за допомогою аналітичних ваг АДВ - 2000 та мікрометра МКЦ-25. Електрополірування дослідних зразків відбувалось за чотирма етапами: 1) візуально – оптичний огляд з фіксацією, контроль ваги перед початком процесу; 2) електрополірування протягом 3 хв., візуально – оптичний огляд з фотофіксацією; контроль ваги після 3 хв. процесу полірування; 3) електрополірування тих самих зразків протягом ще 3 хв., візуально – оптичний огляд з фотофіксацією, контроль ваги після 6 хв. полірування; 4) електрополірування тих самих зразків протягом ще 3 хв., візуально – оптичний огляд з фотофіксацією; контроль ваги після 9 хв. процесу електрополірування. На кожному етапі фіксувалась реальна вольт-амперна крива за допомогою осцилографа. **Результати.** В результаті контролю ваги перед випробуванням та після встановлено, що зразки втратили приблизно однакову вагу в діапазоні 6,9...7,1% відносно початкової. На підставі аналізу отриманих результатів встановлено, що при щільності струму 3А/см² та за напруги 17В реалізується ефективне активне рівномірне полірування поверхні зразків з комірчастою структурою типу скеффолд з змінним розміром комірок від 4 до 2 мм.

Ключові слова: SLM-технологія; AISI 316L; електрохімічне полірування; відносна втрата маси.

Вступ

ASTM визначає адитивне виробництво (AM) як процес з'єднання матеріалів для створення об'єктів відповідно до даних тривимірної моделі, зазвичай шар за шаром, на відміну від методів субтрактивного виробництва [1]. Це визначення широко застосовується до всіх класів матеріалів, включаючи метали, кераміку, полімери, композити та біологічні системи. Хоча AM існує як засіб обробки матеріалів, майже, понад пів століття, він тільки відносно недавно почав

перетворюватися на важливу комерційну виробничу технологію.

В останні роки фактичне виробництво металевих виробів безпосередньо за електронними даними на основі пошарового виготовлення перетворилося з швидкого прототипування на адитивне виробництво [2-4]. На відміну від традиційних виробничих технологій, AM пропонує набагато більшу свободу проектування. Вперше конструкція виробів більше не сильно обмежена методом виробництва, тобто окре-

ними деталями високої складності, наприклад, комірчасті конструкції, складна внутрішня структура або охолодні канали можуть бути реалізовані без урахування конкретних правил проектування. Крім того, деталі, розроблені за допомогою комп'ютерних технологій (CAD), можуть бути піддані процедурам топологічної оптимізації [5] та реалізовані без додаткових витрат [6]. Це дає багато переваг: складна геометрія, зниження ваги, короткий час виконання замовлення, інтеграція функцій тощо.

Істотним підвищення популярності АМ металевих виробів пошарово з порошку є досягнення високого рівня властивостей матеріалу, які спочатку були недостатніми через велику залишкову пористість. В даний час можна успішно обробляти різні металеві сплави та високоякісні матеріали. Досяжні властивості матеріалу можна порівняти з властивостями, що досягаються у звичайних процесах, таких як лиття або деформація. Крім того, існує високий потенціал властивий процесу швидкого та спрямованого затвердіння, що призводить до дуже тонких мікроструктур та впорядкованої будови. Це відкриває нові можливості для проектування виробів, де локальні властивості матеріалів адаптуються до локальних вимог. Крім того, висока швидкість охолодження відкриває нові можливості у формуванні структури та властивостей відомих матеріалів.

АМ не тільки дозволяє створювати складні щільні компоненти, але також може використовуватися для виготовлення виробів, які характеризуються заданим високим ступенем пористості. Комірчасті матеріали [7-9] набувають своїх специфічних властивостей завдяки архітектурі комірок, на які можна лише незначно вплинути в процесі виготовлення за допомогою традиційної порошкової металургії (пресування, спікання).

Мета роботи

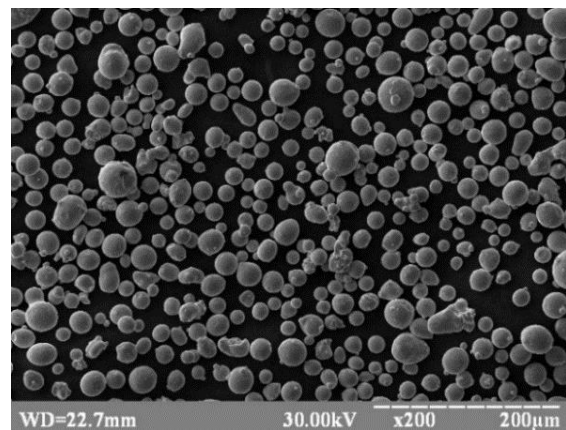
Встановлення впливу електрохімічного полірування на втрату ваги зразків комірчастої структури типу скеффолд, виготовлених за технологією SLM, зі сталі AISI 316L,

Матеріал і методика досліджень

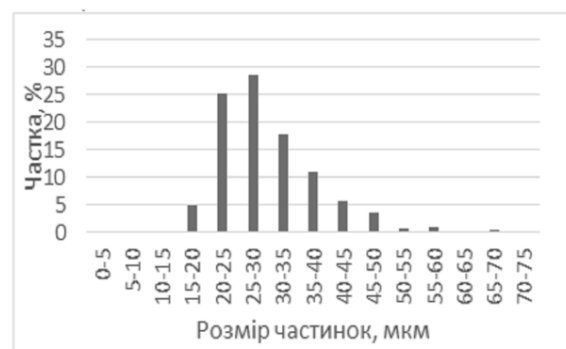
Вихідним матеріалом був металевий порошок нержавіючої сталі 316L з розміром частинок від 10 до 45 мкм. Хімічний склад порошку 316L, % ваг.: Cr=17,79; Ni=12,63; Mo=2,35; Mn=0,78; Si=0,64; C=0,016. Вихідний матеріал був досліджений за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-106 (рис. 1, а) для визначення форми і розмірів частинок. На рис. 1, б наведено результати аналізу. Були виготовлені зразки за технологією SLM з порошку сталі аустенітного класу AISI 316L, що мають

фігуру куб з основою 10 мм, висотою 10 мм та товщиною 10 мм, ширина комірки 4 мм та 2 мм (рис. 2 а, б відповідно). Основне тіло обидвох зразків друкувалось за однаковими режимами при потужності лазера 220 Вт, швидкості сканування 1000 мм/с та відстанню між проходами лазера 0,14 мм. Друк зразків проводився на 3D принтері Alfa-280 виробництва компанії ТОВ «АЛТ Україна» [10].

Електрохімічна поліровка проводилась у розчині ортофосфорної кислоти (H_3PO_4) з гліцирином ($C_3H_8O_3$) при щільності струму 3 А/см² [10]. Контроль ваги та геометричних параметрів проводився за допомогою аналітичних ваг АДВ-2000 та мікрометра МКЦ-25.



а



б

Рис. 1. Частинки вихідного матеріалу 316L при збільшенні 200 (а) та результати гранулометричного аналізу (б)

Після виготовлення деталей за технологією SLM з металевого порошку застосовують пост-обробку, зокрема електрохімічне полірування, основне призначення якого зменшення шорсткості поверхні, підвищення блиску елементів поверхні, видалення металевого порошку, який частково вплавився на зовнішній поверхні виробу в місці контакту розплавленого металу границі деталі та порошку, який знаходиться поруч з розплавом.

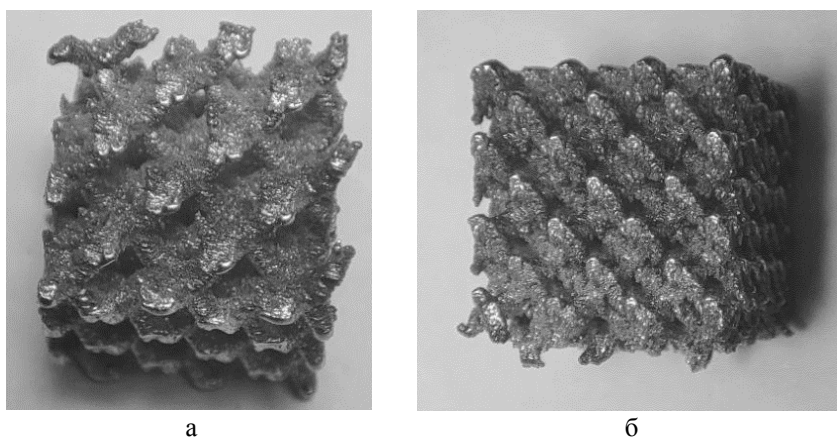


Рис. 2. Зовнішній вигляд скеффолд зразків:
а – зразок 1 (4 мм), б – зразок 2 (2 мм)

За результатами візуально-оптичного контролю встановлено наявність приплавлених часточок металевого порошку на нижній поверхні похилих елементів комірчастої структури. Для контролю ефективності процесу електрохімічного полірування використовували показник відносної зміни маси відповідно до початкової ваги зразків. При визначенні ваги встановлено, що у вихідному стані маса дослідних скеффолд зразків складала з коміркою 4мм – 1,9753 г та з розміром комірки 2 мм – 2,1409 г.

Проведено електрополірування дослідних зразків шляхом занурення дослідних зразків в розчин ортофосфорної кислоти з гліцерином при напруженні 17 В. Візуально- оптичний контроль та контроль ваги проводився за схемою, представленою на рис 3. Виконували контроль втрати ваги. Зняття кислотності від електроліту проводилось в розчині харчової соди.

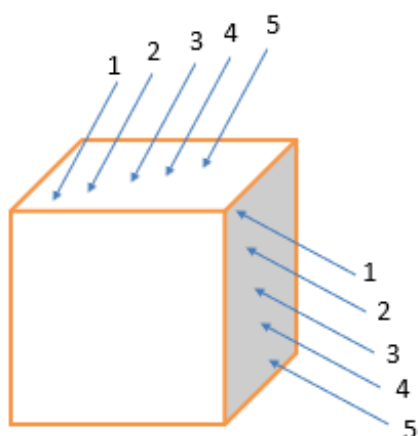


Рис. 3. Схема візуально оптичного контролю зразка з скеффолд структурою у вигляді куба

Електрополірування дослідних зразків відбувалось за чотирма етапами: 1) візуально – оптичний огляд з фіксацією (рис. 4), контроль ваги (рис. 5) перед початком процесу; 2) електрополірування протягом

3 хв., візуально – оптичний огляд з фіксацією (рис. 4); контроль ваги (рис. 5) після 3 хв. процесу; 3) електрополірування тих самих зразків протягом ще 3 хв., візуально – оптичний огляд з фіксацією (рис. 4), контроль ваги (рис. 5) після 6 хв.; 4) електрополірування тих самих зразків протягом ще 3 хв., візуально – оптичний огляд з фіксацією (рис. 4); контроль ваги (рис. 5) після 9 хв. процесу електрополірування. На кожному етапі фіксувалась реальна вольт-амперна крива за допомогою осцилографа (рис. 6).

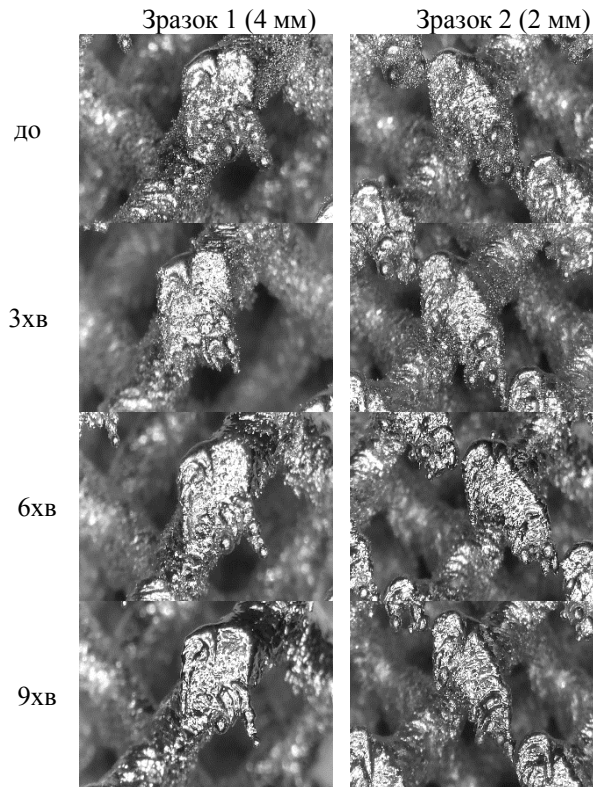


Рис. 4. Візуально- оптичний контроль дослідних зразків

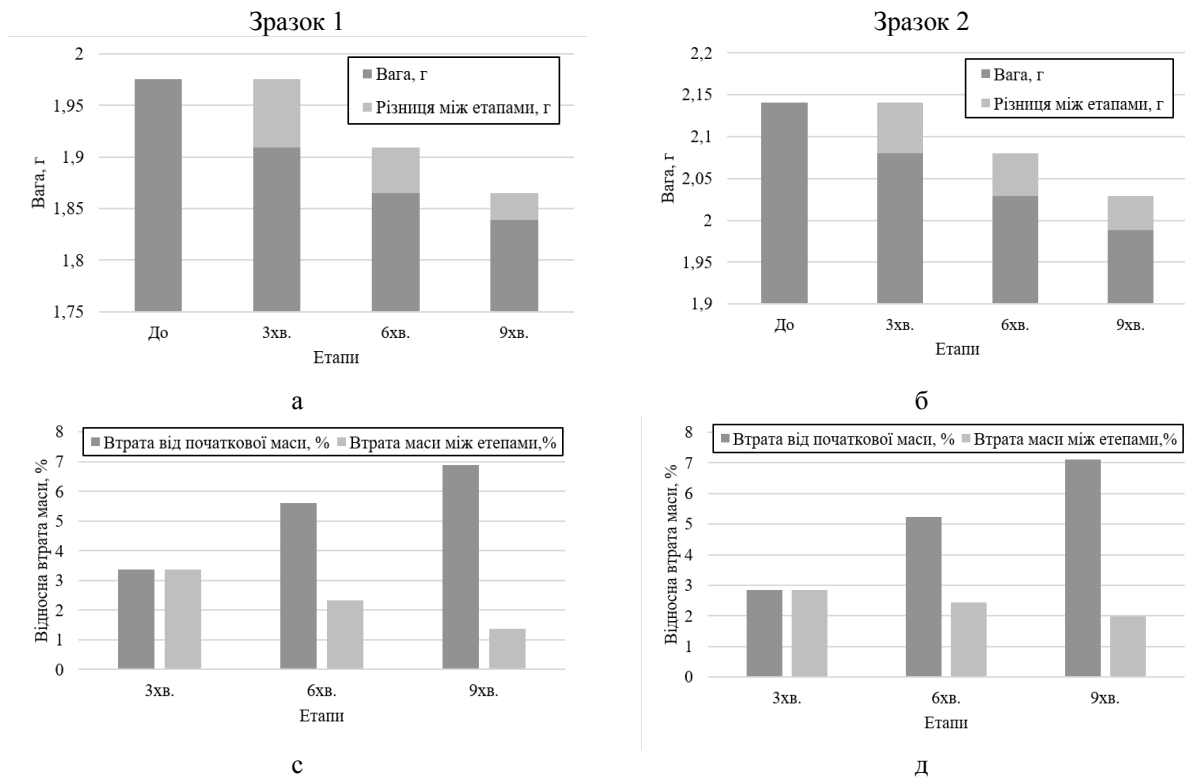


Рис. 5. Результати контролю ваги на всіх етапах електрополірування:
а – вага зразка 1, б – вага зразка 2, с – відносна втрата маси зразка 1, д – відносна втрата маси зразка 2

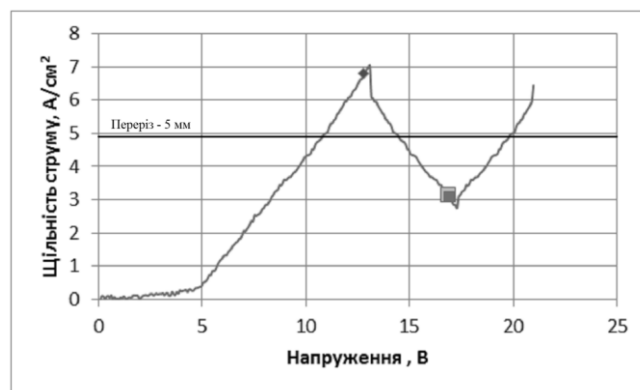


Рис. 6. Реальна вольт-амперна крива дослідних зразків [10]

В результаті контролю ваги перед випробуванням та після встановлено, що зразки втратили приблизно однакову вагу в діапазоні 6,9...7,1 % відносно початкової. Також необхідно відзначити зміну швидкості втрати ваги в процесі полірування. Як видно з рис. 5, втрата маси між етапами зменшується. Ймовірно, це пов'язано зі зменшенням виступів на поверхні зразків та зниженням шорсткості.

На підставі аналізу отриманих результатів встановлено, що при щільності струму 3 А/см² та напруги 17 В реалізується ефективне активне рівномірне полірування поверхні зразків з комірчастою структурою типу скеффолд з змінним розміром комірок від 4 до 2 мм.

Висновки

1. В результаті аналізу зміни ваги зразків з комірчастою структурою з розміром комірок 2 і 4 мм, виготовлених SLM з 316L встановлено, що в процесі електрохімполірування протягом 9 хв. зразки з різним розміром комірок втратили приблизно однакову вагу близько 6,9...7,1 % відносно їх початкової ваги.

2. На підставі аналізу отриманих результатів встановлено, що при щільності струму 3 А/см² та напруги 17 В реалізується ефективне активне рівномірне полірування поверхні зразків з комірчастою структурою типу скеффолд з змінним розміром комірок від 4 до 2 мм.

3. Також необхідно відзначити зміну швидкості втрати ваги в процесі полірування. Встановлено, що втрата маси між етапами зменшується. Ймовірно, це пов'язано зі зменшенням виступів на поверхні зразків та зниженням шорсткості.

Внесок авторів: формування проблеми – **Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **С. В. Аджамський, Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський**; розробка дослідницького стенду – **С. В. Аджамський**; виготовлення дослідних зразків – **С. І. Бадюк**; проведення випробувань – **С. В. Аджамський, Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський, С. І. Бадюк**; аналіз отриманих результатів – **С. В. Аджамський, Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський**.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *Tensile properties and microstructures of laser-formed Ti-6Al-4V [Text]* / J. Alcisto, A. Enriquez, H. Garcia [et al.] // *Journal of materials engineering and performance*. – 2011. – Vol. 20, № 2. – P. 203-212. DOI: 10.1007/s11665-010-9670-9.

2. Vayre, B. *Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects [Text]* / B. Vayre, F. Vignat, F. Villeneuve // *Mech. Ind.* – 2012. – № 13. – P. 89-96. DOI: 10.1051/meca/2012003.

3. *Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms [Text]* / D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe // *Int. Mat. Rev.* – 2012. – № 57. – P. 133-164. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014.

4. Wong, K. *A review of additive manufacturing [Text]* / K. Wong, A. Hernandez // *ISRN Mech. Eng.* – 2012. – № 4. – P. 1-10. DOI: 10.5402/2012/208760.

5. Brackett, D. *Topology optimization for additive manufacturing [Text]* / D. Brackett, I. Ashcroft, R. Hague // *Proc.* – 2011. – P. 348-362.

6. Аджамський, С. *Впровадження технології селективного лазерного плавлення в Україні [Текст]* / С. Аджамський, Г. Кононенко, Р. Подольський. – К.: Наук. думка, 2022. – 116 с. DOI: 10.15407/978-966-00-1856-3.

7. Ashby, M. *Mechanical properties of cellular solids [Text]* / M. Ashby // *Met. Trans. A, Phys. Metal. Mater. Sci.* – 1983. – № 14. – P. 1755-1769.

8. Lu, T. *Heat transfer in open-cell metal foams [Text]* / T. Lu, H. Stone, M. Ashby // *Acta Mater.*, – 1998. – № 46. – P. 3619-3635.

9. Evans, A. *Multifunctionality of cellular metal systems [Text]* / A. Evans, J. Hutchinson, M. Ashby // *Progr. Mater. Sci.* – 1998. – № 43. – P. 171-121.

10. *Дослідження ефективності електрохімічного полірування зразків змінного перерізу з різною*

шорсткістю зі сталі AISI 316L, виготовлених за технологією SLM [Текст] / С. Аджамський, Г. Кононенко, Р. Подольський, С. Бадюк // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2021. – № 2 (170). – С. 66-73. DOI: 10.32620/aktt.2021.2.08.

References

1. Alcisto, J., Enriquez, A., Garcia, H., Hinkson, S., Steelman, T., Silverman, E., Valdovino, P., Gigerenzer, H., Foyos, J., Ogren, J., Dorey, J., Karg, K., McDonald, T. & Es-Said Omar, S. *Tensile properties and microstructures of laser-formed Ti-6Al-4V. Journal of materials engineering and performance*, 2011, vol. 20, no. 2, pp. 203-212. DOI: 10.1007/s11665-010-9670-9.

2. Vayre, B., Vignat, F. & Villeneuve, F. *Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. Mech. Ind.*, 2012, no. 13, pp. 89-96. DOI: 10.1051/meca/2012003.

3. Gu, D., Meiners, W., Wissenbach, K. & Poprawe, R. *Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. Int. Mat. Rev.*, 2012, no. 57, pp. 133-164. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014.

4. Wong, K. & Hernandez, A. *A review of additive manufacturing. ISRN Mech. Eng.*, 2012, no. 4, pp. 1-10. DOI: 10.5402/2012/208760.

5. Brackett, D., Ashcroft, I. & Hague, R. *Topology optimization for additive manufacturing. Proc.*, 2011, pp. 348-362.

6. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskiy, R. & Badyuk, S. *Vprovadzhennja tehnologii selektivnogo lazernogo plavlennja v Ukraini [Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine]*. Kyiv, Naukova Dumka., 2022. 116 p. DOI: 10.15407/978-966-00-1856-3.

7. Ashby, M. *Mechanical properties of cellular solids. Met. Trans. A, Phys. Metal. Mater. Sci.*, 1983, no. 14, pp. 1755-1769.

8. Lu, T. J., Stone, H. & Ashby, M. *Heat transfer in open-cell metal foams. Acta Mater.*, 1998, no. 46, pp. 3619-3635.

9. Evans, A. G., Hutchinson, J. & Ashby, M. *Multifunctionality of cellular metal systems. Progr. Mater. Sci.*, 1998, no. 43, pp. 171-121.

10. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskiy, R. & Badyuk, S. *Doslidzhennja efektyvnosti elektrokhimichnogo poliruvannja zrazkiv zminnogo pererizu z riznoju shorstkistju zi stali AISI 316L, vigotvorenih za tehnologiiu SLM [Research efficiency electrochemical polishing variable section samples with different roughness of steel AISI 316L, manufactured by technology of selective laser melting]. Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 2 (170), pp. 66-73. DOI: 10.32620/aktt.2021.2.08.

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ELECTROCHEMICAL POLISHING OF SCAFFOLD SAMPLES MANUFACTURED BY ADDITIVE TECHNOLOGY

*Sergey Adjamskiy, Ganna Kononenko,
Rostyslav Podolskiy, Sergey Baduk*

In recent years, the actual production of metal products directly from electronic data according to a three-dimensional model based on layer-by-layer manufacturing has evolved from rapid prototyping to additive manufacturing. As the quality of additively manufactured metal products continues to increase and their manufacturing processes improve and develop, the demand for additive manufacturing is increasing. Additive manufacturing technology, also known as 3D printing, has become increasingly popular recently. Using additive manufacturing, almost any complex geometry can be manufactured with high degree of precision. After the production of parts using the SLM technology from metal powder, post-processing is applied, in particular electrochemical polishing, the main purpose of which is to reduce surface roughness, increase the gloss of surface elements, and remove metal powder that has partially melted onto the outer surface of the product at the point of contact between the molten metal and the border of the part and the powder, which is located next to the melt. This is especially important for inclined surfaces, internal channels and cellular structures with developed outer surface. For research, samples were made using SLM technology from AISI 316L austenitic steel powder. The samples have a cube shape with a base of 10 mm, a height of 10 mm, and a thickness of 10 mm, with cell widths of 4 mm and 2 mm. The main body of both samples was printed using the same modes at a laser power of 220 W, a scanning speed of 1000 mm/s and a distance between laser passes of 0.14 mm. Samples were printed on Alfa-280 3D printer manufactured by ALT Ukraine LLC. Electropolishing was carried out in a solution of orthophosphoric acid (H_3PO_4) with glycerol ($C_3H_8O_3$) by immersing the test samples in the electrolytic solution at a voltage of 17 V and a current density of 3 A/cm². The control of weight and geometric parameters was carried out with the help of ADV-2000 analytical balances and MKC-25 micrometer. The electropolishing of the experimental samples took place in four stages: 1) visual - optical inspection with fixation, weight control before the start of the process; 2) electropolishing for 3 minutes, visual - optical inspection with photo fixation; weight control after 3 min. polishing process; 3) electropolishing of the same samples for another 3 minutes, visual - optical inspection with photo fixation, weight control after 6 minutes. polishing; 4) electropolishing of the same samples for another 3 minutes, visual - optical inspection with photo fixation; weight control after 9 min. electropolishing process. At each stage, a real current-voltage curve was recorded using an oscilloscope. As a result of weight control before and after the test, it was established that the samples lost approximately the same weight in the range of 6.9...7.1 % relative to the initial one. Based on the analysis of the obtained results, it was established that at a current density of 3 A/cm² and at a voltage of 17 V, effective active uniform polishing of the surface of samples with a cellular structure of scaffold type with a variable cell size from 4 to 2 mm is realized.

Keywords: SLM technology; AISI 316L; electrochemical polishing; relative mass loss.

Аджамський Сергій Вікторович – PhD, головний конструктор LLC «Additive Laser Technology of Ukraine»; старш. наук. співроб., Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна.

Кононенко Ганна Андріївна – д-р техн. наук, учений секретар, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України; інженер-матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Дніпро, Україна.

Подольський Ростислав Вячеславович – PhD, мол. наук. співроб., Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України; інженер-матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Дніпро, Україна.

Бадюк Сергій Іванович – канд. техн. наук, інженер-технолог LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Дніпро, Україна.

Sergey Adjamskiy – PhD, Chief Designer of LLC "Additive Laser Technology of Ukraine"; Senior Researcher at the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine,
e-mail: info@alt-print.com, ORCID: 0000-0002-6095-8646.

Ganna Kononenko – 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, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: 0000-0001-7446-4105.

Rostyslav Podolskiy – PhD, Junior Researcher of the Institute of Iron and Steel of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine; Materials Engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Dnipro, Ukraine, e-mail: rostislavpodolskiy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0288-0641.

Sergey Baduk – Cand. Technical Science, Process Engineer LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Dnipro, Ukraine, e-mail: uroboroz33@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1074-3057.