

С. В. АДЖАМСКИЙ^{1,2}, А. А. КОНОНЕНКО^{2,3}, Р. В. ПОДОЛЬСКИЙ^{2,3,4}

¹ Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепр, Украина

² LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Днепр, Украина

³ Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, Днепр, Украина

⁴ Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, Украина

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АВИА- И РАКЕТОСТРОЕНИИ

SLM-технология – это инновационное производство изделий сложной геометрической формы посредством послойного наращивания материала на основе компьютерной CAD-модели при помощи специальных 3D-принтеров. С помощью SLM-технологий создают точные металлические изделия для работы в составе узлов и агрегатов ответственного назначения (например, авиационно-космические). SLM успешно заменяет традиционные методы производства, так как изделия построенные по SLM-технологии, зачастую превосходят свойства изделий, изготовленных по традиционным технологиям. Данная технология имеет ряд преимуществ для применения и изготовления изделий авиационно-космического назначения: возможное получение тонкостенных деталей, упрощение их производства, за счет уменьшения количества технологических переходов, применения компьютерных программ и средств автоматизации позволяющих оптимизировать конструкцию изделия, что открывает возможность снижения массы элементов конструкции летательных аппаратов. Одной из возможностей, которые позволяет реализовать SLM-технология – замена сплошных металлических элементов ажурными конструкциями с обеспечением достаточного уровня механических свойств. Использование ажурных конструкций и топологическая оптимизация могут позволить облегчить деталь до 50 %. Однако при этом важным является обеспечение необходимого уровня механических свойств за счет обособленного конструирования элементов: толщина сетки, размер и форма ячеек и т.д. Кроме того, в авиа и ракетостроении часто аддитивные технологии находят применение при создании изделий с внутренними каналами тонкостенных изделий с наклонными поверхностями. Поэтому важно обеспечивать качество тонкостенных поверхностей с различными углами наклона.

Печать проводилась на 3-D принтере «Alpha-150» производства ООО «АЛТ Украина». В рамках эксперимента были изготовлены образцы в виде куба с внутренней ажурной структурой и группа образцов в виде пластин с различным углом наклона относительно оси Z (0°, 30°, 45°) по различным режимам. При отработке режимов печати с внутренними тонкими конструкциями было установлено, что при неблагоприятных режимах создавались условия проплава, металл проваливался на слое порошка, формировались нависающие элементы, нижняя поверхность с высокой шероховатостью. При благоприятных режимах нижняя поверхность менее шероховатая, слои четко выражены, размеры соответствуют заданной геометрии модели. По результатам эксперимента по отработке режимов печати плоских образцов с различными углами наклона установлено, что для разных углов наклона оптимальными являются разные режимы. Таким образом установлено, что SLM-технология позволяет создавать элементы тонкого сечения с максимальной точностью, и производить детали с уникальной геометрической структурой при соответствующих режимах процесса. По разработанным технологическим параметрам могут быть созданы детали сложной формы для эксплуатации в авиакосмической технике.

Ключевые слова: SLM-технология; Inconel 718; ажурная конструкция; топологическая оптимизация; снижение массы; летательный аппарат.

Введение

SLM-технология – это инновационное производство изделий сложной геометрической формы посредством послойного наращивания материала на основе компьютерной CAD-модели при помощи специальных 3D-принтеров. С помощью SLM-технологий создают точные металлические изделия для работы в составе узлов и агрегатов ответственного

назначения (например, авиационно-космические). SLM успешно заменяет традиционные методы производства, так как изделия, построенные по этой современной технологии, зачастую превосходят свойства изделий, изготовленных по традиционным технологиям.

Данная технология имеет ряд преимуществ для применения и изготовления изделий авиационно-космического назначения: возможное получение

тонкостенных деталей, упрощение их производства, за счет уменьшения количества технологических переходов, применения компьютерных программ и средств автоматизации позволяющих оптимизировать конструкцию изделия, высокая плотность материала [1 – 12].

Актуальным направлением в производстве деталей авиационно-космического назначения является топологическая оптимизация («удаление» неработающей части конструкции) для обеспечения минимальной массы и высокой прочности [4 – 12], уменьшение затрат энергоресурсов во время полета, связанное с преодолением сил трения, воздушного сопротивления и уравнивание своей массы [13].

Авиационная промышленность требует снижения массы элементов конструкции летательных аппаратов. Одной из перспективных возможностей, которые позволяет реализовать SLM-технология – замена сплошных металлических элементов ажурными конструкциями с обеспечением достаточного уровня механических свойств.

Рядом исследований показана эффективность такого подхода [14]. Использование ажурных конструкций и топологическая оптимизация могут позволить облегчить деталь до 50 %. Однако при этом важным является обеспечение необходимого уровня механических свойств за счет обоснованного кон-

струирования элементов: толщина сетки, размер и форма ячеек и т.д.

Кроме того, в авиа и ракетостроении часто аддитивные технологии находят применение при создании изделий с внутренними каналами тонкостенных изделий с наклонными поверхностями. Поэтому важно обеспечивать качество тонкостенных поверхностей с различными углами наклона.

Цель исследований

Отработка технологических параметров производства образцов сложной конфигурации при изготовлении по SLM-технологии из жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 с определением возможности применения данной технологии в изделиях авиационно-космического назначения.

Материал и методика исследований

Печать проводилась на 3-D принтере «Alfa-150» (рис. 1) производства ООО «ALT Украина» по технологии селективного лазерного плавления.

В рамках эксперимента были изготовлены образцы в виде куба с внутренней сетчатой структурой по различным режимам. Вторая группа образцов в виде пластин с различным углом наклона относительно оси Z (0°, 30°, 45°).

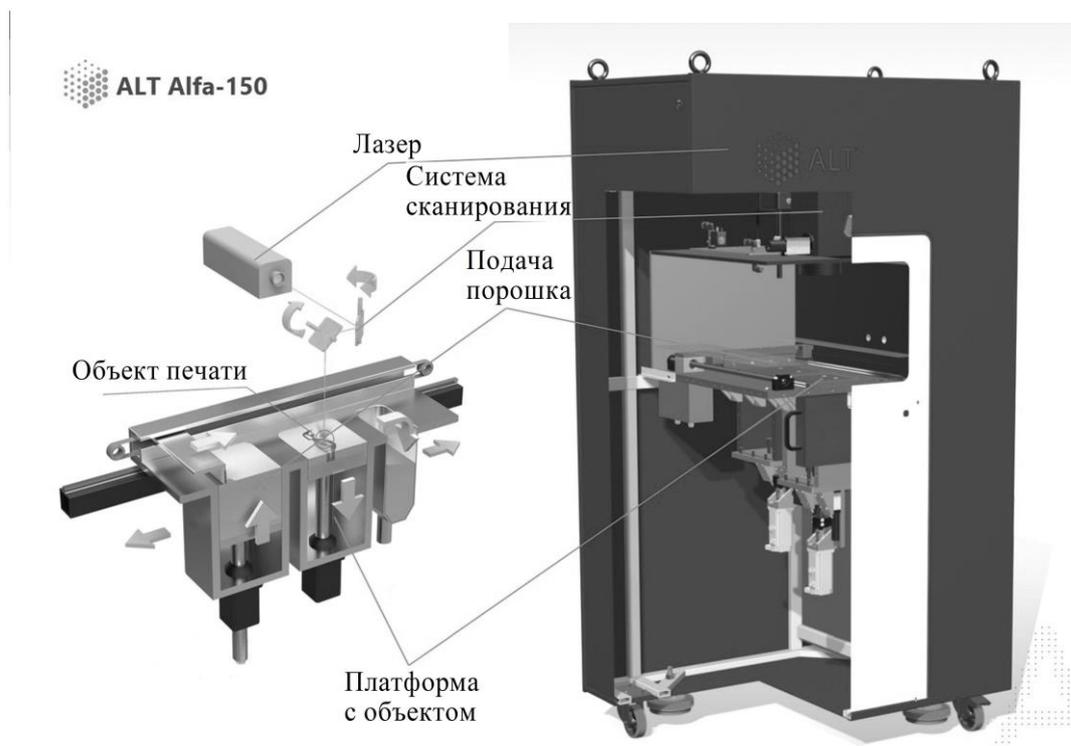


Рис. 1. 3-D принтер «Alfa-150» (ООО «ALT Украина»)

Результаты исследований

При отработке режимов печати с внутренними тонкими конструкциями было установлено, что при неблагоприятных режимах создавались условия проплава, металл проваливался на слое порошка, формировались нависающие элементы, нижняя поверхность неровная [15, 16]. Схематически этот процесс показан на рис. 2, а результат, полученный на образцах показан на рис. 3, а. При благоприятных режимах нижняя поверхность менее шероховатая,

слои четко выражены, соответствуют заданной геометрии модели (рис. 3, б).

Таким образом установлено, что SLM-технология позволяет создавать элементы тонкого сечения с высокой точностью, и производить детали с уникальной геометрической структурой.

Также был выполнен эксперимент по отработке режимов печати плоских образцов с различными углами наклона (рис. 4). Установлено, что для разных углов наклона оптимальными являются разные режимы.

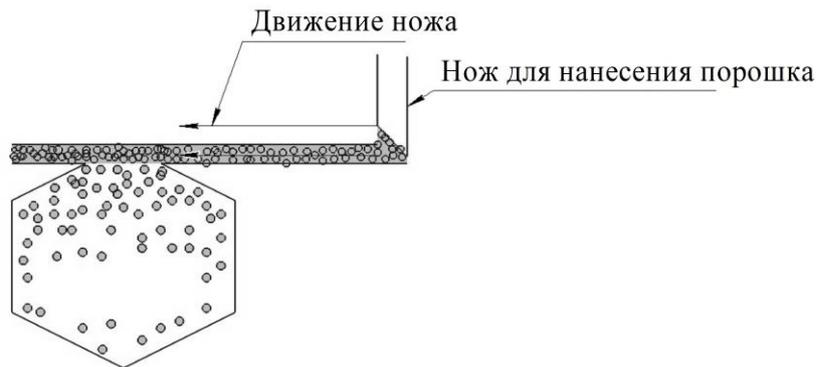


Рис. 2. Нанесение порошка при построении ажурных конструкций

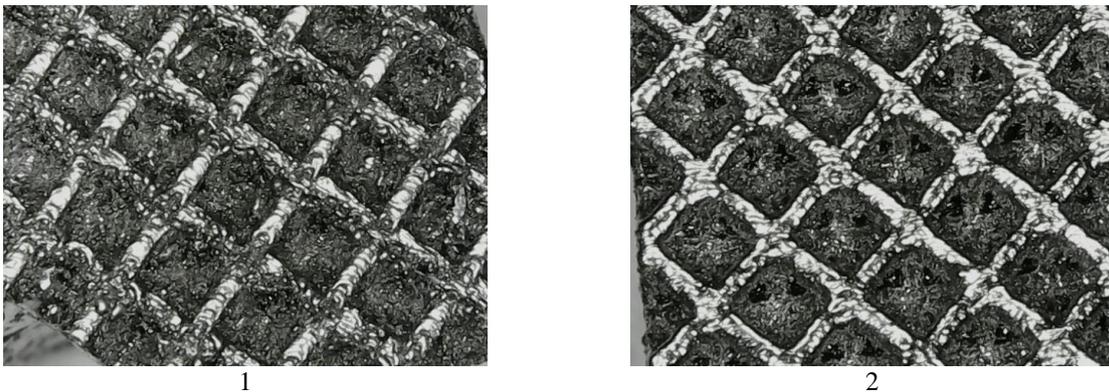


Рис. 3. Макроструктура образца с ажурными конструкциями: 1 – при неблагоприятных режимах процесса; 2 – при благоприятных

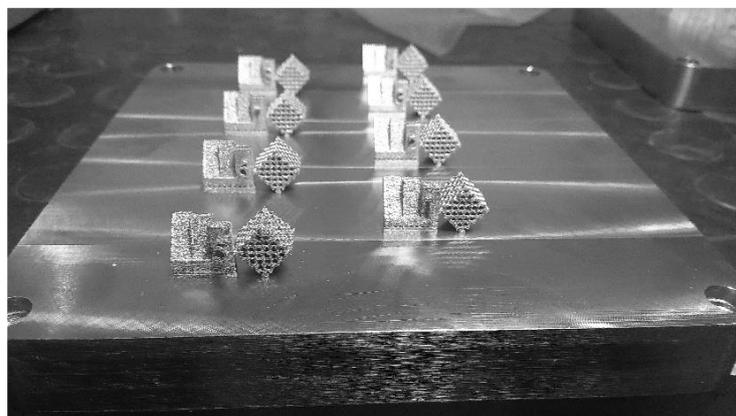


Рис. 4. Общий вид исследуемых образцов

Для режимов с более высокой мощностью и низкой скоростью лучшие результаты получены для больших углов наклона, при этих же режимах образцы с малыми углами наклона относительно оси Z имеют признаки избыточного нагрева: изменение цвета металла, наплывы. Для режимов с меньшей мощностью и высокой скоростью получены хорошие результаты для вертикальных элементов, при этом наклонные части имеют большую шероховатость. По разработанным параметрам процесса могут быть созданы детали сложной формы для эксплуатации в авиакосмической технике. Однако, для использования в авиационно-космическом направлении детали с сложной конфигурацией напечатанные при помощи SLM-технологии требуют проведения дальнейших исследований и испытаний для подтверждения стабильных эксплуатационных свойств.

Выводы

1. Показаны возможности и преимущества использования SLM-технологии для создания деталей, используемых в авиационно-космической отрасли.
2. Установлено, что режимы печати детали должны задаваться в зависимости от геометрии изделия (угол наклона поверхности, толщина стенки, размер детали).
3. Показана возможность создания тонких ажурных конструкций и наклонных поверхностей с обеспечением заданной геометрии.

Литература

1. 20,000 3D Printed Parts Are Currently Used on Boeing Aircraft as Patent Filing Reveals Further Plans [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3dprint.com/49489/boeing-3d-print/>. – 04.08.2015.
2. 3-D-Printed Parts Prove Beneficial for Airbus and ULA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://aviationweek.com/aerospace/3-d-printed-parts-prove-beneficial-airbus-ula>. – 04.08.2015.
3. GE's Additive Manufacturing (3D Printing) Research Center [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ge.com/news/reports/ges-additive-manufacturing-3d-printing-research>. – 04.08.2015.
4. Применение аддитивных технологий для изготовления деталей перспективных газотурбинных двигателей [Текст] / Л. А. Магеррамова, Ю. А. Ножницкий, Б. Е. Васильев и др. // *Технология легких сплавов*. – 2015. – № 4. – С. 7-13.
5. Логачева, А. И. Аддитивные технологии для изделий ракетно-космической техники: перспективы и проблемы применения [Текст] / А. И. Логачева // *Технология легких сплавов*. – 2015. – № 3. – С. 39-44.
6. Дорошенко, В. С. Аддитивное производство отливок на 3D-принтерах [Текст] / В. С. Дорошенко // *Оборудование и инструмент для профессионалов. Металлообработка*. – 2016. – № 5. – С. 62-64.
7. Разработка технологии изготовления завихрителя фронтального устройства камеры сгорания перспективного двигателя ПД-14 [Текст] // *Авиационные материалы и технологии*. – 2014. – № S5. – С. 101-102.
8. Перспективы применения аддитивных технологий в производстве сложных деталей газотурбинных двигателей из металлических материалов [Текст] / С. В. Белов и др. // *Аддитивные технологии в российской промышленности : сб. науч. тр.* – М. : ВИАМ, 2015. – С. 101-102.
9. ANALYSIS: Rolls-Royce readies for Trent XWB-97 flight test on A380 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.flightglobal.com/analysis-rolls-royce-readies-for-trent-xwb-97-flight-test-on-a380/117726.article>. – 04.08.2015.
10. GE's considers 3D printing Turbine Blades for next generation boeing 777X's GE9X Engines [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://3dprint.com/11266/3d-printed-lpt-ge9x-777x>. – 04.08.2015.
11. NASA tests limits of 3D-printing with powerful rocket engine check [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.nasa.gov/press/2013/august/nasa-tests-limits-of-3-d-printing-with-powerful-rocket-engine-check/#.Xy_S8ogzaCg – 27.08.2013.
12. Hot-fire tests show 3D-printed rocket parts rival traditionally manufactured parts [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/3dprinting.html>. – 24.07.2013.
13. Степина, Е. А. Разработка общих принципов формирования методов повышения экономичности полета вс га путём экономии авиатоплива [Текст] / Е. А. Степина, Е. А. Максименко, Р. А. Акзигитов // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. – Сибирь, 2015. – С. 718–720.
14. Damage-tolerant architected materials inspired by crystal microstructure [Текст] / P. Minh-Son, L. Chen, T. Iain et all // *N AT U RE*. – University of Sheffield, Sheffield, UK.: 1Department of Materials, Imperial College London, London, UK., 2019. – (Springer Nature). – P. 305–311.
15. Аджамский, С. В. Использование SLM-технологии в деталях и узлах авиационно-космического назначения [Текст] / С. В. Аджамский, А. А. Кононенко, Р. В. Подольский // *XI Всеукраїнська конференція молодих вчених «МОЛОДІ ВЧЕНІ 2020 – ВІД ТЕОРІЇ ДО ПРАКТИКИ»* – Дніпро: НМетАУ. – 2020. – С. 6–9.
16. Аджамский, С. В. Двумерное моделирование нестационарного температурного поля единичного трека из жаропрочного сплава inconel 718 [Текст] // С. В. Аджамский, А. А. Кононенко, Р. В. Подольский // *Проблеми математичного моделювання: Матеріали Всеукраїнської науково-*

методичної конференції – Кам'янське: ДДТУ, 2020. – С. 42–45.

References

1. *20,000 3D Printed Parts Are Currently Used on Boeing Aircraft as Patent Filing Reveals Further Plans*. Available at: <https://3dprint.com/49489/boeing-3d-print/> (accessed 04.08.2015).
2. *3-D-Printed Parts Prove Beneficial for Airbus and ULA*. Available at: <https://aviationweek.com/aerospace/3-d-printed-parts-prove-beneficial-airbus-ula> (accessed 04.08.2015).
3. *GE's Additive Manufacturing (3D Printing) Research Center*. Available at: <https://www.ge.com/news/reports/ges-additive-manufacturing-3d-printing-research> (accessed 04.08.2015).
4. Magerramova, L. A., Nozhnitskii, Yu. A., Vasil'ev, B. E. *Primenenie additivnykh tekhnologii dlya izgotovleniya detalei perspektivnykh gazoturbinykh dvigatelei* [The use of additive technologies for the manufacture of parts of promising gas turbine engines]. *Tekhnologiya legkikh splavov – Light alloy technology*, 2015, no. 4, pp. 7-13.
5. Logacheva, A. I. *Additivnye tekhnologii dlya izdelii raketno-kosmicheskoi tekhniki: perspektivy i problemy primeneniya* [Additive technologies for rocket and space technology products: prospects and problems of application]. *Tekhnologiya legkikh splavov – Light alloy technology*, 2015, no. 3, pp. 39-44.
6. Doroshenko, V. S. *Additivnoe proizvodstvo otlivok na 3D-printerakh* [Additive manufacturing of castings on 3D printers]. *Oborudovanie i instrument dlya professionalov. Metalloobrabotka – Equipment and tools for professionals. Metalworking*, 2016, no. 5, pp. 62-64.
7. *Razrabotka tekhnologii izgotovleniya zavikhritelya frontovogo ustroystva kamery sgora-niya perspektivnogo dvigatelya PD-14* [Development of manufacturing technology for the swirl of the front device of the combustion chamber of the promising PD-14 engine]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii – Aviation materials and technologies*, 2014, no. S5, pp. 101-102.
8. Belov, S. V. et al *Perspektivy primeneniya additivnykh tekhnologii v proizvodstve slozhnykh detalei gazoturbinykh dvigatelei iz metallicheskich materialov* [Prospects for the use of additive technologies in the production of complex parts of gas turbine engines from metal materials]. *Additivnye tekhnologii v rossiiskoi promyshlennosti : sb. nauch. tr. – Additive technologies in Russian industry*. Moscow, VIAM Publ., 2015, pp. 101-102.
9. *ANALYSIS: Rolls-Royce readies for Trent XWB-97 flight test on A380*. Available at: <https://www.flightglobal.com/analysis-rolls-royce-readies-for-trent-xwb-97-flight-test-on-a380/117726.article> (accessed 04.08.2015).
10. *GE's considers 3D printing Turbine Blades for next generation boeing 777X's GE9X Engines*. Available at: <http://3dprint.com/11266/3d-printed-lpt-ge9x-777x> (accessed 04.08.2015).
11. *NASA tests limits of 3D-printing with powerful rocket engine check*. Available at: https://www.nasa.gov/press/2013/august/nasa-tests-limits-of-3-d-printing-with-powerful-rocket-engine-check/#.Xy_S8ogzaCg (accessed 27.08.2013).
12. *Hot-fire tests show 3D-printed rocket parts rival traditionally manufactured parts*. Available at: <https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/3dprintin.html> (accessed 24.07.2013).
13. Stepina, E. A., Maksimenko, E. A., Akzigitov, R. A. *Pazrabotka obshchikh printsi-pov formirovaniya metodov povysheniya ekonomichno-sti poleta vs ga putem ekonomii aviato-pliva* [Development of general principles for the formation of methods to increase the flight efficiency of an entire aircraft by saving jet fuel]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики – Actual problems of aviation and astronautics*, Sibir', 2015, pp. 718-720.
14. Minh-Son, P., Chen, L., Iain, T., Jedsada, L. *Damage-tolerant architected materials in-spired by crystal microstructure*. University of Sheffield, Sheffield, UK, 1Department of Materials, Imperial College London, London, UK, 2019, Springer Nature, pp. 305–311.
15. Adzhamskii, S. V., Kononenko, A. A., Podol'skii, R. V. *Ispol'zovanie SLM-tekhnologii v detalyakh i uzlakh aviatsionno-kosmicheskogo naznacheniya* [The use of SLM technology in aerospace parts and components]. *XI Vseukrains'ka konferentsiya molodikh vchenikh «MOLODI VChENI 2020 – VID TEORII DO PRAKTIKI» [XI All-Ukrainian Conference of Young Scientists "YOUNG SCIENTISTS 2020 - FROM THEORY TO PRACTICE"]*. Dnipro, NMetAU, 2020, pp. 6–9.
16. Adzhamskii, S. V., Kononenko, A. A., Podol'skii, R. V. *Dvumernoe modelirovanie nestatsionarnogo temperaturnogo polya edinichnogo treka iz zharoprochnogo splava inconel 718* [Two-dimensional modeling of the unsteady temperature field of a single track made of inconel 718 heat-resistant alloy]. *Problemi matematichnogo modelyuvannya: Materiali Vseukrains'koï naukovo-metodichnoi konferentsii [Problems of mathematical modeling: Proceedings of the All-Ukrainian scientific-methodical conference]*. Kamyans'ke, DDTU, 2020, pp. 42–45.

Надійшла до редакції 12.05.2020, розглянута на редколегії 15.08.2020

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ АДДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У АВІА-ТА РАКЕТОБУДУВАННЯ

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

SLM-технологія – це інноваційне виробництво виробів складної геометричної форми за допомогою пошарового нарощування матеріалу на основі комп'ютерної CAD-моделі за допомогою спеціальних 3D-принтерів. За допомогою SLM-технологій створюють точні металеві вироби для роботи в складі вузлів і агрегатів відповідального призначення (наприклад, авіаційно-космічні). SLM успішно замінює традиційні методи виробництва, так як вироби побудовані за SLM-технологією, часто перевершують властивості виробів, виготовлених за традиційними технологіями.

Дана технологія має ряд переваг для застосування і виготовлення виробів авіаційно-космічного призначення: можливе отримання тонкостінних деталей, спрощення їх виробництва, за рахунок зменшення кількості технологічних переходів, застосування комп'ютерних програм і засобів автоматизації дозволяють оптимізувати конструкцію виробу, що відкриває можливість зниження маси елементів конструкції літальних апаратів.

Однією з можливостей, які дозволяє реалізувати SLM-технологія – заміна суцільних металевих елементів ажурними конструкціями з забезпеченням достатнього рівня механічних властивостей. Використання ажурних конструкцій і топологічна оптимізація можуть дозволити полегшити деталь до 50 %. Однак при цьому важливим є забезпечення необхідного рівня механічних властивостей за рахунок обґрунтованого конструювання елементів: товщина сітки, розмір і форма осередків і т.д. Крім того, в авіа- і ракетобудуванні часто адитивні технології знаходять застосування при створенні виробів з внутрішніми каналами тонкостінних виробів з похилими поверхнями. Тому важливо забезпечувати якість тонкостінних поверхонь з різними кутами нахилу.

Друк проводилася на 3-D принтері «Alfa-150» виробництва ТОВ «ALT Україна». В рамках експерименту були виготовлені зразки у вигляді куба з внутрішньою структурою сот і суцільного куба з рівними габаритами по різним режимам. Друга група зразків у вигляді пластин з різним кутом нахилу щодо осі Z (0°, 30°, 45°).

При відпрацюванні режимів друку з внутрішніми тонкими конструкціями було встановлено, що при несприятливих режимах створювалися умови проплавити, метал провалювався на шарі порошку, формувалися нависають елементи, нижня поверхня з високою шорсткістю. При сприятливих режимах нижня поверхня гладка, шари чітко виражені, відповідають заданій геометрії моделі. Також було виконано експеримент з відпрацювання режимів друку плоских зразків з різними кутами нахилу. Встановлено, що для різних кутів нахилу оптимальними є різні режими. Таким чином встановлено, що SLM-технологія дозволяє створювати елементи тонкого перетину з максимальною точністю, і виробляти деталі з унікальною геометричною структурою. За розробленими параметрами процесу можуть бути створені деталі складної форми для експлуатації в авіакосмічній техніці.

Ключові слова: SLM-технологія; Inconel 718; ажурна конструкція; топологічна оптимізація; зниження маси; літальний апарат.

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN AIRCRAFT AND ROCKET ENGINEERING

S. Adjamskiy, G. Kononenko, R. Podolskiy

SLM technology is an innovative production of products of complex geometric shapes through layer-by-layer material building-up based on a computer-based CAD model using special 3D printers. With the help of SLM technology, they create precise metal products for work as part of components and assemblies for critical purposes (for example, aerospace). SLM successfully replaces traditional manufacturing methods, since products built using SLM technology often surpass the properties of products made using traditional technologies.

This technology has several advantages for the application and manufacture of aerospace products: the possible production of thin-walled parts, simplifying their production, by reducing the number of technological transitions, using computer programs and automation tools to optimize the product design, which opens up the possibility of reducing the weight of aircraft structural elements apparatuses.

One of the opportunities that SLM technology allows to realize is the replacement of solid metal elements with openwork structures, ensuring a sufficient level of mechanical properties. The use of openwork designs and topological optimization can make it possible to lighten a part up to 50 %. However, it is important to ensure the necessary level of mechanical properties due to the reasonable design of elements: mesh thickness, cell size, and shape, etc. Besides, in aircraft and rocket science, often additive technologies are used to create products with internal channels of thin-walled products with inclined surfaces. Therefore, it is important to ensure the quality of thin-walled surfaces with different angles of inclination.

Printing was carried out on a 3-D Alfa-150 printer manufactured by ALT Ukraine LLC. As part of the experiment, samples were made in the form of a cube with the internal structure of the honeycomb and a solid cube with equal dimensions in different modes. The second group of samples in the form of plates with different angles of inclination relative to the Z-axis (0°, 30°, 45°).

When practicing printing modes with internal thin structures, it was found that under adverse conditions, fusion conditions were created, the metal fell through on a layer of powder, overhanging elements formed, and the lower surface with high roughness. Under favorable conditions, the lower surface is smooth, the layers are clearly defined, correspond to the given geometry of the model. An experiment was also performed to test the printing modes of flat samples with different angles of inclination. It has been established that different modes are optimal for different tilt angles. Thus, it was found that SLM technology allows you to create thin-section elements with maximum accuracy, and to produce parts with a unique geometric structure. According to the developed process parameters, parts of complex shape for operation in aerospace engineering can be created.

Keywords: SLM technology; Inconel 718; openwork design; topological optimization; weight reduction; aircraft.

Аджамский Сергей Викторович – аспирант Днепропетровского национального университета им. О. Гончара; технический директор LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Днепр, Украина.

Кононенко Анна Андреевна – канд. техн. наук, ученый секретарь Института черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины; инженер-материаловед LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Днепр, Украина.

Подольский Ростислав Вячеславович – магистрант Национальной металлургической академии Украины; инженер первой категории Института черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины; стажер-материаловед LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Днепр, Украина.

Sergey Adjamskiy – PhD student of the Oles Honchar Dnipro National University; Technical Director of Additive Laser Technology of Ukraine LLC, Dnipro, Ukraine,
e-mail: info@alt-print.com, ORCID Author ID: 0000-0002-6095-8646.

Ganna Kononenko – Cand. 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 Author ID: 0000-0001-7446-4105.

Rostislav Podolskiy – undergraduate of the National Metallurgical Academy of Ukraine; engineer of the first category of the Institute of Iron and Steel of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine; trainee and materials scientist LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Dnipro, Ukraine,
e-mail: rostislavpodolskiy@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-0288-0641.