

УДК 621.763

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.040723.73.987

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ЖАРОМІЦНИХ НИКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ПІСЛЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ

САЗАНІШВІЛІ З. В., канд. техн. наук, доц.

Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-90-71, e-mail: sazanishvili.z.v@nmu.one, ORCID ID: 0000-0003-4138-9238

Анотація. Постановка проблеми. Метод селективного лазерного плавлення – перспективна технологія для виробництва деталей з жароміцних сплавів. Традиційні методи виготовлення таких деталей вимагають додаткового технологічного оснащення та обробки, що збільшує час підготовки виробництва і спричинює утворення великої кількості відходів матеріалу. Селективне лазерне плавлення дозволяє виготовляти деталі складної конфігурації без необхідності в додатковому обладнанні. Формоутворення деталей адитивними технологіями забезпечує скорочення часу підготовки виробництва, операцій механічної обробки, підвищення коефіцієнта використання матеріалу. Їх застосування у технологічному циклі виготовлення виробів – актуальне завдання сьогодення. Однак перед упровадженням у технологічний процес операцій формоутворення виробів із жароміцних сплавів методом селективного лазерного плавлення необхідно провести комплексний аналіз механічних, технологічних характеристик матеріалу та його мікроструктури, яка впливає на кінцеві властивості деталей. **Мета дослідження.** Вивчення можливості впровадження методу селективного лазерного плавлення для виробництва деталей з жароміцних сплавів, аналіз механічних характеристик матеріалу, а також мікроструктури, що безпосередньо впливає на кінцеві властивості деталей. **Висновки.** Дослідження показали, що метод селективного лазерного плавлення ефективний для виробництва складних деталей з жароміцних сплавів. Отримані дані щодо механічних властивостей після термічної обробки сплаву Inconel 718 демонструють їх відповідність вимогам стандарту AMS 5662 та його придатність для роботи в екстремальних умовах. У мікроструктурі зразків виявлено особливості, характерні для методу селективного лазерного плавлення, а саме наявність видимих треків та особливої текстури – витягнуті зерна в напрямку вирощування деталі. Дослідження вказують на потенціал адитивних технологій у поліпшенні технологічних процесів та властивостей сплавів для виробництва деталей з жароміцних сплавів.

Ключові слова: селективне лазерне плавлення; механічні властивості; одиничний трек; мікроструктура; зерно

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF FERROUS NICKEL ALLOYS AFTER MOLDING BY SELECTIVE LASER MELTING

SAZANISHVILI Z.V., Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

Department of Civil Engineering, Geotechnics and Geomechanics, National Technical University “Dnipro University of Technology”, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-90-71, e-mail: sazanishvili.z.v@nmu.one, ORCID ID: 0000-0003-4138-9238

Abstract. Problem statement. The selective laser melting method is a promising technology for the production of parts from heat-resistant alloys. Traditional methods of manufacturing such parts require additional technological equipment and processing, which increases the time of production preparation and, as a result, to the creation of a large number of raw materials. Selective laser melting allows you to produce parts of a complex configuration without the need for additional equipment. Molding of parts using additive technologies, which ensure a reduction in product preparation time, mechanical processing operations, and an increase in the efficiency of material use. Their application in the technological cycle of manufacturing products is an urgent task today. However, before the introduction into the technological process of forming products from heat-resistant alloys by the selective laser melting method, it is necessary to carry out a comprehensive analysis of the mechanical and technological characteristics of the material and its microstructure, which affects the final properties of the parts. **The purpose of the article.** Investigation of the possibility of implementing the selective laser melting method for the production of parts from strong alloys, analysis of

the mechanical characteristics of the material, as well as the microstructure, which affects the final properties of the parts. **Conclusions.** Studies have shown that the selective laser melting method is effective for the production of complex parts from heat-resistant alloys. The obtained data on the mechanical properties after heat treatment of the Inconel718 alloy demonstrate its compliance with the requirements of the AMS 5662 standard and its suitability for working under extreme conditions. In the microstructure, highlighted features are revealed, which are characteristic of the selective laser melting method, as well as the presence of visible tracks and a special texture – elongated grains in the direction of growing parts. Research points to the potential of additive technologies in improving technological processes and properties of alloys for the production of heat-resistant alloy parts.

Keywords: selective laser melting; mechanical properties, single track; microstructure; grain

Постановка проблеми. Традиційні методи виробництва деталей з жароміцних сплавів – це лиття, обробка металів тиском, механічна обробка, а також методи порошкової металургії. Ці технології потребують додаткового технологічного оснащення та інструментів, що збільшує час підготовки виробництва та собівартість виробів. Також більшість традиційних методів виготовлення передбачають високий відсоток відходу матеріалу, наприклад, під час механічної обробки маса готової деталі може мати масу у 15 разів меншу за масу заготовки, що викликає необхідність утилізації дорогої стружки.

Розвиток адитивних технологій дозволяє виготовляти деталі складної конфігурації з металів та сплавів методом селективного лазерного плавлення. У процесі формоутворення відбувається розплавлення порошку з наступним отриманням суцільної твердофазної структури. Адитивні технології мають низку переваг, одна з яких полягає у тому, що скорочення періоду підготовки виробництва дозволяє

розпочинати процес формоутворення одразу після конструювання виробу і не потребує додаткового оснащення. Слід зазначити, що коефіцієнт використання матеріалу в даному випадку може досягати 0,95.

Однак технології адитивного виробництва дуже чутливі до вхідних параметрів формоутворення деталей, тому впровадженню методу селективного лазерного плавлення в технологічний процес повинен передувати комплексний аналіз фізико-механічних та технологічних властивостей матеріалу, а також мікроструктури, яка безпосередньо впливає на кінцеві властивості, що формуються.

Аналіз публікацій. Екстремальні умови середовища під час експлуатації деталей, таких як трубки теплообмінників, лопатки газотурбін, жароміцні кріпильні елементи, накладають на матеріал низку вимог. Широкий діапазон високих робочих температур мають сплави на основі нікелю і заліза, серед яких вирізняють групу сплавів Inconel. Хімічний склад сплавів цієї групи наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сплавів групи Inconel [1]

Сплав	Ni	Cr	Mo	Nb	Cu	Mn	C	Si	S	Al	Ti	P	Co	Fe	B
Inconel 600	>72,0	14,0–17	–	–	<0,5	<1,0	<0,15	<0,5	<0,015	–	–	–	–	6,0–10,0	–
Inconel 625	>58,0	20,0–23	8,0–10	3,15–4,15	–	<0,5	<0,10	<0,5	<0,015	<0,4	<0,4	<0,015	<1,0	<5,0	–
Inconel 751	>70,0	14,0–17	–	0,70–1,2	<0,5	<1,0	<0,10	<0,50	<0,010	0,9–1,5	2,0–2,6	–	–	5,0–9,0	–
Inconel 718	50,0–55,5	17,0–21	2,8–3,3	4,75–5,5	<0,3	<0,35	<0,15	<0,35	<0,015	0,2–0,8	0,65–1,15	<0,015	<0,8	ост	0,006

Литі виливки зі сплаву Inconel 718 мають крихку фазу Лавеса, яка знаходиться на границях зерен і знижує міцність. Зменшення активності утворення цієї фази у виливках забезпечується введенням додаткових сполук, наприклад Ti_2AlC , що сприяє утворенню у міждендратній зоні замість фаз Лавеса карбідів і нітридів титану [2].

Сплави класу Inconel мають високу твердість, жароміцність, жаростійкість, але разом із цим вважаються матеріалами, що важко піддаються різанню. Тому, наприклад, під час токарної обробки деталі зі сплаву Inconel 718 піддають додатковій обробці холодом та ультразвуком [3; 4].

Існуючі технології нанесення покриттів дозволяють наносити нікелеві сплави на сталі, що спрощує виготовлення деталей з основного сплаву, при цьому поверхня виробу набуває жаростійкості та високої твердості. Так, у праці [5] показана реалізація надшвидкого лазерного наплавлення сплаву Inconel 625 на сталь 27SiMn.

Комплексним вирішенням зменшення механічної обробки та інших складних і дорогих операцій технологічного процесу, поліпшення властивостей і структури сплаву, а також зменшення часу підготовки виробництва стало застосування адитивних технологій, а саме селективного лазерного плавлення.

Мета дослідження – вивчення можливості впровадження методу селективного лазерного плавлення для виробництва деталей з жароміцних нікелевих сплавів класу Inconel, аналіз механічних характеристик матеріалу, а також мікроструктури, що безпосередньо впливає на кінцеві властивості деталей.

Результати досліджень. Досліджувалися властивості зразків, вирізаних із деталі перемінного перерізу, формоутворення якої відбувалося методом селективного лазерного плавлення. Виріб також було термічно оброблено за режимом AMS5662. Зразки вирізали у вертикальному напрямку по висоті 3D-друку із зон, вказаних на рисунку 1.

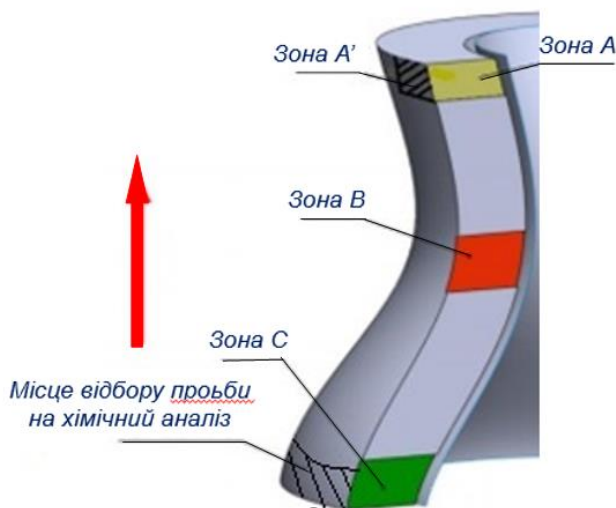


Рис. 1. Зовнішній вигляд виробу зі сплаву Inconel 718 з розміткою вирізки заготовок під зразки для випробувань

Для робочих температур до $1\ 000^{\circ}C$ застосовується сплав Inconel718, якому властиві жароміцність, жаростійкість і гарна оброблюваність. На процеси формоутворення адитивними методами деталей, що працюють в екстремальних умовах, зі сплаву Inconel 718 впливають

багато параметрів, дія яких на властивості матеріалу потребує досліджень [6].

Проводилися випробування механічних властивостей після виготовлення і наступної термічної обробки. Дані наведено в таблиці 2.

Механічні властивості сплаву Inconel 718

№ з/п	Сплав	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1	Необхідні властивості за AMS 5662	1 400 (± 100);	1 200 (± 100);	15 (± 3)
2	Фактично, після термічної обробки	1 418	1 212	16,5

Дослідження мікроструктури виконано на зразках (рис. 2), відібраних від деталі, згідно з рисунком 1. Додатково від зразків із

зони А вирізали частину металу для вивчення мікроструктури в іншій площині перетину шліфа – зона А'.

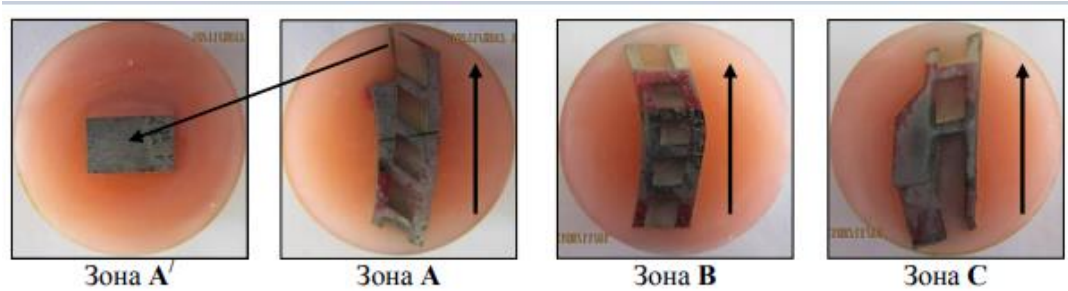


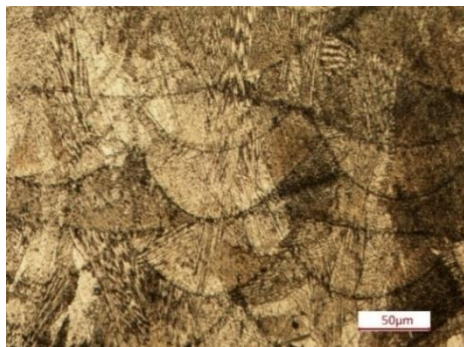
Рис. 2. Загальний вигляд шліфів зразків, відібраних із різних зон деталі

Мікроструктурні дослідження виконані за допомогою світлового мікроскопа за збільшення 100, 200 і 400 крат. Шліфи зразків зон А, В і С для аналізу їх мікроструктури і її фотографування орієнтувалися у вертикальному напрямку 3D-друку.

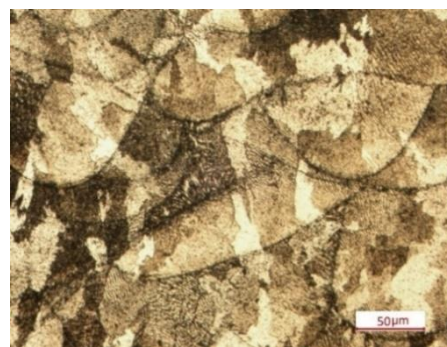
Дослідження показали, що видимої різниці в мікроструктурі зразків із зон А, В і С після однотипних обробок не спостерігається. Тому далі описана характерна мікроструктура сплаву Inconel 718 після 3D-друку та ТО без прив'язки до будь-якої конкретної зони деталі.

Об'ємний вигляд у мікроструктури в більшості випадків можна подати у вигляді параболоїда, форма якого залежить від взаємодії матеріалу, який плавиться, і лазерного променя під час 3D-друку.

Видимим результатом цієї взаємодії стала наявність у мікроструктурі характерного темного сліду – треку, що являє собою область сплаву металу вже існуючого шару і порошку нового шару, що проникає в нього розплавленого лазерним променем У площинах перерізу шліфів геометрія треків (рис. 3) – найчастіше параболі (рис. 3, а), рідше – протяжні хвилясті лінії (рис. 3, б).



а



б

Рис. 3. Мікроструктура перерізу шліфів

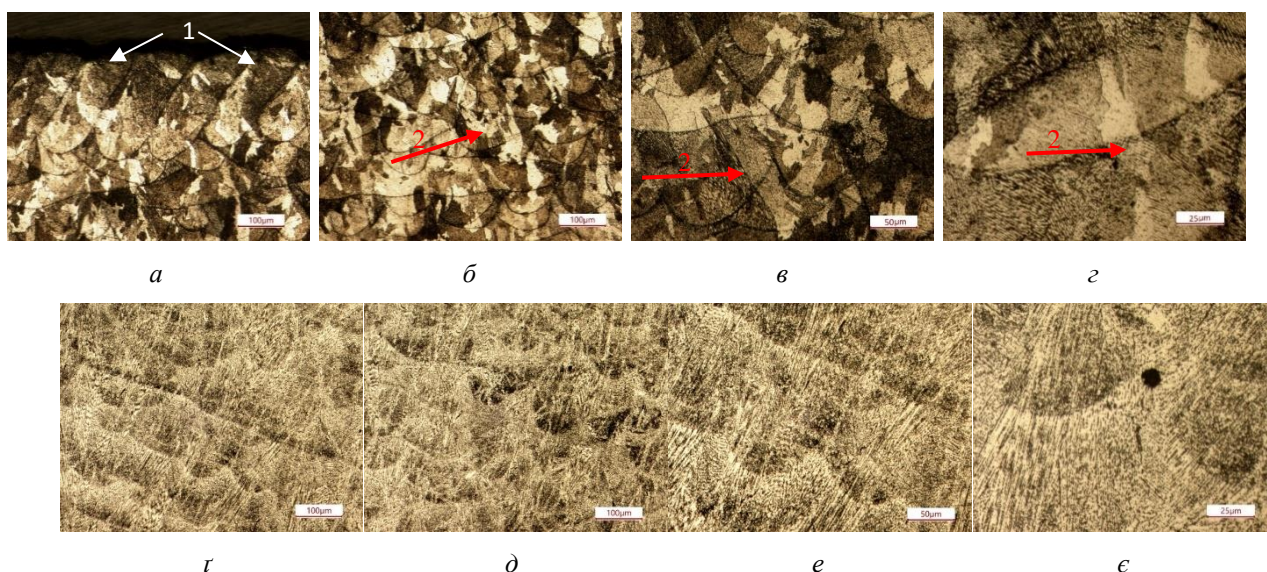


Рис. 4. Мікроструктура сплаву Inconel 718 після 3D друку і ТО:
а-г – після формоутворення, г-є – після термічної обробки

Важливою структурною складовою, що спостерігається в мікроструктурі сплаву після 3D-друку, є зерна (2) (рис. 4). Особливість будови зерен у тому, що їх переважна орієнтація в розглянутих площинах шліфів збігається з напрямком пошарового росту сплаву під час 3D-друку. Візуальна відповідність форми і розмірів зерен після 3D-друку і ТО говорить, що зерна утворюються безпосередньо в процесі формування виробу. Якщо ТО і вносить зміни в будову зерен, то ці зміни незначні.

Висновки

Адитивні технології, зокрема метод селективного лазерного плавлення, дозволяють виготовляти деталі складної конфігурації з жароміцних сплавів швидко, без необхідності додаткового обладнання, інструменту та складних операцій технологічного процесу, при цьому знижуються витрати матеріалу, оскільки коефіцієнт використання матеріалу значно вищий.

Дослідження механічних властивостей сплаву Inconel 718 показали, що після термічної обробки властивості відповідають вимогам стандарту AMS 5662.

Дослідження мікроструктури виявили її особливості, характерні для SLM методу: наявність видимих треків та особливої текстури – витягнуті зерна в напрямку вирощування деталі.

Отже, метод селективного лазерного плавлення ефективний для виробництва складних деталей з жароміцних сплавів. Отримані дані щодо механічних властивостей та мікроструктури сплаву Inconel 718 демонструють його придатність для роботи в екстремальних умовах. Дослідження вказують на потенціал адитивних технологій у поліпшенні технологічних процесів та властивостей сплавів для виробництва деталей з жароміцних сплавів. Проте для того, щоб дати конкретні рекомендації та визначити залежність впливу варіювання параметрів на кінцеві властивості виробу, потрібні подальші дослідження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ASTM B637. Standard Specification for Precipitation-Hardening Nickel Alloy Bars, Forgings, and Forging Stock for High-Temperature Service. *American Society for Testing and Materials*. West Conshohocken, PA 19428, Reprinted from the Annual Book of ASTM Standards. Copyright ASTM. 6 p.

2. Kong Y., Peng K., Huang H. Additive manufacturing of high-strength Inconel 718 alloy through the addition of Ti₂AlC MAX particles. *Journal of Materials Science & Technology*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.01.059>
3. Khanna N. et al. Sustainability analysis of new hybrid cooling/lubrication strategies during machining Ti₆Al₄V and Inconel 718 alloys. *Sustainable Materials and Technologies*. 2023. P. e00606. URL: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00606>
4. Pedroso A. F. V. et al. A Comprehensive Review on the Conventional and Non-Conventional Machining and Tool-Wear Mechanisms of INCONEL®. *Metals*. 2023. Vol. 13, no. 3. P. 585. URL: <https://doi.org/10.3390/met13030585>
5. Ding Y. et al. Elimination of elemental segregation by high-speed laser remelting for ultra-high-speed laser cladding Inconel 625 coatings. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.028>
6. Wang X., Gong X., Chou K. Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts. *Journal of Engineering Manufacture. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B*. 2016. Vol. 231, no. 11. Pp. 1890–1903. URL: <https://doi.org/10.1177/0954405415619883>

REFERENCES

1. ASTM B637. Standard Specification for Precipitation-Hardening Nickel Alloy Bars, Forgings and Forging Stock for High-Temperature Service. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA 19428, Reprinted from the Annual Book of ASTM Standards. Copyright ASTM. 6 p.
2. Kong Y., Peng K. and Huang H. Additive manufacturing of high-strength Inconel 718 alloy through the addition of Ti₂AlC MAX particles. *Journal of Materials Science & Technology*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.01.059>
3. Khanna N. et al. Sustainability analysis of new hybrid cooling/lubrication strategies during machining Ti₆Al₄V and Inconel 718 alloys. *Sustainable Materials and Technologies*. 2023, p. e00606. URL: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00606>
4. Pedroso A.F.V. et al. A Comprehensive Review on the Conventional and Non-Conventional Machining and Tool-Wear Mechanisms of INCONEL®. *Metals*. 2023, vol. 13, no. 3, p. 585. URL: <https://doi.org/10.3390/met13030585>
5. Ding Y. et al. Elimination of elemental segregation by high-speed laser remelting for ultra-high-speed laser cladding Inconel 625 coatings. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.028>
6. Wang X., Gong X. and Chou K. Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts. *Journal of Engineering Manufacture. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B*, 2016, vol. 231, no. 11, pp. 1890–1903. URL: <https://doi.org/10.1177/0954405415619883>

Надійшла до редакції: 16.05.2023.