УДК 669.24.018.45:621.762.8:004.923

doi: 10.32620/aktt.2020.3.03

М. О. КОВАЛЬ¹, О. С. ВОДЕННІКОВА²¹ АТ «Мотор Січ», Національний університет «Запорізька політехніка»,
Запоріжжя, Україна² Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА СТРУКТУРИ СПЛАВУ IN718, ОТРИМАНОГО МЕТОДОМ 3D-ПРИНТИНГУ

Предмет дослідження – процес структуроутворення та поліпшення механічних властивостей жароміцних сплавів, отриманих методом 3D-принтингу. Мета роботи – контроль рівня механічних властивостей жароміцних сплавів, отриманих методом 3D-принтингу, для виготовлення деталей авіаційних газотурбінних двигунів. Завдання роботи – експериментальне визначення механічних властивостей жароміцного нікелевого сплаву IN718, отриманого методом селективного лазерного спікання порошків LPW та Sino Euro як в горизонтальному напрямку XY, так і в вертикальному напрямку Z; проведення порівняльного аналізу механічних властивостей сплавів IN718 та ЭП718-ВД(ИД) (ХН45МВТЮБР) згідно норм ASM 5662M та ТУ 14-1-3905-85; проведення дослідження структури зразків сплаву IN718 до та після термообробки. Методи дослідження – при узагальненні та аналізі науково-технічної літератури з напрямку дослідження механічних властивостей та формування структури жароміцних нікелевих сплавів, отриманих методом селекційного лазерного спікання використовувався комплексний підхід; виконано обробку та аналіз експериментальних даних визначення механічних властивостей сплаву IN718 в трьохвимірному напрямку (горизонтальному напрямку XY та вертикальному напрямку Z); проведено металографічні дослідження зразків сплаву IN718, виготовлених методом 3D-принтингу, до та після термообробки. Отримані результати – порівнянням механічних властивостей жароміцного сплаву IN718, отриманого методом 3D-принтингу з порошків LPW та Sino Euro, з нормативними характеристиками ASM 5662M (для сплаву IN718) та ТУ 14-1-3905-85 (для сплаву ЭП718-ВД) встановлено, що для вертикальних зразків (вирощених в напрямку Z) характерне деяке зниження характеристик міцності та підвищення пластичних характеристик в порівнянні з значеннями горизонтальних зразків (вирощених в напрямку XY), при чому за показником ударної в'язкості сплав IN718 перевершує норми в дослідженому діапазоні температур в 3,75 разів. Наукова новизна – встановлена залежність характеристик структури та механічних властивостей сплаву IN718 від напрямку зростання деталі та показано, що після термообробки можливо отримати щільну, однорідну мікроструктуру, що характеризується дрібнозернистим будовою з наявністю макрозерен, які витягнуті в напрямку зростання зразка.

Ключові слова: адитивні технології; 3D-принтинг; селекційне лазерне спікання; жароміцні сплави; механічні властивості.

Вступ

На сьогоднішній день для потреб авіаційної та аерокосмічної промисловості при виробництві та ремонті лопаток двигунів [1], паливних баків [2], деталей камер згорання [3] та інших металевих конструкцій все більшого застосування набуває використання адитивних технологій.

Використання професійних (промислових) 3D-принтерів дозволяє виготовляти складні за конструкцією деталі, що володіють задовільною мікроструктурою та високим рівнем фізико-механічних властивостей [4].

Трьохвимірний друк металевих конструкцій за допомогою 3D-принтингу, в порівнянні з традиційними виробничими процесами, дає змогу скоротити кількість необхідних операцій для виготовлення

деталей, зменшити кількість відходів, покращити якість деталей та зменшити їх масу [5, 6]. Це в свою чергу призведе до значної економії часу та коштів [7].

Аналіз проблеми та постановка мети дослідження

На сьогоднішній день серед широко використовуваних авіаційних матеріалів, зокрема, жароміцних нікелевих сплавів для виготовлення лопаток та дисків газових турбін, слід виділити сплави типу ЭП718, ЭП648, ВЖ159 та інші [8].

Одним з способів отримання жароміцних сплавів є технологія селекційного лазерного спікання (СЛС) [9].

Данні роботи [10] показують, що селективне

лазерне спікання сплаву ЭП648 на установці Concept Laser дозволяє отримати щільні деталі з середньою об'ємною часткою пористості 0,07 % і високим комплексом механічних властивостей, що відповідає максимальним паспортним значенням для литого матеріалу.

Застосування технології відновлювального наплавлення робочих лопаток з жароміцних нікелевих сплавів (зокрема, наплавці ЭП648 ВИ на лопатку з ЖС32 ВИ) дозволяє скоротити втрати матеріалу при подальшій механічній обробці і тривалість її виконання та забезпечити високу якість наплавленого матеріалу (отримати наплавлені шари без макродефектів) [11].

В роботах [12, 13] проведені дослідження структури і механічних властивостей матеріалу заготовок, отриманих методом СЛС з металопорошкових композицій жароміцного нікелевого сплаву ВЖ159.

Дослідженнями механічних властивостей зразків зі сплаву ВХЛ4-ВИ, отриманого з використанням випалювальних моделей займалися в роботі [14].

Питанню фрактального сканування для селективного лазерного спікання нікелевого сплаву типу CM247LC присвячена робота [15].

Робота [16] присвячена дослідження опору втоми сплавів ВЖ159 та ЭП648.

Автори роботи [17] зосередили свою увагу на питанні застосування адитивних технологій для виробництва камери згоряння (матеріал камери – сплав Inconel 718) ракетного двигуна тягою 350 кг і тиском 1,4 МПа.

В роботі [18] показана можливість виготовлення складнопрофільних деталей (зокрема, турбінної лопатки) з заданою структурою зі сплаву Inconel 718 методом СЛС шляхом варіювання технологічних параметрів процесу.

Питанню дослідження структури та фазового складу сплаву Inconel 718, отриманого методом 3D-принтингу з подальшою термообробкою, присвячена робота [19].

Дослідженнями механічних властивостей та структуроутворення сплаву Inconel 718, виготовленого методом СЛС або аргоновим, або азотним газом із попередньо сплавленого порошку займалися в роботі [20].

Автори роботи [21] приділили увагу порівняльному аналізу механічних властивостей сплаву Inconel 718, отриманого методом СЛС, зі властивостями кованого та литого матеріалу.

Тому дослідження механічних властивостей жароміцних сплавів, зокрема сплаву IN718, що використовується для деталей газових турбін, приладів, силових деталей та іншого, є актуальним напрямом дослідження в авіаційно-космічній галузі.

Мета роботи – контроль рівня механічних властивостей жароміцних сплавів, отриманих методом 3D-принтингу, для виготовлення деталей авіаційних газотурбінних двигунів.

Методика проведення дослідження

Отримання жароміцного сплаву типу IN718 (Inconel) в умовах АТ «Мотор Січ» проводили методом селективного лазерного спікання на установці EOS M400 з наступною термообробкою. Для селективного лазерного спікання використовували порошок фірми LPW (Великобританія) та Sino Euro (Китай).

Хімічний склад жароміцного сплаву IN718 визначали методом хімічного аналізу.

Для визначення механічних властивостей виготовляли зразки як циліндричної ($\varnothing$ 14 мм), так і прямокутної (з перетином квадрату 16 мм) форми.

Механічні властивості сплаву IN718 визначали:

1. В горизонтальному напрямку ХУ:

– №1-5 – циліндричні зразки після випробувань на розтягування;

– №1-3 – прямокутні зразки після випробувань на ударну в'язкість;

– №6 – циліндричний зразок після випробувань на тривалу міцність;

2. В вертикальному напрямку Z:

– №1-5 – циліндричні зразки після випробувань на розтягування;

– №1-3 – прямокутні зразки після випробувань на ударну в'язкість;

– №6 – циліндричний зразок після випробувань на тривалу міцність.

Тривалу міцність зразків визначали на установці Instron M3 при температурі 800 °С та постійно прикладеному навантаженні 206 МПа (21 кгс/мм²). При випробуваннях на тривалу міцність зразки доводили до руйнування.

Межу міцності при розтягуванні (σ_B), межу плинності умовну ($\sigma_{0,2}$), відносне подовження після розриву (δ) та відносне звуження (Ψ) зразків іспитували на розривній машині ZDMY30. Межу міцності при розтягуванні (σ_B), межу плинності умовну ($\sigma_{0,2}$), відносне подовження після розриву (δ) та відносне звуження (Ψ) зразків іспитували на розривній машині ZDMY30.

Ударну в'язкість (KCU) визначали на ударних зразках з концентратором виду U, випробуваних на маятниковому копрі Instron SI-1 M.

Твердість визначали по Брінеллю згідно ДСТУ EN ISO 6506-1:2019.

Механічні властивості сплаву IN718 визначали при кімнатній температурі (20 °С), а жароміцні –

при температурі 650 °C та навантаженні 70 кгс/мм².

Дослідження макроструктури проводили на не травлених шліфах на мікроскопі «Axio Observer. Dlm».

Результати дослідження

Дослідження хімічного складу сплаву IN718, отриманого з порошків LPW та Sino Euro (табл. 1), показали на відповідність складу нормам ASM 5662M для сплаву IN718 та нормам ТУ 14-1-3905-85 для аналогічного Ni-Fe-Cr деформованого сплаву ЭП718-ВД(ИД) (ХН45МВТЮБР). Виключення складає лише 5,62 %-й вміст ніобію в сплаві IN718 (Sino Euro) при нормі 4,75÷5,5% згідно ASM 5662M.

Аналіз механічних властивостей сплаву IN718, отриманого з порошку Sino Euro, показав, що для вертикальних зразків (вирощених в напрямку Z) характерне деяке зниження характеристик міцності (σ_b , $\sigma_{0,2}$ – в межах норм ASM 5662M) та підвищення пластичних (δ , Ψ та KCU) в порівнянні з значеннями горизонтальних зразків (вирощених в напрямку

XY). Особливе слід відмітити перевищення в 3,75 разів показника ударної в'язкості сплаву IN718 (Sino Euro), вирощеного в напрямку Z, в порівнянні з норми ТУ 14-1-3905-85 для сплаву ЭП718-ВД (рис. 1 та рис. 2).

Механічні властивості сплаву IN718, отриманого з порошку LPW як в горизонтальному напрямку XY (рис. 1), так і в вертикальному напрямку Z (рис. 2), також відповідає нормам ASM 5662M.

Данні табл. 2 показують, що жароміцні властивості циліндричних термооброблених зразків зі сплаву IN718 (вирощених як в горизонтальному напрямку XY, так і в вертикальному напрямку Z) відповідають нормам AMS 5662M: час до руйнування в 3,1 разів для IN718 (LPW) та 8,3 разів для IN718 (Sino Euro) перевищує умови AMS 5662M. При цьому слід відмітити, що значення тривалої міцності горизонтальних зразків (вирощених в напрямку XY) в 1,9 разів для сплаву IN718 (LPW) та в 1,4 разів сплаву IN718 (Sino Euro) нижче ніж вертикальних (вирощених в напрямку Z).

Таблиця 1

Хімічний склад сплавів IN718 та ЭП718

Марка сплаву	Вміст елементів, %												
	C	Cr	Ni	Al	Ti	Mo	Nb	Mn	Si	B	S	P	W
IN718 (LPW)	0,07	18,7	52,5	0,61	0,90	2,91	5,33	<0,1	<0,1	<0,006	<0,006	-	
IN718 (Sino Euro)	0,06	18,5	51,5	0,62	0,91	2,8	5,62	<0,1	<0,1	<0,006	0,002	-	
Норми AMS 5662M для сплаву IN718	≤0,08	17,0- 21,0	50,0- 55,0	0,2- 0,8	0,65- 1,15	2,8- 3,3	4,75 -5,5	≤0,35	≤0,35	≤0,006	≤0,015	-	
Норми ТУ 14-1-3905-85 для сплаву ЭП718-ВД	≤0,10	14,0- 16,0	43,0- 47,0	0,9- 1,4	1,9- 2,4	4,0- 5,2	0,8- 1,5	≤0,60	≤0,30	≤0,008	≤0,010	0,8- 1,5	

Таблиця 2

Жароміцні властивості зразків зі сплаву IN718, вирощених в напрямку XY та Z

	Температура випробувань, °C	Прикладене навантаження, кгс/мм ²	Час до руйнування, год.			
			порошок LWP		порошок Sino Euro	
			горизонтальний напрямок XY	вертикальний напрямок Z	горизонтальний напрямок XY	вертикальний напрямок Z
Експериментальні данні	650	70	49,3	94,4	158,3	224
Норми AMS 5662M для сплаву IN718	650	70	≥ 23			
Норми ТУ 14-1-3905-85 для сплаву ЭП718-ВД	650	70	≥ 60

Рис. 1. Механічні властивості порошків LPW, Sino Euro та норми ASM 5662M в напрямку XY

Рис. 2. Механічні властивості порошків LPW, Sino Euro та норми ASM 5662M, ТУ 14-1-3905-85 в напрямку Z

Мікроструктура зразків, виготовлених методом 3D-принтингу, до проведення термообробки складалася з дендритів, які представляють собою Ni-Fe-Cr γ -твердий розчин з наявністю карбідів та карбідонітрідів, що характерна для сплаву IN718.

Металографічними дослідженнями встановлено, що матеріал, який поступив на дослідження до проведення пресування (як горизонтальному, так і вертикальному напрямку) характеризується наявністю мікропористості з розміром пор до 15 мкм. Крім того в зразках спостерігаються оксидні та карбонітридні включення розміром до 15 мкм – в горизонтальних зразках та до 30 мкм – в вертикальних зразках.

Мікроструктура зразків зі сплаву IN718 після термообробки (вздовж ударного зразку) щільна, однорідна та характеризується дрібнозернистим будовою з наявністю макрозерен, що витягнуті в напрямку зростання зразка (рис. 3).

Металографічними дослідженнями встановлено наявність незначної мікропористості (як в горизонтальному напрямку XY, так і в вертикальному напрямку Z) з розміром пор до 15 мкм (рис. 4).

Висновки

1. Порівнянням механічних властивостей жа-

ромічного сплаву IN718, отриманого методом 3D-принтингу з порошків LPW та Sino Euro, з нормативними характеристиками ASM 5662M (для сплаву IN718) та ТУ 14-1-3905-85 (для сплаву ЕП718-ВД(ИД)) встановлено, що для вертикальних зразків (вирощених в напрямку Z) характерне деяке зниження характеристик міцності (σ_b , $\sigma_{0,2}$ – в межах норм ASM 5662M) та підвищення пластичних (δ , Ψ , KCU) в порівнянні з значеннями горизонтальних зразків (вирощених в напрямку XY), при чому за показником ударної в'язкості сплав IN718 перевершує норми в дослідженому діапазоні температур в 3,75 разів.

2. Дослідження жароміцних властивостей термооброблених зразків зі сплаву IN718 (вирощених як в горизонтальному напрямку XY так і в вертикальному напрямку Z) відповідають нормам AMS 5662M: час до руйнування в 3,1 разів для IN718 (LPW) та 8,3 разів для IN718 (Sino Euro) перевищує умови AMS 5662M.

3. Показано, що мікроструктура зразків зі сплаву IN718, виготовлених методом 3D-принтингу, після термообробки (вздовж ударного зразку) щільна, однорідна та характеризується дрібнозернистим будовою з наявністю макрозерен, що витягнуті в напрямку зростання зразка.

Рис. 3. Мікроструктура термооброблених зразків сплаву IN718 (Sino Euro), отриманого методом 3D-принтингу: а – при $\times 100$; б – при $\times 200$; в – при $\times 500$; г – при $\times 1000$

Рис. 4. Пористість термооброблених зразків сплаву IN718 (Sino Euro), отриманого методом 3D-принтингу: а – при $\times 100$; б – при $\times 200$; в – при $\times 500$; г – при $\times 1000$

Література

1. Combined laser manufacturing for complex turbine blades [Текст] / B. Graf, S. Gook, A. Gumenyuk, M. Rethmeier // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 3(20). – С. 34-42.
2. Вехов, А. С. Применение аддитивных технологий в современном производстве [Текст] / А. С. Вехов, С. А. Титаренко // Решетневские чтения. – 2018. – Т. 1, № 22. – С. 90-92.
3. Балякин, А. В. Применение аддитивных технологий для создания деталей камеры сгорания [Текст] / А. В. Балякин, В. Г. Смелов, Л. А. Чемпинский // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва. – 2012. – № 3-2(34). – С. 47-52.
4. Шегидевич, А. Роль аддитивных технологий в авиации [Текст] / А. Шегидевич, А. Жукова, А. Заико // Наука и инновации. – 2019. – № 9 (199). – С. 29-34.
5. Bingheng, Lu. Development Trends in Additive Manufacturing and 3D Printing [Text] / Lu Bingheng, Li Dichen, Tian Xiaoyong // Engineering. – 2015. – no.1 (1). – P. 85-89. DOI: 10.15302/J-ENG-2015012.
6. 3D printing in aerospace and defense market - growth, trends, and forecast (2019-2024) [Digital source]: Industrial report / Mordor Intelligence. – Available at: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/3d-printing-in-aerospace-and-defense-market>. – 18.04.2020.
7. Леоненков, А. Д. Перспективы применения аддитивных технологий в аэрокосмической отрасли [Текст] / А. Д. Леоненков, В. В. Двирный // Решетневские чтения. – 2017. – № 21-2. – С. 632-633.
8. Логунов, А. В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин [Текст] / А. В. Логунов. – Рыбинск : ООО Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2017. – 854 с.
9. Применение технологий селективного лазерного спекания и объемной лазерной наплавки для создания и восстановления деталей, используемых в машиностроении [Текст] / А. С. Орыщенко, П. А. Кузнецов, В. В. Бобырь и др. // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнародний збірник наукових праць. – 2013. – Вип. 46. – С. 238-244.
10. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков [Текст] / А. Г. Евгенов, А. М. Рогалев, С. В. Неруш, И. С. Мазалов // Труды ВИАМ. – 2015. – № 2. – С. 2-12.
11. Лазерная порошковая восстановительная наплавка лопаток газотурбинного двигателя [Текст] / Р. С. Корсмик, Г. А. Туричин, О. Г. Климова-Корсмик и др. // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2016. – Т. 15, № 3. – С. 15-20.
12. Прагер, С. М. Исследование механических свойств и структуры образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления (СЛС) из сплава ВЖ159 [Текст] / С. М. Прагер, Т. В. Солодо-

ва, О. Ю. Татаренко // *Жаропрочные сплавы и стали. Труды ВИАМ.* – 2017. – № 11(59). – С. 3-11.

13. Мазалов, И. С. Перспективы применения жаропрочного структурно-стабильного сплава ВЖ159 для аддитивного производства высокотемпературных деталей ГТД [Текст] / И. С. Мазалов, А. Г. Евгенов, С. М. Прагер // *Авиационные материалы и технологии.* – 2016. – № S1 (43). – С. 3-7.

14. Получение выжигаемых моделей методом 3D-принтинга для отливок газотурбинных двигателей [Текст] / Н. А. Лысенко, А. А. Педаш, В. В. Ключихин, В. В. Наумик // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2019. – № 7 (159). – С. 128-133. DOI: 10.32620/aktt.2019.7.18.

15. Fractal scan strategies for selective laser melting of 'unweldable' nickel superalloys [Text] / S. Catchpole-Smitha, N. Aboulkhaira N., L. Parrya. et al. // *Additive Manufacturing.* – 2017. – vol. 15. – P. 113 – 122. DOI: 10.1016/j.addma.2017.02.002.

16. Горбовец, М. А. Сопротивление усталости жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом СЛС [Текст] / М. А. Горбовец, М. С. Беляев, П. В. Рыжков // *Авиационные материалы и технологии.* – 2018. – № 3 (52). – С. 50-55.

17. Применение аддитивных технологий для производства камер сгорания реактивных двигателей [Текст] / М. В. Андриевский, М. А. Митилов, С. В. Аджамский, Д. А. Шамровский // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2017. – № 6 (141). – С. 17-22.

18. Борисов, В. Е. Формирование заданной структуры турбинной лопатки из жаропрочного никелевого сплава методом селективного лазерного плавления [Текст] : дис. .. канд. техн. наук : 05.16.01 / Борисов В. Е. ; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». – Санкт-Петербург. – 2017. – 152 с.

19. Structure, Texture and Phases in 3D Printed IN718 Alloy Subjected to Homogenization and HIP Treatments [Text] / A. Mostafa, I. P. Rubio, V. Brailovski et al. // *Metals.* – 2017. – Vol. 7. – 196 p. DOI: 10.3390/MET7060196.

20. Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting [Text] / K. N. Amato, S. M. Gaytan, L. E. Murr et al. // *Acta Materialia.* – 2012. – Vol. 60 (5). – P. 2229-2239. DOI: 10.1016/j.actamat.2011.12.032.

21. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting [Text] / T. Trosch, J. Strobner, R. Volk, U. Glatzel // *Materials Letters.* – 2016. – Vol. 164. – P. 428-431. DOI: 10.1016/j.matlet.2015.10.136.

References

1. Graf, B., Gook, S., Gumenyuk, A., Rethmeier, M. Combined laser manufacturing for complex turbine

blades. *Global'naja jadernaja bezopasnost'*, 2016, no. 3(20), pp. 34-42.

2. Vekhov, A. S., Titarenko, S. A. Primenenie additivnykh tekhnologii v sovremennom proizvodstve [The use of additive technologies in modern production]. *Reshetnevskie chteniya*, 2018, vol. 1, no. 22, pp. 90-92.

3. Balyakin, A. V., Smelov, V. G., Chempinskii, L. A. Primenenie additivnykh tekhnologii dlya sozdaniya detalei kamery sgoraniya [The use of additive technologies to create combustion chamber parts]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S. P. Koroleva*, 2012, no. 3-2(34), pp. 47-52.

4. Shegidevich, A., Zhukova, A., Zaiko, A. Rol' additivnykh tekhnologii v aviatsii [Role of additive technologies in aviation]. *Nauka i innovatsii*, 2019, no. 9 (199), pp. 29-34.

5. Bingheng, Lu., Dichen, Li, Xiaoyong, Tian. Development Trends in Additive Manufacturing and 3D Printing. *Engineering*, 2015, no. 1 (1), pp. 85-89. DOI: 10.15302/J-ENG-2015012.

6. 3D printing in aerospace and defense market - growth, trends, and forecast (2019-2024). Industrial report. Available at: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/3d-printing-in-aerospace-and-defense-market> (accessed 18.04.2020).

7. Leonenkov, A. D., Dvirnyi, V. V. Perspektivy primeneniya additivnykh tekhnologii v aerokosmicheskoi otrasli [Prospects for the use of additive technologies in the aerospace industry]. *Reshetnevskie chteniya*, 2017, no. 21-2, pp. 632-633.

8. Logunov, A. V. Zharoprochnye nikelevye splavy dlya lopatok i diskov gazovykh turbin [Heat-resistant nickel alloys for blades and disks of gas turbines]. Rybinsk, OOO Izdatel'skii dom «Gazoturbinnnye tekhnologii» Publ., 2017, 854 p.

9. Oryshchenko, A. S., Kuznetsov, P. A., Bobyr', V. V., Savin, V. I., Tereshchenko, A. V. Primenenie tekhnologii selektivnogo lazernogo spekaniya i ob'emnoi lazernoi naplavki dlya sozdaniya i vosstanovleniya detalei, ispol'zuemykh v mashinostroenii [The use of selective laser sintering technology and bulk laser cladding to create and recovery parts used in mechanical engineering]. *Progresivni tekhnologii i sistemi mashinobuduvannya : mizhnarodnii zbirnik naukovich prats'*, 2013, vol. 46, pp. 238-244.

10. Evgenov, A. G., Rogalev, A. M., Nerush, I. S. Mazalov, S. V. Issledovanie svojstv splava JeP648, poluchennogo metodom selektivnogo lazernogo splavleniya metallicheskih poroshkov [Investigation of properties of ЭП648 alloy obtained by selective laser smelting metal powders]. *Trudy VIAM*, 2015, no. 2, pp. 2-12.

11. Korsmik, R. S., Turichin, G. A., Klimova-Korsmik, O. G., Zemlyakov, E. V., Babkin, K. D. Lazernaya poroshkovaya vosstanovitel'naya naplavka lopatok gazoturbinnogo dvigatelya [Laser powder re-constructed surfacing of gas turbine engine blades].

Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie, 2016, vol. 15, no. 3, pp. 15-20.

12. Prager, S. M., Solodova, T. V., Tatarenko, O. Yu. Issledovanie mekhanicheskikh svoystv i struktury obraztsov, poluchennykh metodom selektivnogo lazernogo splavleniya (SLS) iz splava VZh159 [Investigation of the mechanical properties and structure of samples obtained by selective laser smelting (SLS) from BZh159 alloy]. *Zharoprochnye splavy i stali. Trudy VIAM*, 2017, no. 11(59), pp. 3-11.

13. Mazalov, I. S., Evgenov, A. G., Prager, S. M. Perspektivy primeneniya zharoprochnogo strukturno-stabil'nogo splava VZh159 dlya additivnogo proizvodstva vysokotemperaturnykh detalei GTD [Prospects for the use of heat-resistant structurally stable alloy BZh159 for additive production of high-temperature parts of gas turbine engines]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2016, no. S1 (43), pp. 3-7.

14. Lysenko, N. A., Pedash, A. A., Klyuchikhin, V. V., Naumik, V. V. Poluchenie vyzhigaemykh modelei metodom 3D-printinga dlya otlivok gazoturbinnnykh dvigatelei [Obtaining burnable models by 3D printing for castings of gas turbine engines]. *Aviacijno-kosmichna tekhnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2019, no. 7 (159), pp. 128-133. DOI: 10.32620/aktt.2019.7.18.

15. Catchpole-Smitha, S., Aboulkhaira, N., Parrya, L., Tuck, C., Ashcroft, I. A., Clare, A. Fractal scan strategies for selective laser melting of 'unweldable' nickel superalloys. *Additive Manufacturing*, 2017, vol. 15, pp. 113-122. DOI: 10.1016/j.addma.2017.02.002.

16. Gorbovets, M. A., Belyaev, M. S., Ryzhkov, P. V. Soprotivlenie ustalosti zharoprochnykh nikelovykh splavov, poluchennykh metodom SLS [Fatigue resistance of heat-resistant nickel alloys obtained by the

SLS method]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 50-55.

17. Andrievskii, M. V., Mitikov, M. A., Adzhamskii, S. V., Shamrovskii, D. A. Primenenie additivnykh tekhnologii dlya proizvodstva kamer sgoraniya reaktivnykh dvigatelei [The use of additive technologies for the production of combustion chambers of jet engines]. *Aviacijno-kosmichna tekhnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2017, no. 6 (141), pp. 17-22.

18. Borisov, V. E. *Formirovanie zadannoi struktury turbinnoi lopatki iz zharoprochnogo nikelovogo splava metodom selektivnogo lazernogo plavleniya* [Formation of a given structure of a turbine blade from heat-resistant nickel alloy by selective laser smelting]: dis. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. Nauk. Sankt-Peterburg, Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo», 2017. 152 p.

19. Mostafa, A., Rubio, I. P., Brailovski, V., Jahazi, M., Medraj, M. Structure, Texture and Phases in 3D Printed IN718 Alloy Subjected to Ho-mogenization and HIP Treatments. *Metals*, 2017, vol. 7. 196 p. DOI: 10.3390/MET7060196.

20. 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 Materialia*, 2012, vol. 60 (5), pp. 2229-2239. DOI: 10.1016/j.ACTAMAT.2011.12.032.

21. Trosch, T., Strobner, J., Volkl, R., Glatzel, U. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting. *Materials Letters*, 2016, vol. 164, pp. 428-431. DOI: 10.1016/j.matlet.2015.10.136.

Надійшла до редакції 4.05.2020, розглянута на редколегії 15.06.2020

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ СПЛАВА IN718, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ 3D-ПРИНТИНГА

Н. О. Коваль, О. С. Воденникова

Предмет исследования – процесс структурообразования и улучшения механических свойств жаропрочных сплавов, полученных методом 3D-принтинга. Цель работы – контроль уровня механических свойств жаропрочных сплавов, полученных методом 3D-принтинга, для изготовления деталей авиационных газотурбинных двигателей. Задачи работы – экспериментальное определение механических свойств жаропрочного никелевого сплава IN718, полученного методом селективного лазерного спекания порошков LPW и Sino Euro как в горизонтальном направлении XY, так и в вертикальном направлении Z; проведение сравнительного анализа механических свойств сплавов IN718 и ЭП718-ВД(ИД) (ХН45МВТЮБР) согласно норм ASM 5662M и ТУ 14-1-3905-85; проведение исследования структуры образцов сплава IN718 до и после термообработки. Методы исследования – при обобщении и анализе научно-технической литературы по направлению исследования механических свойств и формирования структуры жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом селекционного лазерного спекания, использовался комплексный подход; выполнена обработка и анализ экспериментальных данных определения механических свойств сплава IN718 в трёхмерном направлении (горизонтальном направлении XY и вертикальном направлении Z); проведены металлографические исследования образцов сплава IN718, изготовленных методом 3D-принтинга, до и после термообработки. Полученные результаты – сравнением механических свойств жаропрочного сплава IN718,

полученного методом 3D-принтинга из порошков LPW и Sino Euro, с нормативными характеристиками ASM 5662M (для сплава IN718) и ТУ 14-1-3905-85 (для сплава ЭП718-ВД) установлено, что для вертикальных образцов (выращенных в направлении Z) характерно некоторое снижение характеристик прочности и повышения пластических характеристик по сравнению с значениями горизонтальных образцов (выращенных в направлении XY), при чем по показателю ударной вязкости сплав IN718 превосходит нормы в исследованном диапазоне температур в 3,75 раз. Научная новизна – установлена зависимость характеристик структуры и механических свойств сплава IN718 от направления роста детали и показано, что после термообработки возможно получить плотную, однородную микроструктуру, характеризующуюся мелкозернистым строением с наличием макрозёрен, которые вытянуты в направлении роста образца.

Ключевые слова: аддитивные технологии; 3D-принтинг; селекционное лазерное спекание; жаропрочные сплавы; механические свойства.

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF IN718 ALLOY PRODUCED BY 3D-PRINTING

N. O. Koval, O. S. Vodennikova

The subject of research – the process of structure formation and improvement of mechanical properties of high-resistant alloys obtained by 3D-printing. The purpose of work – control the level of mechanical properties of high-resistant alloys obtained by 3D-printing for the manufacture of parts of aircraft gas turbine engines. Objectives – experimental determination of mechanical properties of heat-resistant nickel alloy IN718 obtained by selective laser sintering of LPW and Sino Euro powders both in the horizontal XY and in the vertical Z direction; a comparative analysis of the mechanical properties of IN718 and ЭП718-ВД(ИД) (XH45MBTЮБР) alloys according to ASM 5662M and TU 14-1-3905-85; a study of the structure of samples of IN718 alloy before and after heat treatment. Research methods – when summarizing and analyzing scientific and technical literature in the direction of studying mechanical properties and forming the structure of heat-resistant nickel alloys obtained by the method of selective laser sintering, an integrated approach was used; processing and analysis of experimental data on determining the mechanical properties of the IN718 alloy in the three-dimensional direction (horizontal direction XY and vertical direction Z); metallographic studies of samples of the IN718 alloy made by 3D-printing were carried out before and after heat treatment. The results obtained - by comparing the mechanical properties of the heat-resistant alloy IN718 obtained by 3D printing from powders LPW and Sino Euro with the normative characteristics ASM 5662M (for alloy IN718) and TU 14-1-3905-85 (for alloy ЭП718-ВД) it was found that for vertical samples (grown in the Z direction) a certain decrease in the strength characteristics and an increase in plastic characteristics compared with the values of horizontal samples (grown in the XY direction), and in terms of impact strength, the IN718 alloy exceeds the norm in the researched temperature range 3.75 times. Scientific novelty – the dependence of the structural characteristics and mechanical properties of the IN718 alloy on the direction of part growth has been established and it has been shown that after heat treatment it is possible to obtain a dense, uniform microstructure characterized by a fine-grained structure with micro grains that are elongated in the direction of sample growth.

Keywords: additive technologies; 3D-printing; selection laser sintering; heat-resistant alloys; mechanical properties.

Коваль Никита Олегович – инженер-конструктор ОА «Мотор Сич»; аспирант Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина.

Воденникова Оксана Сергеевна – канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии, Запорожский национальный университет, Запорожье, Украина.

Koval Mykyta Olegovich – design engineer, Motor Sich JSC; graduate student, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine,
e-mail: im.billyblock@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-1152-4654.

Vodennikova Oksana Sergeevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Metallurgy, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine,
e-mail: oksana_vodennikova@ukr.net, ORCID Author ID: 0000-0003-0496-5435,
https://scholar.google.com.ua/citations?user=6NOB_vQAAAAJ&hl=ru.