

УДК 621.791.927.55

doi: 10.32620/aktt.2021.5.06

М. О. ГНАТЕНКО, С. Л. ЧИГІЛЕЙЧИК, С. С. САХНО

АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна

ВИГОТОВЛЕННЯ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ З ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ МЕТОДОМ АДИТИВНОГО ПЛАЗМОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

Виконано отримання авіаційної деталі кільцевого типу з жароміцного конструкційного сплаву EI 868 (ХН60ВТ) методом адитивного багатощарового плазмового наплавлення проволокою. Традиційною технологією отримання даного типу кільцевих заготовок є штампування прутків, котрі далі доводяться до кінцевої форми деталі шляхом подальшої механічної обробки. Недоліком традиційної технології є значні витрати металу, який в процесі механічної обробки пресованого прутка, фактично перетворюється в стружку і не використовується повторно, що призводить до підвищення вартості готового виробу. Застосування адитивних технологій дозволить значно скоротити витрати матеріалу при отриманні кільцевих заготовок за рахунок виготовлення заготовки з конфігурацією максимально наближеною до геометрії деталі. Адитивне наплавлення проводилось на роботизованому комплексі, який складається з плазмового джерела живлення SBI PMI-350 AC/DC TL та робота FANUC M-710iC на жорстко закріплену підкладку зі сталі 20. Для визначення можливості отримання авіаційних деталей методом пошарового плазмового наплавлення було проведено дослідження наплавленого матеріалу. Проведено дослідження структури вирошеної деталі, встановлено, що мікроструктура відповідає нормальному стану сплаву EI868 (ХН60ВТ) в мікроструктурі лінії сплавлення не є видимими, структура є однорідною з взаємним проростанням зерен між шарами. В ході визначення технологічних властивостей деталі, було встановлено, що значення механічних властивостей сплаву деталі отриманої методом адитивного вирошування знаходяться на рівні литих заготовок та поковок і при $T=900^{\circ}\text{C}$ становлять: $\sigma_s=35\pm 5 \text{ кгс/мм}^2$, $\sigma_{0.2}=49\pm 5 \text{ кгс/мм}^2$, $\psi=62\pm 5 \%$. Після механічної обробки вирошеної заготовки проведено капілярний метод контролю та радіаційний контроль вирошеної деталі – тріщин та інших видів критичних металургійних дефектів не виявлено. Практична значущість впровадження даного методу полягає у значному скороченні витрат матеріалу при отриманні деталі, та забезпеченні економічної ефективності яка складає близько 159 тисяч гривень.

Ключові слова: плазмове наплавлення; жароміцні сплави; EI 868(ХН60ВТ); адитивні технології.

Вступ

Технології Wire + Arc Additive Manufacturing (WAAM) або адитивного наплавлення проволоками дозволяють отримувати готові вироби, з мінімальними припусками на механічну обробку у найкоротші строки шляхом пошарового нанесення матеріалу до досягнення остаточної форми [1].

Застосування WAAM у якості заміни чи при комбінуванні з традиційними технологіями дозволяє зменшити вартість та трудоемкість виробів. Найбільш розповсюдженими матеріалами для процесу WAAM є алюмінієві сплави та сталі. Оптиміальними методами WAAM для наплавлення алюмінієвих сплавів є електро-дугове, СМТ та плазмове наплавлення [2]. Також були проведені дослідження впливу захисних газів на процеси наплавлення [3].

Однак залишились не вирішеними задачі з впровадженням у виробництво методом WAAM відповідальних деталей з жароміцних нікелевих сплавів, що знаходяться у таких вузлах двигунів як турбіни та камери згорання.

Метою даної роботи є виготовлення авіаційної деталі з жароміцного конструкційного сплаву.

1. Постановка задачі

При отриманні багато габаритних кільцевих деталей які виготовляються методами штампування прутків та подальшої механічної обробки пресованих заготовок існують проблеми пов'язані з великими витратами матеріалу, оскільки біля 70 % матеріалу може уходити у стружку.

Дані деталі виготовляються з жароміцних сплавів на основі нікелю які мають високу вартість, тому збільшення коефіцієнту використання матеріалу є ключовою при зниженні вартості готового виробу.

Одним з методів вирішення даних задач є отримання заготовок значно меншої маси з конфігурацією максимально наближеною до конфігурації деталі.

Застосування WAAM може дозволити оптимізувати виробництво авіаційних деталей, збільшити економічний ефект за рахунок збільшення показників коефіцієнту витрат матеріалу та призвести до зменшення трудоемкості.

Для отримання відповідальної авіаційної деталі з жароміцного сплаву EI 868 (ХН60ВТ) необхідно вирішити наступні задачі: отримати зразки матеріалів з забезпеченням механічних властивостей на рівні литих заготовок. Отримати авіаційні деталі з забезпеченням їх геометрії і технологічних властивостей.

1. Дослідження наплавленого матеріалу

Для оцінки властивостей матеріалу деталі були отримані зразки пластин розміром 140x70x15 мм виготовлені методом плазмового наплавлення проволосою зі сплаву ВЖ98 (EI 868). Зовнішній вигляд зразків представлено на рис. 1.



Рис. 1. Зразки вирошенні методом плазмового наплавлення: а – після наплавлення, б – відрізані для подальшої обробки.

Встановлено, що зразки мають грубу поверхню з виступами на боковій поверхні до 2,5 мм. Макроструктурний аналіз проводився на шліфах, виготовлених з вирошених зразків як в подовжньому так і поперечному напрямку після травлення в реактиві ФРІ.

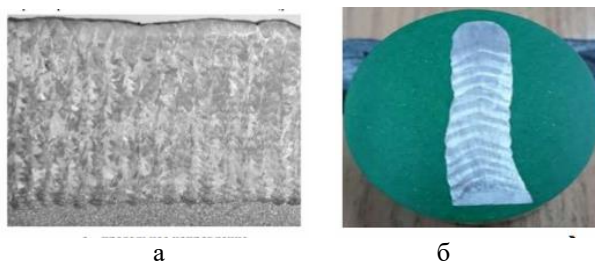


Рис. 2. Макроструктура зразків: а – продовжний напрямок, б – поперечний напрямок

Макроструктура зразків до і після термообробки шарувата, характерна для багатошарового наплавлення з чітким розподілом шарів.

Для забезпечення найбільш оптимального поєднання кількості і морфології зміцнюючих фаз сплаву і найбільш сприятливого поєднання характеристик пластичності і жароміцності була проведена термічна обробка гарт при $T=1200^{\circ}\text{C}$. Структура після термічної обробки при збільшеннях від $\times 50$ до $\times 500$ представлена на рисунку 3.

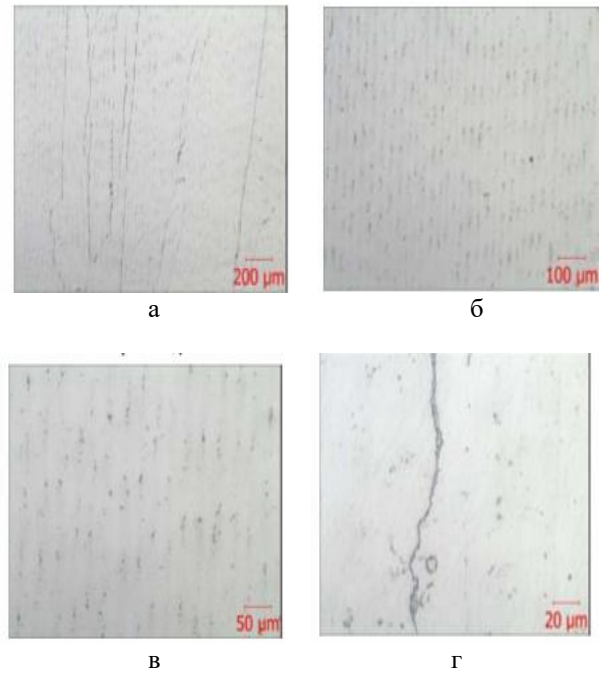


Рис. 3. Мікроструктура зразків: а – збільшення $\times 50$, б – збільшення $\times 100$, в – збільшення $\times 200$, г – збільшення $\times 500$

В ході аналізу мікроструктури зразків після термообробки встановлено наявність дендритної будови з витягнутими зернами в напрямку відводу тепла (рис. 3), є γ -твердий розчин з наявністю нітридів, карбонітридів і карбідів. Присутнє розташування дендритів в напрямку відведення тепла в процесі вирощування (поперек шарів). В мікроструктурі лінії сплавляння не є видимими, структура є однорідною з взаємним проростанням зерен між шарами. Мікроструктура відповідає нормальному термообробленому стану сплаву EI868 (ХН60ВТ), перегріву не виявлено.

Для визначення технологічних властивостей наплавленого матеріалу, були проведені механічні випробування. Механічні властивості сплаву EI 868 (ХН60ВТ) отриманого методом адитивного вирощування плазмовим наплавленням дротом визначали на стандартних циліндричних зразках за «ГОСТ 1497-84 Метали. Методи випробувань на розтяг», «ГОСТ 9651-84 Метали. Методи випробувань на розтягнення при підвищених температурах», «ГОСТ 10145-81 Метали. Методи випробування на тривалу міцність».

Зразки для механічних випробувань вирізали в подовжньому і поперечному напрямку щодо шарів вирощування (рис. 4) після термічної обробки.

Оскільки робоча температура деталі складає 850°C , механічні випробування проводили при температурі 900°C . Результати механічних випробувань вирошених зразків представлені в таблиці 1.

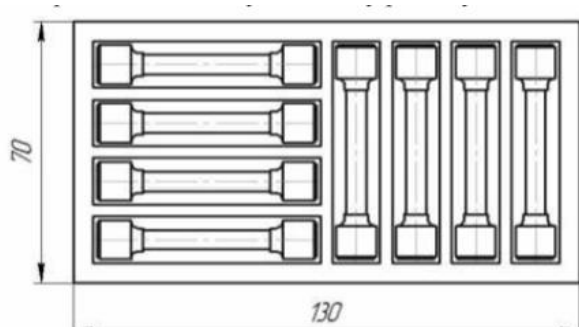


Рис. 4. Схема виготовлення зразків

Таблиця 1

Середні механічні властивості
вирощених зразків при $T=900^{\circ}\text{C}$

ТУ Сортамент	Механічні властивості		
	σ_b , кгс/мм ²	$\sigma_{0.2}$, кгс/мм ²	ψ , %
Наплавлені зразки	Повздовжній напрям		
	34,9	47,1	48,1
	34,1	48,2	59,0
	34,5	47,7	53,6
	Поперечний напрям		
	32,6	43,2	64,0
	30,6	52,6	66,3
	31,6	47,9	65,2
ТУ27.1001190414-038:2007 (поковка)	≥ 22	≥ 45	≥ 50

Із даних представлених у табл. 1 випливає, що властивості міцності (σ_b) зразків в подовжньому і поперечному напрямку знаходяться приблизно на одному рівні, присутня невелика відмінність ($\sim 8\%$). При цьому спостерігається більш значна ($\sim 10 \dots 18\%$) відмінність пластичних властивостей (δ , ψ) в подовжньому і поперечному напрямку. Значення механічних властивостей для наплавленого матеріалу при $T=900^{\circ}\text{C}$ знаходяться на рівні значень поковок встановлених нормами технічних умов.

Таким чином встановлено що матеріал EI868 (XH60BT) отриманий методом плазмового багатоповшового наплавлення відповідає вимогам технічної документації і може використовуватись для виготовлення статорних деталей.

На підкладку зі сталі 20, по заданій програмі було наплавлено заготовку деталі «Кільце» зі сплаву EI868 (ВЖ98) рис. 5. Кількість наплавлених шарів 30, висота одного наплавленого шару складала 3 мм, ширина 15 мм.



Рис. 5. Процес вирощування заготовки деталі:
а – процес наплавлення заготовки,
б – заготовка деталі після наплавлення

Було проведено механічну обробку заготовки деталі, геометрія деталі відповідає нормам креслення. За результатами проведення капілярного методу контролю та радіаційного контролю тріщини, несплавлення та інші види металургійних дефектів не виявлено.



Рис. 6. Вирощена деталь:
а – заготовка деталі після вирощування,
б – деталь після механічної обробки

Було проведено розрахунок економічної ефективності, встановлено, що при отриманні традиційними методами деталь, вага якої складає 4 кг, виготовляють з двох прутків, що пресуються, далі виточуються, зварюються між собою, а потім доводяться до кінцевої форми. Вага першої поковки складає 21,970 кг, вага другої – 43,842 кг. Вартість одного кілограма прутка складає 3168 грн за 1 кг. Загальна вартість деталі отриманої традиційними методами складає 208512 грн.

Вага вирощеної заготовки складає 15 кг. Вартість одного кілограма проволочи складає 3320 грн за 1 кг. Загальна вартість вирощеної деталі складає 49800 грн.

Таким чином, економічний ефект з однієї деталі складає 158 712 грн.

Висновок

Структура деталі отриманої методом плазмового наплавлення є характерною для литої, металургійних дефектів не виявлено. Значення механічних

властивостей вирощеного матеріалу при температурі 900°C знаходиться в межах норм ТУ 27.1-001190414-038:2007. Коефіцієнт використання матеріалу для методу вирощування складає 26,6 %, для традиційної технології 6 %. Підвищення коефіцієнту використання матеріалу, та зниження ваги заготовки деталі у чотири рази призводить до значної економічної ефективності застосування адитивного методу багатошарового плазмового наплавлення і при виготовленні однієї деталі складає 158712 грн.

Література

1. *A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement [Text]* / W. Binto, P. Zengxi, D. Donghong, C. Dominic, L. Huijun, X. Jing, N. John // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 35. – P. 127-139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.

2. *Detecting the influence of heats sources on material properties when production a aviation parts by a direct energy deposition method [Text]* / M. Gnatenko, P. Zhemaniuk, I. Petrik, S. Sakhno, S. Chigileichik, V. Naumyk, O. Ovchinnikov, M. Matkovska // *Eastern-European journal of enterprise technologies*. – 2019. – Vol. 1, No. 12(97). – P. 49-55. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.157604.

3. *Gnatenko, M. Influence of sources of heating and protective gases on the properties of the material obtained by the direct deposition [Text]* / M. Gnatenko, V. Naumyk, M. Matkovska // *Materials Science and Technology*. – 2019. – P. 68-74. DOI: 10.7449/2019/MST_2019_68_74.

References

1. Binto, W., Zengxi, P., Donghong, D., Dominic, C., Huijun, L., Jing, X., John, N. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 35, October 2018, pp. 127-139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.

2. Gnatenko, M., Zhemaniuk, P., Petrik, I., Sakhno, S., Chigileichik, S., Naumyk, V., Ovchinnikov, O., Matkovska, M. Detecting the influence of heats sources on material properties when production a aviation parts by a direct energy deposition method. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2019, vol. 1, no. 12(97), pp. 49-55. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.157604.

3. Gnatenko, M., Naumyk, V., Matkovska M. Influence of sources of heating and protective gases on the properties of the material obtained by the direct deposition. *Materials Science and Technology*, 2019, pp. 68-74. DOI: 10.7449/2019/MST_2019_68_74.

Надійшла до редакції 31.05.2021, розглянута на редколегії 23.09.2021

ИЗГОТОВЛЕНИЕ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ АДТИВНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ

М. О. Гнатенко, С. Л. Чигилейчик, С. С. Сахно

Выполнено получение авиационной детали кольцевого типа из жаропрочного конструкционного сплава ЭИ 868 (ХН60ВТ) методом аддитивной многослойной плазменной наплавки проволокой. Традиционной технологией получения данного типа кольцевых заготовок является штамповка прутков, которые доводятся до конечной формы детали путем дальнейшей механической обработки. Недостатком традиционной технологии являются значительные затраты металла, который в процессе механической обработки прессованного прутка, фактически превращается в стружку и не используется повторно, что приводит к повышению стоимости готового изделия. Применение аддитивных технологий позволит значительно сократить расход материала при получении кольцевых заготовок за счет изготовления заготовки с конфигурацией максимально приближенной к геометрии детали. Аддитивная наплавка проводилась на роботизированном комплексе, который состоит из плазменного источника питания SBI PMI-350 AC / DC TL и робота FANUC M-710iC на жестко закрепленную подложку из стали 20. Для определения возможности получения авиационных деталей методом послойной плазменной наплавки было проведено исследование наплавленного материала. Проведено исследование структуры выращенной детали, установлено, что микроструктура соответствует нормальному состоянию сплава ЭИ868 (ХН60ВТ) в микроструктуре линии сплавления не является видимыми, структура неоднородна с взаимным прорастанием зерен между слоями. В ходе определения технологических свойств детали, было установлено, что значения механических свойств сплава детали полученной методом аддитивного выращивания находятся на уровне литых заготовок и поковок и при $T = 900^{\circ}\text{C}$ составляют: $\sigma_b = 35 \pm 5$ кгс/мм², $\sigma_{0,2} = 49 \pm 5$ кгс/мм², $\psi = 62 \pm 5$ %. После механической обработки выращенной заготовки проведен капиллярный метод контроля и радиационный контроль выращенной детали - трещин и других видов критических металлургических дефектов не обнаружено. Практическая значимость внедрения

данного метода заключається в значительном сокращении расхода материала при получении детали, и обеспечении экономической эффективности, которая составляет около 159 000 гривен.

Ключевые слова: плазменная наплавка; жаропрочные сплавы; ЭИ 868 (ХН60ВТ); аддитивные технологии.

MANUFACTURE OF AVIATION PARTS FROM HEAT-RELATED NICKEL ALLOYS BY MULTILAYER PLASMA SURFACING

M. Gnatenko, S. Chigileichyk, S. Sakhno

The aviation part of the ring-type was made of heat-resistant structural alloy EI 868 (HN60VT) by the method of additive multilayer plasma surfacing with wire. The traditional technology for obtaining this type of ring blank is the stamping of rods, which are then brought to the final shape of the part by further machining. The disadvantage of traditional technology is the significant cost of metal, which in the process of machining the pressed rod, is converted into chips and not reused, which increases the cost of the finished product. The use of additive technologies will significantly reduce the cost of material in obtaining annular workpieces by manufacturing a workpiece with a configuration as close as possible to the geometry of the part. Additive surfacing was performed on a robotic complex consisting of a plasma power supply SBI PMI-350 AC/DC TL and work FANUC M-710iC on a rigidly fixed substrate of steel 20. To determine the possibility of obtaining aviation parts using the method of layer-by-layer plasma surfacing, a study of the deposited material was conducted. The structure of the grown part was studied, it was found that the microstructure corresponds to the normal state of the alloy EI868 (HN60W) in the microstructure of the fusion line is not visible, the structure is homogeneous with the mutual germination of grains between layers. Alloy parts obtained using the method of additive cultivation are at the level of cast blanks and forgings and at $T = 900^{\circ}\text{C}$ are: $\sigma_b = 35 \pm 5 \text{ кгс/мм}^2$, $\sigma_{0.2} = 49 \pm 5 \text{ кгс/мм}^2$, $\psi = 62 \pm 5 \%$. After machining the grown workpiece, a capillary method of control and radiation control of the grown part - cracks and other types of critical metallurgical defects was not detected. The practical significance of the introduction of this method is a significant reduction in material costs in obtaining parts and ensuring economic efficiency, which is about 159 thousand hryvnias.

Keywords: plasma surfacing; heat-resistant alloys; EI 868 (HN60VT); additive technologies.

Гнатенко Михайло Олегович – інженер-технолог АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна.

Чігілейчик Сергій Леонідович – начальник бюро зварювання АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна.

Сахно Сергій Сергійович – начальник бюро досліджень АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна.

Mykhailo Gnatenko – engineer-technologist of Motor Sich JSC, Zaporizhia, Ukraine,
e-mail: jane070air594@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7613-852X.

Serhiy Chigileychik – Head of the Welding Bureau of Motor Sich JSC, Zaporizhia, Ukraine,
e-mail: sweld1812@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2372-9078.

Serhiy Sakhno – Head of Research Bureau of Motor Sich JSC, Zaporizhia, Ukraine,
e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID: 0000-0003-3388-2663.