

УДК 669.71:621.791.92:621.431

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.250619.32.319

ВЛИЯНИЕ ИСТОЧНИКОВ НАГРЕВА, ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

ГНАТЕНКО М. О., *аспир.*Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (066) 40-80-373, e-mail : jane070air594@gmail.com, ORCID : 0000-0003-3666-9358

Аннотация. Исследование проводилось с *целью* определения, при каком источнике нагрева и с использованием какого защитного газа наплавленный материал будет иметь высшие значения физико-механических характеристик, оценки качества, размера и равномерности распределения наплавленных слоев, геометрии полученной поверхности. **Методы исследования:** методы изучения химического состава, структуры и свойств опытных сплавов; методы качественной и количественной оценки структурных составляющих, определения физико-механических и структурных свойств изучаемого материала. **Объектом исследования** выбран сплав $AlSi_5$, выращенный с использованием двух параметров, влияющих на качество выращенного материала – источников нагрева: электродугового и сварочной дуги с холодным переносом металла (СМТ – Cold Metal Transition) в среде аргона и защитных газов – аргона и смеси аргон – гелий в соотношении 50/50 при выращивании методом электродуговой наплавки. Основными показателями свойств алюминиевого сплава, которые определялись в эксперименте, были выбраны : предел прочности (σ_b), предел текучести ($\sigma_{0,2}$), относительное удлинение (δ). **Результаты исследования:** выявлено влияние источников нагрева на формирование поверхности наплавленных пластин; образцы, полученные методом плазменной наплавки, имеют выступание наплавленных слоев боковой поверхности на высоту до 1,5 мм; образцы, полученные методом электродуговой наплавки, как в среде аргона, так и в среде гелия имеют высоту до 0,3 мм. Анализ химического состава показал, что каждый источник нагрева позволил обеспечить химический состав готового изделия, соответствующий химическому составу изначального материала, однако процесс СМТ обеспечил наиболее точное распределение легирующих элементов. Физико-механические свойства пластин, полученных методом прямого выращивания, находятся примерно на одном уровне с материалами, которые были получены традиционными методами литья. Наивысшие значения механических свойств имеют образцы, полученные методом СМТ наплавки: $\sigma_b = 19$ МПа; $\sigma_{0,2} = 13$ МПа; $\delta = 12$ %, что можно объяснить более дисперсной структурой. **Научная новизна** исследования : выявлено влияние каждого источника нагрева на изменение физико-механических свойств, а также влияние защитного газа при электродуговой наплавке; выполнена оценка взаимозаменяемости данных процессов при изготовлении авиационных деталей методом прямого выращивания. **Практическая значимость:** исследование позволяет определить, какой источник нагрева целесообразней использовать для получения необходимых для конкретного технологического процесса.

Ключевые слова : аддитивные технологии; прямое выращивание; холодный перенос металла; защитные газы; смесь аргон – гелий

ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ ДЖЕРЕЛ НАГРІВУ І ЗАХИСНИХ ГАЗІВ НА ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛУ ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ВИРОЩУВАННЯ

ГНАТЕНКО М. О., *аспир.*Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запорожжя, Україна, тел. +38 (066) 40-80-373, e-mail : jane070air594@gmail.com, ORCID : 0000-0003-3666-9358

Анотація. Дослідження проводилося з *метою* визначення, за яке джерело нагрівання та з використанням якого захисного газу наплавлений матеріал буде мати вищі значення фізико-механічних характеристик, оцінити якість, розмір і рівномірність розподілу наплавлених шарів, геометрію отриманої поверхні. **Методи дослідження:** методи вивчення хімічного складу, структури і властивостей досліджуваних сплавів; методи якісного і кількісного оцінювання структурних складових; методи визначення фізико-механічних і структурних властивостей досліджуваного матеріалу. **Об'єктом дослідження** обрано сплав $AlSi_5$, вирощений з використанням двох параметрів, які впливають на якість вирощеного матеріалу – джерел нагріву : электродугового і зварювальної дуги з холодним перенесенням металу (СМТ – Cold Metal Transition), в середовищі аргону та захисних газів – аргону і суміші аргон – гелій у співвідношенні 50/50 під час вирощування методом электродугового наплавлення. Основними показниками властивостей алюмінієвого сплаву, які визначалися в експерименті, були обрані: межа міцності (σ_b), межа плинності ($\sigma_{0,2}$), відносне подовження (δ). **Результати дослідження:** виявлено вплив джерел нагріву на формування поверхні наплавлених пластин; зразки, отримані методом плазмового наплавлення, мають виступання наплавлених шарів бічної поверхні на висоту до 1,5 мм; зразки, отримані методом электродугового наплавлення, як у середовищі аргону, так і в середовищі гелію, мають висоту до 0,3 мм. Аналіз

хімічного складу показав, що кожне з джерел нагріву дозволило забезпечити хімічний склад готового виробу, який відповідає хімічному складу початкового матеріалу, проте процес СМТ забезпечує найбільш точний розподіл легуючих елементів. Фізико-механічні властивості пластин, отриманих методом прямого вирощування, перебувають приблизно на одному рівні з матеріалами, які були отримані традиційними методами лиття. Найвищі значення механічних властивостей мають зразки, отримані методом СМТ наплавлення: $\sigma_b = 19$ МПа; $\sigma_{0,2} = 13$ МПа; $\delta = 12$ %, що можна пояснити більш дисперсною структурою. **Наукова новизна дослідження** полягає у виявленні впливу кожного джерела нагріву на зміну фізико-механічних властивостей, а також виявлено вплив захисного газу за електродугового наплавлення. Проведено оцінювання взаємозамінності цих процесів під час виготовлення авіаційних деталей методом прямого вирощування. **Практична значимість:** дослідження дозволяє визначити, яке джерело нагріву доцільніше використовувати для конкретного технологічного процесу.

Ключові слова : адитивні технології; пряме вирощування; холодне перенесення металу; захисні гази; суміш аргон – гелій

INFLUENCE OF HEAT SOURCES AND SHIELDING GASES ON PROPERTIES OF MATERIAL WHEN PRODUCING AIRCRAFT DETAILS BY DIRECT GROWTH METHOD

HNATENKO M.O., *Postgraduate Student*

Zaporizhia National Technical University, 64, Zhukovskoho str., 69063, Zaporizhia, Ukraine, tel. +38 (066) 40-80-373, e-mail : jane070air594@gmail.com, ORCID : 0000-0003-3666-9358

Abstract. The *purpose of the research* is to determine at what source of heating and with the use of which shielding gas the deposited material will have the highest values of physical and mechanical characteristics. It is necessary to assess the quality, size and uniformity of distribution of the deposited layers, the geometry of obtained surface. To perform the tasks set in this work, we applied the methods of research of the chemical composition, structure and properties of the experimental alloys. We used the *methods* of qualitative and quantitative assessment of structural components, the determination of physical, mechanical and structural properties of the material under study. The *object of the study* was the AlSi₅ alloy grown using two parameters affecting the quality of the grown material - heat sources: electric arc and welding arc with cold metal transfer (CMT – Cold Metal Transition) in argon. The main indicators of the properties of the aluminum alloy, which were determined in the experiment, are following: tensile strength (σ_b), yield strength ($\sigma_{0,2}$), elongation (δ). As a *result of the research*, it was revealed that the influence of heat sources on the formation of the surface of the deposited plates, the samples obtained by the method of plasma-jet facing have a protrusion of the deposited layers of the lateral surface to a height of 1.5 mm. Samples obtained by the method of electric arc welding both in argon and helium have a height of up to 0.3 mm. Analysis of the chemical composition showed that each source of heating made it possible to ensure the chemical composition of the finished product, corresponding to the chemical composition of the original material. The CMT process provided the most accurate distribution of alloying elements. The physicomechanical properties of the plates obtained by the direct growth method are approximately at the same level with the materials that were obtained by traditional casting methods. The highest values of mechanical properties have the samples obtained by the method of SMT facing: $\sigma_b = 19$ МПа; $\sigma_{0,2} = 13$ МПа; $\delta = 12$ %, which can be explained by more dispersed structure. The *scientific novelty* of the research lies in the fact that the influence of each heat source on the change in the physical and mechanical properties was revealed. Effect of shielding gas during electric arc surfacing. The evaluation of the interchangeability of these processes in the manufacture of aircraft parts by the method of direct growth. The *practical significance* of the study allows us to determine which source of heating is more appropriate to use in order to obtain the necessary properties for a particular process.

Keywords: additive technologies; direct energy deposition; cold metal transfer; shielding gases; argon-helium mixture

Введение

Аддитивное производство (АП) является новым направлением изготовления деталей, в том числе и из алюминиевых сплавов, которые в ряде случаев могут заменить классические способы, такие как литье и штамповка. При этом значительно сокращаются время и затраты на получение нового изделия за счет исключения промежуточных стадий изготовления оснастки и пресс-форм. [1].

Метод прямого выращивания Directed Energy Deposition (DED) – процесс АП, в котором сфокусированная тепловая энергия используется для плавления проволочных или порошковых материалов [2]. Преимущество данного метода заключается в возможности не только изготавливать детали, но и производить ремонт, а также в

производстве детали комбинированным методом, когда часть изделия изготавливается традиционными методами, а далее доращивается. [3]

Процессы подачи проволоки имеют большую производительность, являются более экономичными благодаря почти 100 % эффективности использования проволоки по сравнению с порошковыми материалами [4].

Технологии аддитивного производства алюминия с использованием сварочной проволоки –Wire +arc additive manufacture (WAAM) позволяют выращивать крупногабаритные, функциональные компоненты ребер из алюминиевого сплава [5].

Метод СМТ (Cold Metal Transition) позволяет получить более мелкие зерна и равномерное распределение кислорода [6; 7], данный процесс представляет собой модифицированный вариант

дуговой сварки, основанный на механизме управляемого режима переноса металла. Этот процесс обеспечивает высокую производительность и качество сварки за счет низкого тепловложения [8].

Помимо источников нагрева важным фактором для процесса прямого выращивания являются защитные газы. Предпочитаемыми защитными газами для сварки MIG с переменным током являются аргон, гелий, а также смеси аргона с гелием. Аргон дает широкое и неглубокое проникновение сварного шва. Гелий увеличивает напряжение, повышает глубину проникновения сварного шва. Добавление аргона к гелию улучшает зажигание дуги и ее стабильность. Скорость сварки и проникновение сварочного шва будет меньше, чем при сварке с чистым гелием, но лучше, чем при сварке только с аргоном. Поэтому можно регулировать ширину шва и глубину его проникновения путем изменения доли аргона в защитном газе [9].

В работе [10] проведено исследование с оценкой применения данных технологий не только при единичном, но и при серийном производстве деталей из алюминиевых сплавов. Но остались не решенными проблемы, связанные с влиянием защитных газов на свойства выращиваемого материала.

Все это позволяет утверждать, что необходимо проведение исследования влияния защитных газов на свойства наплавленного материала, а также исследования выращенного термоупрочняемого сплава для оценки воздействия термической обработки на свойства материала.

Проведено исследование трех вариантов методом прямого выращивания: из сплава $AlSi_5$ диаметр 1,2 мм.

Вариант № 1 250 × 200 × 13 мм изготовлен методом MIG-наплавки, защитный газ аргон.

Вариант № 2 300 × 250 × 8 мм изготовлен методом MIG-наплавки в среде смеси аргон – гелий 50/50.

Вариант № 3 300 × 50 × 8 мм изготовлен методом MIG/CMT наплавки, защитный газ аргон.

Поверхность пластин ровная, наплавленные слои пластин, выращенных электродуговой наплавкой, выступают на высоту не более 0,2...0,5 мм, выращенных методом CMT – 0,5...1,5 мм (рис. 1 в).

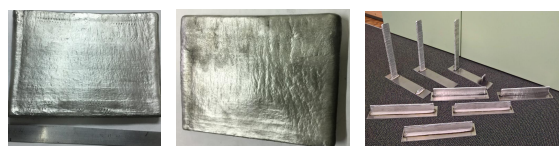


Рис. 1. Внешний вид выращенных пластин :
а – вариант 1; б – вариант 2;

в – вариант 3 / Fig. 1. Appearance of grown plates:
a – option 1; b – option 2;

Согласно данным количественного спектрального анализа химический состав образца соответствует требованиям AWSA5.10 и ISO 18273 для сплава

$AlSi_5$. Химический состав после наплавки соответствует составу материала в исходном материале.

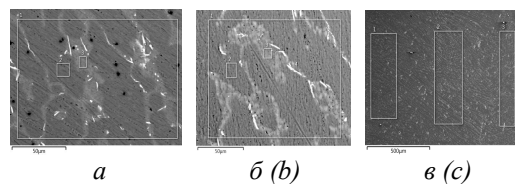


Рис. 2. Зоны распределения элементов на площади образцов : а – шлиф образца № 1; б – шлиф образца № 2; в – шлиф образца № 3 / Fig. 2. The distribution zones of the elements on the sample area : a – shlif of sample number 1; b – shlif of sample number 2; c – shlif of sample number 3

Образцы, выращенные методом CMT наплавки, имеют более равномерное распределение легирующих элементов по поверхности шлифа по сравнению с материалом, полученным методом электродуговой наплавки (табл. 1).

Таблица 1

Количественное распределение элементов / Quantitative distribution of elements

Метод наплавки	Зона анализа	Элемент, доля, %	
		Al	Si
Вариант 1	Спектр 1	89,64	7,87
	Спектр 2	95,93	1,49
Вариант 2	Спектр 1	90,08	8,55
	Спектр 2	96,69	6,94
Вариант 3	Спектр 1	93,34	6,66
	Спектр 2	93,04	6,96

Таблица 2

Металлические свойства выращенных материалов / Metallic properties of grown materials

Метод наплавки	Направление вырезки	Механические свойства			
		σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Вариант 1	продольное	12,7	8,2	27,2	41,7
	поперечное	13,8	8,5	20,4	28,6
Вариант 2	продольное	12,7	7,3	28,4	12,7
	поперечное	13,3	8,5	26,0	13,3
Вариант 3	продольное	18,0	12,2	12,0	3,3
	поперечное	19,1	12,9	12,0	6,0
Требования ISO 18273	–	12,0	4,0	8,0	–

Свойства соответствуют нормам ISO 18273 для сплава $AlSi_5$ [11] (табл. 2). Образцы, полученные методом CMT, имеют наивысшие значения предела прочности, среднее значение $\sigma_b = 18,5$ МПа. Наивысшие значения относительного удлинения имеют образцы, выращенные электродуговой наплавкой в среде смеси гелий – аргон $\delta \approx 26$ %.

В макроструктуре образца выявляются наплавленные слои шириной ~ 0,5...2,0 мм с четкой границей раздела, без проявления макрозерна,

дефекты металлургического происхождения не обнаружены.

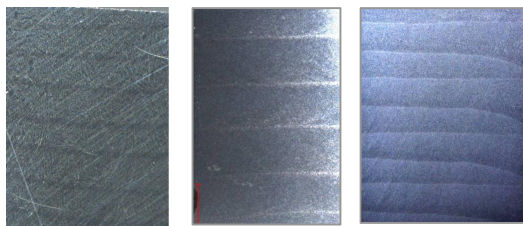


Рис. 3. Макроструктура выращенных образцов $\times 6,5$: а – вариант 1; б – вариант 2;

в – вариант 3 / Fig. 3. Macrostructure of grown samples $\times 6.5$: a – option 1; b – option 2; v – option 3

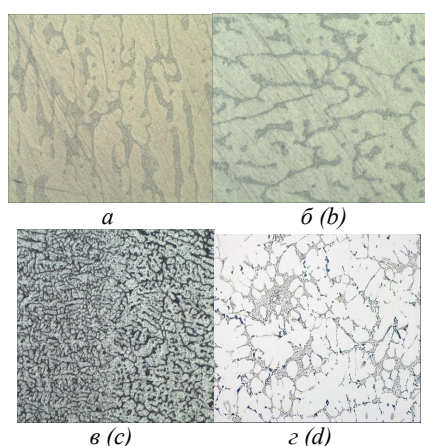


Рис. 4. Микроструктура выращенных образцов $\times 200$: а – вариант 1; б – вариант 2;

в – вариант 3 / Fig. 4. The microstructure of the grown samples $\times 200$: a – option 1; b – option 2; c – option 3

Наименьший размер наплавленных слоев имеет материал, полученный методом электродуговой наплавки в среде смеси гелий – аргон 0,5...0,7 мм.

Микроструктура материала образца, как в зоне линии сплавления, так и в слоях, идентична: представляет собой дендриты α -твердого раствора + эвтектика (Si), отличается от структуры литых силуминов более дисперсным строением дендритов α -твердого раствора.

Меньший размер дендритов можно объяснить тем, что объем расплавленного металла небольшой и

наносится послойно, что приводит к большей скорости кристаллизации и способствует формированию более мелкой дендритной структуры.

Выводы

1. Наиболее качественная поверхность, напоминающая литую, позволяющая задать минимальный припуск на механическую обработку, с наименьшей высотой выступания слоев до 0,5 мм, получена электродуговой наплавкой, как в среде аргона, так и в среде смеси гелий – аргон. У образцов, наплавленных методом СМТ, слои выступают на высоту 0,5...1,5 мм боковой поверхности.

2. Каждый источник нагрева позволяет обеспечить химический состав готового изделия, соответствующий химическому составу изначального материала. Рентгеноспектральный микроанализ показал, что в материале образцов распределение легирующих элементов равномерное между наплавленными слоями. Однако процесс СМТ обеспечил наиболее точное распределение легирующих элементов за счет низкого тепловложения.

Наплавка в среде защитных газов гелий – аргон позволила получить более точное распределение легирующих элементов, чем аргон в чистом виде.

3. Микроструктура материала образца, как в зоне линии сплавления, так и в слоях, идентична: представляет собой дендриты α -твердого раствора + эвтектика (Si). Строение дендритов материала, полученного методом выращивания, является более дисперсной по сравнению с литой. Наиболее дисперсная структура получена методом СМТ, что сказалось на более высоком значении механических свойств. Материал, выращенный в среде смеси гелий – аргон имеет наивысшие значения относительного удлинения.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что исследуемые источники нагрева позволяют выращивать заготовки деталей, обладающие физико-механическими свойствами, соответствующими качеству деформируемых и литых заготовок для применения в авиационном производстве.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Additive Manufacturing of aluminum alloys. Light Metal Age. – 2018. – Режим доступа : <https://www.lightmetalage.com/news/industry-news/3d-printing/article-additive-manufacturing-of-aluminum-alloys>.
2. Standardization Roadmap for Additive Manufacturing, Version 1.0. America Makes and ANSI Additive Manufacturing Standardization Collaborative (AMSC). – 2017.
3. Гнатенко М. О. Оценка возможности изготовления и ремонта деталей методом аддитивных технологий из алюминиевых сплавов / М. О. Гнатенко, Ю. А. Марченко, Т. И. Митина // Процессы литья. – 2018. – № 4 (130). – С. 56–61.
4. Wire-feed additive manufacturing might be the future of metal-based 3D printing. – Режим доступа : <https://www.3ders.org/articles/20150531>.
5. Ding J. Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts / J. Ding, P. Colegrove, J. Mehnen, S. Ganguly, P.M. Sequeira Almeida, F. Wang, S. Williams // Computational Materials Science. – 2011. – Vol. 50 (12). – Pp. 3315–3322. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.06.023>.

6. Pickin C.G. Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding / C.G. Pickin, S.W. Williams, M. Lunt // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2011. – Vol. 211(3). – Pp. 496–502.
7. Pickin C.G. Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy / C.G. Pickin, K. Young // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2006. – Vol. 11(5). – Pp. 583–585.
8. Gu J. Wire + Arc additive manufacturing of aluminium / J. Gu, B. Cong, J. Ding, S. Williams, Y. Zhai // *Proc. 25th Int. Solid Freeform Fabrication Symp. University of Texas*. – 2014. – Pp. 451–458.
9. Ouyang, J. H. Rapid prototyping of 5356-aluminum alloy based on variable polarity gas tungsten arc welding : process control and microstructure / J.H. Ouyang, H. Wang, R. Kovacevic // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2002. – Vol. 17 (1). – Pp. 103–124. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1081/amp-120002801>
10. Gnatenko M. Detecting the influence of heat sources on material properties when production aviation parts by a direct energy deposition method / M. Gnatenko, P. Zhemaniuk // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologie*. – № 1/12(97). – 2019. – Pp. 49–55.
11. ДСТУ EN ISO 18273:2018 Матеріали сварочные. Электроды, проволока и прутки для сварки алюминия и его сплавов. Классификация (EN ISO 18273:2015, IDT; ISO 18273:2015, IDT).

REFERENCES

1. Additive Manufacturing of aluminum alloys. *Light Metal Age*. Available, 2018.
2. Standardization Roadmap for Additive Manufacturing. Version 1.0. America Makes and ANSI Additive Manufacturing Standardization Collaborative (AMSC), 2017.
3. Gnatenko M.O., Marchenko Yu.A. and Mitina T.I. *Ocenka vozmozhnosti izgotovleniya i remonta detaley metodom additivnyh tekhnologiy iz alyuminiyevykh splavov* [Assessment of the possibility of manufacturing and repair of parts by the method of additive technologies from aluminum alloys]. *Processy lit'ya* [Casting processes]. 2018, no. 4 (130), pp. 56–61. (in Russian).
4. Wire-feed additive manufacturing might be the future of metal-based 3D printing.
5. Ding J., Colegrove P., Mehnen J., Ganguly S., Sequeira Almeida P. M., Wang F. and Williams S. Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts. *Computational Materials Science*, 2011, vol. 50 (12), pp. 3315–3322.
6. Pickin C.G., Williams S.W. and Lunt M. Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211(3), pp. 496–502.
7. Pickin C.G. and Young K. Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, vol. 11(5), pp. 583–585.
8. Gu J., Cong B., Ding J., Williams S. W. and Zhai Y. Wire + Arc additive manufacturing of aluminium. *Proc. 25th Int. Solid Freeform Fabrication Symp. University of Texas*, 2014, pp. 451–458.
9. Ouyang J.H., Wang H. and Kovacevic R. Rapid prototyping of 5356-aluminum alloy based on variable polarity gas tungsten arc welding : process control and microstructure. *Materials and Manufacturing Processes*, 2002, vol. 17 (1), pp. 103–124.
10. Gnatenko M. and Zhemaniuk P. Detecting the influence of heat sources on material properties when production aviation parts by a direct energy deposition method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 1/12(97), 2019, pp. 49–55.
11. ДСТУ EN ISO 18273:2018. *Materialy svarochnye. Elektrody, provoloka i prutki dlya svarki alyuminiya i ego splavov* [Welding materials. Electrodes, wires and rods for welding aluminum and its alloys]. *Klassifikaciya (EN ISO 18273:2015, IDT; ISO 18273:2015, IDT)*. [Classification (EN ISO 18273:2015, IDT; ISO 18273:2015, IDT)]. (in Russian).

Поступила в редакцию 01.06.2019.