

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.791

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-38-45>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА АМг5, ПОЛУЧЕННЫХ СПОСОБОМ МНОГОСЛОЙНОЙ НАПЛАВКИ

Карташев М.Ф., Пермяков Г.Л., Трушников Д.Н., Миндибаев М.Р.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация. Аддитивные технологии быстро развиваются, но промышленности требуется производство крупногабаритных деталей, а самые распространённые процессы, такие как селективное лазерное плавление и лазерная наплавка, не могут удовлетворить данному требованию. В этом направлении проволоочно-дуговая многослойная наплавка позволяет производить крупногабаритные детали, к примеру, для аэрокосмической отрасли. Однако металл, полученный с помощью процесса дуговой наплавки, имеет большие остаточные напряжения из-за высоких скоростей наплавки и чрезмерного тепловложения. К тому же наплавленный металл имеет низкие механические свойства из-за влияния пористости и неблагоприятной микроструктуры. Деформационное упрочнение во время процесса наплавки, к примеру поверхностное деформационное упрочнение высокочастотным ударным воздействием, может улучшить структуру, снизить пористость и остаточные напряжения, тем самым улучшив свойства металла, полученного с помощью дуговой наплавки. В статье описано экспериментальное исследование механических свойств алюминиевых образцов, полученных методом многослойной наплавки при различных температурных циклах, с применением деформационного упрочнения и без применения деформационного упрочнения. Представлены результаты механических испытаний образцов. Обнаружено влияние деформационного упрочнения на механические свойства образцов из сплава АМг5.

Ключевые слова: аддитивные технологии, многослойная наплавка, cold metal transfer, CMT, алюминий, АМг5, деформационное упрочнение, ударное воздействие, механические свойства, прочность при растяжении, ударная вязкость, проволоочно-дуговая послойная наплавка, WAAM, дуговая сварка.

Введение

Процесс проволоочно-дуговой многослойной наплавки подразумевает наплавку детали слой за слоем с подачи проволоки в качестве присадочного материала [1]. Данный процесс набирает всё большую популярность благодаря высокой скорости наплавки изделий и простоте используемого оборудования. Многослойная наплавка имеет большие перспективы в аэрокосмической и судостроительной отраслях, в частности, для алюминиевых сплавов, которые являются одними из самых востребованных в данных отраслях [2]. При применении дуговой наплавки возможно производить крупногабаритные детали с высокими механическими свойствами, с гораздо более высокими скоростями наплавки, чем при лазерной многослойной наплавке: процессом дуговой наплавки можно получать до 6 кг/ч, тогда как при лазерной многослойной наплавке – до 1 кг/ч [3].

Также в процессе дуговой наплавки возможно производить заготовки, практически совпадающие по геометрическим параметрам с конечной деталью, что требует незначительной механической обработки и приводит к значительной экономии металла [4]. Однако известны исследования, в которых описываются факторы, негативно влияющие на механические свойства получаемых изделий. Основными из них считаются пористость, остаточные напряжения и дендритная структура наплавленного металла [5–10]. От этих характеристик зависят такие механические свойства, как предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, ударная вязкость [11]. Также металл, полученный методом многослойной наплавки, имеет ряд недостатков: неблагоприятная дендритная структура, пористость и, как следствие, низкие механические свойства [12]. Решением этих проблем может стать послойное деформационное упрочнение. Известно исследование, в котором улучшение механических свойств и структуры производилось с помощью деформации роликом [13]. Деформация роликом

© Карташев М.Ф., Пермяков Г.Л., Трушников Д.Н., Миндибаев М.Р., 2019

преимущественно улучшает внутреннюю структуру. Принято решение использовать поверхностное деформационное упрочнение. Удары производятся бойком после наплавки каждого слоя. Предполагается, что деформационное упрочнение поможет повысить плотность наплавляемого материала, измельчить структуру и в результате получить более высокие механические свойства. Известна работа [14], в которой для снижения остаточных сварочных напряжений и деформаций коробления предложен метод повторного локального глубокого пластического деформирования притупленным индентором, основанный на закономерностях возникновения благоприятных остаточных напряжений при контактно-ударном воздействии.

Методы исследования

Для подтверждения гипотезы проведены сравнительные эксперименты по многослойной наплавке образцов с применением и без применения последнего деформационного упрочнения, а также с паузой между слоями, равной паузе, необходимой для проведения операции деформационного упрочнения. Паузы также используются для имитации наплавки крупногабаритных деталей.

Многослойная наплавка производится с помощью процесса СМТ (холодный перенос металла). Процесс СМТ выбран по причине того, что обеспечивает высокую скорость наплавки относительно всех методов дуговой наплавки, и тепловложение в основной металл во время этого процесса минимально по сравнению с другими методами наплавки [15]. В качестве источника питания используется Fronius TransPuls Synergic 5000 СМТ.

Эксперименты по многослойной наплавке производились с применением робота Fanuc Arc Mate 100iC. Благодаря специальному программному обеспечению ARC TOOL контроллеры роботов серии ARC Mate подготовлены для взаимодействия со сварочными источниками многих известных производителей, в том числе с используемым нами источником Fronius TransPuls Synergic 5000 СМТ. Специальные функции данного программного обеспечения позволяют в разы уменьшить время, необходимое для подготовки программы и задания траектории наплавки.

Управление роботом осуществляется с помощью системного контроллера Fanuc R-30iA. Этот контроллер имеет простую архитектуру и способен выполнять задачи различной сложности, что играет достаточно важную роль при последующем внедрении технологии в производство.

Для послослойного деформационного упрочне-

ния образцов используется ручной пневматический молоток Sumake ST-M3009/Н. Благодаря его небольшому весу и габаритам деформационное упрочнение можно проводить с минимальной задержкой после наплавки.

Используемое оборудование приведено на **рис. 1**.

В качестве материала использовалась проволока из сплава АМг5 диаметром 1,2 мм. В качестве защитного газа применялся аргон газообразный, высшего сорта по (99,993%), расход защитного газа 10 л/мин. Режимы наплавки приведены в **табл. 1**. В таблице: $V_{св}$ – скорость наплавки, $V_{пш}$ – скорость подачи проволоки, $Q_{зщ}$ – расход защитного газа, $I_{св}$ – ток наплавки, $U_{дуги}$ – напряжение дуги. Параметры процесса для образцов указаны в **табл. 2**.

Таблица 1

Режимы наплавки

Параметр	Значение
$V_{св}$, м/мин	0,4
$V_{пш}$, м/мин	5
$Q_{зщ}$, л/мин	10
$I_{св}$, А	45
$U_{дуги}$, В	17

При наплавке всех образцов использовалась одна и та же стратегия заполнения (**рис. 2**): зигзагообразное продольное заполнение, последующие слои находятся прямо над предыдущими, начало последующего слоя находится в месте окончания предыдущего слоя. Согласно работам [16] и [17] подобная стратегия заполнения обеспечивает наиболее высокие механические свойства наплавленного материала.

Образцы наплавлены с разными геометрическими характеристиками (**табл. 3 и 4**): 3 образца высотой 21 мм для испытаний на разрыв перпендикулярно направлению выращивания и 3 образца высотой 75 мм для испытаний на разрыв вдоль направления выращивания. Деформационное упрочнение на каждый слой образцов производилось сразу после наплавки слоя, пока наплавленный материал еще не остыл ниже 300С и легко подвергался деформированию. Внешний вид образцов, полученных при многослойной наплавке, показан на **рис. 3, 4**. Для уменьшения статистического разброса каждый образец наплавлен в количестве трёх штук.

Далее из наплавленных образцов были изготовлены образцы под механические испытания на растяжение (ГОСТ 1497-84), тип образца – 7. На **рис. 5** представлена схема испытаний на разрыв и чертеж образца.



а



б



в



г

Рис. 1. Оборудование, используемое для проведения экспериментов по многослойной наплавке с послойным деформационным упрочнением: а – робот Fanuc Arc Mate 100iC; б – системный контроллер Fanuc R-30iA; в – источник питания Fronius TransPuls Synergic 5000 CMT; г – пневматический молоток Sumake ST-M3009/H

Таблица 2

Параметры процесса для образцов

Номер образца	Количество слоёв	Деформационное упрочнение	Время деформационного упрочнения, с	Сила удара, Дж	Количество ударов в минуту	Паузы, с
1	5	-	-	-	-	0
2	5	+	60	7,1	3200	60
3	5	-	-	-	-	60
4	25	-	-	-	-	0
5	25	+	60	7,1	3200	60
6	25	-	-	-	-	60

Таблица 3

Геометрические характеристики образцов №1, 2, 3

Геометрическая характеристика	Размер, мм
Высота	21
Ширина	17
Длина	120

Таблица 4

Геометрические характеристики образцов №4, 5, 6

Геометрическая характеристика	Размер, мм
Высота	75
Ширина	20
Длина	70

Также были проведены испытания образцов на ударный изгиб (ГОСТ 9454-78), тип образцов - 1. При испытаниях образцов на ударный изгиб удар производился в двух направлениях: перпендикулярно направлению выращивания (KCU_1) и вдоль направления выращивания (KCU_2). На рис. 6 представлена схема испытаний на ударный изгиб и чертеж образцов.

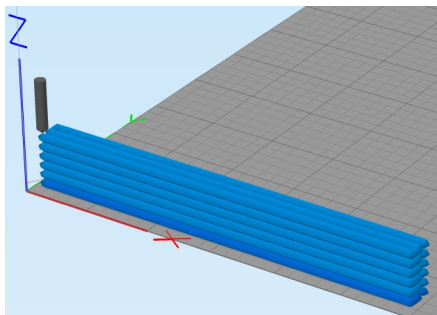


Рис. 2. Стратегия заполнения при наплавке образцов

Результаты исследования

Результаты испытаний наплавленных образцов из сплава АМг5 систематизированы в виде табл. 5. В таблице приведены усредненные результаты механических испытаний наплавленных образцов. Для сравнения механических свойств наплавленных образцов с механическими свойствами стандартных изделий в табл. 5 также приведены механические свойства листа по ГОСТ 21631-76 и плиты по ГОСТ 17232-99 из сплава АМг5.

Полученные результаты механических испытаний на рис. 7 представлены в виде диаграмм. Из диаграмм видно, что механические свойства образцов различаются в зависимости от температурного цикла наплавки, использования деформационного упрочнения и наличия пауз между слоями. Стоит заметить, что относительно-

ное удлинение у образцов высотой 21 мм, подвергнутых разрыву перпендикулярно направлению выращивания, больше, чем у образцов высотой 75 мм, подвергнутых разрыву вдоль направления выращивания.

Также из результатов видно, что образцы, полученные при непрерывной наплавке, имеют механические свойства равные либо превышающие механические свойства стандартных изделий. Но при наплавке крупногабаритных изделий всегда будет присутствовать пауза между слоями, то есть непрерывная наплавка невозможна. Непрерывную наплавку можно использовать при мелком ремонте.

Кроме того, при анализе результатов механических испытаний наплавленных образцов из сплава АМг5 замечено, что деформационное упрочнение улучшает их механические свойства. Это хорошо видно на примере сравнения образцов №6 и 5, №3 и 2. Образцы №2 и 5, полученные наплавкой с применением послойного деформационного упрочнения, имеют лучшие механические свойства, чем образцы №3 и 6, наплавленные с паузами между слоями, но без применения послойного деформационного упрочнения.

Таблица 5

Результаты испытаний образцов и стандартных материалов

Материал	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	$KCU_{1,2}$, кДж/м ²	$KCU_{2,2}$, кДж/м ²
Лист, ГОСТ 21631-76	275	130	12-15	-	-
Плита, ГОСТ 17232-99	255-265	110-120	12-13	300	
Образец № 1	263,8	170,8	40,0	311	-
Образец № 2	243	192,9	33,4	335	-
Образец № 3	259,4	182,5	31,7	316	-
Образец № 4	259	230	24	342	607
Образец № 5	196	131	10	293	609
Образец № 6	156	111	8	243	550



Образец №1



Образец №2



Образец №3

Рис. 3. Внешний вид образцов для испытаний поперек направления выращивания, полученных при многослойной наплавке



Образец №4

Образец №5

Образец №6

Рис. 4. Внешний вид образцов для испытаний вдоль направления выращивания, полученных при многослойной наплавке

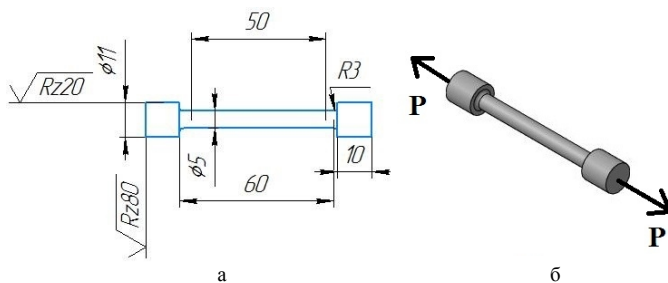


Рис. 5. Чертеж образца (а) и схема механического испытания на растяжение (б)

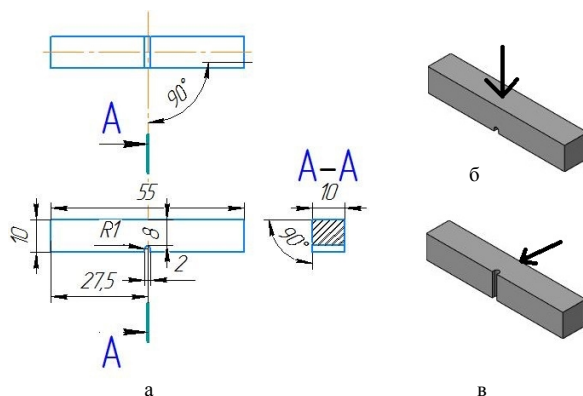


Рис. 6. Чертеж образца и схема механического испытания на ударный изгиб:
а – чертеж образца для испытания; б – схема испытания при ударе вдоль направления выращивания;
в – схема испытания при ударе поперек направления выращивания

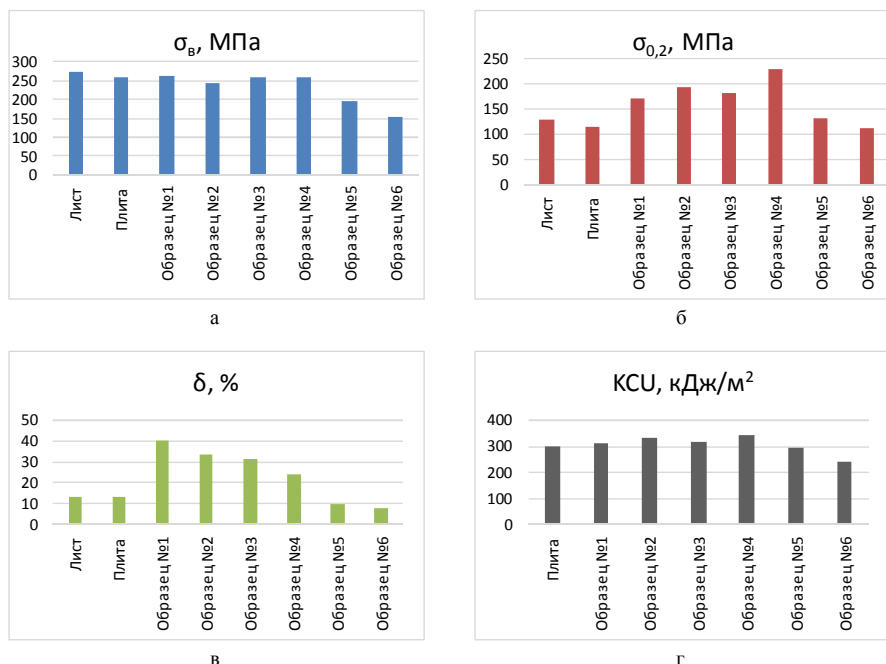


Рис. 7. Диаграммы механических свойств наплавленного сплава АМг5 и стандартных изделий из сплава АМг5: а – предел прочности; б – предел текучести; в – относительное удлинение; г – ударная вязкость

Заключение

Проведены предварительные исследования повышения механических свойств образцов из алюминиевого сплава АМг5, полученных с помощью дуговой наплавки путем применения послойного деформационного упрочнения. Установлено, что применение послойного поверхностного деформационного упрочнения повышает механические свойства наплавленных изделий на 25%. При механических испытаниях наплавленных образцов наблюдается анизотропия механических свойств. В частности, ударная вязкость в направлении выращивания образца более чем в два раза превышает ударную вязкость перпендикулярно направлению выращивания.

В дальнейших работах планируется приведение результатов металлографии образцов с целью выявления влияния деформационного упрочнения на структуру и пористость наплавленного материала. Также планируется проведение экспериментальных работ по подбору параметров режима

наплавки и режима деформационного упрочнения с точки зрения достижения наилучших механических свойств наплавляемых образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках соглашения С-26/787 от 21.12.2017 (изучение современного состояния вопроса) и Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта №18-08-01016 А (проведение экспериментальных исследований).

Список литературы

1. Wu Bintao; Pan Zengxi; Ding Donghong; Cuiuri Dominic; Li Huijun; Xu Jing; Norrish John, A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement, JOURNAL OF MANUFACTURING PROCESSES 35, 2018, pp. 127–139.
2. Donghong Ding, Zengxi Pan *, Stephen van Duin, Huijun Li and Chen Shen, Fabricating Superior NiAl Bronze Components through Wire Arc Additive Manufacturing, Materials 2016, 9, 652.
3. Iván Tabernero, Amagoia Paskual, Pedro Álvarez, Alfredo Suárez, Study on Arc Welding processes for High Deposi-

- tion Rate Additive Manufacturing, 19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, 23–27 April 2018, Bilbao, Spain. Eng. 68, 2018, pp. 358–362.
4. Lockett, Helen; Ding, Jialuo; Williams, Stewart and Martina, Filomeno (2017). Design for Wire + Arc Additive Manufacturing: design rules and build orientation selection. *Journal of Engineering Design*, 28(7-9) pp. 568–598.
 5. E.M. Ryan, T.J. Sabin, J.F. Watts, M.J. Whiting, The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy 2319, *Journal of Materials Processing Tech.* 262, 2018, pp. 577–584.
 6. Zeqi Hu, Xunpeng Qin, Tan Shao, Welding Thermal Simulation and Metallurgical Characteristics Analysis in WAAM for 5CrNiMo Hot Forging Die, International Conference on the Technology of Plasticity, ICTP 2017, 17–22 September 2017, Cambridge, United Kingdom, vol 207, 2017, pp 2203–2208.
 7. J Bai et al, Porosity evolution in additively manufactured aluminium alloy during high temperature exposure 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 167 012045.
 8. Markus Hirtler, Angelika Jedynak, Benjamin Sydow, Alexander Sviidov, and Markus Bambach, Investigation of microstructure and hardness of a rib geometry produced by metal forming and wire-arc additive manufacturing. *MATEC Web of Conferences* 190, 02005, 2018, ICNFT 2018.
 9. Zhizhuang Hao, Sansan Ao, Yangchuan Cai, Wei Zhang and Zhen Luo, Formation of SUS304/Aluminum Alloys Using Wire and Arc Additive Manufacturing. *Metals* 2018, 8, 595.
 10. Z D Ni, B L Dong, S B Lin, C L Yang, C L Fan, J X Shi, Numerical Analysis on Stress Evolution During GTA-Additive Manufacturing of Thin-Walled Aluminum Alloys. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1063, 2018 012083.
 11. Qianru Wu, Jiping Lu, Changmeng Liu *, Hongli Fan, Xuezhai Shi, Jie Fu and Shuyuan Ma, Effect of Molten Pool Size on Microstructure and Tensile Properties of Wire Arc Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Alloy. *Materials* 2017, 10, 749.
 12. Anthony R. McAndrew, Marta Alvarez Rosales, Paul A. Colegrove, Jan R. Hönnige, Alistair Ho, Romain Fayolle, Kamal Eytayo, Ioan Stan, Punyawee Sukrongpang, Antoine Crochemore, Zolt Pinter, Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire+arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Additive Manufacturing* 21, 2018, 340–349.
 13. J. Donoghue, A.A. Antony, F. Martina, P.A. Colegrove, S.W. Williams, P.B. Prangnell, The effectiveness of combining rolling deformation with Wire+Arc Additive Manufacturing on β -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V, *Materials Characterization*, 2016, vol. 114, pp. 103–114.
 14. Сапожников С.Б., Загребельный С.С., Шакиров А.А. Релаксация сварочных напряжений при помощи глубокого пластического деформирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение, 2013. 13 (2). 81–86.
 15. Baoqiang Cong, Zewu Qi, Bojin Qi, Hongye Sun, Gang Zhao and Jialuo Ding, A Comparative Study of Additively Manufactured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy Using Cold Metal Transfer Process. *Appl. Sci.* 2017, 7, 275.
 16. Jie Fu, Kun Qiu, Lin Gong, Changmeng Liu, Qianru Wu, Jiping Lu, Hongli Fan. Effect of Tool-Path on Morphology and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing. *MATEC Web of Conferences* 128, 05009, 2017, EITCE 2017.
 17. X Zhang, F Martina, J Ding, X Wang and SW Williams, Fracture toughness and fatigue crack growth rate properties in wire+arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Fract Engng Mater Struct*, 2017, 40, 790–803.

Поступила 27.06.19

Принята в печать 29.07.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-38-45>

UNDERSTANDING THE EFFECT OF WORK HARDENING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOY 5056 SPECIMENS PRODUCED BY MULTILAYER SURFACING

Maksim F. Kartashev – Postgraduate Student, Engineer

Department of Welding, Metrology and Materials Engineering, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: goncharsk@mail.ru

Gleb L. Permyakov – Junior Research Fellow

Laboratory "Processing of Materials with Highly Concentrated Energy Sources", Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: gleb.permyakov@yandex.ru

Dmitry N. Trushnikov – Dr.Sci. (Eng.), Professor

Department of Welding, Metrology and Materials Engineering, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: trdimitr@yandex.ru

Maksim R. Mindibaev – Bachelor's Degree Student

Department of Welding, Metrology and Materials Engineering, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: max.mindibaevv@gmail.com

Abstract. In spite of the rapid development of additive manufacturing technology, the industry has a demand for large parts and the most common processes, such as Selective Laser Melting or Laser Cladding, cannot satisfy this demand. In this regard, Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM) enables to produce large components,

such as those finding application in the aerospace industry. However, WAAM processes usually cause high residual stresses due to high deposition rates and excessive heat input. In addition, the mechanical properties of the clad metal are significantly affected by porosity and poor microstructure. In-process work hardening, such as sur-

face work hardening through highly dynamic impacts (also known as forging), can help refine the structure, lower the porosity and residual stresses thus benefiting the properties of clad metal. This paper describes an experimental study that looked at the mechanical properties of aluminium specimens produced by multilayer surfacing in different temperature cycles with or without forging. The results of the mechanical tests are also presented. It was found that forging had an impact on the mechanical properties of the aluminum alloy 5056 specimens.

Keywords: Additive manufacturing, multilayer surfacing, cold metal transfer, CMT, aluminium, aluminum alloy 5056, work hardening, impact, mechanical properties, tensile properties, toughness, wire arc additive manufacturing, WAAM, arc welding.

This research was funded by the Government of the Perm Territory under the Agreement S-26/787 dated 21/12/2017 (Understanding the current status of the problem) and by the Russian Foundation for Basic Research under the Project No. 18-08-01016 A (Carrying out experimental studies).

References

1. Wu Binta; Pan Zengxi; Ding Donghong; Cuiuri Dominic; Li Huijun; Xu Jing; Norrish John, A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement, JOURNAL OF MANUFACTURING PROCESSES 35, 2018, pp. 127–139.
2. Donghong Ding, Zengxi Pan *, Stephen van Duin, Huijun Li and Chen Shen. Fabricating Superior NiAl Bronze Components through Wire Arc Additive Manufacturing. Materials 2016, 9, 652.
3. Iván Tabernero, Amagoia Paskual, Pedro Álvarez, Alfredo Suárez. Study on Arc Welding processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing. 19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, 23–27 April 2018, Bilbao, Spain. Eng. 68, 2018, pp. 358–362.
4. Lockett, Helen; Ding, Jialuo; Williams, Stewart and Martina, Filomeno (2017). Design for Wire + Arc Additive Manufacture: design rules and build orientation selection. Journal of Engineering Design, 28(7-9) pp. 568–598.
5. E.M. Ryan, T.J. Sabin, J.F. Watts, M.J. Whiting. The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy 2319. Journal of Materials Processing Technology. 262, 2018, pp. 577–584.
6. Zeqi Hu, Xunpeng Qin, Tan Shao. Welding Thermal Simulation and Metallurgical Characteristics Analysis in WAAM for 5CrNiMo Hot Forging Die. International Conference on the Technology of Plasticity, ICTP 2017, 17–22 September 2017, Cambridge, United Kingdom, vol 207, 2017, pp 2203–2208.
7. J Bai et al. Porosity evolution in additively manufactured aluminium alloy during high temperature exposure. 2017 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 167 012045.
8. Markus Hirtler, Angelika Jedynak, Benjamin Sydow, Alexander Svidnov, and Markus Bambach. Investigation of microstructure and hardness of a rib geometry produced by metal forming and wire-arc additive manufacturing. MATEC Web of Conferences 190, 02005, 2018, ICNFT 2018.
9. Zhizhuang Hao, Sansan Ao, Yangchuan Cai, Wei Zhang and Zhen Luo. Formation of SUS304/Aluminum Alloys Using Wire and Arc Additive Manufacturing. Metals 2018, 8, 595.
10. Z D Ni, B L Dong, S B Lin, C L Yang, C L Fan, J X Shi. Numerical Analysis on Stress Evolution During GTA-Additive Manufacturing of Thin-Walled Aluminum Alloys. IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series 1063, 2018 012083.
11. Qianru Wu, Jiping Lu, Changmeng Liu *, Hongli Fan, Xuezhi Shi, Jie Fu and Shuyuan Ma. Effect of Molten Pool Size on Microstructure and Tensile Properties of Wire Arc Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Alloy. Materials 2017, 10, 749.
12. Anthony R. McAndrew, Marta Alvarez Rosales, Paul A. Colegrove, Jan R. Hönnige, Alistair Ho, Romain Fayolle, Kamal Eytayo, Ioan Stan, Punyawee Sukrongpan, Antoine Crochemore, Zsolt Pinter. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire-arc additively manufactured features for microstructure refinement. Additive Manufacturing 21, 2018, 340–349.
13. J. Donoghue, A.A. Antony, F. Martina, P.A. Colegrove, S.W. Williams, P.B. Prangnell. The effectiveness of combining rolling deformation with Wire-Arc Additive Manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V. Materials Characterization, 2016, vol. 114, pp. 103–114.
14. Sapozhnikov S.B., Zagrebnyi S.S., Shakirov A.A. Relaxation of welding stresses through severe plastic deformation. Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye [Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering Industry], 2013, no. 13 (2), pp. 81–86. (In Russ.)
15. Baoqiang Cong, Zewu Qi, Bojin Qi, Hongye Sun, Gang Zhao and Jialuo Ding. A Comparative Study of Additively Manufactured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy Using Cold Metal Transfer Process. Applied Sciences. 2017, 7, 275.
16. Jie Fu, Kun Qiu, Lin Gong, Changmeng Liu, Qianru Wu, Jiping Lu, Hongli Fan. Effect of Tool-Path on Morphology and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing. MATEC Web of Conferences 128, 05009, 2017, EITCE 2017.
17. X Zhang, F Martina, J Ding, X Wang and SW Williams. Fracture toughness and fatigue crack growth rate properties in wire-arc additive manufactured Ti-6Al-4V. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2017, 40, 790–803.

Received 27/06/19

Accepted 29/07/19

Образец для цитирования

Исследование влияния деформационного упрочнения на механические свойства образцов из сплава AMr5, полученных способом многослойной наплавки / Карташев М.Ф., Пермяков Г.Л., Трушников Д.Н., Миндибаев М.Р. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17. №3. С. 38–45. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-38-45>

For citation

Kartashev M.F., Permyakov G.L., Trushnikov D.N., Mindibaev M.R. Understanding the Effect of Work Hardening on the Mechanical Properties of Aluminum Alloy 5056 Specimens Produced by Multilayer Surfacing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 38–45. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-38-45>