

УДК 621.791

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-6-22-30

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И ТЕРМООБРАБОТКИ ПРИ МНОГОСЛОЙНОЙ НАПЛАВКЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПОРИСТОСТЬ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1580

Изучено влияние деформационного воздействия и термообработки на пористость и механические свойства изделий из магний-скандий содержащих алюминиевых сплавов. Исследовано дополнительное использование классической и ступенчатой термообработки после применения поверх-

ностного деформационного упрочнения, что значительно улучшило механические свойства деталей.

Ключевые слова: аддитивные технологии, многослойная наплавка, алюминий, деформационное упрочнение, ударное воздействие, термообработка, пористость, дуговая сварка.

M.F. Kartashev, D.O.Panov, M.R. Mindibaev, G.L. Permyakov, D.N. Trushnikov

EFFECT RESEARCH OF SURFACE DEFORMATION IMPACT AND THERMAL TREATMENT AT MULTI-LAYER WELD DEPOSITION UPON MECHANICAL PROPERTIES AND POROSITY OF ALUMINUM ALLOY 1580

The experimental research of mechanical properties and porosity of samples made of experimental high-strength magnesium-scandium aluminum alloy 1580 obtained through the method of multi-layer weld deposition including the application of deformation strengthening and also the further thermal treatment is carried out.

There is investigated the impact of layer-by-layer deformation strengthening with the further thermal treatment upon mechanical properties and porosity of the samples of experimental high-strength aluminum alloy 1580 having magnesium-scandium during multi-layer weld deposition. There are shown the values of mechanical properties and porosity of samples subject to modes of deformation strengthening and thermal treatment. A possibility of the impact of deformation effect and thermal treatment upon porosity and me-

chanical properties of products made of aluminum alloys containing magnesium-scandium obtained during multi-layer SMT weld deposition is checked up.

According to the results of the investigation there are drawn conclusions: it is determined that for porosity decrease in metal deposited there are required higher values of efforts of the deformation impact and a weld deposition mode selection excluding product over-heating influencing porosity of metal deposited; thermal treatment impact upon porosity of the metal deposited is not defined; the samples obtained with the use of deformation impact and long annealing with the duration more than six hours have higher mechanical properties.

Key words: additive technologies, multi-layer weld deposition, aluminum, deformation strengthening, impact effect, thermal treatment, porosity, arc welding.

Введение

Аддитивное производство – это новая группа технологий, с помощью которых изделия получают путем послойного нанесения материала. Этот подход рассматривается как альтернативный и более экономичный процесс для производства металлических изделий за счет повышенной производительности и меньшей траты материалов [1]. Существует множество процессов для аддитивного производства изделий, каждый из которых используется для определенной задачи [2-7]. В сравнении с процессами, основанными на спека-

нии металлического порошка, в которых в качестве источника энергии используют лазерный луч или электронный луч, волоочно-дуговая наплавка (WAAM) преимущественно используется для производства крупногабаритных изделий. Это возможно благодаря высокой скорости наплавки, низкой стоимости производства и оборудования, а также высокой гибкости и масштабируемости производства [4, 7, 8]. В аэрокосмической и судостроительной отраслях широко используются высокопрочные алюминиевые сплавы, поэтому

особо перспективным направлением является внедрение проволочно-дугового аддитивного производства именно алюминиевых материалов [9]. Алюминиевые изделия, полученные методом проволочно-дуговой наплавки, весьма часто имеют ряд недостатков: неблагоприятную дендритную структуру, остаточные напряжения и высокую пористость [10, 11, 12].

В результате влияния приведенных выше негативных факторов изделия, полученных методом проволочно-дугового аддитивного производства, имеют более низ-

Материалы, методика

В качестве материала присадочной проволоки использовался алюминиевый сплав 1580 – экспериментальный высокопрочный магний-скандий, содержащий алюминиевый сплав, разработанный российской компанией «РУСАЛ» в качестве альтернативы высокопрочному деформируемому алюминиевому сплаву 01570 системы $Al-Mg-Sc$ и разработанному Всероссийским институтом легких сплавов (ВИЛС) в 70-х гг. прошлого столетия [18]. Сплав 01570 удовлетворяет требованиям

кие по сравнению со стандартными изделиями механические свойства [13]. Одним из путей борьбы с этими негативными факторами является послойное деформационное воздействие (проковка) изделия в процессе многослойной наплавки в tandem с последующей термообработкой [14, 15, 16, 17]. В работе приведено исследование влияния деформационного воздействия (проковки) и термообработки на механические свойства наплавленных образцов.

авиационно-космической промышленности, обладает высокой коррозионной стойкостью, прочностью и хорошей свариваемостью. Компания «РУСАЛ» предполагает, что при производстве деталей методом проволочно-дуговой наплавки экспериментальный сплав 1580 будет соответствовать свойствам сплава 1570, но при этом иметь меньшую себестоимость производства за счет измененного химического состава. Химический состав обоих сплавов представлен в табл.1.

Таблица 1

Химический состав алюминиевых сплавов 1570 и 1580

Сплав	Массовая доля элементов, мас. %										
	Mg	Mn	Sc	Zr	Cr	Zn	Ti	Si	Fe	Прочие	Al
1570	5,3... 6,3	0,2... 0,6	0,17... 0,35	0,05... 0,15	-	-	0,01... 0,05	0,2	0,3	0,101	Основа
1580	4,815	0,515	0,079	0,115	0,156	0,205	-	-	0,179	0,086	Основа

Для наплавки использовано оборудование: робот *Fanuc Arc Mate 100iC*, контроллер *Fanuc R-30iA*, источник *Fronius TransPuls Synergic 5000 CMT*. Для послойного деформационного воздействия использован ударно пневматический молот *Sumake ST-M3009/H*. Для термообработки образцов использована лабораторная печь ПЛ 10/12,5. Микрошлифы для определения пористости наплавленных образцов изготовлены на шлифовально-полировальном станке *Top Tech* серии *Plato-NA* модель *FS-V*. Изображения микрошлифов для определения пористости получены с помощью светового инвертированного микроскопа *OlympusGX 51* при увеличении до 1000 крат и программного обеспечения *Olympus*

Stream Motion 1.8. Расчет процентного содержания пор произведен с помощью анализатора изображений *SIAMS 700*. Для проведения механических испытаний из наплавленных образцов изготовлены плоские образцы под механические испытания на растяжение (ГОСТ 1497-84), тип образца – 2. Испытания на растяжение проводились на машине для испытаний конструкционных материалов УТС-110М.

Всего исследовано 5 режимов наплавки заготовок:

- образцы без термообработки, без проковки;
- образцы с термообработкой 360° на 3 часа, без проковки;

- образцы с термообработкой 350 ° на 4 часа и 325 ° на 3 часа, без проковки;
- образцы с термообработкой 360 ° на 3 часа, с проковкой;
- образцы с термообработкой 350 ° на 4 часа и 325 на 3 часа, с проковкой.

Каждый образец был наплавлен в количестве трех штук для ограничения статистического разброса. Первый образец является контрольным – без применения проковки и термообработки. Он используется для того, чтобы можно было наглядно показать достоинства проковки и термообработки с точки зрения получения более высоких механических свойств наплаваемых изделий. Образцы 2 и 4 наплавлены для контроля влияния проковки при использовании термообработки. Образцы 3 и 5 наплавлены для контроля влияния проковки при использовании ступенчатой

термообработки, а также для сравнения влияния ступенчатой и классической термообработки.

Геометрические параметры наплаваемых образцов подобраны с точки зрения возможности изготовления из них образцов под механические испытания. Наплавленные образцы имеют следующие геометрические характеристики: высота – 25 мм, ширина – 15 мм, длина – 140 мм. На рис. 1 представлена стратегия заполнения для наплавки образцов. По предварительным исследованиям было решено, что подобная стратегия является наиболее эффективной с точки зрения производительности, конечной геометрии и структуры наплавленного металла [19, 20]. На рис. 2 приведен внешний вид наплавленных образцов.

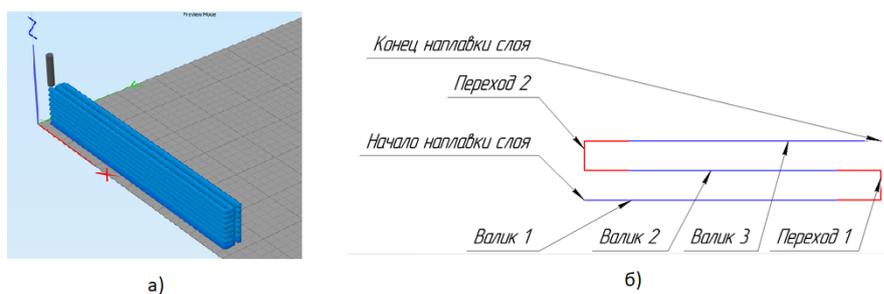


Рис. 1. Стратегия заполнения: а - всего образца; б - слоя.

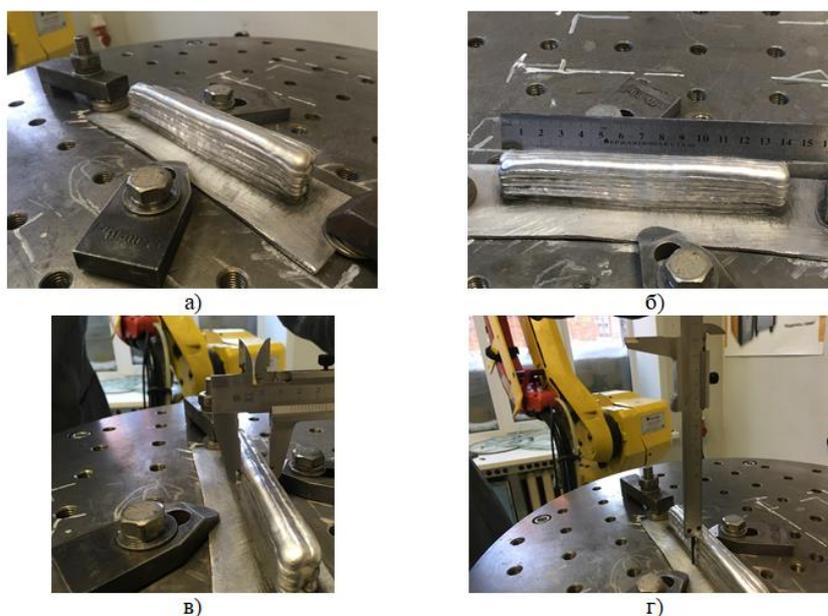


Рис. 2. Внешний вид (а) и геометрические характеристики наплавленных образцов: б - длина 140 мм; в - ширина 15 мм; г - высота 25 мм.

По результатам предварительных экспериментальных исследований были подобраны режимы наплавки, позволяющие получить необходимую геометрию наплавляемых образцов. Деформационное воздействие осуществлялось следующим образом: во время межслойной паузы, сразу непосредственно после наплавки слоя производится его деформационное воздействие в горячем состоянии при температуре выше 300 °С, что обеспечивает высокую пластичность и эффективность проковки наплавляемого материала. Время межслойной паузы составляет около 60 секунд: за это время обеспечивается охлаждение наплавляемого изделия до 70 °С перед наплавкой следующего слоя и снижается значение сварочных деформаций.

Режимы деформационного воздействия подобраны по предварительным исследованиям влияния деформационного упрочнения на механические свойства об-

разцов из сплава АМг5 и включают в себя такие параметры, как сила удара (7,1 Дж) и количество ударов в минуту (3200) [21]. В проведенном исследовании оценивалось влияние наличия или отсутствия деформационного упрочнения на свойства наплавляемого материала, поэтому варьировалось только два уровня: наличие либо отсутствие деформационного упрочнения.

Режимы последующей термообработки выбраны, исходя из существующих рекомендаций [22-26]. Согласно опубликованным научным данным, образование твердого раствора $Al3Sc$ происходит при температурах отжига. Образующиеся в этих условиях частицы $Al3Sc$, с одной стороны, весьма дисперсные, а с другой - довольно эффективно замедляют рекристаллизацию при нагреве и дислокации при деформации материала. Это может улучшить прочностные свойства сплава.

Результаты и обсуждение

После наплавки и последующей термообработки из наплавленных образцов вырезаны и подготовлены микрошлифы

для определения пористости. В табл. 2 представлены результаты исследование пористости.

Таблица 2

Результаты исследования пористости

Образец, №	Объемное содержание пор, %	Средний размер пор, мм	Максимальный размер пор, мм	Количество пор на см ²
1	0,4	0,0392	0,2012	214
2	0,4	0,036	0,2639	240
3	0,5	0,0428	0,2722	234
4	0,8	0,0469	0,4094	211
5	0,3	0,0377	0,2325	160

По результатам исследования пористости выявлено, что наименьшую пористость имеет образец № 5 с проковкой и ступенчатой термообработкой. Наибольшую пористость имеет образец № 4 с проковкой и классической термообработкой. Таким образом, влияния проковки и термообработки на заданных режимах на пористость не выявлено. Предполагается, что для схлопывания пор требуется проводить проковку на более высоких режимах. Об этом также свидетельствуют результаты

исследований, где выявлены высокие степени деформации образцов при возрастающих нагрузках деформационного упрочнения [8]. В данном исследовании выявлено, что несмотря на отсутствие видимого влияния проковки и термообработки на объемное содержание, средний и максимальный размер пор в наплавленном металле при многослойной проволочно-дуговой наплавке алюминиевого сплава 1580 с помощью СМТ процесса средний размер пор не превышает 50 мкм. Такой же

результат по среднему размеру пор наблюдается и у авторов [10], изучающих пористость на иных режимах: СМТ-pulse и СМТ-advanced. В образце № 4 наблюдается значительное искажение результатов, что связано со случайным выбросом. Выявлено, что требуется более высокие значения усилия деформационного упрочнения и подбор режимов наплавки для влияния на пористость наплавленного материала.

После наплавки и последующей термообработки образцов проведены механические испытания на растяжение. Ниже результаты механических испытаний приведены в виде гистограмм (рис. 3–5), а также приведены механические свойства стандартных образцов и образцов, полученных с помощью плазменной наплавки [27, 28].

Из результатов механических испытаний видно, что образец № 1 (без проков-

ки и ТО) имеет наиболее низкие механические свойства. Образец № 2 (без проковки, 4 часа ТО) высокое относительное удлинение, при этом по остальным параметрам уступает следующим образцам. По сравнению с образцами № 1 и № 2 образец № 3 (без проковки, 7 часов ТО) имеет примерно одинаковые значения, но выбивается только относительное удлинение – у образца № 2 значение этого параметра намного выше. Свойства образца № 4 (с проковкой, 4 часа ТО) также незначительно выше, чем у предыдущих образцов. Наилучшие механические свойства имеет образец № 5 (с проковкой, 7 часов ТО).

При этом свойства образца № 5 существенно ниже свойств холодного проката из этого же сплава. При сравнении с плазменной наплавкой, образец № 5 уступает только в пределе текучести и относительном удлинении.

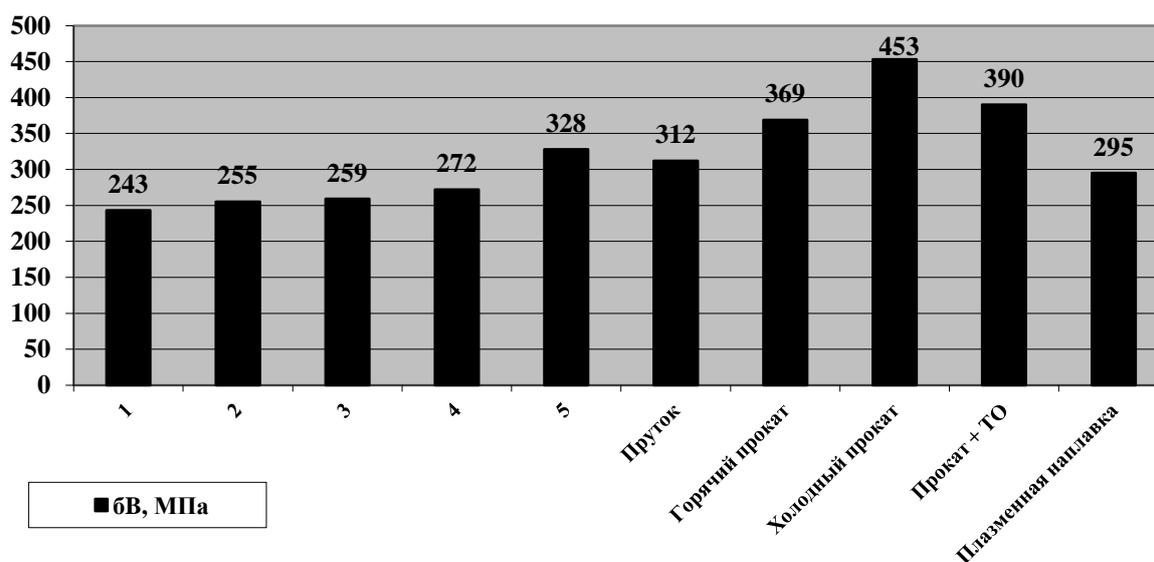


Рис. 3. Предел прочности наплавленных образцов и стандартных образцов

Выявлено, что применение деформационного и термического воздействия влияет на механические свойства, несмотря на низкую деформацию наплавленного металла. Предположим, что этот результат может быть обусловлен влиянием на микроструктуру. Для проверки этой гипотезы проведем металлографическое исследование микроструктуры наплавленных образцов.

При сравнении со стандартными материалами и с образцами, полученными плазменной наплавкой [28], выявлено, что образцы, полученные при многослойной СМТ наплавке, по прочностным свойствам соответствуют материалам литья и плазменной наплавки, но уступают деформированным материалам. По свойствам пластичности образцы, полученные при СМТ наплавке, значительно превосходят материалы литья, и холодного проката, слегка

превышают свойства деформированного материала с применением повышенных

температур, а уступают только материалам плазменной наплавки.

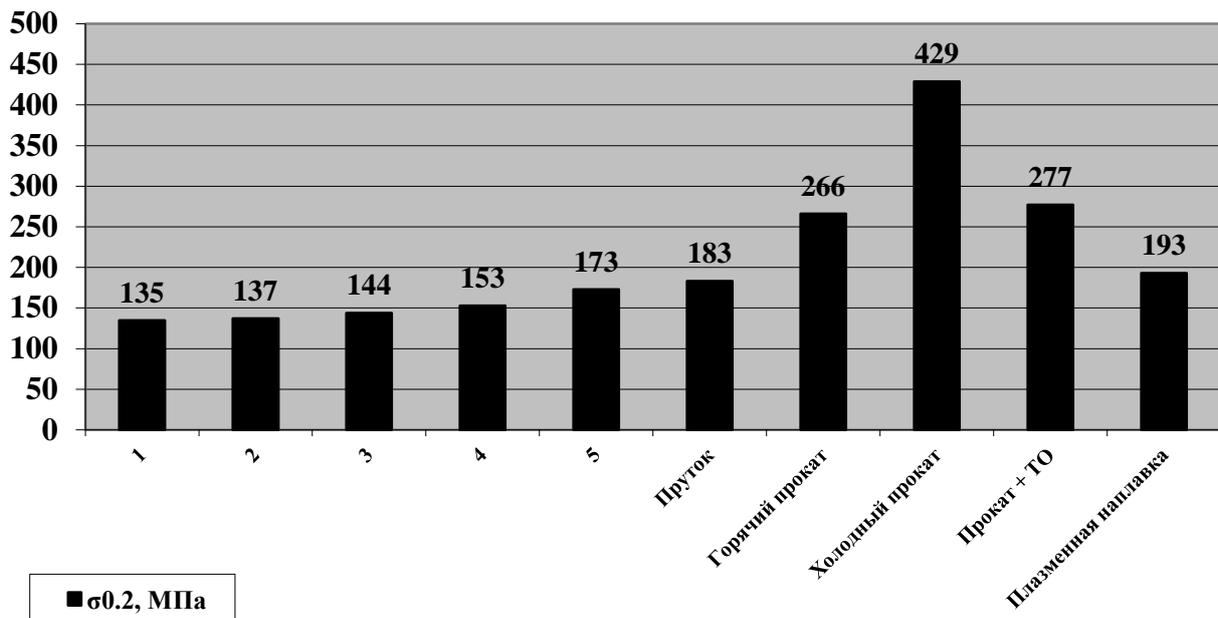


Рис. 4. Предел текучести наплавленных образцов и стандартных образцов

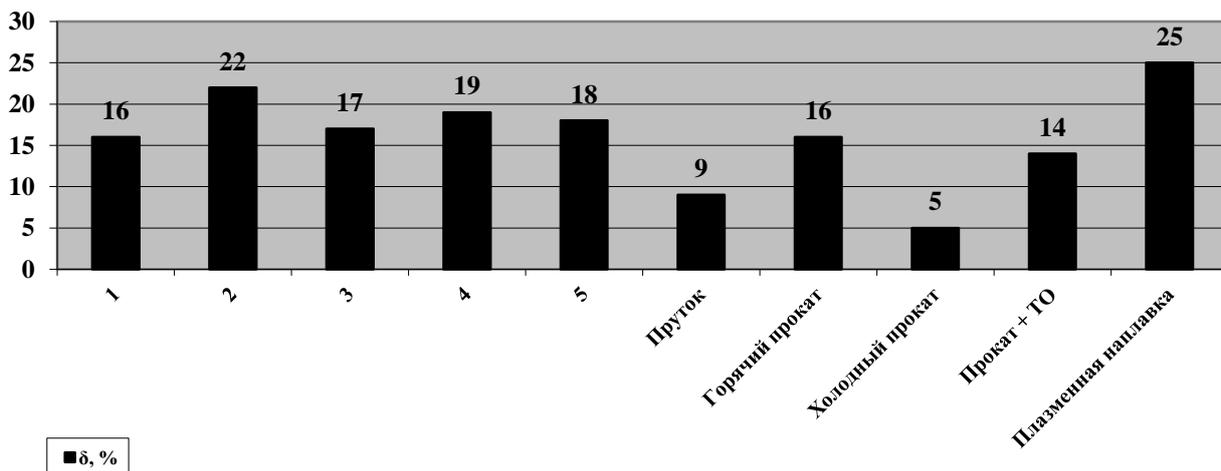


Рис. 5. Относительное удлинение наплавленных образцов и стандартных образцов

В этой связи целесообразно в дальнейшем проведение металлографического исследования микроструктуры наплавленного металла для проверки

гипотезы влияния послойного деформационного воздействия и термообработки на микроструктуру.

Выводы

1. Изучено влияние деформационного воздействия и термообработки на пористость и механические свойства изделий из магний-скандий содержащих алюминиевых сплавов, полученных при многослойной СМТ наплавке.

2. Выявлено, что для снижения пористости наплавленного металла требуются

более высокие значения усилия деформационного воздействия и подбор режимов наплавки, исключая перегрев изделия, который оказывает влияние на пористость наплавленного материала.

3. Влияния термообработки на пористость наплавленного металла не выявлено.

4. Более высокими механическими свойствами обладают образцы, полученные с применением деформационного воз-

действия и продолжительного отжига более 6 часов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках соглашения С-26/787 от 21.12.2017 и Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта №18-08-01016 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang F., Williams S.W., Colegrove P., Antony-samy A.A. Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V. *Metall. Mater. Trans. A* 2013. 44. 968–977.
2. Guo P., Zou B., Huang C., Gao H. Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition. *J. Mater. Process. Technol.* 2016. 240. 12–22.
3. Greitemeier D., Palm F., Syassen F., Melz T. Fatigue performance of additive manufactured TiAl6V4 using electron and laser beam melting. *Int. J. Fatigue.* 2016. 94. 211–217.
4. Williams S.W., Martina F., Addison A.C., Ding J., Pardal G., Colegrove P. Wire plus Arc Additive Manufacturing. *Mater. Sci. Technol.* 2016. 32. 641–647.
5. Xiong J., Lei Y., Chen H., Zhang G. Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition. *J. Mater. Process. Technol.* 2017. 240. 397–403.
6. Martina F., Mehnen J., Williams S.W., Colegrove P., Wang F. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. *J. Mater. Process. Technol.* 2012. 212. 1377–1386.
7. Szost B.A. et al., A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components. *Mater. Des.* 2016. 89. 559–567.
8. Gu J. et al., The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy. *Mater. Sci. Eng. A* 2016. 651. 18–26.
9. Starke E.A., Jr., Staley, J.T. Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Prog. Aerosp. Sci.* 1996. 32. 131–172.
10. Baoqiang Cong, et al., 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
11. Gu J., et al., Wire+Arc Additive Manufacturing of Aluminium. *Materials Processing Technology*, 2003. 135. 347–357.
12. Bai J., et al., Porosity evolution in additively manufactured aluminium alloy during high temperature exposure. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 167 (2017). 012045.
13. Hao Z., et al., Formation of SUS304/Aluminum Alloys Using Wire and Arc Additive Manufacturing. *Metals*. 2018. 8. 595.
14. Donoghue J., et al., 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. 114. 103–114.
15. Hönnige J.R., et al., Control of residual stress and distortion in aluminium wire + arc additive manufacture with rolling. *Additive Manufacturing* 22 (2018). 775–783.
16. Horgar A., et al., Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire. *Journal of Materials Processing Tech.* 2018. 259. 68–74.
17. Gu J., et al., The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology* 2016. 230. 26–34.
18. Бронз А.В. [и др.]. Сплав 1570С - Материал для герметичных конструкций перспективных многогоразовых изделий РКК «Энергия» // *Космическая техника и технологии*. 2014. Т. 7. № 4. С. 62.
19. Fu J., et al., Effect of Tool-Path on Morphology and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing. *MATEC Web of Conferences*. 2017. 128.
20. Zhang X., et al., Fracture toughness and fatigue crack growth rate properties in wire+arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Fract Engng Mater Struct*, 2017. 40.790–803.
21. Карташев М.Ф. [и др.]. Исследование влияния деформационного упрочнения на механические свойства образцов из сплава АМг5, полученных способом многослойной наплавки // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2019. Т.17. №3. С.38–45.
22. Ковалёв Д.С., Шахов В.Н., Богданов В.В. Технологические особенности алюминиевых сплавов 1201 и 01570 // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2014. Т. 1. № 10.
23. Корягин Ю.Д., Ильин С.И. Особенности рекристаллизации деформируемых алюминий-магниевого сплавов со скандием // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy*. 2017. Т. 17. № 1.
24. Дриц М.Е. [и др.]. О механизме влияния скандия на повышение прочности и термической

- стабильности сплавов Al–Mg // ДАН СССР. Металлы. 1981. Т. 257. № 2. С. 353-356.
25. Филатов Ю.А., Елагин В.И., Захаров В.В. Промышленные сплавы на основе системы Al–Mg–Sc // Скандий 94: тез. докл. конф. М., 1994. С. 33
26. Дриц М.Е. [и др.]. Структура и свойства сплавов Al–Sc и Al–Mg–Sc. // Металлургия и металловедение цветных сплавов. М.: Наука, 1982. С. 213–223.
1. Wang F., Williams S.W., Colegrove P., Antony-samy A.A. Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V. *Metall. Mater. Trans. A* 2013. 44. 968–977.
2. Guo P., Zou B., Huang C., Gao H. Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition. *J. Mater. Process. Technol.* 2016. 240. 12–22.
3. Greitemeier D., Palm F., Syassen F., Melz T. Fatigue performance of additive manufactured TiAl6V4 using electron and laser beam melting. *Int. J. Fatigue.* 2016. 94. 211–217.
4. Williams S.W., Martina F., Addison A.C., Ding J., Pardal G., Colegrove P. Wire plus Arc Additive Manufacturing. *Mater. Sci. Technol.* 2016. 32. 641–647.
5. Xiong J., Lei Y., Chen H., Zhang G. Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition. *J. Mater. Process. Technol.* 2017. 240. 397–403.
6. Martina F., Mehnen J., Williams S.W., Colegrove P., Wang F. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti–6Al–4V. *J. Mater. Process. Technol.* 2012. 212. 1377–1386.
7. Szost B.A. et al., A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti–6Al–4V components. *Mater. Des.* 2016. 89. 559–567.
8. Gu J. et al., The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al–6.3Cu alloy. *Mater. Sci. Eng. A* 2016. 651. 18–26.
9. Starke E.A., Jr., Staley, J.T. Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Prog. Aerosp. Sci.* 1996. 32. 131–172.
10. Baoqiang Cong, et al., 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
11. Gu J., et al., Wire+Arc Additive Manufacturing of Aluminium. *Materials Processing Technology*, 2003. 135. 347-357.
12. Bai J., et al., Porosity evolution in additively manufactured aluminium alloy during high temperature exposure. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 167 (2017). 012045.
13. Hao, Z., et al., Formation of SUS304/Aluminum Alloys Using Wire and Arc Additive Manufacturing. *Metals*. 2018. 8. 595.
14. Donoghue J., et al., 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. 114. 103-114.
15. Hönnige J.R., et al., Control of residual stress and distortion in aluminium wire + arc additive manufacture with rolling. *Additive Manufacturing* 22 (2018). 775–783.
16. Horgar A., et al., Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire. *Journal of Materials Processing Tech.* 2018. 259. 68–74.
17. Gu J., et al., The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology* 2016. 230. 26–34.
18. Bronz A.V. [et al.]. Alloy 1570S – Material for sealed structures of long-range shuttle products of Aerospace Company “Energy” // *Space Engineering and Technologies*. 2014. Vol.7. No.4. pp. 62.
19. Fu J., et al., Effect of Tool-Path on Morphology and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing. *MATEC Web of Conferences*. 2017. 128.
20. Zhang X., et al., Fracture toughness and fatigue crack growth rate properties in wire+arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Fract Engng Mater Struct*, 2017. 40.790–803.
21. Kartashev M.F. [et al.]. Investigation of deformation strengthening impact upon mechanical properties of AMg5 alloy samples obtained by multi-layer weld deposition // *Bulletin of Nosov State Technical University*. 2019. Vol.17. No.3. pp. 38-45.
22. Kovalyov D.S., Shakhov V.N., Bogdanov V.V. Technological peculiarities of aluminum alloys 1201 and 01570 // *Urgent Problems of Aircraft and Cosmonautics*. 2014. Vol.1. No. 10.
23. Koryagin Yu.D., Iliyn S.I. Recrystallization peculiarities of deformed aluminum-magnesium alloys with scandium // *Bulletin of South-Urals State University. Series: Metallurgy*. 2017. Vol. 17. No.1.

24. Drits M.E. [et al.]. On mechanism of scandium impact upon increase of strength and thermal stability of alloys Al-Mg // *DAS of the USSR. Metals*. 1981. Vol. 257. No.2. pp. 353-356.
25. Filatov Yu.A., Elagin V.I., Zakharov V.V. Industrial alloys based on Al-Mg-Sc system // *Scandium 94: Proceedings of the Conf.* M.: 1994. pp. 33.
26. Drits M.E. [et al.]. Structure and properties of Al-Sc and Al-Mg-Sc alloys // *Metallurgy and Non-*

Ferrous Alloy Science. M.: Science, 1982. pp. 213-223.

27. Sidelnikov S.B. [et al.]. Mechanical properties investigation of aluminum-scandium alloy half-finished products // *Proceedings of Tula State University*. 2017. Vol.11. No.1. pp. 147-153.
28. Shchitsyn Yu.D. [et al.]. Plasma weld deposition use for aluminum alloy billet additive formation // *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University*. 2019. Vol.21. No.2. pp. 63-72.

Ссылка для цитирования:

Карташев М.Ф., Панов Д.О., Миндибаев М.Р., Пермьяков Г.Л., Трушников Д.Н. Исследование влияния поверхностного деформационного воздействия и термообработки при многослойной наплавке на механические свойства и пористость алюминиевого сплава 1580 // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 6. С. 22-30. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-6-22-30.

Статья поступила в редакцию 20.02.20.

Рецензент: д.т.н., профессор Муромского филиала (института) Владимирского государственного университета

Соловьев Д.Л.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 25.05.20.

Сведения об авторах:

Карташев Максим Федорович, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, тел. +7(919)481-18-57, e-mail: goncharsk@mail.ru.

Панов Дмитрий Олегович, к.т.н., Пермский национальный исследовательский политехнический университет, тел.: +7(905)860-56-97, e-mail: dimmak-panov@mail.ru.

Миндибаев Максим Ринатович, бакалавр, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, тел. +7(952)334-37-78, e-mail: max.mindibaevv@gmail.com.

Kartashev Maxim Fedorovich, Post graduate student, Perm National Research Polytechnic University, phone: +7(919) 481-18-57, e-mail: goncharsk@mail.ru.

Panov Dmitry Olegovich, Can. Sc. Tech., Perm National Research Polytechnic University, phone: +7(905) 860-56-97, e-mail: dimmak-panov@mail.ru.

Mindibaev Maxim Renatovich, Bachelor, Perm National Research Polytechnic University, phone: +7(952)334-37-78, e-mail: max.mindibaevv@gmail.com.

Пермьяков Глеб Львович, к.т.н., мл. науч. сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Обработка материалов высококонцентрированными источниками энергии», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, тел.: +7(964)185-04-75, e-mail: gleb.permyakov@yandex.ru.

Трушников Дмитрий Николаевич, д.т.н., профессор кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, тел.: +7(919)478-50-31, e-mail: trdimitr@yandex.ru.

Permyakov Gleb Lvovich, Can. Sc. Tech., Junior scientific assistant of the Research Lab. "Material Processing with High-concentrated Power Sources", Perm National Research Polytechnic University, phone: +(964) 185-04-75, e-mail: gleb.permyakov@yandex.ru.

Trushnikov Dmitry Nikolaevich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. "Welding Production, Metrology and Material Technology", Perm National Research Polytechnic University, phone: +7(919) 478-50-31, e-mail: trdimitr@yandex.ru.