МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.791

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-2-38-46

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО МАГНИЙСОДЕРЖАЩЕГО СПЛАВА 1580, ПОЛУЧЕННЫХ СПОСОБОМ МНОГОСЛОЙНОЙ НАПЛАВКИ

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

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация. Технология проволоочно-дугового аддитивного производства в международном сообществе известна как Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) – это новый метод непосредственного изготовления компонентов путем плавления и нанесения слоя присадочной проволоки слой за слоем с дугой в качестве источника питания. Алюминиевый сплав 1580, экспериментальный магнийсодержащий сплав с введением 0,1% скандия в качестве легирующего элемента для повышения прочности, имеет широкие перспективы применения в аэрокосмической промышленности благодаря высокому соотношению прочности и веса и хорошим механическим свойствам. Использование технологии WAAM для изготовления изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов привлекло внимание аэрокосмической промышленности. Однако металл, полученный с помощью процесса дуговой наплавки, имеет высокие остаточные напряжения, неблагоприятную микроструктуру, приводящие к низким механическим свойствам. Доказано, что такая термообработка, как отжиг повышает свойства многослойно наплавленных изделий из алюминиевого сплава Д16. Алюминиевый сплав 1580 также можно упрочнить путем термообработки, и его свойства варьируются в зависимости от температуры и времени обработки. В этом исследовании с помощью WAAM были изготовлены тонкостенные образцы из алюминиевого сплава 1580. Для термообработки образцов был проведен отжиг с различными температурами и временем. Исследована микроструктура и механические свойства образцов, отожженных в различных условиях. Представлены результаты механических испытаний образцов. Обнаружено влияние термообработки на микроструктуру и механические свойства образцов из сплава 1580.

Ключевые слова: аддитивные технологии, многослойная наплавка, Cold Metal Transfer, алюминий, скандий, термообработка, отжиг, механические свойства, прочность при растяжении, микроструктура, проволоочно-дуговая послойная наплавка, Wire Arc Additive Manufacturing, дуговая сварка.

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).

© Карташев М.Ф., Юрченко А.Н., Гребенкин Р.Д., Миндибаев М.Р., Пермяков Г.Л., Трушников Д.Н., 2020

Для цитирования

Исследование влияния термообработки на микроструктуру и механические свойства образцов из алюминиевого магнийсодержащего сплава 1580, полученных способом многослойной наплавки / Карташев М.Ф., Юрченко А.Н., Гребенкин Р.Д., Миндибаев М.Р., Пермяков Г.Л., Трушников Д.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №2. С. 38–46. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-38-46>

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDYING THE HEAT TREATMENT EFFECT ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM MAGNESIUM-CONTAINING ALLOY 1580 SAMPLES PRODUCED BY A MULTILAYER SURFACING METHOD

Maxim F. Kartashev, Alexander N. Yurchenko, Roman D. Grebenkin,
Maxim R. Mindibaev, Gleb L. Permyakov, Dmitry N. Trushnikov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. The process of wire-arc additive manufacturing (WAAM) is a new method for the direct manufacturing of components by melting and applying a layer of filler wire layer by layer with an arc as a power source. Aluminum alloy 1580, an experimental magnesium-containing alloy, containing 0.1% of scandium introduced as an alloying element to significantly increase strength, has wide prospects for its use in the aerospace industry due to its high strength-to-weight ratio and good mechanical properties. The use of WAAM technology for manufacturing products from high-strength aluminum alloys attracted the attention of the aerospace industry. However, metal produced by the arc welding process has high residual stresses, an unfavorable microstructure leading to low mechanical properties. It is proved that heat treatment, such as annealing, improves the properties of WAAM Al-6.3Cu components. Aluminum alloy 1580 can also be hardened by heat treatment, and its properties vary depending on the processing temperature and time. In this study, thin-walled aluminum alloy 1580 samples were manufactured using WAAM. To carry out heat treatment of the samples, they were annealed at various temperatures and time. The authors studied a microstructure and mechanical properties of the samples annealed under various conditions. The paper contains the results of mechanical testing of the samples. It is found that heat treatment influences the microstructure and mechanical properties of the alloy 1580 samples.

Keywords: additive technologies, multilayer surfacing, cold metal transfer, aluminum, scandium, heat treatment, annealing, mechanical properties, tensile properties, microstructure, wire arc additive manufacturing, arc welding.

This research was funded by the Government of Perm Krai as part of Agreement C-26/787 dated 21.12.2017 (studying the current state of the issue) and the Russian Foundation for Basic Research as part of Project No. 18-08-01016 A (experimental research).

For citation

Kartashev M.F., Yurchenko A.N., Grebenkin R.D., Mindibaev M.R., Permyakov G.L., Trushnikov D.N. Studying the Heat Treatment Effect on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Magnesium-Containing Alloy 1580 Samples Produced by a Multilayer Surfacing Method. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novosibirsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 2, pp. 38–46. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-38-46>

Введение

Наплавка габаритных изделий весом более 10 кг из титана, алюминия, стали и других металлов возможна с использованием проволоночн-дуговых аддитивных технологий. Эти технологии используют сварочную дугу и металлическую проволоку в качестве присадочного материала для аддитивного производства. Высокие скорости наплавки, низкие затраты на материалы и оборудование, а также хорошая структурная целостность делают эти технологии подходящим кандидатом для замены существующих методов изготовления из цельной заготовки или крупной поковки, особенно в отношении деталей низкой и средней сложности [1–3]. В последние несколько лет представители аэрокосмической промышленности проявили интерес к технологии WAAM для производства деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов, таких

как воздухопроводы, силовые установки, корпуса турбин, кронштейны, криогенные цистерны, фюзеляжи или оболочки для космических аппаратов и т.д. [4,5]. В этом направлении руководство российской объединённой компании «РУСАЛ», одного из крупнейших в мире производителей алюминия, также заинтересовано в производстве инновационных высокопрочных алюминиевых сплавов для аэрокосмической промышленности. Один из таких сплавов, алюминиевый сплав 1580, экспериментальный магний-содержащий сплав с введением 0,1% скандия и 0,15% циркония в качестве легирующих элементов для повышения прочности, имеет широкие перспективы применения в аэрокосмической промышленности благодаря высокому соотношению прочности и веса и хорошим механическим свойствам [6–9]. Однако, для сравнения, аддитивно изготовленные сплавы обладают гораздо более низкими прочностными характе-

ристиками в состоянии непосредственно после наплавки по сравнению с материалами поковки или фрезерования, причиной чего являются высокие остаточные напряжения, неблагоприятная микроструктура. Для большинства промышленных применений прочность наплавленных алюминиевых сплавов необходимо повысить до уровня, аналогичного деформируемым сплавам. Известна возможность повышения механических свойств алюминиевых WAAM изделий с помощью отжига [10,11].

Производителем заявлено, что алюминиевый сплав 1580 также можно упрочнить путем термообработки (ТО), и его свойства варьируются в зависимости от температуры и времени обработки. В этом исследовании была поставлена задача с помощью WAAM изготовить тонкостенные образцы из алюминиевого сплава 1580, провести их отжиг, исследовать микроструктуру и механические свойства образцов, отожженных в различных условиях, определить влияние ТО на микроструктуру и механические свойства образцов из сплава 1580.

Материалы и методы исследования

В качестве исследуемого материала выбран сплав 1580. Химический состав сплава приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав исследуемого сплава
Table 1. Chemical composition of the alloy under study

Содержание элементов, масс. %										
Al	Mg	Mn	Zn	Fe	Cr	Zr	Cu	S	Si	Sc
Основа	5,78	0,5	0,2	0,19	0,2	0,13	0,03	0,14	0,03	0,06

Многослойная наплавка проводилась с помощью технологии холодного переноса металла, в международном сообществе известного как CMT (Cold Metal Transfer). Процесс CMT позволяет производить наплавку с высокой производительностью при минимальном тепловложении в основной металл [12]. Источник питания Gro-nius Trans Puls Synergic 5000 CMT. Робот для наплавки Fanuc Arc Mate 100iC.

Режимы наплавки для разных слоев наплавленного образца указаны в табл. 2. Остальные, неизменяемые режимы наплавки: скорость наплавки 50 см/мин, защитный газ аргон газообразный, высшего сорта по ГОСТ 10157-79 (99,993%), расход защитного газа 10 л/мин, время наплавки одного слоя 17 с, время наплавки одного образца 135 с.

Таблица 2. Режимы по слоям
Table 2. Schedules by layers

Слой	Скорость подачи проволоки, м/мин	Ток дуги, А	Напряжение дуги, В	Мощность дуги, Дж
1	6,0	97,0	12,0	1164,0
2,3	3,5	72,0	10,0	720,0
4-8	3,0	59,0	9,5	560,5

Стратегия заполнения, используемая для наплавки образцов, представлена на рис. 1: образцы наплавлены в 1 валик в слое, 8 слоев, начало последующего слоя находится в месте окончания предыдущего слоя. Такая стратегия заполнения разработана для получения наплавленного образца требуемых геометрических свойств, указанных на рис. 2, 6. Из наплавленного образца с заданными габаритами возможно изготовление, посредством фрезерования, образцов под механические испытания на растяжение.

Рис. 1. Стратегия заполнения при наплавке образцов, главный вид

Fig. 1. Strategy of filling, when surfacing the samples, main view

Внешний вид и габариты наплавленного образца представлены на рис. 2.

Так как для сплава 1580, являющегося экспериментальным, а также для изделий, получаемых методом проволоочно-дуговой многослойной наплавки, отсутствуют рекомендуемые режимы ТО, была поставлена задача найти оптимальный режим ТО с точки зрения достижения оптимальной микроструктуры и наивысших механических свойств.

С этой целью были подобраны режимы ТО в диапазоне режимов, используемых для классических магнийсодержащих алюминиевых сплавов. Варьировались время и температура отжига. Термическая обработка проводилась в лабораторной печи с окислительной атмосферой типа

«Накал» при температурах 300, 330, 360 и 390°C с выдержками 1, 3 и 6 ч при каждой температуре.

а

б

Рис 2. Внешний вид (а), габариты (б) наплавляемых образцов

Fig. 2. External view (a), dimensions (b) of the samples to be surfaced

После проведения ТО была исследована микроструктура наплавленных образцов, для чего залили в Citopress-10 по 3–4 образца. Изготовление шлифов проведено на шлифовальном оборудовании Struers Tegramin-30. Приготовление микрошлифов проводили по стандартной методике на образцах, изготовленных из наплавляемых заготовок. В качестве травителя использовали реактив Keller (1 мл HF + 1,6 мл HCl + 2,5 мл HNO₃ + 95 мл дистиллированной воды). Микроструктуру образцов изучали до и после травления на световом инвертированном микроскопе Olympus GX 51, оснащенный программным комплексом Olympus Stream Motion 1.8, при увеличениях от 50 до 1000 крат.

Для проведения механических испытаний из наплавляемых и прошедших ТО заготовок вырезаны плоские образцы под механические испы-

тание на прочность при растяжении, удовлетворяющие условиям ГОСТ 1497-84 (прил. 3), плоские образцы с головками, тип I. На рис. 3 представлен эскиз образца под механические испытания.

Рис. 3. Эскиз образца под механические испытания на растяжение

Fig. 3. Sketch of the sample for tensile tests

Для испытаний на растяжение использовалась лабораторная разрывная машина Р-0,5, обеспечивающая испытание плоских металлических образцов по ГОСТ 1497, с наибольшей предельной нагрузкой 5 кН.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 5 представлена структура образца сплава 1580 в исходном состоянии. На поверхности образцов как в исходном, так и в термически обработанном состоянии присутствуют микропоры. На рис. 6 для примера приведена структура образца после отжига при температуре 390°C в течение 3 ч. В центральной части (рис. 6, в-д) наплавки, в отличие от верхней (рис. 6, е) и нижней (рис. 6, б) частей, наблюдается повышенная травимость, которая связана с многократным нагревом металла предыдущих слоев [7], что также замечено на всех остальных образцах.

Кроме того, в работе [11] отмечается эффект усиления направленного роста дендритов в тех областях, где травимость выше, что подтверждается настоящими исследованиями. Термическое циклирование в центральной части также приводит к усиленному образованию фаз типа $Al_3(Sc_{1-x},Zr_x)$. Повышение температуры отжига от 300 до 390°C или времени выдержки от 1 до 6 ч сопровождается увеличением доли фаз типа $Al_3(Sc_{1-x},Zr_x)$ и их коагуляцией.

На стыке слоев происходит активное выделение первичной β -фазы (Al_3Mg_2), которая располагается по границам зерен. Кроме того, возможно образование интерметаллидов $Al_3(Sc,Zr)$ или Al_3Sc .

Рис. 5. Структура сплава 1580: а – исходный образец; б – 300°C, 6 ч
Fig. 5. Structure of alloy 1580: a is an original sample; б is 300°C, 6 hours

Рис. 6. Структура алюминиевого сплава 1580 после отжига при температуре 390°C в течение 3 ч:
а – макроструктура; б-д – микроструктура в соответствующих местах
Fig. 6. Structure of aluminum alloy 1580 after annealing at 390°C for 3 hours: a is a macrostructure;
б-д is a microstructure in relevant areas

Зависимости механических свойств наплавленных образцов от режимов ТО представлены в виде графиков на рис. 7 и 8. Определены такие механические свойства, как относительное удлинение и предел прочности. Относительное

удлинение колеблется в пределах от 10 до 20%. Предел прочности испытанных образцов – от 290 до 330 МПа. Наивысшее значение предела прочности наблюдается после отжига при температуре 330°C в течение 6 ч.

а

б

Рис. 7. Графики зависимости предела прочности от режимов ТО: а – зависимость σ_B от температуры отжига при разных значениях времени отжига; б – зависимость σ_B от времени отжига при разных значениях температуры отжига; 0 – исходное состояние 307 МПа

Fig. 7. Ultimate tensile strength – heat treatment schedule dependence diagrams: а is relation between σ_B and annealing temperature at various annealing time; б is relation between σ_B and annealing time at various annealing temperatures; 0 is an original state, 307 МПа

а

б

Рис. 8. Графики зависимости относительного удлинения от режимов ТО: а – зависимость δ от температуры отжига при разных значениях времени отжига; б – зависимость δ от времени отжига при разных значениях температуры отжига; 0 – исходное состояние 17%

Fig. 8. Relative elongation – heat treatment schedule dependence diagrams: а is relation between δ and annealing temperature at various annealing time; б is relation between δ and annealing time at various annealing temperatures; 0 is an original state, 17%

Из графиков следует, что температура отжига 300°C является недостаточной для повышения прочности, но позволяет повысить пластичность наплавленного материала с 17% исходного состояния до 20%.

При отжиге наплавленных заготовок температура 330°C позволяет добиться максимальной прочности в 330 МПа, однако только при продолжительном времени отжига в 6 ч. Тогда сохраняются пластические свойства материала. Проводить отжиг 330°C при меньших значениях времени не имеет смысла, так как прочностные свойства либо падают, либо остаются теми же, что и в исходном состоянии, но при этом падают пластические свойства материала до 10%.

При температуре отжига 360°C можно наблюдать положительный эффект от ТО только при времени 1 ч, либо в интервале времени от 3 до 6 ч. При ТО в течение 1 ч значительно повышается пластичность материала до 20%. При большем времени отжига от 3 до 6 ч можно до-

биться комплексного улучшения свойств по прочности и по пластичности.

При температуре отжига 390°C не наблюдается положительного эффекта от ТО наплавленных слоев ни при какой продолжительности ТО.

Заключение

Выявлено, что СМТ-технология наплавки приводит к получению дендритной структуры, которая сохраняется и после отжига при различных температурах. Структура состоит из фаз типа $Al_3(Sc_{1-x}Zr_x)$, Al_3Mg_2 , $Al_3(Sc,Zr)$ или Al_3Sc .

Для повышения прочности изделий из сплава 1580, получаемых методом многослойной наплавки, целесообразно применять отжиг при температуре 330°C в течение 6 ч. Если более приоритетной целью ТО является повышение пластичности наплавленных изделий, то имеет место отжиг при температуре 360°C в диапазоне времени от 3 до 6 ч.

Список литературы

1. S. Williams, F. Martina, A. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove, Wire + arc additive manufacturing, J. Mater. Sci. Technol. 32 (2016) 641–647, <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>.
2. T. DebRoy, H. Wei, J. Zuback, T. Mukherjee, J. Elmer, J. Milewski, A. Beese, A. Wilson-Heid, A. Ded, W. Zhang, Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties, progress in materials, Science 92 (2018) 112–224, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>.
3. D. Ding, A. Pan, D. Criuri, H. Li, Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 81 (2015) 465–481, <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>.
4. Zewu Qi, Baoqiang Cong, Bojin Qi, Gang Zhao, Jialuo Ding, Properties of wire + arc additively manufactured 2024 aluminum alloy with different solution treatment temperature, Materials Letters, Volume 230, 2018, Pages 275–278, ISSN 0167-577X, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.07.144>.
5. P. Naga Raju, K. Srinivasa Rao, G.M. Reddy, M. Kamaraj, K. Prasad Rao, Mater. Sci. Eng. A 464 (2007) 192–201.
6. Baranov V. et al. Study of strength properties of semi-finished products from economically alloyed high-strength aluminum-scandium alloys for application in automobile transport and shipbuilding // Open Engineering. 2018. Vol. 8. No. 1. P. 69–76.
7. Щицын Ю. Д. и др. Использование плазменной наплавки для аддитивного формирования заготовок из алюминиевых сплавов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2019. Т. 21. № 2.
8. Белов Н. А., Алабин А. Н. Перспективные алюминиевые сплавы с добавками циркония и скандия // Цветные металлы. 2007. № 2. С. 99–106.
9. Белов Н. А., Алабин А. Н., Прохоров А. Ю. Влияние добавки циркония на прочность и электросопротивление холоднокатаных алюминиевых листов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2009. № 4. С. 42–47.
10. J. Gu, J. Ding, S. Williams, H. Gu, J. Bai, Y. Zhai, P. Ma, 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 651 (2016) 18–26.
11. J. Bai, C. Fan, S. Lin, C. Yang, B. Dong, Mechanical properties and fracture behaviors of GTA-additive manufactured 2219-Al after an especial heat treatment, J. Mater. Eng. Perform. 26 (2017) 1808–1816, <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2627-5>.
12. 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.

References

1. S. Williams, F. Martina, A. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove. Wire + arc additive manufacturing. J. Mater. Sci. Technol. 32 (2016), 641–647, <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>.
2. T. DebRoy, H. Wei, J. Zuback, T. Mukherjee, J. Elmer, J. Milewski, A. Beese, A. Wilson-Heid, A. Ded, W. Zhang. Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties, progress in materials. Science, 92 (2018), 112–224, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>.
3. D. Ding, A. Pan, D. Criuri, H. Li. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 81 (2015), 465–481, <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>.
4. Zewu Qi, Baoqiang Cong, Bojin Qi, Gang Zhao, Jialuo Ding. Properties of wire + arc additively manufactured 2024 aluminum alloy with different solution treatment temperature. Materials Letters, Volume 230, 2018, pp. 275–278, ISSN 0167-577X, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.07.144>.
5. P. Naga Raju, K. Srinivasa Rao, G.M. Reddy, M. Kamaraj, K. Prasad Rao. Mater. Sci. Eng. A 464 (2007), 192–201.
6. Baranov V. et al. Study of strength properties of semi-finished products from economically alloyed high-strength aluminum-scandium alloys for application in automobile transport and shipbuilding. Open Engineering, 2018. vol. 8, no. 1, pp. 69–76.
7. Shchitsyn Yu. D. et al. Plasma surfacing for additive formation of semi-finished products from aluminum alloys. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science], 2019, vol. 21, no. 2, pp. 63–72. (In Russ.)
8. Belov N. A., Alabin A. N. Advanced aluminum alloys with added zirconium and scandium. *Tsvetnye metally* [Ferrous Metals], 2007, no. 2, pp. 99–106. (In Russ.)
9. Belov N. A., Alabin A. N., Prokhorov A. Yu. Effect of added zirconium on strength and electrical resistance of cold rolled aluminum sheets. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya*. [Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy], 2009, no. 4, pp. 42–47. (In Russ.)
10. J. Gu, J. Ding, S. Williams, H. Gu, J. Bai, Y. Zhai, P. Ma. 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 651 (2016), 18–26.
11. J. Bai, C. Fan, S. Lin, C. Yang, B. Dong. Mechanical properties and fracture behaviors of GTA-additive manufactured 2219-Al after an especial heat treatment. J. Mater. Eng. Perform. 26 (2017), 1808–1816. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2627-5>.
12. 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.

Поступила 15.01.2020; принята к публикации 27.02.2020; опубликована 25.06.2020
Submitted 15/01/2020; revised 27/02/2020; published 25/06/2020

Карташев Максим Федорович – аспирант, инженер кафедры
«Сварочное производство, метрология и технология материалов»,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.
Email: goncharsk@mail.ru

Юрченко Александр Николаевич – младший научный сотрудник кафедры
«Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов»,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.
Email: aleksmta@gmail.com

Гребенкин Роман Дмитриевич – студент гр. МТО-18-1м кафедры
«Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов»,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.
Email: repikhs@gmail.com

Миндибаев Максим Ринатович – бакалавр кафедры
«Сварочное производство, метрология и технология материалов»,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.
Email: max.mindibaevv@gmail.com

Пермяков Глеб Львович – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории
«Обработка материалов высококонцентрированными источниками энергии»,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.
Email: gleb.permyakov@yandex.ru

Трушников Дмитрий Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры
«Сварочное производство, метрология и технология материалов»,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.
Email: trdimitr@yandex.ru

Maxim F. Kartashev – Postgraduate Student, Engineer,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. Email: goncharsk@mail.ru

Alexander N. Yurchenko – Junior Researcher,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. Email: aleksmt@gmail.com

Roman D. Grebenkin – Student
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. Email: repikhs@gmail.com

Maxim R. Mindibaev – Bachelor's Degree Student,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. Email: max.mindibaevv@gmail.com

Gleb L. Permyakov – Junior Researcher,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. Email: gleb.permyakov@yandex.ru

Dmitry N. Trushnikov – DrSc (Eng.), Professor
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. Email: trdimitr@yandex.ru