



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Механические и трибологические свойства металлической стенки, выращенной электродуговым способом в среде защитных газов

Максим Кузнецов^{1, a, *}, Владимир Данилов^{2, b}, Максим Крампит^{3, c}, Дмитрий Чинахов^{1, 2, d},
 Михаил Слободян^{2, e}

¹ Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского Томского политехнического университета, ул. Ленинградская, 26, г. Юрга, 650059, Россия

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, г. Томск, 635055, Россия

³ Школа инженерного творчества, ул. Ленинградская, 24, г. Юрга, 650059, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0003-3919-3009>, kuznechik_85@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-5741-7574>, dvi@ispms.tsc.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0003-3710-9598>, savage_jawa@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-4319-7945>, chinakhov@tpu.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0002-5718-7027>, s.m.s@ngs.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.92-023.5

История статьи:

Поступила: 22 апреля 2020

Рецензирование: 19 мая 2020

Принята к печати: 24 июня 2020

Доступно онлайн: 15 сентября 2020

Ключевые слова:

Электродуговое аддитивное производство

Предел прочности

Относительное удлинение

Предел текучести

Трибологические свойства

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00036 и Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (Проект №23.2.1).

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений реализации технологических процессов производства металлических изделий сложной конфигурации является аддитивное производство. В его основе лежит послойная наплавка металла в соответствии с трехмерной моделью, созданной посредством компьютерного проектирования. В качестве исходного материала используют металлические порошки или проволоку различных составов. Источником тепла служат электронный пучок, лазерный луч или электрическая дуга. Несмотря на существующее достаточно большое количество технологий выращивания металлических изделий сложной формы некоторые из них имеют очень высокую стоимость оборудования и соответственно высокую себестоимость. Поэтому разработка технологии и оборудования электродугового послойного выращивания металлических изделий является сложной актуальной задачей. **Цель работы:** исследование механических и трибологических свойств металлических изделий, выращенных электродуговым способом в среде защитных газов из углеродистой стали по разработанной технологии. **В работе исследованы** механические и трибологические свойства вертикальных стенок, выращенных электродуговым послойным способом в среде защитных газов. **Методами исследования** являются механические испытания предела прочности, предела текучести и относительного удлинения выращенных образцов, а также трибологические свойства (площадь поверхности износа, коэффициент трения и амплитуда вибрационных ускорений). **Результаты и обсуждение.** Выявлено, что образцы, выращенные с использованием технологии аддитивного производства на основе электродуговой наплавки плавящимся электродом в среде активных газов, имеют механические свойства, соизмеримые с литым металлом. Установлено, что произошло уменьшение погонной энергии при выращивании металлической стенки по разработанной технологии за счет предварительного подогрева электродной проволоки до 400...600 °С путем установки дополнительного токоподвода, расположенного на расстоянии 250...400 мм от торца проволоки для пропускания подогревающего тока. В результате повысились трибологические свойства выращенных образцов и их износ стал более равномерным.

Для цитирования: Механические и трибологические свойства металлической стенки, выращенной электродуговым способом в среде защитных газов / М.А. Кузнецов, В.И. Данилов, М.А. Крампит, Д.А. Чинахов, М.С. Слободян // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 18–32. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-18-32.

*Адрес для переписки

Кузнецов Максим Александрович, к.т.н.

Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета,

ул. Ленинградская, 26,

652055, г. Юрга, Россия

Тел.: 8 (38451) 7-77-65, e-mail: kuznechik_85@mail.ru

Введение

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений реализации технологических процессов производства металлических изделий сложной конфигурации является аддитивное производство. В его основе лежит послойная наплавка металла в соответствии с

трехмерной моделью, созданной посредством компьютерного проектирования [1]. В качестве исходного материала используют металлические порошки [2–17, 49] или проволоку [11–70] различных составов. Источником тепла является электронный пучок [2, 3, 5–11, 17–19, 29–31, 54], лазерный луч [2–5, 7–19, 23–28, 54] или электрическая дуга [15–17, 32–69]. Кроме того, в работе [62] был использован гибридный источник тепла, совмещавший в себе электрическую дугу и лазерный луч.

Среди перечисленных методов аддитивного производства металлических изделий одним из наиболее хорошо изученных является послойная наплавка проволок. Это обусловлено несколькими причинами [15–17]. Во-первых, на рынке представлена широкая номенклатура выпускаемых качественных и относительно недорогих проволок, которые можно использовать в качестве материала для электродугового выращивания. Таким способом производили изделия из нелегированных тантала [45] и вольфрама [66, 67], титановых [32–45] и алюминиевых [55–62] сплавов, а также сплавов с эффектом памяти формы на основе Cu–Al [46] и Ni–Ti [69]. Помимо этого были исследованы нержавеющие [29, 45–54], инструментальные [65] и углеродистые конструкционные [30, 63] стали. Кроме того, были сделаны попытки создания композитных материалов путем сплавления одновременно двух проволок: алюминия и титана [64], а также никелевого сплава и нержавеющей стали [68]. Во-вторых, архитектура производственных комплексов для данного процесса является открытой. Это позволяет использовать как промышленные роботы, так и автоматизированные трехкоординатные столы совместно с распространенными источниками питания, горелками и вспомогательным оборудованием, предназначенным для дуговой сварки и наплавки. Например, плазменно-дуговую наплавку использовали в исследованиях [32–40, 49], наплавку неплавящимся электродом – в работах [40–44, 47, 57, 61, 62, 64, 66, 67, 69] и механизированную дуговую наплавку плавящимся электродом в среде защитных газов – в [45–56, 58–60, 63, 65, 68], включая технологию «cold metal transfer (CMT)» [45, 47, 49, 51, 52, 54, 56, 58–60, 63], наплавку короткой ду-

гой [48] и двумя проволоками [50, 55], а также с подачей в зону горения дуги дополнительной проволоки (технология «cold wire») [68].

Перечисленные факторы вместе с относительно высокой производительностью наплавки обуславливают перспективность данных технологий, несмотря на сравнительно низкое качество поверхности производимых изделий и необходимость их последующей механической обработки, а также высокую вероятность формирования дефектов в виде пор, несплавлений между соседними валиками и слоями, деградации структуры металла из-за воздействия многочисленных термических циклов, а также остаточные деформации и напряжения [15–17]. Каждый из упомянутых методов имеет свои достоинства и недостатки, поэтому выбор какого-либо из них в каждом конкретном случае необходимо осуществлять с точки зрения технологических возможностей и экономической целесообразности.

Несмотря на существующее достаточно большое количество технологий выращивания металлических изделий сложной формы, некоторые из них имеют очень высокую стоимость оборудования и соответственно высокую себестоимость. Поэтому разработка технологии и оборудования электродугового послойного выращивания металлических изделий является сложной актуальной задачей. **Цель работы:** исследование механических и трибологических свойств металлических изделий, выращенных электродуговым способом в среде защитных газов из углеродистой стали по разработанной технологии.

Технология аддитивного производства на основе электродуговой наплавки плавящимся электродом в среде активных газов – одна из наименее затратных с точки зрения первоначальных инвестиций и стоимости расходных материалов, а также обладающая высокой производительностью.

Однако данный процесс имеет недостатки, среди которых наиболее существенными являются большой размер зоны термического влияния (ЗТВ) и значительные остаточные напряжения вследствие перегрева. Они могут привести к снижению механических и эксплуатационных свойств построенных металлических изделий. Одним из путей минимизации данных проблем служит снижение температурного градиента в на-

плавляемых слоях за счет уменьшения вводимой энергии при плавлении проволоки и переносе металла в ванну расплава. В представленной работе была исследована возможность уменьшить погонную энергию за счет предварительного подогрева электродной проволоки до 400...600 °С путем установки дополнительного токоподвода, расположенного на расстоянии 250...400 мм от торца проволоки для пропускания подогревающего тока. Предлагаемое техническое решение позволило уменьшить величину и длительность действия максимального тока в период отрыва и перехода расплавленной капли в ванну при импульсной электродуговой наплавке плавящимся электродом в среде углекислого газа.

Методика исследований

Для выращивания образцов использовали специализированное оборудование на основе технологии автоматизированной импульсной электродуговой наплавки плавящимся электродом в среде углекислого газа [70, 71]. Исходным материалом служила сварочная проволока марки ОК Autrodur 58 GM диаметром 1,2 мм. Ее химический состав представлен в табл. 1. В качестве подложки использовали пластину из стали 40Х размером 150×100×10 мм.

Было выращено по пять образцов с использованием различных технологических параметров. Пять образцов (образец № 1) вырастили с использованием подогрева электродной проволоки. Скорость наплавки была 300 мм/мин, ток подогрева проволоки составлял 30 А (расчетная температура подогрева 400 °С [72]), ток паузы 85 А, ток импульса 180 А, длительность импульса 4 мс, напряжение для наложения импульса 18 В. Выбор параметров режима сварки с подогревом электродной проволоки был сделан на основе расчетной модели. Модель учитывает

ток паузы, скорость подачи проволоки, расстояние между контактными наконечниками и материал электродной проволоки. Расстояние между контактными наконечниками выбиралось на основании режима для обеспечения высокой температуры подогрева (для увеличения коэффициента расплавления) при недопущении перегрева электродной проволоки. По результатам расчета такое место токоподвода (250...400 мм) является наиболее рациональным.

Пять образцов (образец № 2) вырастили с использованием типового режима наплавки: сила тока 150 А, напряжение 22...24 В, скорость наплавки 300 мм/мин.

Из каждого выращенного образца вырезали по пять заготовок для механических испытаний перпендикулярно наплавленному слою (схема представлена на рис. 1) с помощью электроискровой резки на станке Делта-Тест Арта 151, которые затем подвергали механической шлифовке и последующей полировке с использованием алмазной пасты АСМ 10/7 НВЛ. Исследование механических свойств (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение) производилось методом растяжения образцов на испытательной машине Walter+Bai AG LFM-125.

Исследование износостойкости полученных образцов (по пять на каждый режим) осуществлялось методом сухого трения скольжения на трибометрической установке Tribotechnic (табл. 2).

Таблица 1
Table 1

**Химический состав проволоки
ОК Autrodur 58 GM
The chemical composition of the
'OK Autrodur 58 GM' wire**

Химические элементы, %			
С	Mn	Si	Cr
1,04	1,87	0,48	1,82

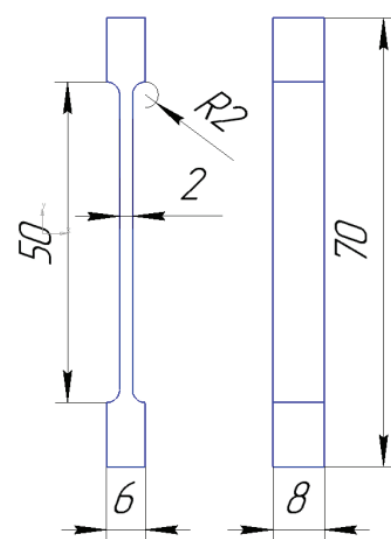


Рис. 1. Размеры образцов для испытаний на растяжение
Fig. 1. Dimensions of the tensile test specimens

Параметры тестов износостойкости
Parameters of the wear resistance tests

Номер теста	Скорость скольжения, м/с	Нагрузка, Н	Контртело
1	0,1	20	Шарик ШХ15
2	0,5		Шарик ШХ15
3	0,1		Шарик Al ₂ O ₃
4	0,5		Шарик Al ₂ O ₃

Результаты и их обсуждение

Образцы (рис. 2) были выращены путем наплавки десяти последовательных слоев высотой 2...4 мм и шириной 4...6 мм (в зависимости от режимов наплавки). Их размер составил примерно 100×8 мм.

Анализ результатов механических испытаний показал, что образцы имели в среднем предел прочности при растяжении 708...716 МПа, предел текучести 341...349 МПа и относительное удлинение 5,1...5,2 %. Данные значения сопоставимы с механическими свойствами сталей по ГОСТ 6713–91 (предел прочности 685...700 МПа, предел текучести 335...345 МПа) и по ГОСТ 1050–88 (предел прочности 660...680 МПа, предел текучести 350...370 МПа). В качестве примера на рис. 3 представлена диаграмма напряжений от деформаций образца № 1.

При исследовании образцов на износостойкость учитывали следующие параметры: площадь поверхности износа, коэффициент трения и амплитуду вибрационных ускорений. В первом тесте согласно табл. 2 износ поверхности образ-

ца № 1 превысил соответствующий параметр образца № 2 на 23 %, во втором – на 48 %, в третьем – на 7 %, и в четвертом – на 13 % (рис. 4).

Значения коэффициентов трения обоих образцов были схожими (рис. 5). Разброс их значений был в пределах погрешности измерений. Следует отметить, что в первом тесте коэффициент трения образца № 1 был меньше на 12 %, а во втором тесте – на 20 % больше.

Амплитуда виброускорений (рис. 6) образца № 1 в первом тесте была меньше на 51 %. Во втором и третьем тесте различия значений были в пределах погрешности измерений. В четвертом тесте амплитуда виброускорений образца № 1 больше на 14 %. Увеличение амплитуды виброускорений происходило в случаях увеличения скорости скольжения. При низкой скорости скольжения (0,1 м/с) амплитуда вибраций была выше при трении в паре с керамическим шариком, чем в паре со стальным. При более высокой скорости скольжения (0,5 м/с) амплитуда вибраций при трении в паре со стальным шариком значительно превышает вибрации в паре с керамическим шариком. Это связано с интенсивным



Рис. 2. Внешний вид выращенного образца

Fig. 2. The as-built sample

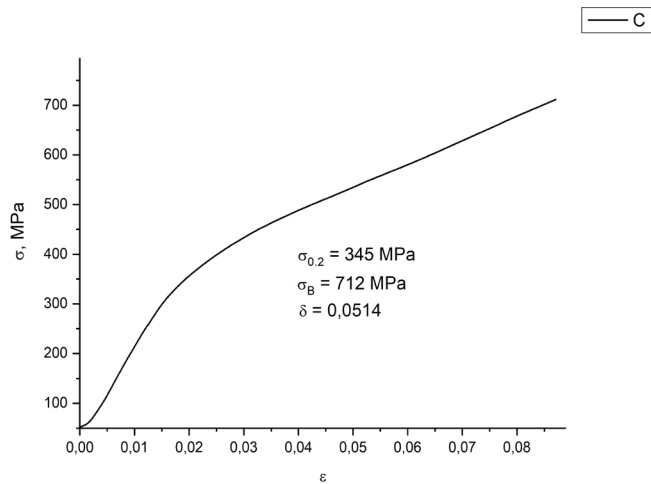


Рис. 3. Диаграмма напряжений от деформаций
Fig. 3. The stress–strain curve

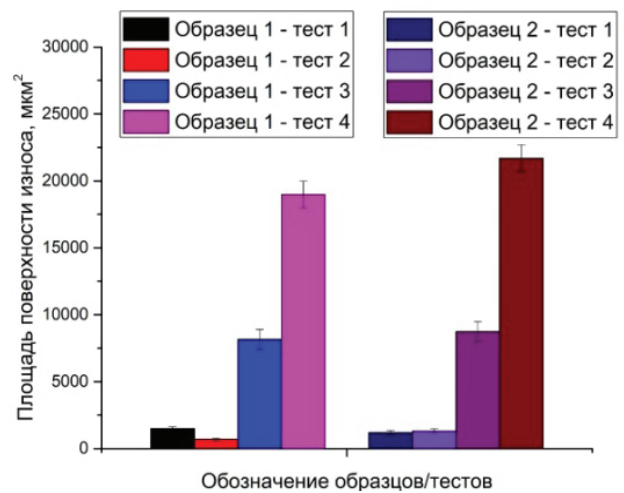


Рис. 4. Площади поверхности износа
Fig. 4. Wear surface areas

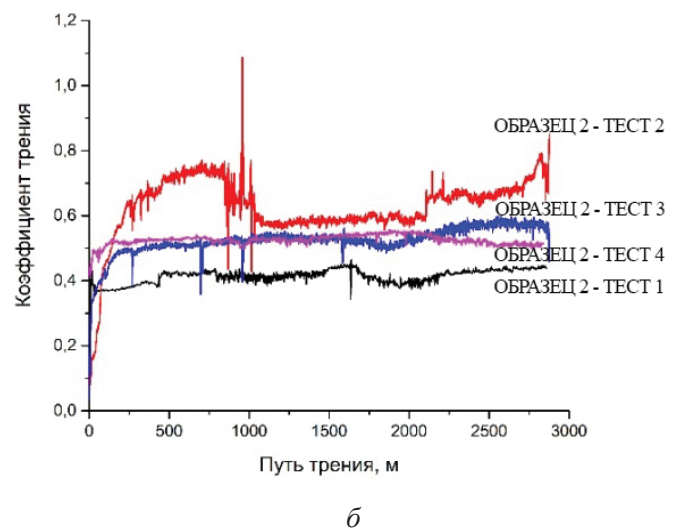
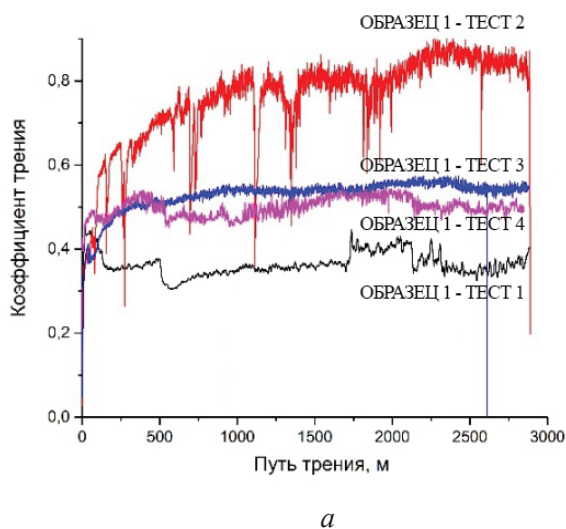


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от пройденного пути образца № 1 (а) и образца № 2 (б)
Fig. 5. The friction coefficient vs sliding distance: sample No. 1 (a) and sample No. 2 (b)

износом шарика и незначительным износом образцов, в результате чего процесс трения был крайне нестабильным.

Анализ представленных результатов трибологических испытаний позволяет сделать вывод о более равномерной динамике износа образца № 1. Изменение значений коэффициента трения и виброускорений происходило более монотонно.

Результаты проведенных исследований позволили сделать вывод, что образцы, построенные с использованием технологии аддитивного

производства на основе электродуговой наплавки плавящимся электродом в среде активных газов, имеют механические свойства, соизмеримые с литым металлом. Установлено уменьшение погонной энергии за счет предварительного подогрева электродной проволоки до 400...600 °С путем установки дополнительного токоподвода, расположенного на расстоянии 250...400 мм от торца проволоки для пропускающего подогревающего тока. В результате повысились трибологические свойства построенного образца и его износ был более равномерным.

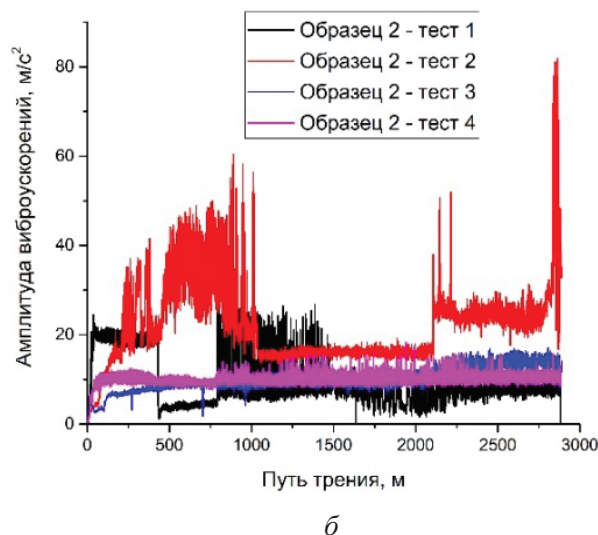
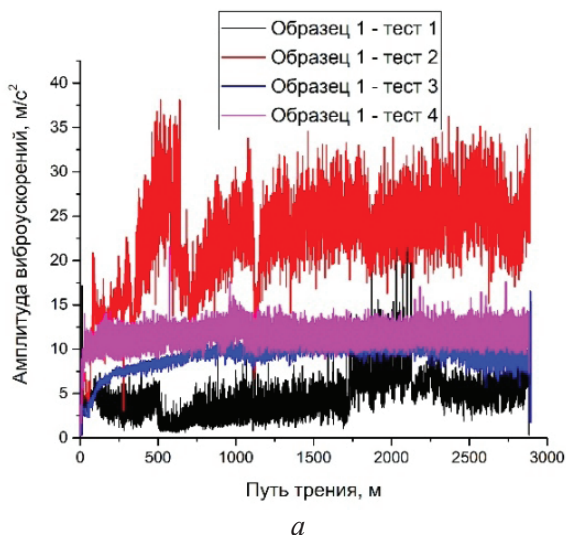


Рис. 6. Зависимость амплитуды виброускорений от пройденного пути образца № 1 (а) и образца № 2 (б)

Fig. 6. Acceleration amplitude vs sliding distance: sample No. 1 (a) and sample No. 2 (b)

Выводы

1. Установлено, что выращенная электродуговым способом в среде защитных газов с подогревом электродной проволоки металлическая стенка имеет следующие механические свойства: предел прочности при растяжении 708...716 МПа, предел текучести 341...349 МПа и относительное удлинение 5,1...5,2 %.

2. Показано, что разработанная технология электродугового послойного выращивания в среде защитных газов с подогревом электродной проволоки позволяет получать металлические изделия с трибологическими свойствами, сопоставимыми с традиционными способами наплавки.

Список литературы

1. ГОСТ Р 57558–2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Ч. 1. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2017. – 12 с.

2. Fabrication of metal and alloy components by additive manufacturing: examples of 3D materials science / L.E. Murr, E. Martinez, K.N. Amato, S.M. Gaytan, J. Hernandez, D.A. Ramirez, P.W. Shindo, F. Medina, R.B. Wicker // Journal of Materials Research and Technology. – 2012. – Vol. 1 (28). – P. 42–54. – DOI: 10.1016/S2238-7854(12)70009-1.

3. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies / L.E. Murr, S.M. Gaytan, D.A. Ramirez, E. Martinez, J. Hernandez, K.N. Amato, P.W. Shindo, F. Medina,

R.B. Wicker // Journal of Materials Science and Technology. – 2012. – Vol. 28, iss. 1. – P. 1–14. – DOI: 10.1016/S1005-0302(12)60016-4.

4. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms / D.D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe // International Materials Reviews. – 2012. – Vol. 57, iss. 3. – P. 133–164. – DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014.

5. Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: a review on processes, materials and designs / S.L. Sing, J. An, W.Y. Yeong, F.E. Wiria // Journal of Orthopaedic Research. – 2016. – Vol. 34, iss. 3. – P. 369–385. – DOI: 10.1002/jor.23075.

6. Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review // International Materials Reviews. – 2016. – Vol. 61, iss. 5. – P. 361–377. – DOI: 10.1080/09506608.2016.1176289.

7. Additive manufacturing of metals / D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 117. – P. 371–392. – DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.

8. A review of powdered additive manufacturing techniques for Ti-6Al-4V biomedical applications / W.S.W. Harun, N.S. Manam, M.S.I.N. Kamariah, S. Sharif, A.H. Zulkifly, I. Ahmad, H. Miura // Powder Technology. – 2018. – Vol. 331. – P. 74–97. – DOI: 10.1016/j.powtec.2018.03.010.

9. Chen S., Tong Y., Liaw P.K. Additive manufacturing of high-entropy alloys: a review // Entropy. – 2018. – Vol. 20, iss. 12. – P. 937. – DOI: 10.3390/e20120937.

10. Ahmed N. Direct metal fabrication in rapid prototyping: a review // Journal of Manufacturing

Processes. – 2019. – Vol. 42. – P. 167–191. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.05.001.

11. *Frazier W.E.* Metal additive manufacturing: a review // *Journal of Materials Engineering and Performance.* – 2014. – Vol. 23 (6). – P. 1917–1928. – DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z.

12. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing / W.J. Sames, F.A. List, S. Pannala, R.R. Dehoff, S.S. Babu // *International Materials Reviews.* – 2016. – Vol. 61, iss. 5. – P. 315–360. – DOI: 10.1080/09506608.2015.1116649.

13. *Murr L.E.* A Metallographic review of 3D printing/additive manufacturing of metal and alloy products and components // *Metallography, Microstructure, and Analysis.* – 2018. – Vol. 7, iss. 2. – P. 103–132. – DOI: 10.1007/s13632-018-0433-6.

14. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: a critical review / Y. Kok, X.P. Tan, P. Wang, M.L.S. Nai, N.H. Loh, E. Liu, S.B. Tor // *Materials and Design.* – 2018. – Vol. 139. – P. 565–586. – DOI: 10.1016/j.matdes.2017.11.021.

15. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties / T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang // *Progress in Materials Science.* – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.

16. Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: a review / A. Gisario, M. Kazarian, F. Martina, M. Mehrpouya // *Journal of Manufacturing Systems.* – 2019. – Vol. 53. – P. 124–149. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.08.005.

17. Progress in additive manufacturing on new materials: a review / N. Li, S. Huang, G. Zhang, R. Qin, W. Liu, H. Xiong, G. Shi, J. Blackburn // *Journal of Materials Science and Technology.* – 2019. – Vol. 35, iss. 2. – P. 242–269. – DOI: 10.1016/j.jmst.2018.09.002.

18. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / D. Ding, X. Pan, D. Cuiuri, H. Li // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2015. – Vol. 81. – P. 465–481. – DOI: 10.1007/s00170-015-7077-3.

19. *Oliveira J.P., Santos T.G., Miranda R.M.* Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: from theory to practice // *Progress in Materials Science.* – 2020. – Vol. 107. – P. 100590. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.100590.

20. Wire + arc additive manufacturing / S.W. Williams, F. Martina, A.C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove // *Materials Science and Technology.* – 2016. – Vol. 32, iss. 7. – P. 641–647. – DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073.

21. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, J. Xu, J. Norrish // *Journal of Manufacturing Processes.* – 2018. – Vol. 35. – P. 127–139. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.

22. Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing / C.R. Cunningham, J.M. Flynn, A. Shokrani, V. Dhokia, S.T. Newman // *Additive Manufacturing.* – 2018. – Vol. 22. – P. 672–686. – DOI: 10.1016/j.addma.2018.06.020.

23. Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire. Part I: Microstructural properties of single beads / E. Brandl, V. Michailov, B. Viehweger, C. Leyens // *Surface and Coatings Technology.* – 2011. – Vol. 206. – P. 1120–1129. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.07.095.

24. Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire. Part II: Hardness and dimensions of single beads / E. Brandl, V. Michailov, B. Viehweger, C. Leyens // *Surface and Coatings Technology.* – 2011. – Vol. 206. – P. 1130–1141. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.07.094.

25. Mechanical properties of additive manufactured titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by a solid-state laser and wire / E. Brandl, F. Palm, V. Michailov, B. Viehweger, C. Leyens // *Materials and Design.* – 2011. – Vol. 32. – P. 4665–4675. – DOI: 10.1016/j.matdes.2011.06.062.

26. *Ding Y., Akbari M., Kovacevic R.* Process planning for laser wire-feed metal additive manufacturing system // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2018. – Vol. 95, iss. 1–4. – P. 355–365. – DOI: 10.1007/s00170-017-1179-z.

27. Laser wire deposition of a large Ti-6Al-4V space component / N. Chekir, J.J. Sixsmith, R. Tollett, M. Brochu // *Welding Journal.* – 2019. – Vol. 28, iss. 6. – P. 172-s–180-s. – DOI: 10.29391/2019.98.014.

28. Melt pool size control through multiple closed-loop modalities in laser-wire directed energy deposition of Ti-6Al-4V / B.T. Gibson, Y.K. Bandari, B.S. Richardson, W.C. Henry, E.J. Vetland, T.W. Sundermann, L.J. Love // *Additive Manufacturing.* – 2020. – Vol. 32. – P. 100993. – DOI: 10.1016/j.addma.2019.100993.

29. Effect of heat input on phase content, crystalline lattice parameter, and residual strain in wire-feed electron beam additive manufactured 304 stainless steel / S. Tarasov, A. Filippov, N. Savchenko, S. Fortuna, V. Rubtsov, E. Kolubaev, S. Psakhie // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2018. – Vol. 99, iss. 9–12. – P. 2353–2363. – DOI: 10.1007/s00170-018-2643-0.

30. *Fuchs J., Schneider C., Enzinger N.* Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source // *Welding in the World.* – 2018. – Vol. 62, iss. 2. – P. 267–275. – DOI: 10.1007/s40194-017-0537-7.

31. Titanium alloy repair with wire-feed electron beam additive manufacturing technology / P. Wanjara, K. Watanabe, C. de Formanoir, Q. Yang, C. Bescond, S. Godet, M. Brochu, K. Nezaki, J. Gholipour, P. Patnaik // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 2019. – P. 3979471. – DOI: 10.1155/2019/3979471.
32. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V / F. Martina, J. Mehnen, S.W. Williams, P. Colegrove, F. Wang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2012. – Vol. 212. – P. 1377–1386. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002.
33. Fatigue crack propagation behaviour in wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V: Effects of microstructure and residual stress / J. Zhang, X. Wang, S. Paddea, X. Zhang // *Materials and Design*. – 2016. – Vol. 90. – P. 551–561. – DOI: 10.1016/j.matdes.2015.10.141.
34. Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment / J. Lin, Y. Lv, Y. Liu, Z. Sun, K. Wang, Z. Li, Y. Wu, B. Xu // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2017. – Vol. 69. – P. 19–29. – DOI: 10.1016/j.jmbbm.2016.12.015.
35. *Hönnige J.R., Colegrove P., Williams S.* Improvement of microstructure and mechanical properties in wire + arc additively manufactured Ti-6Al-4V with machine hammer peening // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 216. – P. 8–17. – DOI: 10.1016/j.proeng.2018.02.083.
36. Enhanced strength and ductility in thin Ti-6Al-4V alloy components by alternating the thermal cycle strategy during plasma arc additive manufacturing / J. Lin, Y. Lv, D. Guo, X. Wu, Z. Li, C. Liu, B. Guo, G. Xu, B. Xu // *Materials Science and Engineering A*. – 2019. – Vol. 759. – P. 288–297. – DOI: 10.1016/j.msea.2019.05.025.
37. Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment / J. Lin, Y. Lv, Y. Liu, Z. Sun, K. Wang, Z. Li, Y. Wu, B. Xu // *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. – 2017. – Vol. 69. – P. 19–29. – DOI: 10.1016/j.jmbbm.2016.12.015.
38. *Ríos S., Colegrove P.A., Williams S.W.* Metal transfer modes in plasma wire+arc additive manufacture // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2019. – Vol. 264. – P. 45–54. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.08.043.
39. Interrupted fatigue testing with periodic tomography to monitor porosity defects in wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V / R. Biswal, X. Zhang, M. Shamir, A.A. Mamun, M. Awd, F. Walther, A.K. Syed // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 28. – P. 517–527. – DOI: 10.1016/j.addma.2019.04.026.
40. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement / A.R. McAndrew, M.A. Rosales, P.A. Colegrove, J.R. Hönnige, A. Ho, R. Fayolle, K. Eytayo, I. Stan, P. Sukrongpang, A. Crochemore, Z. Pinter // *Additive Manufacturing*. – 2018. – Vol. 21. – P. 340–349. – DOI: 10.1016/j.addma.2018.03.006.
41. Residual stress of as-deposited and rolled wire + arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components / F. Martina, M.J. Roy, B.A. Szost, S. Terzi, P.A. Colegrove, S.W. Williams, P.J. Withers, J. Meyer, M. Hofmann // *Materials Science and Technology*. – 2016. – Vol. 32, iss. 1. – P. 1439–1448. – DOI: 10.1080/02670836.2016.1142704.
42. The effectiveness of combining rolling deformation with wire-arc additive manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V / J. Donoghue, A.A. Antonysamy, F. Martina, P.A. Colegrove, S.W. Williams, P.B. Prangnell // *Materials Characterization*. – 2016. – Vol. 114. – P. 103–114. – DOI: 10.1016/j.matchar.2016.02.001.
43. Mitigation of thermal distortion in wire arc additively manufactured Ti6Al4V part using active interpass cooling / B. Wu, Z. Pan, G. Chen, D. Ding, L. Yuan, D. Cuiuri, H. Li // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2019. – Vol. 24, iss. 5. – P. 484–494. – DOI: 10.1080/13621718.2019.1580439.
44. Hot-wire arc additive manufacturing Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V titanium alloy: pore characterization, microstructural evolution, and mechanical properties / T. Lu, C. Liu, Z. Li, Q. Wu, J. Wang, T. Xu, J. Liu, H. Wang, S. Ma // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 817. – P. 153334. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.153334.
45. *Elmer J.W., Gibbs G.* The effect of atmosphere on the composition of wire arc additive manufactured metal components // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2019. – Vol. 24, iss. 5. – P. 367–374. – DOI: 10.1080/13621718.2019.1605473.
46. Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications / A. Queguineur, G. Rückert, F. Cortial, J.Y. Hascoët // *Welding in the World*. – 2018. – Vol. 62, iss. 2. – P. 259–266. – DOI: 10.1007/s40194-017-0536-8.
47. Wire and arc additive manufacturing: a comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel / N. Rodriguez, L. Vázquez, I. Huarte, E. Arruti, I. Tabernero, P. Alvarez // *Welding in the World*. – 2018. – Vol. 62, iss. 5. – P. 1083–1096. – DOI: 10.1007/s40194-018-0606-6.
48. *Bekker A.C.M., Verlinden J.C.* Life cycle assessment of wire + arc additive manufacturing

compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 177. – P. 438–447. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.148.

49. *Hoefler K., Haelsing A., Mayr P.* Arc-based additive manufacturing of steel components – comparison of wire- and powder-based variants // *Welding in the World*. – 2018. – Vol. 62, iss. 2. – P. 243–247. – DOI: 10.1007/s40194-017-0527-9.

50. Tandem metal inert gas process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel / F. Martina, J. Ding, S. Williams, A. Caballero, G. Pardal, L. Quintino // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 25. – P. 545–550. – DOI: 10.1016/j.addma.2018.11.022.

51. Wire-arc additive manufacturing of a duplex stainless steel: thermal cycle analysis and microstructure characterization / V. A. Hosseini, M. Högström, K. Hurtig, M.A. Valiente Bermejo, L.-E. Stridh, L. Karlsson // *Welding in the World*. – 2019. – Vol. 63. – P. 975–987. – DOI: 10.1007/s40194-019-00735-y.

52. Heat-treatment effects on a bimetallic additively-manufactured structure (BAMS) of the low-carbon steel and austenitic-stainless steel / Md.R.U. Ahsan, A.N.M. Tanvir, G.-J. Seo, B. Bates, W. Hawkins, C. Lee, P.K. Liaw, M. Noakes, A. Nycz, D.B. Kim // *Additive Manufacturing*. – 2020. – Vol. 32. – P. 101036. – DOI: 10.1016/j.addma.2020.101036.

53. Experimental results for structural design of wire-and-arc additive manufactured stainless steel members / V. Laghi, M. Palermo, G. Gasparini, V.A. Girelli, T. Trombetti // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2020. – P. 105858. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105858.

54. Wire-based additive manufacturing of stainless steel components / J.W. Elmer, J. Vaja, J.S. Carpenter, D.R. Coughlin, M.J. Dvornak, P. Hochanadel, P. Gurrung, A. Johnson, G. Gibbs // *Welding Journal*. – 2020. – Vol. 99, iss. 1. – P. 8s–24s. – DOI: 10.29391/2020.99.002.

55. In-process control of distortion in wire and arc additive manufacturing based on a flexible multipoint support fixture / F. Li, S. Chen, J. Shi, Y. Zhao // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2019. – Vol. 24, iss. 1. – P. 36–42. – DOI: 10.1080/13621718.2018.1476083.

56. Effect of process parameters on the quality of aluminium alloy Al₅Si deposits in wire and arc additive manufacturing using a cold metal transfer process / A.G. Ortega, L.C. Galvan, F. Deschaux-Beaume, B. Mezrag, S. Rouquette // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2018. – Vol. 23, iss. 4. – P. 316–332. – DOI: 10.1080/13621718.2017.1388995.

57. Optimisation of interpass temperature and heat input for wire and arc additive manufacturing 5A06 aluminium alloy / H. Geng, J. Li, J. Xiong, X. Lin // *Sci-*

ence and Technology of Welding and Joining. – 2017. – Vol. 22, iss. 6. – P. 472–483. – DOI: 10.1080/13621718.2016.1259031.

58. Characterisation of 4043 aluminium alloy deposits obtained by wire and arc additive manufacturing using a cold metal transfer process / A.G. Ortega, L.C. Galvan, M. Salem, K. Moussaoui, S. Segonds, S. Rouquette, F. Deschaux-Beaume // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2019. – Vol. 24, iss. 6. – P. 538–547. – DOI: 10.1080/13621718.2018.1564986.

59. Effects of milling thickness on wire deposition accuracy of hybrid additive/subtractive manufacturing / S. Zhang, Y. Zhang, M. Gao, F. Wang, Q. Li, X. Zeng // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2019. – Vol. 24, iss. 5. – P. 375–381. – DOI: 10.1080/13621718.2019.1595925.

60. Micropore evolution in additively manufactured aluminum alloys under heat treatment and inter-layer rolling / J. Gu, S. Yang, M. Gao, J. Bai, Y. Zhai, J. Ding // *Materials and Design*. – 2020. – Vol. 186. – P. 108288. – DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108288.

61. Real-time seam defect identification for Al alloys in robotic arc welding using optical spectroscopy and integrating learning / Z. Zhang, W. Ren, Z. Yang, G. Wen // *Measurement*. – 2020. – Vol. 156. – P. 107546. – DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107546.

62. Comparative study of microstructure evaluation and mechanical properties of 4043 aluminum alloy fabricated by wire-based additive manufacturing / Q. Miao, D. Wu, D. Chai, Y. Zhan, G. Bi, F. Niu, G. Ma // *Materials and Design*. – 2020. – Vol. 186. – P. 108205. – DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108205.

63. Ultrasonic phased array inspection of a wire + arc additive manufactured (WAAM) sample with intentionally embedded defects / Y. Javadi, C.N. MacLeod, S.G. Pierce, A. Gachagan, D. Lines, C. Mineo, J. Ding, S. Williams, M. Vasilev, E. Mohseni, R. Su // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 29. – P. 100806. – DOI: 10.1016/j.addma.2019.100806.

64. *Horii T., Kirihara S., Miyamoto Y.* Freeform fabrication of Ti–Al alloys by 3D micro-welding // *Intermetallics*. – 2008. – Vol. 16. – P. 1245–1249. – DOI: 10.1016/j.intermet.2008.07.009.

65. Fusion zone geometries, cooling rates and solidification parameters during wire arc additive manufacturing / W. Ou, T. Mukherjee, G.L. Knapp, Y. Wei, T. DebRoy // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 127. – P. 1084–1094. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.111.

66. Development of wire + arc additive manufacturing for the production of large-scale unalloyed tungsten components / G. Marinelli, F. Martina, S. Ganguly, S. Williams // *International Journal of Refractory Metals*

and Hard Materials. – 2019. – Vol. 82. – P. 329–335. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.05.009.

67. Microstructure and thermal properties of unalloyed tungsten deposited by wire + arc additive manufacture / G. Marinelli, F. Martina, H. Lewtas, D. Hancock, S. Mehraban, N. Lavery, S. Ganguly, S. Williams // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – Vol. 522. – P. 45–53. – DOI: 10.1016/j.jnucmat.2019.04.049.

68. Control of the chemical composition distribution in deposited metal by wire and arc-based additive manufacturing / T. Abe, D. Mori, K. Sonoya, M. Nakamura, H. Sasahara // Precision Engineering. – 2019. – Vol. 55. – P. 231–239. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2018.09.010.

69. Wire and arc additive manufacturing of a Ni-rich NiTi shape memory alloy: Microstructure and mechanical properties / Z. Zeng, B.Q. Cong, J.P. Oliveira, W.C. Ke, N. Schell, B. Peng, Z.W. Qi, F.G. Ge, W. Zhang, S.S. Ao // Additive Manufacturing. – 2020. – Vol. 32. – P. 101051. – DOI: 10.1016/j.addma.2020.101051.

70. Кузнецов М.А., Крампит М.А. Проектирование 3D-принтера для электродугового послойного выращивания металлических изделий // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сборник материалов II Международной научно-практической конференции / ФГБУ ВО КузГТУ. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2018. – С. 151–153.

71. Structural and chemical analysis of 3D printed metal products / M.A. Kuznetsov, E.A. Zernin, M.A. Krampit, V.I. Danilov, G.V. Shlyakhova // International Journal of Advanced Science and Technology. – 2019. – Vol. 28, iss.15. – P. 699–709.

72. Krampit A.G., Krampit M.A. Determination of a wire heat temperature under a pulse-arc welding condition by means of a calculation and graphic method // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 392–396. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.392.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Mechanical and Tribological Properties of a Metal Wall Grown by an Electric Arc Method in an Atmosphere of Shielding Gas

Maxim Kuznetsov^{1, a, *}, Vladimir Danilov^{2, b}, Maxim Krampit^{3, c}, Dmitry Chinakhov^{1, 2, d},
Mihail Slobodyan^{2, e}

¹ Yurga Institute of Technology, TPU Affiliate, 26 Leningradskaya st., Yurga, 652055, Russian Federation

² Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 2/4, Academic Avenue, Tomsk, 635055, Russian Federation

³ School of Engineering, 24, Leningrad Street, Yurga, 650059, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-3919-3009>, kyznechik_85@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-5741-7574>, dvi@ispms.tsc.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0003-3710-9598>, savage_jawa@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-4319-7945>, chinakhov@tpu.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0002-5718-7027>, s.m.s@ngs.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 22 April 2020

Revised: 19 May 2020

Accepted: 24 June 2020

Available online: 15 September 2020

Keywords:

MAG additive manufacturing

Tensile strength

Yield strength

Elongation

Tribological properties

Funding

The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the scientific project No. 18-38-00036 and the Basic Research Program of the State Academies of Sciences for 2013–2020 (Project No. 23.2.1).

ABSTRACT

Introduction. At present, additive manufacturing is one of the most promising methods to optimize the production processes of complex metal products. It is based on the layer-by-layer metal deposition in accordance with a three-dimensional model created using computer aided design software. Various metal powders and wires are applied as a feedstock, and a laser or electron beam, as well as an arc can be employed as a heat source. Despite the existing rather large number of developed methods for the complex metal product additive manufacturing, some of them are very expensive that results in a high production cost. Due to this fact, developing equipment and procedures for the layer-by-layer gas metal arc deposition using carbon dioxide as a shielding gas is an urgent task. **The aim of the paper** is to investigate the mechanical and tribological properties of carbon steel samples built by the layer-by-layer gas metal arc deposition according to the developed procedure. The carbon steel samples, built by layer-by-layer gas metal arc deposition using carbon dioxide as a shielding gas, are studied. **The research methods** are mechanical tests of tensile strength, yield strength and elongation of grown samples, as well as tribological properties (wear surface area, friction coefficient and amplitude of vibrational accelerations). **Results and Discussion.** It is found that the samples built by the developed additive manufacturing procedure possessed the mechanical properties commensurate with hot-rolled steel. It is established that there is a decrease in linear energy when growing a metal wall according to the developed technology due to preheating of the electrode wire to 400...600 °C by installing an additional current supply located at a distance of 250...400 mm from the end of the wire to pass the heating current. As a result, the tribological properties of the grown samples are increased and its wear became more uniform.

For citation: Kuznetsov M.A., Danilov V.I., Krampit M.A., Chinakhov D.A., Slobodyan M.S. Mechanical and tribological properties of a metal wall grown by an electric arc method in an atmosphere of shielding gas. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 18–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-18-32. (In Russian).

References

1. GOST R 57558–2017. *Additivnye tekhnologicheskie protsessy. Bazovye printsipy*. Ch. 1. *Terminy i opredeleniya* [State standard R 57558–2017. Additive manufacturing. General principles. Pt. 1. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 12 p.

* Corresponding author

Kuznetsov Maxim A., Ph.D. (Engineering)

Yurga Institute of Technology, TPU Affiliate

26 Leningradskaya st., Yurga, 652055, Russian Federation

Tel.: 8 (38451) 7-77-65, e-mail: kyznechik_85@mail.ru

2. Murr L.E., Martinez E., Amato K.N., Gaytan S.M., Hernandez J., Ramirez D.A., Shindo P.W., Medina F., Wicker R.B. Fabrication of metal and alloy components by additive manufacturing: examples of 3D materials science. *Journal of Materials Research and Technology*, 2012, vol. 1, pp. 42–54. DOI: 10.1016/S2238-7854(12)70009-1.
3. Murr L.E., Gaytan S.M., Ramirez D.A., Martine E., Hernandez J., Amato K.N., Shindo P.W., Medina F.R., Wicker R.B. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science and Technology*, 2012, vol. 28, iss. 1, pp. 1–14. DOI: 10.1016/S1005-0302(12)60016-4.
4. Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*, 2012, vol. 57, iss. 3, pp. 133–164. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014.
5. Sing S.L., An J., Yeong W.Y., Wiria F.E. Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: a review on processes, materials and designs. *Journal of Orthopaedic Research*, 2016, vol. 34, iss. 3, pp. 369–385. DOI: 10.1002/jor.23075.
6. Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review. *International Materials Reviews*, 2016, vol. 61, iss. 5, pp. 361–377. DOI: 10.1080/09506608.2016.1176289.
7. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 2016, vol. 117, pp. 371–392. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.
8. Harun W.S.W., Manam N.S., Kamariah M.S.I.N., Sharif S., Zulkifly A.H., Ahmad I., Miura H. A review of powdered additive manufacturing techniques for Ti-6Al-4V biomedical applications. *Powder Technology*, 2018, vol. 331, pp. 74–97. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.03.010.
9. Chen S., Tong Y., Liaw P.K. Additive manufacturing of high-entropy alloys: a review. *Entropy*, 2018, vol. 20, iss. 12, p. 937. DOI: 10.3390/e20120937.
10. Ahmed N. Direct metal fabrication in rapid prototyping: a review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 42, pp. 167–191. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.05.001.
11. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23 (6), pp. 1917–1928. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z.
12. Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*, 2016, vol. 61, iss. 5, pp. 315–360. DOI: 10.1080/09506608.2015.1116649.
13. Murr L.E. A metallographic review of 3D printing/additive manufacturing of metal and alloy products and components. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2018, vol. 7, iss. 2, pp. 103–132. DOI: 10.1007/s13632-018-0433-6.
14. Kok Y., Tan X.P., Wang P., Nai M.L.S., Loh N.H., Liu E., Tor S.B. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: a critical review. *Materials and Design*, 2018, vol. 139, pp. 565–586. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.11.021.
15. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 2018, vol. 92, pp. 112–224. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
16. Gisario A., Kazarian M., Martina F., Mehrpouya M. Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: a review. *Journal of Manufacturing Systems*, 2019, vol. 53, pp. 124–149. DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.08.005.
17. Li N., Huang S., Zhang G., Qin R., Liu W., Xiong H., Shi G., Blackburn J. Progress in additive manufacturing on new materials: a review. *Journal of Materials Science and Technology*, 2019, vol. 35, iss. 2, pp. 242–269. DOI: 10.1016/j.jmst.2018.09.002.
18. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 81, pp. 465–481. DOI: 10.1007/s00170-015-7077-3.
19. Oliveira J.P., Santos T.G., Miranda R.M. Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: from theory to practice. *Progress in Materials Science*, 2020, vol. 107, p. 100590. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.100590.
20. Williams S. W., Martina F., Addison A. C., Ding J., Pardal G., Colegrove P. Wire + arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 2016, vol. 32, iss. 7, pp. 641–647. DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073.
21. Wu B., Pan Z., Ding D., Cuiuri D., Li H., Xu J., Norrish J. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 35, pp. 127–139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.

22. Cunningham C.R., Flynn J.M., Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T. Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 22, pp. 672–686. DOI: 10.1016/j.addma.2018.06.020.
23. Brandl E., Michailov V., Viehweger B., Leyens C. Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire. Part I: Microstructural properties of single beads. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 206, pp. 1120–1129. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.07.095.
24. Brandl E., Michailov V., Viehweger B., Leyens C. Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire. Part II: Hardness and dimensions of single beads. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 206, pp. 1130–1141. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.07.094.
25. Brandl E., Palm F., Michailov V., Viehweger B., Leyens C. Mechanical properties of additive manufactured titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by a solid-state laser and wire. *Materials and Design*, 2011, vol. 32, pp. 4665–4675. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.06.062.
26. Ding Y., Akbari M., Kovacevic R. Process planning for laser wire-feed metal additive manufacturing system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 95, iss. 1–4, pp. 355–365. DOI: 10.1007/s00170-017-1179-z.
27. Chekir N., Sixsmith J.J., Tollett R., Brochu M. Laser wire deposition of a large Ti-6Al-4V space component. *Welding Journal*, 2019, vol. 98, iss. 6, pp. 172-s–180-s. DOI: 10.29391/2019.98.014.
28. Gibson B.T., Bandari Y.K., Richardson B.S., Henry W.C., Vetland E.J., Sundermann T.W., Love L.J. Melt pool size control through multiple closed-loop modalities in laser-wire directed energy deposition of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 32, p. 100993. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100993.
29. Tarasov S.Yu., Filippov A.V., Savchenko N.L., Fortuna S.V., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A., Psakhie S.G. Effect of heat input on phase content, crystalline lattice parameter, and residual strain in wire-feed electron beam additive manufactured 304 stainless steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 99, iss. 9–12, pp. 2353–2363. DOI: 10.1007/s00170-018-2643-0.
30. Fuchs J., Schneider C., Enzinger N. Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source. *Welding in the World*, 2018, vol. 62, iss. 2, pp. 267–275. DOI: 10.1007/s40194-017-0537-7.
31. Wanjara P., Watanabe K., Formanoir C. de, Yang Q., Bescond C., Godet S., Brochu M., Nezaki K., Gholipour J., Patnaik P. Titanium alloy repair with wire-feed electron beam additive manufacturing technology. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 2019, p. 3979471. DOI: 10.1155/2019/3979471.
32. 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. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, vol. 212, pp. 1377–1386. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002.
33. Zhang J., Wang X., Paddea S., Zhang X. Fatigue crack propagation behaviour in wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V: effects of microstructure and residual stress. *Materials and Design*, 2016, vol. 90, pp. 551–561. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.10.141.
34. Lin J., Lv Y., Liu Y., Sun Z., Wang K., Li Z., Wu Y., Xu B. Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2017, vol. 69, pp. 19–29. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2016.12.015.
35. Hönnige J.R., Colegrove P., Williams S. Improvement of microstructure and mechanical properties in wire + arc additively manufactured Ti-6Al-4V with machine hammer peening. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 216, pp. 8–17. DOI: 10.1016/j.proeng.2018.02.083.
36. Lin J., Lv Y., Guo D., Wu X., Li Z., Liu C., Guo B., Xu G., Xu B. Enhanced strength and ductility in thin Ti-6Al-4V alloy components by alternating the thermal cycle strategy during plasma arc additive manufacturing. *Materials Science and Engineering A*, 2019, vol. 759, pp. 288–297. DOI: 10.1016/j.msea.2019.05.025.
37. Lin J., Lv Y., Liu Y., Sun Z., Wang K., Li Z., Wu Y., Xu B. Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 2017, vol. 69, pp. 19–29. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2016.12.015.
38. Ríos S., Colegrove P.A., Williams S.W. Metal transfer modes in plasma wire+arc additive manufacture. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, vol. 264, pp. 45–54. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.08.043.
39. Biswal R., Zhang X., Shamir M., Mamun A.A., Awd M., Walther F., Syed A.K. Interrupted fatigue testing with periodic tomography to monitor porosity defects in wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 28, pp. 517–527. DOI: 10.1016/j.addma.2019.04.026.
40. McAndrew A.R., Rosales M.A., Colegrove P.A., Hönnige J.R., Ho A., Fayolle R., Eyitayo K., Stan I., Sukrongpang P., Crochemore A., Pinter Z. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured

features for microstructural refinement. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 21, pp. 340–349. DOI: 10.1016/j.addma.2018.03.006.

41. Martina F., Roy M.J., Szost B.A., Terzi S., Colegrove P.A., Williams S.W., Withers P.J., Meyer J., Hofmann M. Residual stress of as-deposited and rolled wire + arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components. *Materials Science and Technology*, 2016, vol. 32, iss. 1, pp. 1439–1448. DOI: 10.1080/02670836.2016.1142704.

42. Donoghue J., Antonysamy A.A., Martina F., Colegrove P.A., Williams S.W., Prangnell P.B. 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. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.02.001.

43. Wu B., Pan Z., Chen G., Ding D., Yuan L., Cuiuri D., Li H. Mitigation of thermal distortion in wire arc additively manufactured Ti6Al4V part using active interpass cooling. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, vol. 24, iss. 5, pp. 484–494. DOI: 10.1080/13621718.2019.1580439.

44. Lu T., Liu C., Li Z., Wu Q., Wang J., Xu T., Liu J., Wang H., Ma S. Hot-wire arc additive manufacturing Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V titanium alloy: pore characterization, microstructural evolution, and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 817, p. 153334. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.153334.

45. Elmer J.W., Gibbs G. The effect of atmosphere on the composition of wire arc additive manufactured metal components. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, vol. 24, iss. 5, pp. 367–374. DOI: 10.1080/13621718.2019.1605473.

46. Queguineur A., Rückert G., Cortial F., Hascoët J.Y. Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications. *Welding in the World*, 2018, vol. 62, iss. 2, pp. 259–266. DOI: 10.1007/s40194-017-0536-8.

47. Rodriguez N., Vázquez L., Huarte I., Arruti E., Tabernero I., Alvarez P. Wire and arc additive manufacturing: a comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel. *Welding in the World*, 2018, vol. 62, iss. 5, pp. 1083–1096. DOI: 10.1007/s40194-018-0606-6.

48. Bekker A.C.M., Verlinden J.C. Life cycle assessment of wire + arc additive manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 177, pp. 438–447. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.148.

49. Hofer K., Haelsig A., Mayr P. Arc-based additive manufacturing of steel components – comparison of wire- and powder-based variants. *Welding in the World*, 2018, vol. 62, iss. 2, pp. 243–247. DOI: 10.1007/s40194-017-0527-9.

50. Martina F., Ding J., Williams S., Caballero A., Pardo G., Quintino L. Tandem metal inert gas process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 25, pp. 545–550. DOI: 10.1016/j.addma.2018.11.022.

51. A Hosseini V., Högström M., Hurtig K., Valiente Bermejo M.A., Stridh L.-E., Karlsson L. Wire-arc additive manufacturing of a duplex stainless steel: thermal cycle analysis and microstructure characterization. *Welding in the World*, 2019, vol. 63, pp. 975–987. DOI: 10.1007/s40194-019-00735-y.

52. Ahsan M.R.U., Tanvir A.N.M., Seo G.-J., Bates B., Hawkins W., Lee C., Liaw P.K., Noakes M., Nycz A., Kim D.B. Heat-treatment effects on a bimetallic additively-manufactured structure (BAMS) of the low-carbon steel and austenitic-stainless steel. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 32, p. 101036. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101036.

53. Laghi V., Palermo M., Gasparini G., Girelli V.A., Trombetti T. Experimental results for structural design of wire-and-arc additive manufactured stainless steel members. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, p. 105858. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105858.

54. Elmer J.W., Vaja J., Carpenter J.S., Coughlin D.R., Dvornak M.J., Hochanadel P., Gurung P., Johnson A., Gibbs G. Wire-based additive manufacturing of stainless steel components laser, arc, and electron beam sources were compared for free form fabrication of metal parts at high deposition rates. *Welding Journal*, 2020, vol. 99, iss. 1, pp. 8-s–24-s. DOI: 10.29391/2020.99.002.

55. Li F., Chen S., Shi J., Zhao Y. In-process control of distortion in wire and arc additive manufacturing based on a flexible multipoint support fixture. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, vol. 24, iss. 1, pp. 36–42. DOI: 10.1080/13621718.2018.1476083.

56. Ortega A.G., Galvan L.C., Deschaux-Beaume F., Mezrag B., Rouquette S. Effect of process parameters on the quality of aluminium alloy Al₃Si deposits in wire and arc additive manufacturing using a cold metal transfer process. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2018, vol. 23, iss. 4, pp. 316–332. DOI: 10.1080/13621718.2017.1388995.

57. Geng H., Li J., Xiong J., Lin X. Optimisation of interpass temperature and heat input for wire and arc additive manufacturing 5A06 aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2017, vol. 22, iss. 6, pp. 472–483. DOI: 10.1080/13621718.2016.1259031.

58. Ortega A.G., Galvan L.C., Salem M., Moussaoui K., Segonds S., Rouquette S., Deschaux-Beaume F. Characterisation of 4043 aluminium alloy deposits obtained by wire and arc additive manufacturing using a cold metal transfer process, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, vol. 24, iss. 6, pp. 538–547. DOI: 10.1080/13621718.2018.1564986.
59. Zhang S., Zhang Y., Gao M., Wang F., Li Q., Zeng X. Effects of milling thickness on wire deposition accuracy of hybrid additive/subtractive manufacturing. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, vol. 24, iss. 5, pp. 375–381. DOI: 10.1080/13621718.2019.1595925.
60. Gu J., Yang S., Gao M., Bai J., Zhai Y., Ding J. Micropore evolution in additively manufactured aluminum alloys under heat treatment and inter-layer rolling. *Materials and Design*, 2020, vol. 186, p. 108288. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108288.
61. Zhang Z., Ren W., Yang Z., Wen G. Real-time seam defect identification for Al alloys in robotic arc welding using optical spectroscopy and integrating learning. *Measurement*, 2020, vol. 156, p. 107546. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107546.
62. Miao Q., Wu D., Chai D., Zhan Y., Bi G., Niu F., Ma G. Comparative study of microstructure evaluation and mechanical properties of 4043 aluminum alloy fabricated by wire-based additive manufacturing. *Materials and Design*, 2020, vol. 186, p. 108205. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108205.
63. Javadi Y., MacLeod C.N., Pierce S.G., Gachagan A., Lines D., Mineo C., Ding J., Williams S., Vasilev M., Mohseni E., Su R. Ultrasonic phased array inspection of a wire + arc additive manufactured (WAAM) sample with intentionally embedded defects. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 29, p. 100806. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100806.
64. Horii T., Kirihara S., Miyamoto Y. Freeform fabrication of Ti–Al alloys by 3D micro-welding. *Intermetallics*, 2008, vol. 16, pp. 1245–1249. DOI: 10.1016/j.intermet.2008.07.009.
65. Ou W., Mukherjee T., Knapp G.L., Wei Y., DebRoy T. Fusion zone geometries, cooling rates and solidification parameters during wire arc additive manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 127, pp. 1084–1094. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.111.
66. Marinelli G., Martina F., Ganguly S., Williams S. Development of wire + arc additive manufacture for the production of large-scale unalloyed tungsten components. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, vol. 82, pp. 329–335. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.05.009.
67. Marinelli G., Martina F., Lewtas H., Hancock D., Mehraban S., Lavery N., Ganguly S., Williams S. Microstructure and thermal properties of unalloyed tungsten deposited by wire + arc additive manufacture. *Journal of Nuclear Materials*, 2019, vol. 522, pp. 45–53. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2019.04.049.
68. Abe T., Mori D., Sonoya K., Nakamura M., Sasahara H. Control of the chemical composition distribution in deposited metal by wire and arc-based additive manufacturing. *Precision Engineering*, 2019, vol. 55, pp. 231–239. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2018.09.010.
69. Zeng Z., Cong B.Q., Oliveira J.P., Ke W.C., Schell N., Peng B., Qi Z.W., Ge F.G., Zhang W., Ao S.S. Wire and arc additive manufacturing of a Ni-rich NiTi shape memory alloy: Microstructure and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 32, p. 101051. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101051.
70. Kuznetsov M.A., Krampit M.A. [The design of the 3d printer for electric-arc layered growth of metal products]. *Innovatsii v informatsionnykh tekhnologiyakh, mashinostroenii i avtotransporte: sbornik materialov II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proceedings 2nd International conference “Innovations in information technology, engineering and motor vehicles”]. Kemerovo, 2018, pp. 151–153. (In Russian).
71. Kuznetsov M., Zernin E., Krampit M., Danilov V., Shlyakhova G. Structural and chemical analysis of 3d printed metal products. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 2019, vol. 28, iss. 15, pp. 699–709.
72. Krampit A.G., Krampit M.A. Determination of a wire heat temperature under a pulse-arc welding condition y means of a calculation and graphic method. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 392–396. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.392.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).