

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.79

doi: 10.30987/2782-5957-2022-4-60-68

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА СИНТЕЗИРУЕМОЙ WAAM-МЕТОДОМ ДЕТАЛИ УПРАВЛЕНИЕМ ТРАЕКТОРИЕЙ ДВИЖЕНИЯ ФИДСТОКА

Андрей Викторович Киричек¹, Алексей Григорьевич Сергеев²,
Светлана Олеговна Федонина³✉, Дмитрий Иванович Петрешин⁴

¹⁻⁴ Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ avkbgtu@gmail.com, ORCID 0000-0002-3823-0501

² sergeev-san@mail.ru

³ fedonina.sv2015@gmail.com, ORCID 0000-0002-0472-4845

⁴ dipetreshin@yandex.ru, ORCID 0000-0001-9472-2167

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментальных исследований процесса 3DMP-синтеза с различными формообразующими траекториями движения проволочного фидстока. Установлена необходимость применения осциллирующих движений фидстока с целью повышения стабильности сварочного процесса и предотвращения возникновения дефектов формы. Приведены рекомендации использования траектории осциллирующих движений в зависимости от ширины синтезируемых стенок образцов. Проведены исследования качества синтезируемого материала, в ходе которых обнаружены немногочисленные поры размерами 5...25 мкм и 5...13 мкм (пилообразная и п-образная траектории осциллирующих движений соответственно) при общей величине содержания пор на исследуемой площади 0,016% и 0,01%. Цель исследования – технологическое обеспечение параметров качества синтезируемой WAAM-

методом детали управлением траекторией формообразующих движений фидстока в зависимости от геометрических параметров детали. Задача, решению которой посвящена статья – выявление наиболее оптимальных траекторий движения фидстока в процессе синтеза деталей при обеспечении параметров качества наплаваемого слоя (пористость). Выводы: в процессе синтеза деталей из проволоки WAAM-методом возможно успешное применение пилообразной и п-образной траекторий осцилляции фидстока при рекомендуемой ширине стенки 6...20 мм, выращиваемой в одном технологическом цикле с осциллирующим движением фидстока, целесообразность выбора траектории осцилляции зависит от геометрических параметров изделия.

Ключевые слова: технология, наплавка, синтез, 3DMP, WAAM, фидсток, траектория, осцилляция, качество.

Ссылка для цитирования:

Киричек А. В. Технологическое обеспечение параметров качества синтезируемой waam-методом детали управлением траекторией движения фидстока / А. В. Киричек, А. Г. Сергеев, С. О. Федонина, Д. И. Петрешин // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 4. – С. 60–68. doi: 10.30987/2782-5957-2022-4-60-68.

Original article

Open Access Article

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF THE QUALITY PARAMETERS OF THE PART USING WAAM-METHOD BY CONTROLLING THE FEEDSTOCK PATH

Andrey Viktorovich Kirichek¹, Aleksey Grigorievich Sergeev²,
Svetlana Olegovna Fedonina³✉, Dmitry Ivanovich Petreshin⁴

¹⁻⁴ Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ avkbgtu@gmail.com, ORCID 0000-0002-3823-0501

² sergeev-san@mail.ru

³ fedonina.sv2015@gmail.com, ORCID 0000-0002-0472-4845

⁴ dipetreshin@yandex.ru, ORCID 0000-0001-9472-2167

The paper presents the results of experimental studies of 3DMP synthesis with various shaping paths of the wire feedstock. The necessity of using oscillating feedstock movements in order to increase the stability of the welding process and prevent shape defects is established. Recommendations are given for using the path of oscillating movements depending on the width of the synthesized walls of samples. The quality of the synthesized material are studied and a few pores with sizes of 5...25 microns and 5...13 (sawtooth and U-shaped oscillation respectively) are discovered with the total pore content of 0.016% and 0.01% on the area under study. The study objective is the technological support of the quality parameters of the part synthesized by WAAM-method by controlling the shaping

feedstock path depending on the geometric parameters of the part. The problem to which the paper is devoted is to identify the most optimal paths of feedstock during part synthesis while ensuring the quality parameters of the deposited layer (porosity). Conclusions: for the synthesis of wire parts by WAAM-method, it is possible to apply sawtooth and U-shaped feedstock oscillation paths with a recommended wall width of 6...20 mm, grown in the same technological cycle with oscillating feedstock path. The appropriateness of the choice of the oscillation path depends on the geometric parameters of the product.

Keywords: technology, surfacing, synthesis, 3DMP, WAAM, feedstock, path, oscillation, quality.

Reference for citing:

Kirichek A.V, Sergeev A.G, Fedonina S.O, Petreshin D.I. Technological support of the quality parameters of the part using WAAM-method by controlling of the feedstock path. - Transport Engineering. – 2022. – № 4. - P. 60 - 68 . doi: 10.30987/2782-5957-2022-4-60-68.

Введение

В настоящее время интенсивно развивается направление аддитивного производства наукоемких изделий. Из всего многообразия аддитивных технологий (АТ), наиболее перспективными сегодня являются технологии синтеза деталей из проволоки, которые по сравнению с порошковыми АТ обладают многократно более высокой производительностью и не имеют жестких ограничений по размерам выращиваемых изделий.

Появление 3DMP-метода (3D Metal Print – осаждение/наплавка проволоки методом электродуговой сварки (gas metal arc welding, GMA welding, GMAW), синтеза деталей создало реальную конкуренцию традиционным технологиям механической обработки даже по экономической эффективности. Такие технологии получили аббревиатуру WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing). Применение проволоки позволяет упростить предварительный процесс подготовки сырья к синтезу и ограничиться только проверкой химического состава, а также исключить процедуру по удалению порошка из внутренних полостей детали [1].

Возможно успешное применение WAAM-технологий не только самостоятельно, но и в составе гибридных аддитивно-субтрактивных или аддитивно-субтрактивно-упрочняющих технологий. [2-5]

Несмотря на родственность электродуговой сварки и 3DMP-печати, невозможно полностью полагаться на исследования сварочных процессов и не учитывать ключевые отличия реализации синтеза. Сварка деталей в большинстве случаев предполагает соединение контактирующих поверхностей по основной траектории движения исполнительного органа вдоль наплавляемой линии и дополнительных осциллирующих движений при небольшой длине шва. Синтез деталей будет обоснован только в случае создания крупных сложнопрофильных изделий с размерами до нескольких метров или мелкогабаритных деталей сложной конфигурации сплошным слоем (швом). Таким образом, синтез сложнопрофильных деталей невозможно проводить в ручном режиме, процесс должен быть автоматизирован, что накладывает определенные требования к конструкции и системам ЧПУ применяемого оборудования. В некоторых случаях синтез деталей возможен при вращении горелки (сопла), что значительно усложняет программирование роботов (или модулей станка) и создание траектории инструмента. [6]

Кроме того, применение одного и того же режима наплавки для синтеза деталей из разных металлов (алюминий, титан, сталь и т.д.) невозможно [1]. Целесообразно применение более специализированных

источников тока, позволяющих работать в широком диапазоне режимов (MIG/MAG, COLD, TIG, импульсный и т.д.).

Следовательно, в вопросах применяемых режимов синтеза и формообразования на достоверные данные сварочных процессов можно полагаться частично (синтез мелкогабаритных деталей с применением пауз или небольшим количеством слоев). При синтезе более крупных деталей необходимо проведение предварительных исследований по выявлению рациональных технологических параметров наплавки.

Вне зависимости от применяемых методов синтеза ключевое значение имеет траектория движения исполнительного ор-

Теоретические предпосылки

Предварительные исследования выбора траектории движения фидстока, позволяющей получить наиболее качественный наплавленный слой, основаны на многочисленных данных отечественных и зарубежных исследований. [1, 7]

Наиболее часто в результате некорректно подобранной траектории движения исполнительного органа формируются изгиб или провисание наплавленного материала, незаполненные полости и высокая пористость [1]. Существуют несколько методик по устранению или минимизации искажений геометрической формы. Метод преобразования средней оси МАТ (Medial Axis Transformation), применяется для устранения проблем с пористостью и полостями, заполняя деталь изнутри к ее границам [10-11], в то время как [13] и [14] исследовали шаблоны траекторий для создания элементов пересечения, применяя траекторию наплавки похожей на две буквы «L», соприкасающиеся друг с другом.

Приведенные ниже теоретические предпосылки рассматриваются применительно к синтезу деталей из стальной проволоки одного диаметра и материала 3DMP-методом.

Укрупненно траектории осцилляции фидстока при сварочных процессах можно разделить на прямолинейные (типа п-образное, елочкой (пилообразное) и т.д.) и сложные (восьмерка, петлеобразное и т.д.).

гана – электрода или фидстока. В результате выбора нерациональной траектории возникают погрешности формы, следовательно, увеличивается припуск на последующую механическую обработку и уменьшается коэффициент использования материала. Таким образом, одной из важнейших задач технологии 3DMP-синтеза является формообразование – формирование заданной толщины и правильного профиля стенки, выращиваемой в процессе послойной наплавки.

Кроме того, оптимальный выбор траектории формообразующих движений имеет влияние и на качество наплавленного слоя, в частности на наличие и размеры внутренних дефектов.

Учитывая автоматизацию процесса 3DMP-печати, возможно использование траекторий осцилляции любой сложности, однако применение сложных траекторий увеличивает сложность написания программ управления траекторией перемещения фидстока, а также длительность синтеза. Кроме того, применение излишне сложных траекторий может привести к перегреву материала в области «петель». Как следствие, возможна потеря геометрической формы наплавленной детали, что особенно важно учитывать при наплавке металлов с разной теплоемкостью и теплопроводностью.

Следовательно, целесообразно исследовать в первую очередь возможность применения наиболее простых траекторий осцилляции типа пилообразная (елочка) и п-образная.

Обе траектории можно охарактеризовать задаваемыми параметрами ширины наплавленного слоя $l_{сл}$ и шагом формообразующего движения h (рис. 1). Применение пилообразной траектории, рис. 1а, с небольшим значением $l_{сл}$ приведет к наслоению материала вблизи середины шва и формированию выпуклости при равномерном заполнении материалом областей вблизи края шва. При значительном увеличении ширины слоя до максимальных значений в центральной части слоя возможно формирование как наслоения

так и равномерного распределения материала, что будет зависеть от параметра h . Форма краевых областей слоя также зависит от шага формообразующего движения. При минимальном шаге формируется

наслоение и вблизи краев, при максимальном – незаполненные полости. Более равномерный по высоте слой формируется при средних значениях ширины наплавляемого слоя.

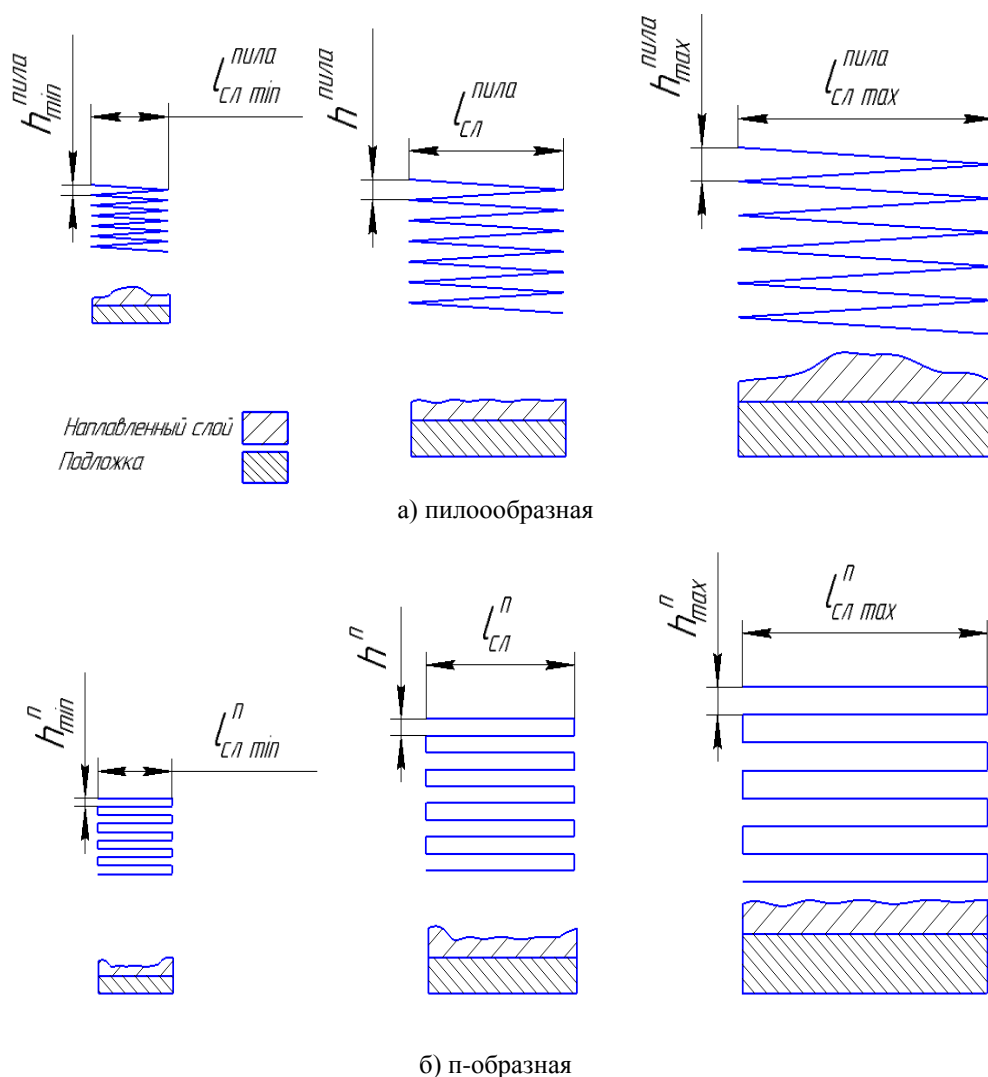


Рис. 1. Траектории движений осцилляции при 3DMP-синтезе
Fig. 1. Trajectories of oscillation movements during 3DMP synthesis

Применение п-образной траектории (рис. 1б), при наплавке слоя небольшой ширины с небольшим значением h приведет к небольшому участку равномерной высоты в центре слоя и наслоению (наплыву) материала вблизи краев шва с формированием вогнутости. При увеличении ширины слоя до максимальных значений в центральной части слоя также будет равномерное распределение материала, а заполнение краевых областей зависит от шага формообразующих движений. При минимальной величине шага возможно

формирование наплыва наплавляемого материала вблизи краев, при максимальном – незаполненные полости. Более равномерный по высоте слой формируется при больших значениях ширины синтезируемого слоя.

При необходимости наплавки тонкой стенки возможно применение движения наплавки без осцилляции или пилообразная траектория при значительном шаге осцилляции.

Таким образом, в зависимости от геометрических размеров наплавляемого

слоя металла целесообразно применение «пилообразной» траектории осцилляции при наплавке слоя небольшой ширины, п-

образной – при больших значениях ширины слоя.

Результаты

В целях поиска рациональных путей решения данной проблемы, были проведены экспериментальные исследования результатов 3DMP-синтеза с различными формообразующими траекториями движения проволочного фидстока марки Св08Г2С диаметром 1 мм на базовый элемент из проката – трубу из стали 09Г2С [8]. Результаты исследований представлены на рис. 2.

На рис. 2а, представлена наплавка без осцилляции фидстока. Такая траектория перемещения фидстока может использоваться для получения тонких стенок, а также при работе с материалами, имеющими особые технологические

свойства – минимальное растекание в расплавленном состоянии. При данном способе возможны потоки материала как по образующей, так и по укладываемому шву, нарушения геометрической правильности и сплошности стенки. Причинами возникающих в процессе синтеза дефектов формообразования могут быть: нерациональные режимы наплавки, некорректно подобранный материал и геометрические параметры применяемой подложки, локальный перегрев, сопровождающийся потерей устойчивости стенки, недостаточная или отсутствующая система охлаждения.

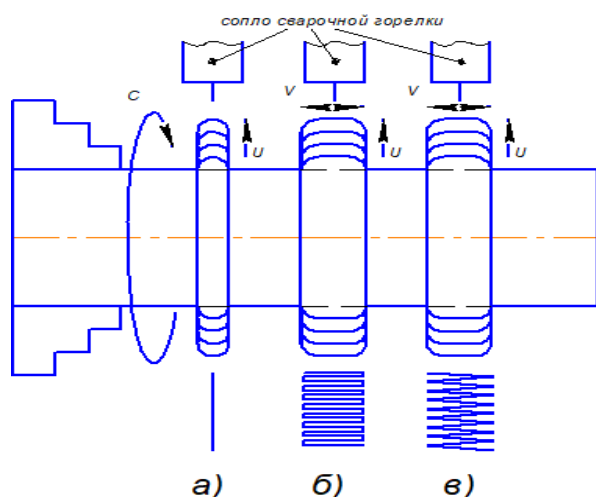


Рис.2. Результаты и схема наплавки при различных траекториях движения фидстока (сопла сварочной горелки):

а – без осцилляции; б-в – с осциллирующим движением: б – п-образным; в – пилообразным
 Fig.2. Results and scheme of surfacing with different trajectories of the feedstock (welding torch nozzle):
 a – without oscillation; b-c – with oscillating motion: b – u-shaped; c – sawtooth

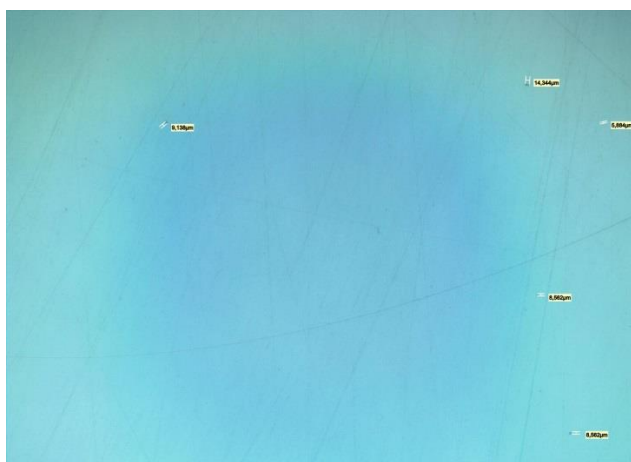
Для повышения стабильность сварочного процесса и предотвращения возникновения дефектов формы следует применять осциллирующее движение фидстока. Из рис. 2б и 2в видно, что осцилляция не только позволяет за один технологический цикл выращивать значительно более широкие стенки, но и способствует формированию ровных боковых поверхностей. Рекомендуемая ширина стенки, выращиваемой в одном

технологическом цикле с осциллирующим движением фидстока, составляет 6...20 мм. При этом для более широких стенок рекомендуется п-образное осциллирующее движение, а для более тонких – пилообразное осциллирующее движение фидстока.

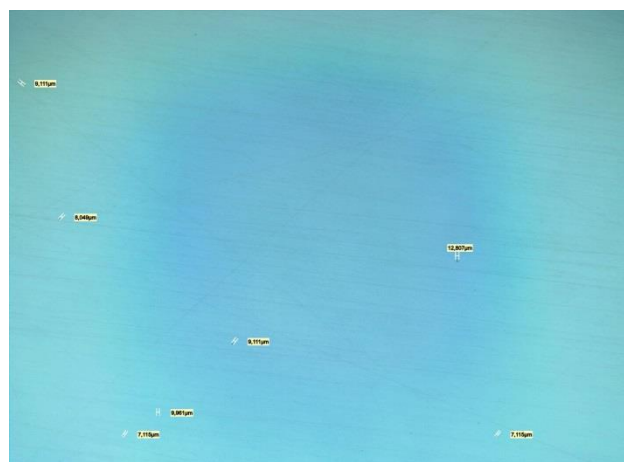
При увеличении толщины стенки (фланца) свыше 20 мм выращивание слоя за один оборот заготовки пилообразной траекторией невозможно, необходимо

несколько проходов, а применение пилообразной траектории осцилляции нецелесообразно вследствие быстрой кристаллизации расплава

В целях определения влияния применяемой траектории формообразующих движений на качество наплавляемого слоя проводились исследования пористости образцов, синтезированных при идентичных технологических режимах: газовая среда – смесь газов (80 % Ar + 20 % CO₂); подача фидстока 1000 мм/мин; высота наплавляемого слоя 2,5 мм; шаг формообразующего движения 3 мм; ширина шва 16 мм; скорость подачи проволоки 4,4 м/мин.



а - пилообразная



б - п-образная

Рис. 3. Внутренние дефекты в синтезированном образце из проволоки Св08Г2С, ×200
Fig. 3. Internal defects in the synthesized Sw08G2C wire sample, ×200

В результате контроля образца, синтезированного с применением пилообразной траектории осцилляции, также обнаружены немногочисленные, в большинстве случаев сгруппированные, поры размерами 5...13 мкм, рисунок 3, б. Общая величина содержания пор на

Заключение

В ходе проведенных теоретических и экспериментальных исследований выбора траектории осцилляции фидстока при синтезе образцов из проволоки марки Св08Г2С на заготовку-трубу из стали 09Г2С установлено: рекомендуемая ширина стенки, выращиваемой в одном технологическом цикле с осциллирующим

Исследования внутренних дефектов синтезированных заготовок проводились на вырезанных в нескольких сечениях образцах с нетравленными полированными поверхностями на металлографическом оптическом микроскопе Leica DVM6A. Согласно ГОСТ Р 57556-2017 [9] для исследования пористости применялись образцы с полем зрения более 10×10мм.

В результате исследований образца, синтезированного с пилообразной траекторией осцилляции, обнаружены немногочисленные сгруппированные поры размерами 5...25 мкм, рис.3, а. Общая относительная площадь, занятая порами, составляет около 0,016 %.

исследуемой площади составляет 0,01%.

Трещин, раковин несплошностей или иных внутренних дефектов синтезированного материала не обнаружено ни в одном из исследуемых образцов.

движением фидстока, составляет 6...20 мм; при синтезе более широких стенок (10...20 мм) рекомендуется п-образное осциллирующее движение фидстока, для более тонких (6...12 мм) – пилообразное. При увеличении ширины стенки более 20 мм рекомендуется выращивание в несколько проходов.

Проведенные исследования качества синтезируемого материала показали наличие в синтезированных образцах немногочисленных пор размерами 5...25 мкм (пилообразное) и 5...13 мкм (п-образное) при общей величине содержания пор на исследуемой площади 0,016 % и 0,01 % соответственно.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Knezović N., Topić A. Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) – A New Advance in Manufacturing. 4th International Conference 4th International Conference «NEW TECHNOLOGIES NT-2018» Development and Application June 14-16. 2018 – Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. URL: https://www.researchgate.net/publication/325092297_Wire_and_Arc_Additive_Manufacturing_WAA_M_-_A_New_Advance_in_Manufacturing
2. Киричек А.В., Федонин О.Н., Соловьев Д.Л., Жирков А.А., Хандожко А.В., Смоленцев Е.В. Аддитивно-субтрактивные технологии – эффективный подход к инновационному производству. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2019;8 (81):4-10.
3. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Жирков А.А., Федонин О.Н., Федонина С.О., Хандожко А.В. Возможности аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2016;4 (52):151-160.
4. Патент №2750603 С1 Российская Федерация, МПК В33У 30/00 (2015.01), В23К 9/04 (2006.01), В23К 26/342 (2014.01), В23К 26/70 (2014.01), С21D 9/50 (2006.01). Устройство для создания деталей аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологией : №2020129073 : заявл. 02.09.2020 : опубл. 29.06.2021 / Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Жирков А.А., Терехов М.В. – 12 с.
5. Патент №2755081 С1 Российская Федерация, МПК В24В 39/00 (2006.01), В23К 28/02 (2014.01), С21D 9/50 (2006.01). Устройство для наплавки с упрочнением волной деформации : № 2020129069 заявл. 02.09.2020 : опубл. 13.09.2021. / Киричек А.В., Соловьев Д.Л. – 11 с.
6. Williams S.W., Martina F., Addison A.C., Ding J., Pardal G., Colegrove P. Wire + arc additive manufacturing. *Mater. Sci. Technol.* 2015;836:1743284715Y.000.
7. Крампит А.Г., Крампит Н.Ю. Способы управления формированием сварного шва. *Технологии и материалы*. 2015;3:21-26.
8. Киричек А.В., Сергеев А.Г., Федонина С.О. Влияние траектории движения проволочного фидстока на формообразование при аддитивном 3DMP-синтезе. *Новые технологии в машиностроении*: сб. науч. тр. Всероссийской научно-технической конф. Воронеж, 2021. С.62-64.
9. ГОСТ Р 57556-2017 Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний. М.: Стандартинформ, 2017. 11 с.
10. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H., Larkin N. Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation. *J. Clean. Prod.* 2016;133:942–952.
11. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2015;34:8–19.
12. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014;73(1–4):173–183.
13. Baufeld B., Brandl E., Van O. Der Biest. Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition. *J. Mater. Process. Technol.* 2011;211(6):1146–1158.
14. Venturini G., Montevecchi F., Scippa A., Campatelli G. Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features. *Procedia CIRP.* 2016;55:95–100.
1. Knezović N., Topić A. Wire and arc additive manufacturing (WAAM) – a new advance in manufacturing. Proceedings of 4th International Conference 4th International Conference «NEW TECHNOLOGIES NT-2018» Development and Application; 2018 June 14-16; Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. Available from: https://www.researchgate.net/publication/325092297_Wire_and_Arc_Additive_Manufacturing_WAA_M_-_A_New_Advance_in_Manufacturing
2. Kirichek AV, Fedonin ON, Soloviev DL, Zhirkov AA, Khandozhko AV, Smolentsev EV. Additive-subtractive technologies - an effective approach to innovative production. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2019;8(81):4-10.
3. Kirichek AV, Soloviev DL, Zhirkov AA, Fedonin ON, Fedonina SO, Khandozhko AV. Possibilities of additive-subtractive-strengthening technology. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2016;4(52):151-160.

4. Kirichek AV, Soloviev DL, Zhirkov AA, Terekhov MV. Patent no. 2750603 C1 Russian Federation, IPC B33Y 30/00 (2015.01), B23K 9/04 (2006.01), B23K 26/342 (2014.01), B23K 26/70 (2014.01), C21D 9/50 (2006.01). Device for creating parts with additive-subtractive-strengthening technology: no. 2020129073. 2021 Jul 29.
5. Kirichek AV, Soloviev DL. Patent no. 2755081 C1 Russian Federation, IPC B24B 39/00 (2006.01), B23K 28/02 (2014.01), C21D 9/50 (2006.01). Device for surfacing with wave deformation hardening: no. 2020129069. 2021 Sep 13.
6. Williams SW, Martina F, Addison AC, Ding J, Pardal G, Colegrove P. Wire + arc additive manufacturing. Mater. Sci. Technol. 2015;836:1743284715Y.000.
7. Krampit AG, Krampit NYu. Methods of controlling the formation of a weld. *Technologii I Materiali*. 2015;3:21-26.
8. Kirichek AV, Sergeev AG, Fedonina SO. Influence of the wire feedstock path on shaping during additive 3DMP synthesis. *New technologies in mechanical engineering: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference; Voronezh: 2021. p.62-64.*
9. GOST R 57556-2017 Materials for additive technological processes. *Methods of control and testing*. Moscow: Standartinform; 2017.
10. Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H, Larkin N. Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation. *J. Clean. Prod.* 2016;133:942–952.
11. Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2015;34:8–19.
11. Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H. A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014;73(1–4):173–183.
12. Baufeld B, Brandl E, Van O. Der Biest. Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition. *J. Mater. Process. Technol.* 2011;211(6):1146–1158.
13. Venturini G, Montevecchi F, Scippa A, Campatelli G. Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features. *Procedia CIRP.* 2016:55:95–100.
14. Venturini G., Montevecchi F., Scippa A., Campatelli G. Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features. *Procedia CIRP.* 2016:55:95–100.

Информация об авторах:

Киричек Андрей Викторович, доктор технических наук, профессор, проректор по перспективному развитию Брянского государственного технического университета, тел. (4832) 51-51-38, Scopus-Author ID – 6506677389, Research- ID-Web of Science – P-8276-2019 и AAQ-9985-2020, Author-ID-РИНЦ – 143976.

Сергеев Алексей Григорьевич, ведущий инженер лаборатории упрочняющих технологий Брянского государственного технического университета.

Федонина Светлана Олеговна, кандидат технических наук, ведущий инженер лаборатории упроч-

Kirichek Andrey Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector for Long-term Development at Bryansk State Technical University, phone: 8 (4832) 51-51-38; Scopus-Author ID – 6506677389, Research- ID-Web of Science – P-8276-2019 и AAQ-9985-2020, Author-ID- RSCI – 143976.

Sergeev Aleksey Grigorievich, Chief Engineer of the Laboratory of Strengthening Technologies at Bryansk State Technical University.

Fedonina Svetlana Olegovna, Candidate of Technical Sciences, Chief Engineer of the Laboratory of

упрочняющих технологий Брянского государственного технического университета, тел. (4832) 51-51-38, Scopus-Author ID – 57188852728, Author-ID-РИНЦ – 1119220.

Петрешин Дмитрий Иванович, доктор технических наук, профессор, директор Учебно-научного технологического института Брянского государственного технического университета, тел. (4832) 56-14-75, Scopus-Author ID – 36024438700, Research- ID-Web of Science – V-3703-2019 и GG-1326-2016, Author –ID-РИНЦ – 175163.

Strengthening Technologies at Bryansk State Technical University, phone: 4832) 51-51-38, Scopus-Author ID – 57188852728, Author-ID- RSCI - 1119220.

Petreshin Dmitry Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Educational and Scientific Institute of Technology at Bryansk State Technical University, phone: (4832) 56-14-75, Scopus-Author ID – 36024438700, Research- ID-Web of Science – V-3703-2019 и GG-1326-2016, Author –ID- RSCI – 175163.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 28.03.2022; одобрена после рецензирования 10.12.2021; принята к публикации 21.03.2022. Рецензент – Шалыгин М.Г., доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Трубопроводные транспортные системы» Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 28.03.2022; approved after review on 10.12.2021; accepted for publication on 21.03.2022. The reviewer is Shaligin M.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Pipeline Transport Systems at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.