

Варушкин С.В., Трушников Д.Н., Саломатова Е.С., Беленький В.Я., Пермяков Г.Л. Многослойная электронно-лучевая наплавка проволочным материалом // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 89–94. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.4.11

Varushkin S.V., Trushnikov D.N., Salomatova E.S., Belenkiy V.Ya., Permyakov G.L. Multiple-layer electron beam surfacing by wire material. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 89–94. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.4.11

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 4, 2019
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.4.11
УДК 621.791.722

С.В. Варушкин, Д.Н. Трушников, Е.С. Саломатова, В.Я. Беленький, Г.Л. Пермяков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

МНОГОСЛОЙНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ НАПЛАВКА ПРОВОЛОЧНЫМ МАТЕРИАЛОМ

Описаны экспериментальные исследования многослойной электронно-лучевой наплавки проволочного материала. Был произведен экспериментальный подбор режимов электронно-лучевой наплавки проволочного материала. Оценка режимов производилась путем визуального контроля процесса и результата наплавки. Были исследованы режимы электронно-лучевой наплавки со следующими технологическими приемами: кольцевая осцилляция электронного луча и различные режимы фокусировки при статичном положении электронного луча, подача присадочной проволоки в расплавленную ванну, подача присадочной проволоки над зоной наплавки. Посредством изменения режимов фокусировки было исследовано несколько характерных положений фокуса электронного луча: ниже поверхности подложки, на поверхности подложки, между уровнем присадочной проволоки и поверхностью подложки, на уровне присадочной проволоки, выше уровня присадочной проволоки. Кроме того, было исследовано влияние позиционирования присадочной проволоки на качество наплавляемого валика. Была исследована подача проволоки в зону наплавки под углом 45°–60° к поверхности и горизонтальная подача проволоки над зоной наплавки. В ходе эксперимента были использованы различные варианты горизонтальной подачи проволоки: спереди, сбоку, сзади. В заключительной части экспериментальных исследований была выполнена многослойная наплавка с использованием присадочной проволоки ER308LSi диаметром 0,8 мм на пластину из нержавеющей стали толщиной 13 мм. Был получен образец кольцевой наплавки, состоящий из четырех слоев, высотой 3 мм. При этом два слоя были получены с точным позиционированием присадочной проволоки, один слой со смещением проволоки относительно оси наплавляемого валика в одну сторону и один слой со смещением в другую сторону.

Ключевые слова: электронно-лучевая наплавка, многослойная, присадочная проволока, аддитивные технологии, фокусировка, осцилляция, статичный луч, нержавеющая сталь, положение присадочной проволоки, параметры режима.

S.V. Varushkin, D.N. Trushnikov, E.S. Salomatova, V.Ya. Belenkiy, G.L. Permyakov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

MULTIPLE-LAYER ELECTRON BEAM SURFACING BY WIRE MATERIAL

The paper describes experimental studies of multiple-layer electron beam surfacing by wire material. An experimental selection of electron-beam surfacing modes for wire material was carried out. The evaluation of the regimes was carried out by visual control of the process and the result of surfacing. Regimes of electron beam surfacing with the following technological methods were studied: ring oscillation of the electron beam and various focusing modes in the static position of the electron beam, feeding the filler wire into the molten pool, feeding the filler wire above the surfacing zone. By changing the focusing modes, several characteristic electron beam focusing positions were investigated: below the substrate surface; on the surface of the substrate; between the level of the filler wire on the substrate surface; at the filler wire level; above the level of the filler wire. In addition, the influence of the filler wire positioning on the quality of the deposited roller was investigated. The wire feed into the surfacing zone at an angle of 45–60° to the surface and a horizontal feed of the wire over the surfacing zone were studied. During the experiment, various variants of horizontal wire feeding were used: front, side, rear. In the final part of the experimental studies, multiple-layer surfacing was performed using an ER308LSi filler wire 0.8 mm in diameter to a plate of the stainless steel with a thickness of 13 mm. A specimen of an annular surfacing was obtained, consisting of four layers, 3 mm high. Two layers were obtained with the exact positioning of the filler wire, one layer with offset of the wire relative to the axis of the deposited roller in one direction and one layer with offset in the other direction.

Keywords: electron beam surfacing, multiple-layer, filled wire, additive technologies, focusing, oscillation, static beam, stainless steel, filled wire position, surfacing variable.

Большинство существующих в настоящее время аддитивных технологий изготовления металлических изделий основаны на селективном лазерном спекании порошков, лазерном плавлении

порошковых материалов или расплавлении порошков под действием концентрированного электронного пучка. Широкое применение аддитивных технологий с использованием порошкового сырья

обусловлено возможностью изготавливать детали с высокой геометрической точностью. Однако при этом существенно сужается круг конструкционных материалов, из которых возможно получение готовых изделий высокого качества. В частности, формирование изделий из большинства алюминиевых сплавов, а также сплавов активных металлов, таких как титановые и магниевые сплавы, приводит к повышенной пористости материала полученного изделия с существенным снижением его механических характеристик [1–11].

Для аддитивного производства с незначительными адаптациями могут быть использованы многие стандартные сварочные процессы, такие как дуговая, лазерная и электронно-лучевая сварка. Применение проволоочных материалов для аддитивного производства является интересной альтернативой применению порошковых материалов ввиду простоты процесса и относительно больших скоростей наплавки металла.

При электронно-лучевой наплавке с использованием сплошной проволоки в качестве присадочного материала качество получаемого наплавленного валика зависит от множества факторов. При этом основными характеристиками качества процесса наплавки являются точность формирования наплавленного слоя металла и характер переноса металла в наплавляемый валик. Несмотря на большое внимание к аддитивным технологиям, процессы электронно-лучевой наплавки проволоочным материалом до настоящего времени изучены недостаточно, что подтверждается малочисленностью публикаций о результатах исследований этого процесса [12–20].

Целью данной работы было исследование влияния параметров режима электронно-лучевой наплавки сплошной проволокой и подбор их оптимальных значений.

Эксперимент проводился на установке электронно-лучевой сварки с энергетическим агрегатом ЭЛА-6ВЧ. Подача присадочной проволоки осуществлялась посредством установленного в вакуумную камеру компактного механизма с приводом на шаговом двигателе 57PLF10K. В качестве подложки были использованы цилиндрические образцы из стали 12X18H10T наружным диаметром 160 мм и толщиной стенки 5 мм. Наплавка производилась коррозионно-стойкой хромоникелевой проволокой ER308LSi диаметром 0,8 мм.

На первом этапе проведения экспериментов был произведен экспериментальный подбор режимов электронно-лучевой наплавки проволоочного материала. Оценка режимов производилась путем

визуального контроля процесса и результатов наплавки. Процесс электронно-лучевой наплавки исследовался при воздействии на металл неподвижного электронного луча с различными режимами фокусировки, а также при развертке луча по круговой траектории. Подача присадочной проволоки в зону ее расплавления электронным лучом осуществлялась как над зоной наплавки, так и непосредственно в расплавленную ванну.

При проведении экспериментальных исследований использовались следующие режимы фокусировки электронного луча:

- ниже поверхности подложки;
- на поверхности подложки;
- в промежутке между областью воздействия электронного луча на присадочную проволоку и поверхностью подложки;
- на уровне области воздействия электронного луча на присадочную проволоку;
- выше области воздействия электронного луча на присадочную проволоку.

Было установлено, что при фокусировке электронного луча с незначительным превышением над областью его воздействия на присадочную проволоку обеспечивается наиболее благоприятный режим плавления проволоки и активации поверхности подложки. Это связано с тем, что при таком режиме фокусировки электронный луч взаимодействует с проволокой при пониженной плотности энергии, что обеспечивает отсутствие перегрева проволоки и разбрызгивания металла. В плоскости взаимодействия с подложкой электронный луч имеет еще более низкую плотность энергии. Это приводит к снижению интенсивности плавления подложки, снижению ее перемешивания с наплавляемым материалом и увеличению зоны активации поверхности подложки.

Однако ввиду неизбежных отклонений оси присадочной проволоки от своего первоначального положения при ее подаче в зону плавления требуется дополнительное увеличение диаметра электронного луча в плоскости взаимодействия с проволокой. Это позволяет снизить требования к точности позиционирования присадочной проволоки относительно электронного луча. Недостатком такого подхода является необходимость повышения вводимой мощности, что приводит к увеличению ширины наплавляемого валика и не может быть использовано при наличии ограничений по его ширине. Внешний вид наплавленных валиков, полученных при наплавке расфокусированным электронным лучом, представлен на рис. 1.

Альтернативой предлагаемому способу фокусировки является использование системы опера-



Рис. 1. Внешний вид валика, наплавленного с использованием расфокусированного электронного луча

тивного контроля положения присадочной проволоки относительно электронного луча либо применение развертки электронного луча. В частности, развертка электронного луча по круговой траектории позволила избежать колебаний ширины наплавленного валика (рис. 2).

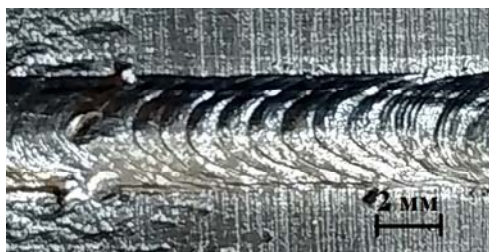


Рис. 2. Внешний вид валика при наплавке с круговой разверткой электронного луча

На следующем этапе проведения экспериментов было исследовано влияние позиционирования присадочной проволоки на качество наплаваемого валика.

При подаче проволоки в зону наплавки под углом 45° – 60° к поверхности процесс сильно зависит от позиционирования проволоки и мало зависит от направления наплавки. При этом проволока может подаваться прямо в ванну расплавленного металла и происходит равномерный перенос металла. Однако в данном случае существует вероятность залипания проволоки при отклонении от устойчивого режима плавления.

При горизонтальной подаче присадочной проволоки наблюдалась низкая зависимость процесса наплавки от позиционирования проволоки.

При передней или боковой подаче присадочной проволоки обеспечивается более гладкая поверхность валика (рис. 3, а, б), в то время как при задней подаче формируется валик с неравномерной поверхностью (рис. 3, в). Следует отметить, что при задней подаче проволоки такой характер поверхности наплавленного валика может быть изменен корректировкой мощности электронного луча.

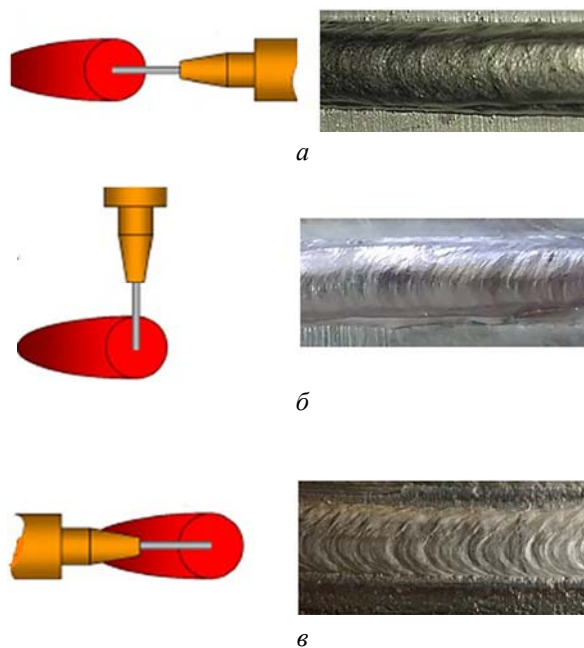


Рис. 3. Формирование поверхности валика в зависимости от ориентации проволоки (направление наплавки слева направо): а – передняя подача проволоки; б – задняя подача проволоки; в – боковая подача проволоки

Исходя из полученных результатов в заключительной части экспериментальных исследований была выполнена многослойная наплавка с использованием присадочной проволоки ER308LSi диаметром 0,8 мм на пластину из нержавеющей стали толщиной 13 мм (см. рис. 3). Параметры режима наплавки представлены в таблице.

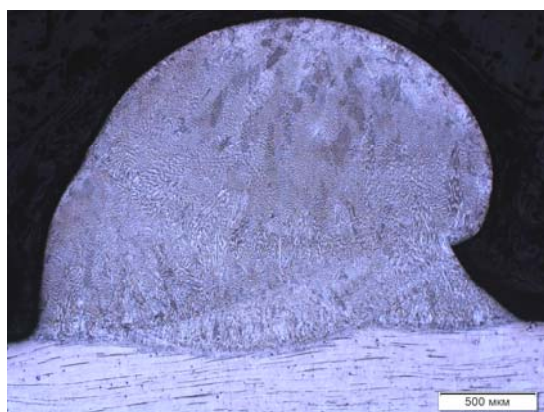
Внешний вид образца с наплавкой четырех слоев и макрошлиф наплавленного валика приведены на рис. 4. Общая высота валика – 3 мм. Из рис. 4, б видно, что сплавление наплавки происходит с минимальным перемешиванием, дефекты

Параметры режима наплавки

| Ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}}$, кВ | Ток луча $I_{\text{л}}$, мА | Скорость наплавки (скорость перемещения подложки) $V_{\text{н}}$, мм/с | Скорость подачи проволоки $V_{\text{п.п.}}$, мм/с | Положение фокуса луча | Подача присадочной проволоки | Траектория развертки электронного луча |
|---|------------------------------|---|--|--|--|--|
| 60 | 12–14 | 2,5 | 15 | Между наплаваемым валиком и проволокой | Горизонтально, спереди, на 1–2 мм выше наплаваемого валика | Круговая, диаметр 1,8 мм, частота 810 Гц |



а



б

Рис. 4. Многослойная наплавка нержавеющей аустенитной стали: а – внешний вид; б – макрошлиф наплавленного валика

отсутствуют. Второй слой был наплавлен по оси наплавки первого слоя. Проплавление второго слоя происходит на всю толщину первого слоя с частичным расплавлением подложки. Третий слой был наплавлен со смещением присадочной проволоки относительно оси наплавки. При формировании этого слоя имело место стекание металла с наплавленного валика. Четвертый слой был наплавлен со смещением присадочной проволоки в сторону, противоположную оси наплавки. Этот слой также был получен со смещением металла относительно оси наплавки с образованием наплыва.

Выводы

1. При расположении фокуса электронного луча между областью воздействия электронного луча на присадочную проволоку и подложкой при наплавке снижается разбрызгивание присадочной проволоки и обеспечивается достаточно хорошая активация подложки.

2. Применение развертки электронного луча по круговой траектории при наплавке позволяет снизить требования к точности позиционирования

присадочной проволоки и избежать колебаний ширины наплаваемого валика.

3. При горизонтальной подаче присадочной проволоки снижается зависимость качества наплаваемого валика от точности позиционирования проволоки. При этом существует незначительная зависимость качества поверхности валика от направления подачи проволоки. Передняя и боковая подача проволоки обеспечивает более лучшее качество поверхности наплаваемого валика.

4. Значительные отклонения присадочной проволоки относительно оси наплавки приводят к снижению отношения высота/ширина наплаваемого валика и увеличивают вероятность появления дефектов.

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

Список литературы

1. Powder bed charging during electron-beam additive manufacturing / Z.C. Cordero, H.M. Meyer, P. Nandwana, R.R. Dehoff // *Acta Materialia*. – 2018. – Vol. 124. – P. 437–445.
2. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: a review // *J. of Materials Eng. and Performance*. – 2014. – Vol. 23(6). – P. 1917–1928.
3. Gokuldoss P.K., Kolla S., Eckert J. Additive manufacturing processes: selective laser melting, electron beam melting and binder jetting–selection guidelines // *Materials*. – 2017. – Vol. 10(672). – P. 1–12.
4. Directed light fabrication of a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition / J.O. Milewski, G.K. Lewis, D.J. Thoma, G.I. Keel, R.B. Nemeck, R.A. Reinert // *J. of Materials Proc. Techn.* – 1998. – Vol. 75, no. 1–3. – P. 165–172.
5. Mumtaz K., Hopkinson N. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting // *Rapid Prototyping J.* – 2009. – Vol. 15, no. 2. – P. 96–103.
6. Zhu H.H., Lu L., Fuh J.Y.H. Development and characterisation of direct laser sintering Cu-based metal powder // *J. of Materials Proc. Techn.* – 2003. – Vol. 140, no. 1–3. – P. 314–317.
7. Milewski J.O. Additive manufacturing of metals. – Cham: Springer International Publishing, 2017. – 343 p.
8. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing / W.J. Sames, F.A. List, S. Pannala, R.R. Dehoff, S.S. Babu // *Int. Materials Rev.* – 2016. – Vol. 61, no. 5. – P. 315–360.
9. Additive manufacturing of metals / D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann // *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 117. – C. 371–392.
10. Bourell D.L. Perspectives on additive manufacturing // *Annual Rev. of Materials Res.* – 2016. – Vol. 46. – P. 1–18.

11. Microstructural Control of Additively Manufactured Metallic Materials / P.C. Collins, D.A. Brice, P. Samimi, I. Ghamarian, H.L. Fraser // *Annual Rev. of Materials Res.* – 2016. – Vol. 46. – P. 63–91.

12. Fuchs J., Schneider C., Enzinger N. Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source // *Weld. in the World.* – 2018. – Vol. 62, no. 2. – P. 267–275.

13. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li // *The Int. J. of Adv. Manuf. Techn.* – 2015. – Vol. 81, no. 1–4. – P. 465–481.

14. Electron beam additive manufacturing with wire – analysis of the process / M.St. Węglowski, S. Błacha, J. Pilarczyk, J. Dutkiewicz, Ł. Rogal // *AIP Conf. Proc.* – 2018. – Vol. 1960. – P. 140015.

15. Гуденко А.В., Драгунов В.К., Слива А.П. Методика определения режимов послойной электронно-лучевой наплавки проволоки для аддитивных технологий // *Вестник Моск. энергет. ин-та.* – 2017. – № 5. – С. 8–14.

16. Суходоев С.С., Суходоева А.А. Электронно-лучевая наплавка проволоки // *Современные проблемы студенческого образования: материалы межвуз. науч.-практ. конф.* – Пермь, 2018. – С. 84–87.

17. Установка электронно-лучевого выращивания металлических изделий / И.Ю. Бакеев, Ю.А. Бурачевский, В.А. Бурдовицин, И.В. Осипов, А.Г. Рау, Г.В. Семенов // *Доклады Томс. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники.* – 2017. – Vol. 20, no. 3. – С. 76–78.

18. Контроль параметров процесса электронно-лучевой наплавки с использованием сигналов токов проволоки и изделия / А.В. Щербаков, В.Н. Мартынов, И.А. Харитонов, Д.А. Гапонова, Р.В. Родякина, В.К. Драгунов // *Электротехника.* – 2018. – № 4. – С. 37–42.

19. Process control of electron beam wire additive manufacturing: пат. 0297140 США / Taminger K.M., Hafley R.A., Zalameda J.N., Domack C.S., Taminger B.L., Burke E.R., Martin R.E., Seufzer W.J., Butler T.A.; заяв. и патентообл. National Aeronautics and Space Administration (NASA). – № 15/489247; заявл. 17.04.17, опубл. 19.10.2017. – 28 с.

20. Electron beam layer manufacturing using scanning electron monitored closed loop control: пат. 8598523 США / Stecker S., Wollenhaupt P.; заяв. и патентообл. SCIAKY Inc. – № 12/902,520; заявл. 12.10.10; опубл. 06.03.2014. – 19 с.

References

1. Cordero Z.C., Meyer H.M., Nandwana P., Dehoff R.R. Powder bed charging during electron-beam additive manufacturing. *Acta Materialia*, 2018, vol. 124, pp. 437–445.

2. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Eng. and Performance*, 2014, vol. 23(6), pp. 1917–1928.

3. Gokuldoss P.K., Kolla S., Eckert J. Additive manufacturing processes: selective laser melting, electron beam melting and binder jetting–selection guidelines. *Materials*, 2017, vol. 10(672), pp. 1–12.

4. Milewski J.O., Lewis G.K., Thoma D.J., Keel G.I., Nemecek R.B., Reinert R.A. Directed light fabrication of

a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition. *Journal of Materials Proc. Techn.*, 1998, vol. 75, no. 1–3, pp. 165–172.

5. Mumtaz K., Hopkinson N. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 2009, vol. 15, no. 2, pp. 96–103.

6. Zhu H.H., Lu L., Fuh J.Y.H. Development and characterisation of direct laser sintering Cu-based metal powder. *Journal of Materials Proc. Techn.*, 2003, vol. 140, no. 1–3, pp. 314–317.

7. Milewski J.O. Additive manufacturing of metals. *Cham: Springer International Publishing*, 2017, 343 p.

8. Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *Int. Materials Rev.*, 2016, vol. 61, no. 5, pp. 315–360.

9. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 2016, vol. 117, pp. 371–392.

10. Collins P.C., Brice D.A., Samimi P., Ghamarian I., Fraser H.L., Bourell D.L. Perspectives on additive manufacturing. *Annual Rev. of Materials Res.*, 2016, vol. 46, pp. 1–18.

11. Microstructural Control of Additively Manufactured Metallic Materials. *Annual Rev. of Materials Res.*, 2016, vol. 46, pp. 63–91.

12. Fuchs J., Schneider C., Enzinger N. Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source. *Weld. in the World*, 2018, vol. 62, no. 2, pp. 267–275.

13. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The Int. Journal of Adv. Manuf. Techn.*, 2015, vol. 81, no. 1–4, pp. 465–481.

14. Węglowski M.St., Błacha S., Pilarczyk J., Dutkiewicz J., Rogal Ł. Electron beam additive manufacturing with wire – analysis of the process. *AIP Conf. Proc.*, 2018, vol. 1960, pp. 140015.

15. Гуденко А.В., Драгунов В.К., Слива А.П. Методика определения режимов послойной электронно-лучевой наплавки проволоки для аддитивных технологий [Methodology for determining the layered electron-beam cladding of wire for additive technologies]. *Vestnik Mosk. energet. in-ta*, 2017, no. 5, pp. 8–14.

16. Sukhodoev S.S., Sukhodoeva A.A. Elektronno-luchevaia naplavka provoloki [Electron-beam wire surfacing]. *Sovremennye problemy studentcheskogo obrazovaniia: materialy mezhvuz. nauch.-prakt. konf.* Perm', 2018, pp. 84–87.

17. Bакеев И.И., Бурачевский И.А., Бурдовицин В.А., Осипов И.В., Рау А.Г., Семенов Г.В. Установка электронно-лучевого выращивания металлических изделий [Installation of electron-beam metal products growth]. *Doklady Toms. gos. un-ta sistem upr. i radioelektroniki*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 76–78.

18. Шчербаков А.В., Мартынов В.Н., Харитонов И.А., Гапонова Д.А., Родиакина Р.В., Драгунов В.К. Контроль параметров процесса электронно-лучевой наплавки с использованием сигналов токов проволоки и изделия [Control of electron-beam cladding process parameters using wire and product current signals]. *Elektrotehnika*, 2018, no. 4, pp. 37–42.

19. Taminger K.M., Hafley R.A., Zalameda J.N., Domack C.S., Taminger B.L., Burke E.R., Martin R.E., Seufzer W.J., Butler T.A. Process control of electron beam wire additive manufacturing. Patent National Aeronautics and Space Administration no. 0297140.15/489247(2017).

20. Stecker S., Wollenhaupt P. Electron beam layer manufacturing using scanning electron monitored closed loop control. Patent SCIAKY no. 8598523 (2014).

Получено 27.08.2018

Опубликовано 26.11.19

Сведения об авторах

Варушкин Степан Владимирович (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Обработка материалов высококонцентрированными источниками энергии» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: stepan.varushkin@mail.ru.

Трушников Дмитрий Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: trdimitr@yandex.ru.

Саломатова Екатерина Сергеевна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: weld-katy@mail.ru.

Беленький Владимир Яковлевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru.

Пермяков Глеб Львович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Обработка материалов высококонцентрированными источниками энергии» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: gleb.permyakov@yandex.ru.

About the authors

Stepan V. Varushkin (Perm, Russian Federation) – Junior Researcher, Science-Technical Laboratory of Material Treatment by Highconcentrated Energy Sources, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: stepan.varushkin@mail.ru.

Dmitriy N. Trushnikov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: trdimitr@yandex.ru.

Ekaterina S. Salomatova (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: weld-katy@mail.ru.

Vladimir Ya. Belenkij (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru.

Gleb L. Permyakov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Junior Researcher, Science-Technical Laboratory of Material Treatment by Highconcentrated Energy Sources, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: gleb.permyakov@yandex.ru.