



УДК 621.791
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-133-138

Поступила 18.11.2018
Received 18.11.2018

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЗАГОТОВОК ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ И СИЛУМИНА НА ИХ МИКРОСТРУКТУРУ

И. Л. ПОБОЛЬ, А. А. БАКИНОВСКИЙ, М. К. СТЕПАНКОВА, А. Н. БУРИН, А. Д. ГУБКО, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: backinoffskin@mail.ru

Исследована микроструктура образцов из нержавеющей стали аустенитного класса и силумина, полученных аддитивным методом послойной наплавки проволоки при различных режимах. Показано влияние тока луча, временных интервалов между наплавками слоев металла друг на друга, а также электронно-лучевой постобработки на микроструктуру.

Ключевые слова. Электронно-лучевые технологии, аддитивные технологии, термоциклирование, силумин, нержавеющая сталь, микроструктура.

Для цитирования. Поболь, И. Л. Влияние условий термоциклирования в процессе аддитивного производства заготовок из нержавеющей стали и силумина на их микроструктуру / И. Л. Поболь, А. А. Бакиновский, М. К. Степанкова, А. Н. Бурин, А. Д. Губко // *Литье и металлургия*. 2018. № 4. С. 133–138. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-133-138.

INFLUENCE OF HEAT CYCLING CONDITIONS IN THE ADDITIVE MANUFACTURING OF STAINLESS STEEL AND AL-SI ALLOY RAW PARTS ON THEIR MICROSTRUCTURE

I. L. POBOL, A. A. BAKINOVSKI, M. K. STEPANKOVA, A. N. BURIN, A. D. GUBKO, Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevich str.
E-mail: backinoffskin@mail.ru

The microstructure of samples of austenitic stainless steel and Al-Si alloy, obtained by the wire based additive method under various conditions was investigated. The effect of the beam current, the deposition intervals and the electron beam post-processing on the microstructure is shown.

Keywords. Electron beam technologies, additive manufacturing, heat cycling, stainless steel, Al-Si alloy, microstructure.

For citation. Pobol I. L., Bakinovski A. A., Stepankova M. K., Burin A. N., Gubko A. D. Influence of heat cycling conditions in the additive manufacturing of stainless steel and Al-Si alloy raw parts on their microstructure. *Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 4, pp. 133–138. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-133-138.

Введение

Растущий темп развития и повсеместное распространение идеи аддитивного производства изделий в первом десятилетии XXI в. привели к разработке множества методов, которые позволяют послойно создавать детали из металлов и сплавов. Однако в ходе разработки и создания промышленного оборудования для аддитивного производства по этим технологиям было обнаружено множество особенностей и ограничений. Например, при работе оборудования по схеме bed deposition существуют ограничения по габаритам изготавливаемых деталей, а низкая скорость производства, высокая цена на исходный порошок и ограниченный спектр материалов сильно сужают области применения таких технологий, как SLS (Selective Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting), EBM (Electron Beam Melting) [1–4]. И хотя использование проволоки в качестве «строительного материала» в оборудовании, работающем по принципу direct deposition, позволяет уйти от этих проблем, низкое качество поверхности и ограниченность возможности получения изделий сложной геометрической формы являются на сегодняшний день се-

рзными препятствиями для внедрения технологий EBFFF (Electron Beam Free Form Fabrication), SMD (Shaped Metal Deposition) в промышленность [5, 6].

При этом основной особенностью изделий, изготовленных с помощью аддитивных методов, является специфическая микроструктура, так как в процессе послойного производства материал каждого слоя многократно проходит сложные термические циклы, состоящие из переплава, нагрева и охлаждения [7]. Изучение влияния режимов послойного выращивания на микроструктуру получаемых изделий позволит более ясно представить механизмы структурно-фазовых превращений в металле, что, в свою очередь, станет предпосылкой для разработки технологических приемов управления микроструктурой изготавливаемых изделий.

Материалы, оборудование, методики исследования

Для изучения особенностей структурообразования при электронно-лучевой послойной наплавке в качестве исходного материала использовали проволоку диаметром 1,2 мм из нержавеющей стали аустенитного класса. Подложка толщиной 7 мм изготовлена из стали 45. Химический состав этих материалов приведен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Химический состав материалов, использовавшихся для получения образцов из стали аустенитного класса [8, 9]

Материал	Химический состав материалов, мас.%									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	S	P	V
Сталь аустенитного класса	0,02	0,8	1,9	20,0	10,0	–	0,1	0,035	0,02	–
Сталь 45 (подложка)	0,45–0,5	0,17–0,37	0,5–0,8	<0,25		–	–	0,04	0,035	–

Для оценки особенностей структурообразования силумина изготовлены образцы из проволоки силумина диаметром 1,2 мм. Химический состав материалов проволоки и подложки толщиной 15 мм приведен в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Химический состав материалов, использовавшихся для получения образцов из силумина

Материал	Химический состав, мас.%		
	Si	Ti	Al
Алюминиевый сплав системы Al-Si (проволока)	5	0,1	Остальное
Алюминий (подложка)	–	–	99,95

Послойную электронно-лучевую наплавку проводили на оборудовании КЛ156, предназначенном для электронно-лучевой сварки деталей. В вакуумной камере размером 3000×3000×4500 мм размещена электронно-лучевая пушка мощностью 30 кВт. Шаговые двигатели обеспечивают электронно-лучевой пушке возможность перемещения по пяти осям. Совокупность механических и диффузионных насосов позволяет откачивать камеру до остаточного давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па. Дополнительно на электронно-лучевую пушку была установлена система подачи проволоки, управление которой выведено к пульту оператора.

Основными параметрами процесса электронно-лучевой наплавки являются ток луча I , ток фокусировки I_f , скорость подачи проволоки $v_{пр}$, скорость перемещения пушки $v_{п}$, высота смещения пушки по оси z перед наплавкой нового слоя высотой h (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Основные параметры электронно-лучевой послойной наплавки

Материал	I , мА	I_f , мА	$v_{пр}$, мм/с	$v_{п}$, мм/с	h , мм
Сталь аустенитного класса	70–60	530	5	7–12	0,5–2
Силумин	15–30	530	5	7–12	0,5–2

При наплавке первых слоев требуются более высокие затраты энергии ввиду того, что подложка в начальный момент имеет комнатную температуру. Поэтому для корректного протекания процесса наплавки на его начальной стадии ток I необходимо увеличивать, а скорость движения пушки $v_{п}$ уменьшать. Такое изменение режима приводит к увеличению объема наплавляемого слоя, причем в большей

степени по высоте, чем по ширине. В связи с этим высота h при наплавке первых слоев увеличивалась до 2 мм.

Металлографические исследования микроструктуры полученных образцов осуществляли на оптическом микроскопе Planar МИ-1.

Результаты исследования

Методом послойной электронно-лучевой наплавки были изготовлены экспериментальные образцы простой формы (рис. 1). Из них были изготовлены шлифы, на которых проводили анализ микроструктуры. Различные цвета параллельных участков на боковой поверхности связаны с механической обработкой фрезерованием.



Рис. 1. Внешний вид образца, полученного методом послойной электронно-лучевой наплавки до (а) и после (б) механической обработки поверхности [10]

На рис. 2 показана типичная микроструктура наплавленного материала из нержавеющей стали. Такая структура образуется в каждом наплавленном слое. Она представляет собой хаотически ориентированные дендриты небольшой длины (до 1 мм). Однако при наплавке следующего слоя происходит переплав одного или нескольких (в зависимости от режима) предыдущих, уже закристаллизовавшихся слоев. Именно во время последующей кристаллизации металл предыдущего слоя приобретает характерную дендритную структуру с ориентацией осей в направлении теплоотвода (рис. 3), так как на этом этапе он является промежуточным звеном между наплаваемым металлом и нижележащими слоями.

На рис. 3 приведена микроструктура на границе слоев из нержавеющей стали, которые были наплавлены непосредственно друг за другом (с интервалом около 1 мин) и с длительной паузой между наплавками (около 2 ч). Интервал между этапами наплавки напрямую влияет на температуру, которую будет

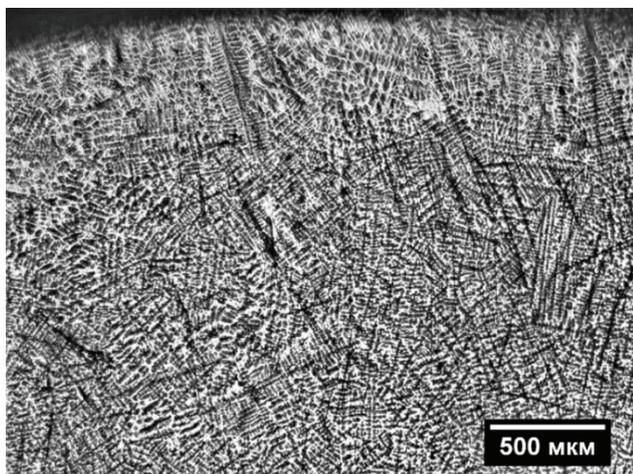


Рис. 2. Микроструктура наплавленного материала из нержавеющей стали без последующего слоя

иметь уже закристаллизовавшаяся часть изготавливаемого образца во время наплавки следующего слоя. Разница температур в ванне расплава и твердом металле в процессе наплавки влияет на температурный градиент в жидкой и твердой фазах, скорость кристаллизации и в итоге на микроструктуру. Из рисунка видно, что микроструктура приграничных зон смежных слоев наплавки при длительном интервале между наплавками сильно различается: крупные дендриты шириной около 100 мкм в нижнем слое и тонкие (до 5 мкм) мелкодисперсные дендриты в верхнем. В случае кратковременного интервала такой разницы в структурах соседних слоев наплавки не наблюдается: дендриты последующего слоя практически являются продолжением дендритов предыдущего слоя.

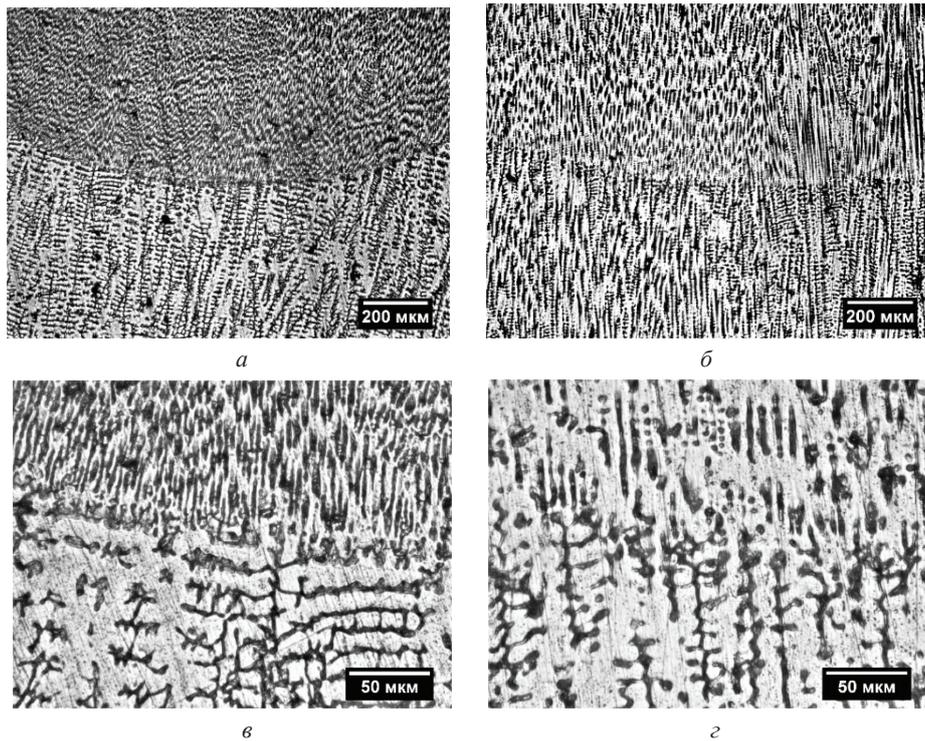


Рис. 3. Микроструктура на границе слоев из нержавеющей стали, наплавленных с интервалом 2 ч (а, в) и 1 мин (б, г)

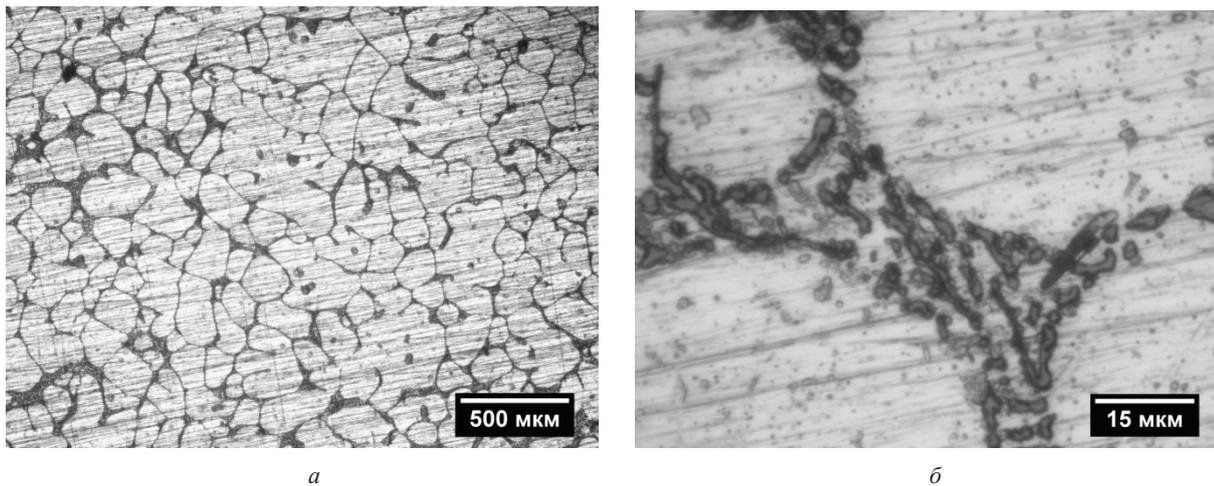


Рис. 4. Микроструктура образца из силумина, полученного методом электронно-лучевой послойной наплавки при токе луча 30 мА: а – $\times 50$; б – $\times 1000$

На рис. 4, а представлена микроструктура образца из силумина, полученного методом электронно-лучевой послойной наплавки при токе луча $I = 30$ мА. Необходимо отметить, что при таком режиме в структуре отсутствуют дендриты с ярко выраженным превалирующим направлением роста главных ветвей, как можно было наблюдать на образцах из нержавеющей стали аустенитного класса. Напротив, микроструктура представляет собой равноосные дендриты твердого раствора кремния в алюминии с размерами 200–400 мкм. В междендритном пространстве располагается эвтектика (рис. 4, б).

Путем снижения тока луча до $I = 15$ мА в процессе наплавки без изменения остальных параметров удалось получить образцы с мелкодисперсной структурой. Размер равноосных дендритов уменьшился в 40 раз по сравнению с образцом, полученным при $I = 30$ мА, и составил 5–10 мкм (рис. 5, а). Однако в образце, полученном при таком режиме наплавки, образуются небольшие зоны неравноосных дендритов, главные оси которых расположены вдоль направления теплоотвода (рис. 5, б).

Таким образом, изменяя величину тока луча при электронно-лучевой послойной наплавке, можно получать образцы из силумина с необходимым размером зерна. Так как доэвтектоидные силумины являются литейными термонеупрочняемыми сплавами, то измельчение зерна наряду с модифицированием

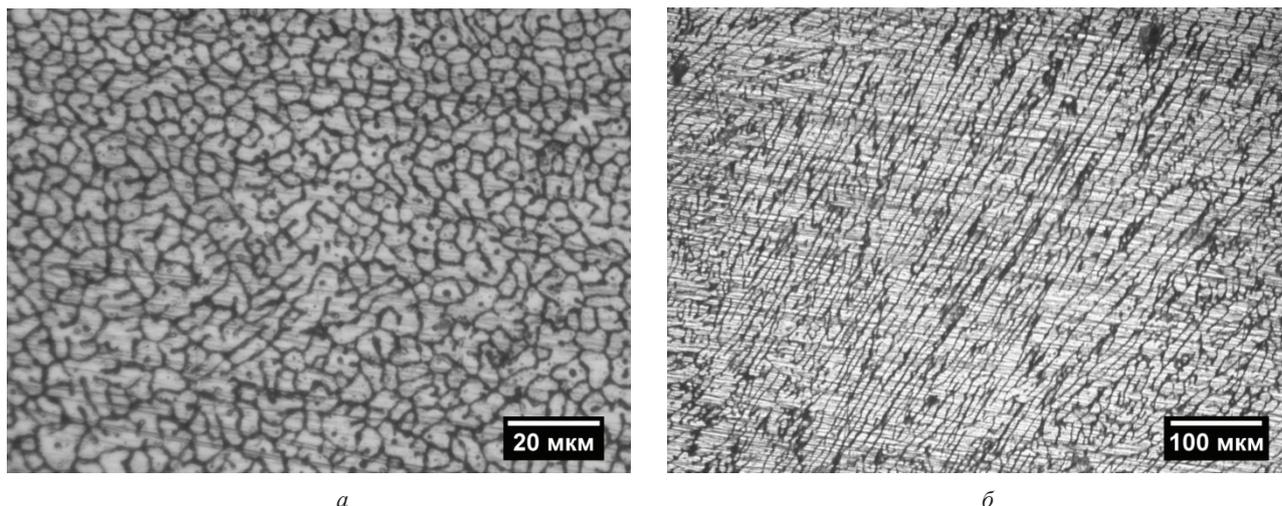


Рис. 5. Микроструктура образца из силумина, полученного методом электронно-лучевой послойной наплавки при токе луча 15 мА: равноосные (а) и неравноосные дендриты (б)

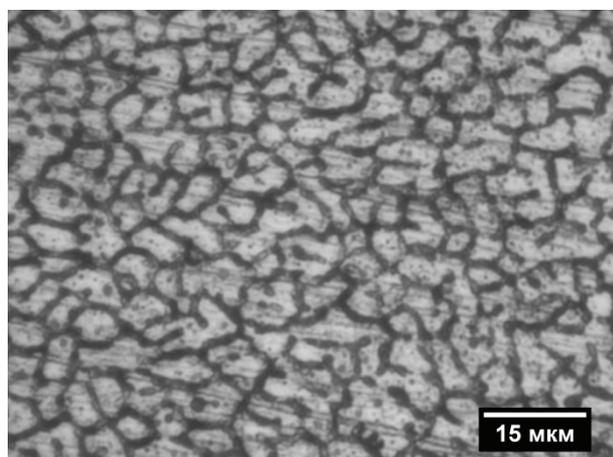


Рис. 6. Микроструктура образца из силумина, полученного методом электронно-лучевой послойной наплавки при токе луча $I = 30$ мА с последующей термообработкой

является практически единственным способом повышения механических и эксплуатационных свойств деталей и заготовок из таких материалов.

Однако ток луча также тесно связан с геометрическими размерами слоя наплавки, что при аддитивном способе изготовления деталей является одним из самых важных параметров. При увеличении тока луча отношение высоты слоя к его толщине h/b уменьшается. Таким образом, получить образец с большой толщиной стенки и мелкодисперсной структурой путем уменьшения тока наплавки не представляется возможным. Одним из путей решения этой проблемы является электронно-лучевая обработка каждого слоя после его наплавки. На рис. 6 показан пример микроструктуры образца из силумина, полученного методом электронно-лучевой послойной наплавки при токе луча $I = 30$ мА, измельченной последующей электронно-лучевой обработкой.

Выводы

Сравнительный анализ микроструктур одно- и многопроходной наплавки из нержавеющей аустенитной стали показал, что при многократной послойной наплавке дендриты, изначально хаотически ориентированные в теле наплавки, в процессе частичного переплава и многократных термических циклов, возникающих при наплавке последующих слоев металла, приобретают преобладающую ориентацию вдоль направления теплоотвода. При этом большое влияние на формирование микроструктуры приграничных зон смежных слоев наплавки, в частности на степень ее дисперсности, оказывает температура закристаллизовавшегося металла в момент наплавки на него следующего слоя.

На примере силумина показано, что при увеличении тока луча в 2 раза (с 15 до 30 мА) в процессе наплавки размер зерна наплавленного слоя увеличивается в 40 раз. Однако электронно-лучевая постобработка наплавленных слоев позволяет вернуть мелкодисперсную структуру.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении: пособ. для инженеров. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
2. Herzog, D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals // Acta Mater. 2016. Vol. 117. P. 371–392.
3. Trevisan F., Calignano F., Lorusso M., Pakkanen J., Aversa A., Ambrosio E.; Lombardi M., Fino P., Manfredi D. On the selective laser melting (SLM) of the alsil10mg alloy: Process, microstructure, and mechanical properties // Materials. 2017. Vol. 10(76). P. 1–23.

4. Sallica-Leva E., Jardini A. L., Fogagnolo J. B. Microstructure and mechanical behavior of porous Ti-6Al-4V parts obtained by selective laser melting // *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2013. Vol. 26. P. 98–108.
5. Taminger K. M. B., Hafley R. A. Characterization of 2219 Aluminum Produced by Electron Beam Freeform Fabrication // *Proceedings of the 13th Solid Freeform Fabrication Symposium*; Austin, TX; August 4–8, 2002. P. 482–489.
6. Baufeld B., Van der Biest O., Gault R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties // *Materials and Design*. 2010. Vol. 31(1), pp. 106–111.
7. Brenne F., Leuders S., Niendorf T. On the impact of additive manufacturing on microstructural and mechanical properties of stainless steel and Ni-base alloys // *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte* 2017, Vol. 162(5), pp. 199–202.
8. Химический состав материала проволоки LNM304LSi // Официальный сайт компании Lincoln Electric [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/ConsumableEU_MIGWires-LNM-LNM304LSi/LNM304LSi-rus.pdf – Дата доступа: 1.11.2018.
9. ГОСТ 1050-88. Сталь качественная и высококачественная. Сортовой и фасонный прокат, калиброванная сталь. ИПК ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ, М.: Изд-во Сталь, 1996.
10. Залеский В. Г., Поболь И. Л., Бакиновский А. А., Губко А. Д. Получение металлических изделий с применением электронно-лучевых аддитивных технологий // *Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* 2018. Т. 63. № 2. С. 169–180. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-169-180>.

REFERENCES

1. Zlenko M. A., Nagaytsev M. V., Dovbysh V. M. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Additive technologies in engineering]. Moscow «NAMI» Publ., 2015. 220 p.
2. Herzog, D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals // *Acta Mater.* 2016, vol. 117, pp. 371–392.
3. Trevisan F., Calignano F., Lorusso M., Pakkanen J., Aversa A., Ambrosio E., Lombardi M., Fino P., Manfredi D. On the selective laser melting (SLM) of the als10mg alloy: Process, microstructure, and mechanical properties. *Materials*, 2017, vol. 10(76), pp. 1–23.
4. Sallica-Leva E., Jardini A. L., Fogagnolo J. B. Microstructure and mechanical behavior of porous Ti-6Al-4V parts obtained by selective laser melting. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2013. Vol. 26, pp. 98–108.
5. Taminger K. M. B., Hafley R. A. Characterization of 2219 Aluminum Produced by Electron Beam Freeform Fabrication. *Proceedings of the 13th Solid Freeform Fabrication Symposium*; Austin, TX; August 4–8, 2002, pp. 482–489.
6. Baufeld B., Van der Biest O., Gault R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties. *Materials and Design*. 2010, vol. 31(1), pp. 106–111.
7. Brenne F., Leuders S., Niendorf T. On the impact of additive manufacturing on microstructural and mechanical properties of stainless steel and Ni-base alloys. *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, 2017, vol. 162(5), pp. 199–202.
8. *Khimicheskii sostav materiala provoloki LNM304LSi* (Chemical elements content of wire LNM304LSi) // *Officialnyi sait kompanii Lincoln Electric* (Lincoln Electric official site) Available at: https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/ConsumableEU_MIGWires-LNM-LNM304LSi/LNM304LSi-rus.pdf (accessed 1 November 2018).
9. State Standard 1050–88. Quality and high-quality steel. Rolled and shaped steel, calibrated steel. Moscow, Standartinform Publ., 1996. 30 p. (In Russian).
10. Zaleski V. H., Pobol I. L., Bakinovskii A. A., Gubko A. D. Poluchenie metalicheskikh izdeliy s primeneniem elektronno-luchevykh additivnykh tekhnologiy [The metal parts manufacturing by electron beam additive technologies]. *Vesti NAN Belarusi. Ser. phys.-tech. nauk = Proceeding of the National Academy Sciences of Belarus. Physical-Tehchnical series.* 2018, vol. 63, no. 2. pp. 169–180. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-169-180>.