

АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ (Обзор)

В. В. ЖУКОВ, Г. М. ГРИГОРЕНКО, В. А. ШАПОВАЛОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены различные особенности способов аддитивного производства металлических изделий. Отмечена перспективность технологий, использующих в качестве расходного материала металлическую проволоку. Показано современное состояние исследовательских работ в области аддитивного производства послойной электродуговой объемной наплавкой. Библиогр. 20, табл. 3, рис. 10.

Ключевые слова: аддитивное производство, прототипирование, формообразование и управление структурой, лазерная наплавка расходимой проволокой, изготовление произвольных форм электронным лучом, электродуговая послойная объемная наплавка

Термином «аддитивное производство» (АП) принято называть группу технологических способов быстрого прототипирования, которые позволяют создавать цельные, объемные изделия из различных материалов по трехмерной компьютерной модели [1]. Стандарт ASTM F2792-12A дает определение термину АП как «способ соединения материалов, при котором происходит послойное создание объекта по заданной цифровой трехмерной модели». Первые способы АП, появившиеся в начале 1980-х годов, в основном были специализированы на производстве изделий из полимерных пластиков и резин. В настоящее время эти способы нашли успешное и коммерческое применение в таких областях, как аэрокосмическое производство, машиностроение, медицина, архитектура и дизайн, бытовая электроника, ювелирное производство, военная промышленность [2–5]. Наряду с развитием способов АП, использующих в качестве расходных полимерные материалы, развивались и способы, использующие металлические сплавы.

Возможность изготовления металлического изделия конечной формы или близкой к конечной в одну технологическую операцию видится перспективной в области непосредственного производства. Условная область применения способа производства, при прочих равных условиях, может быть представлена в виде зависимости сложности формы от количества изделий. На рис. 1. представлена область применения АП в сфере металлургического производства [6]. Способы АП могут быть конкурентоспособными при необходимости изготовить небольшое количество изделий или деталей сложной формы, или изделий с заданной структурой.

По сравнению с классическими способами производства (включая механообработку на фрезерных станках с ЧПУ), способы АП имеют определенные преимущества:

- возможность полной автоматизации процесса создания изделия (включая этап создания цифровой трехмерной модели), что снижает количество человеко-часов, необходимых на изготовление изделия, и в целом снижает общее время изготовления.

- конкурентоспособность применения способов АП для изготовления изделий из дорогостоящих титановых и никелевых сплавов, ввиду низкого коэффициента расхода материала. Это преимущество особенно важно в области аэрокосмической промышленности, изготовление деталей которой зачастую характеризуется высоким коэффициентов расхода материала (рис. 2).

В табл. 1 приведены различные способы АП, сгруппированные в соответствии со стандартом ASTM F2792. Этот стандарт предполагает подразделять способы АП в области производства металлических изделий по используемому принципу: основанные на сплавлении (спекании) порошковой подложки; основанные на впрыски-



Рис. 1. Качественная позиция области применения АП относительно распространенных способов производства [6]

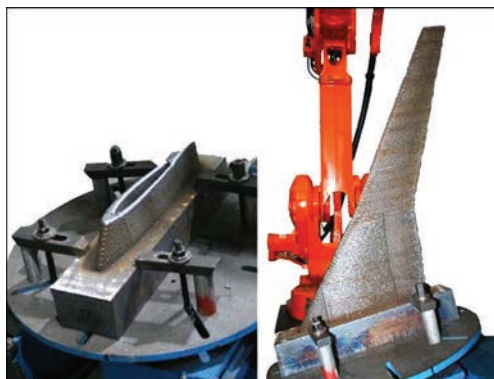


Рис. 2. Модель крыла, созданного по технологии WAAM [7]

вании связующего на порошковую подложку; основанные на наплавке концентрированным источником энергии; основанные на ламинировании листового металлического материала.

Следует отметить, что большинство способов были запатентованы в 1990-е годы и в связи с истечением сроков действия патентов [3, 8], появляется множество вариантов одного и того же способа. В табл. 1 приведены наиболее цитируемые в литературе названия способов.

Способы аддитивного производства изделий из металла имеют отличительные особенности. В табл. 2 представлено сравнение некоторых технологических характеристик различных способов АП.

Способы, использующие в качестве расходного материала порошок, на данный момент шире внедрены по сравнению со способами, использующими в качестве расходного материала проволоку, в связи с возможностью производить изделия со значительной геометрической точностью. Кроме того, способы, использующие металлический порошок, дают возможность производить изделия из порошковых металлических компози-

ций, обладающих свойствами, которые присущи изделиям порошковой металлургии. Однако производительность порошковых способов АП очень низкая, исчисляемая десятками грамм в минуту, что ограничивает возможность их применения для изготовления крупногабаритных изделий. К тому же необходимость защитной камеры и особенности транспортировки и хранения металлических порошковых материалов накладывают определенные сложности на применение порошковых способов АП. Способ LENS и подобные ему способы, использующие принцип наплавки металлическим порошком, подаваемым в струе защитного газа в область действия лазерного луча, хотя и не требуют для проведения наплавки защитной камеры, тем не менее из-за рассыпания порошка требуют изоляции рабочей площадки и индивидуальной защиты обслуживающего персонала [6, 13].

Способы АП, использующие в качестве расходного материала проволоку, по сравнению с порошковыми способами АП обладают 100%-ной эффективностью использования материала, а так же значительно большей массовой производительностью, что оправдывает применение способов для создания крупногабаритных изделий. Несмотря на низкую точность и грубую поверхность, способы, использующие в качестве расходного материала проволоку, дают возможность производить заготовки деталей при значительной экономии материала на последующих стадиях обработки (рис. 3).

При исследовании металла изделий, выполненных по технологиям АП с использованием проволоки и порошка [6], отмечена схожесть микроструктуры образцов, выполненных разными способами. Тем не менее, отмечается наличие некоторой пористости металла изделия, выполнен-

Т а б л и ц а 1. Классификация способов АП по используемому принципу действия

Принцип	Название способа/оригинальное название (англ.)	Расходуемый материал
Сплавление порошковой подложки	Выборочное лазерное спекание/Selective laser sintering (SLS) [9]	Металлический порошок
	Выборочное лазерное оплавление/Selective laser melting (SLM) [10]	
	Электроннолучевое оплавление/Electron beam melting (EBM) [11]	
Впрыскивание связующего на порошковую подложку	Струйная 3D печать на порошковой подложке/Powder bed and inkjet 3D printing (3DP) [12]	Металлический порошок
Наплавка концентрированным источником энергии	Лазерное изготовление конечных форм/Laser engineered net shaping (LENS) [13]	
	Лазерная наплавка расходной проволокой/Wire fed laser beam (WFLB) [14]	
	Изготовление произвольных форм электронным лучом/Electron beam freeform fabrication (EBF3) [15]	
	Дуговое аддитивное производство из проволоки/Wire and arc additive manufacturing (WAAM) [16]	
Ламинирование металлических листов	Ультразвуковое аддитивное производство/Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) [17]	Листовой металл, фольга

Таблица 2. Технологические характеристики некоторых способов АП [6]

Используемый материал	Сокращенное название способа	Высота наносимого слоя, мкм	Скорость наплавки, г/мин	Точность исполнения, мм	Шероховатость поверхности, мкм
Порошок	LC*	–	1...30	$\pm 0,025$ – $\pm 0,069$	1...2
	SLM	20...100		$\pm 0,04$	9...10
	SLS	75	~0,1	$\pm 0,05$	14...16
	DLF*	200	10	$\pm 0,13$	~20
Проволока	WAAM	~1500	12	$\pm 0,2$	200
	EBF3	–	до 330	низкая	высокая

* Способы LC – Laser Consolidation (Лазерное соединение) и DLF – Direct Light Fabrication (Прямое лазерное изготовление) являются разновидностями способа LENS.

ного по технологии АП с использованием расходуемого порошка.

Способы АП, использующие в качестве расходуемого материала проволоку, в зависимости от источника концентрированной энергии могут подразделяться на лазерные, электронно-лучевые и электродуговые. Отмечается [14], что лазерные способы АП отличаются повышенной точностью, по сравнению с другими способами, использующими проволоку. Тем не менее, лазерные способы объемной наплавки имеют низкую энергетическую эффективность — 2...5 %. Способы электронно-лучевой аддитивной наплавки обладают куда более значительной энергетической эффективностью — 15...20 %, однако изначально способ электронно-лучевого наплавления произвольных металлических форм был разработан в NASA для перспективного применения в космическом пространстве [15] и требует применения оборудования для создания вакуумной среды. Соответственно размер деталей, произведенных электронно-лучевой наплавкой проволокой ограничен размером вакуумной камеры (с учетом размещаемого в ней оборудования). Кроме того, необходимость работы с вакуумным оборудованием накладывает определенные сложности на применение способа.

По сравнению с лазерной и электронно-лучевой наплавкой, электродуговая наплавка произвольных форм, с привлечением способов электродуговой сварки плавящимся или неплавящимся электродом в защитном газе обладает значительной энергоэффективностью. Некоторые способы TIG или MIG сварки могут достигать энергоэффективности до 90 % [6]. Тем не менее все способы АП проволокой обладают рядом общих особенностей, таких как остаточные напряжения и деформации изделия, вызванные интенсивным нагревом, относительно низкая точность изготовления и характерная «ступенчатая» поверхность.

Однако способы проволочного АП остаются перспективной и развивающейся областью металлургического производства [8] и, в особенности, способы электродугового аддитивного производства. На данный момент относительно немного публикаций посвящено проблеме аддитивного

производства на основе электродуговой сварочной технологии. И хотя первые статьи посвященные электродуговой аддитивной наплавке появились в 1990-е годы [3, 18], проблемы формирования структуры металла шва, проблемы, связанные с формообразованием шва в нестационарных условиях теплоотвода, остаются нерешенными и актуальными [15, 19].

Исследователи Ноттингемского университета еще в 1992 г. способом электродуговой сварки изготовили объемное изделие типа прямоугольного короба (рис. 4) из стали состава, мас. %: 0,08 С, 0,9 Si, 1,5 Mn. Высота стенки изделия составляла 100 мм и была выполнена за 70 сварочных проходов.

Анализ механических характеристик полученного металла показал небольшое расхождение при испытании на растяжение образцов, вырезанных вдоль и поперек направления сварки (см. табл. 3).

Результаты измерения твердости по Викерсу (при нагрузке 10 кг) показали повышение значений *HRV* от дна до верха стенки изделия от 146,3

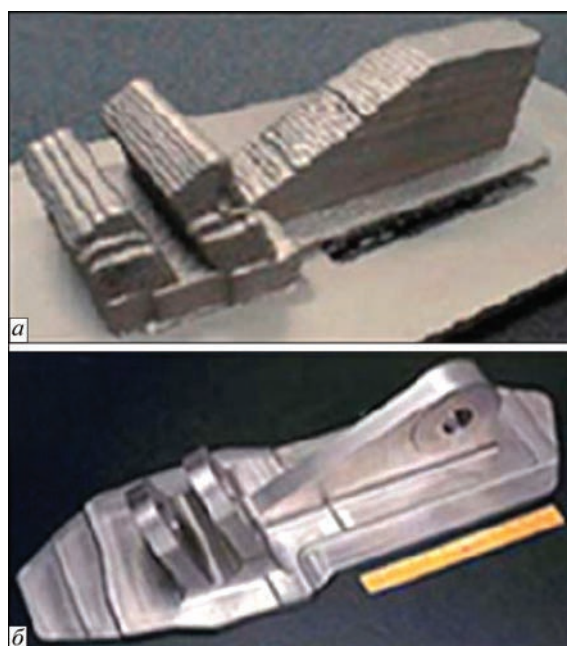


Рис. 3. Заготовка (а) детали (б) выполненной способом WFLB

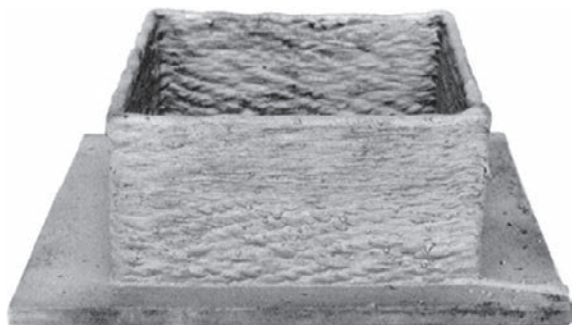


Рис. 4. Экспериментальное изделие, полученное способом электродуговой аддитивной наплавки

Таблица 3. Результаты механических испытаний металла электродуговой аддитивной наплавки

Ориентация вырезки образца	Предел прочности на растяжение, МПа	Относительное удлинение, %
Вертикальная	489	35,0
Горизонтальная (верх)	484	22,5
Горизонтальная (дно)	499	33,1

до 172,6 соответственно. Такое повышение твердости может быть связано с отпускными процессами, проходящими при наложении наплавочных валиков. Тем не менее изучение микроструктуры показало, что в 99,5 % случаях металл образцов имеет равномерную, равноосную феррито-перлитную структуру с размером зерна приблизительно 60 мкм (рис. 5, а). Однако для локальной области, ограниченной последним слоем наплавки, характерно присутствие дендритных зерен, размером приблизительно 600×100 мкм (рис. 5, б).

Область последнего наплавленного слоя не испытывает повторного (и последующих циклов) нагрева, как то претерпевают предыдущие слои. С этим фактом может быть связано некоторое ухудшение показателей относительного удлинения образцов, вырезанных из верха стенки изготовленного изделия.

Исследователи так же отмечают изменение геометрии наплавленных слоев с увеличением высоты наплавленного металла.

Авторы работы [19] проводили схожие исследования на аустенитной нержавеющей стали 308S93. При этом так же был изготовлен «короб»

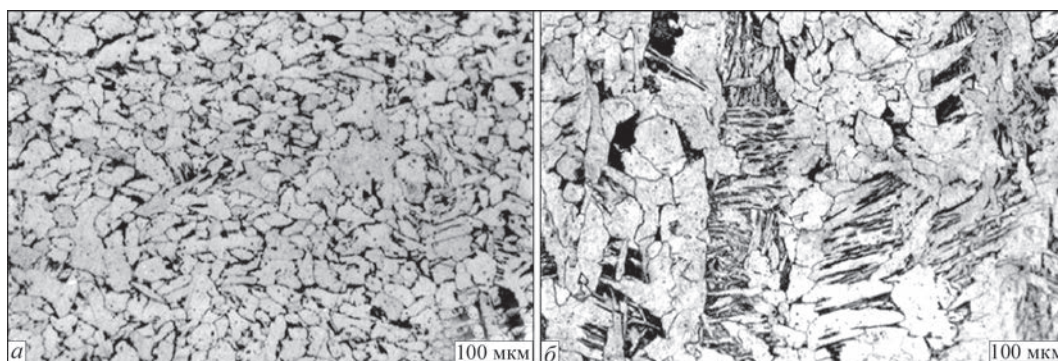


Рис. 5. Микроструктура изделия, полученного способом электродуговой аддитивной наплавки: а — середина стенки изделия; б — верх стенки изделия

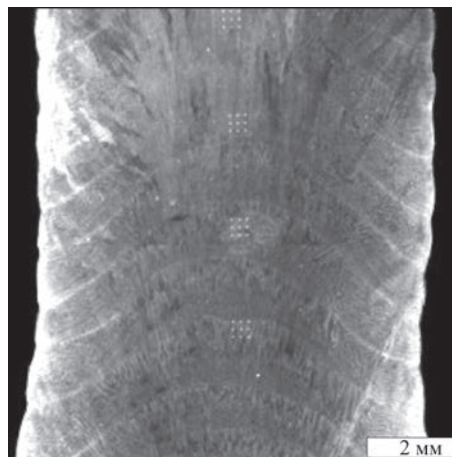


Рис. 6. Макроструктура поперечного сечения вертикально наплавленной стенки из стали 308S93 способом электродугowego АП

с длиной стенки 130×130 мм, с высотой стенки 31 мм, наращенной за 30 сварочных проходов, толщина стенки — 8 мм. Параметры наплавки составили: расход проволоки — 2 м/мин; сварочный ток — 160 А; скорость хода сварочной головки — 0,25 м/мин.

Результаты исследования макроструктуры поперечного сечения стенки (рис. 6) показали Л-образную форму наплавленных слоев, повторяющих форму усиления шва.

Микроструктура металла состоит преимущественно из феррита и аустенита (рис. 7, а) в виде разориентированных равноосных кристаллитов, тогда как структура в области последнего, верхнего слоя (рис. 7, б), состоит из продолжительных ферритных иголок, ориентированных в соответствии с теплоотводом, и областей феррита Видманштетта.

Среднее значение твердости HRV при нагрузке 100 гр составило 186 ± 15 . Механические испытания показали среднее значение предела прочности 537 МПа при среднем относительном удлинении 59 %. Так же исследователями отмечена тенденция к ухудшению свойств металла от низа к верху наплавленной стенки.

В работе [18] приведены результаты исследования в области возможности формирования раз-

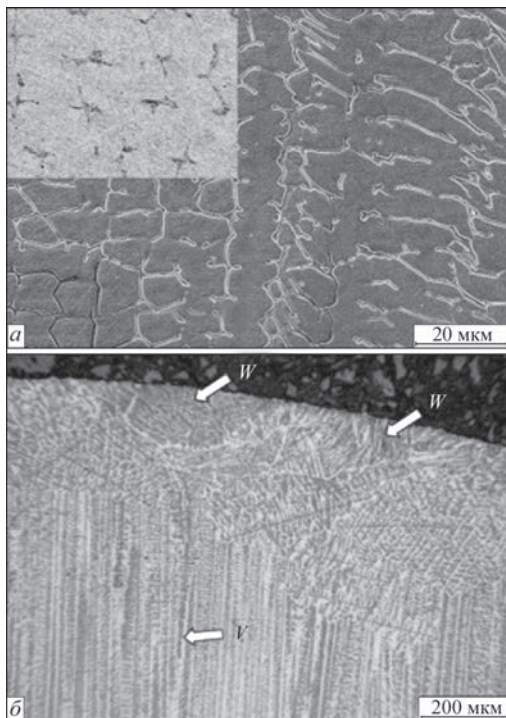


Рис. 7. Микроструктура шва поперечного сечения вертикально наплавленной стенки из стали 308S93, способом электродугового АП: *a* — середина стенки; *b* — верх стенки (*V* — продолжительные игольчатые ферритные формирования; *W* — феррит Видманштетта)

личных геометрических элементов создаваемого изделия. В частности, был произведен подбор режимов для создания горизонтальной потолочной стенки (рис. 8, *a*). В результате создано изделие с разнонаправленными плоскостями, без изменения наклона затравочной плиты в процессе изготовления (рис. 8, *b*).

Следует отметить, что многие исследователи, [7, 15, 18, 19] занимающиеся проблемами электродуговой объемной наплавки, концентрируют свое внимание преимущественно на вопросах формообразования. В то же время некоторые [6] выполняют различные исследования в области точности воплощения формы изделия и достижения заданных свойств как, например, влияние параметров сканирования и геометрических параметров шва на качество поверхности после наплавки (рис. 9) или влияние остаточных напряжений и деформаций на степень точности изготовления изделия путем изменения программы сканирования (рис. 10).

Однако с точки зрения качества и надежности металлического изделия первостепенной является структура металла, а не форма изделия. И хотя, в случае создания металлических изделий путем пространственной послойной наплавки, форма наплавочного шва жестко связана с условиями теплоотвода и, соответственно, с условиями формирования внутренней структуры металла, тем не менее, первостепенной задачей формирования

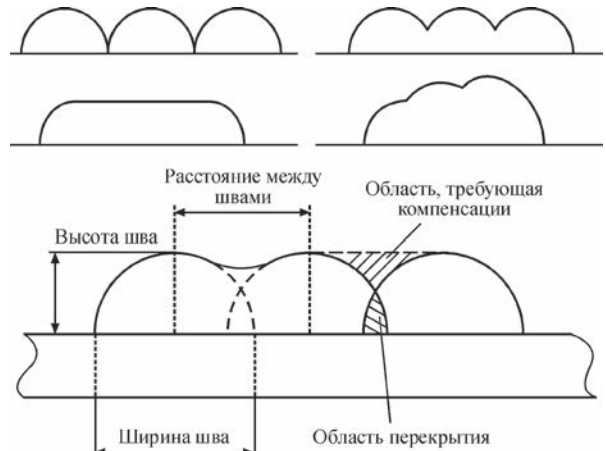


Рис. 9. Особенности геометрии шва и влияние позиционирования наплавочного инструмента на качество наплавленной поверхности

металлического изделия должен оставаться структурный фактор.

Подходы управления структурой при послойном формировании слитка, разработанные в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины [20], могут быть применены для создания металлических изделий сложной геометрической формы. Особенности формирования геометрических параметров шва в зависимости от условий охлаждения должны быть не первопричиной исследования, а следствием и технологической особенностью, которую следует учитывать,

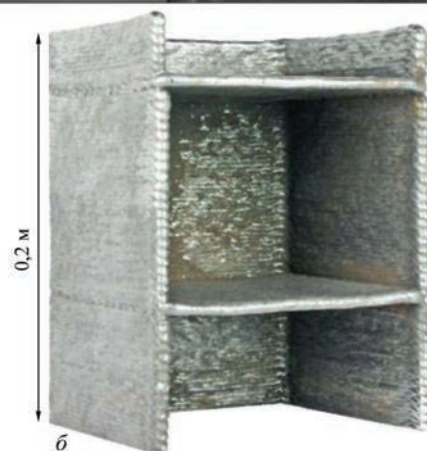
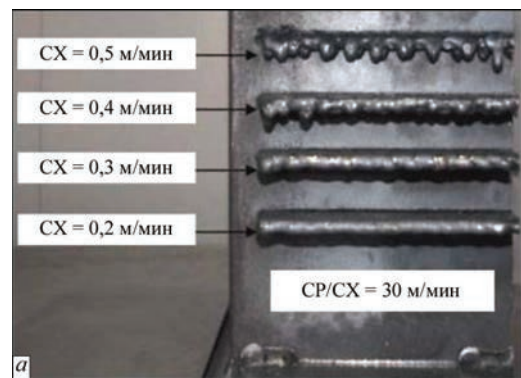


Рис. 8. Подбор режимов наплавки для создания навесных горизонтальных поверхностей

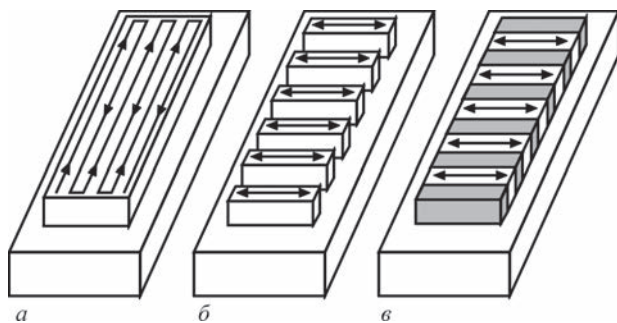


Рис. 10. Варианты сканирующего движения наплавочного инструмента в процессе создания элемента типа «стена»

не стремясь получить равноразмерное формирование слоев, что невозможно, при условии получения равномерной структуры при изготовлении сложного изделия с элементами различной массивности.

На данный момент в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины существуют все предпосылки к созданию технологии объемной послойной элетродуговой автоматической наплавки объемных металлических изделий.

1. Wong K. V. A review of additive manufacturing / K. V. Wong, A. Hernandez // International Scholarly Research Network Mechanical Engineering. — 2012. — Vol. 2012. — Article ID 208760. — 10 pages — Режим доступа: <http://downloads.hindawi.com/journals/isrn/2012/208760.pdf>.
2. Rizwan Ali P.M. Review on diverse materials applied for additive manufacturing / P. M. Rizwan Ali, C. R. Hara Theja, Syed Mahammad Syed Sheb, C. Yuvaraj // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). — 2015. — Vol. 3. Issue VII. — P. 16–20. — Режим доступа: <http://www.ijraset.com/fileserve.php?FID=2945>.
3. Wohlers T. History of additive manufacturing. / T. Wohlers, T. Gomet // Wohlers Report [Электронный ресурс]. — 2014. — Режим доступа: <http://wohlersassociates.com/history2014.pdf>.
4. Guessasma S. Challenges of additive manufacturing technologies from an optimisation perspective / S. Guessasma, W. Zhang, J. Zhu, S. Belhabib, H. Nouri // International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization. — 2016. — № 6, A9. — 13 p. — Режим доступа: <http://www.ijsmdo.org/articles/smdo/pdf/2015/01/smdo150009.pdf>.
5. Quadrennial Technology Review 2015 [Электронный ресурс] / The U.S. Department of Energy (DOE), 1000 Independence Avenue SW., Washington, DC 20585-0121. — 2015. — Режим доступа: http://energy.gov/sites/prod/files/2015/09/f26/Quadrennial-Technology-Review-2015_0.pdf.
6. Ding D. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2015. — № 81(1-4). — P. 465–481. — DOI 10.1007/s00170-015-7077-3. — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/275973182_Wire-feed_additive_manufacturing_of_metal_components_technologies_developments_and_future_interests.
7. Williams S. W. Wire + arc additive manufacturing / S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, et. al. // Materials Science and Technology. — 2015. — 7 p. — DOI 10.1179/1743284715Y.0000000073. — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/277921887_WireArc_Additive_Manufacturing.
8. Frazier W. E. Metal additive manufacturing: a review / W. E. Frazier // Journal of Materials Engineering and Performance.

- 2014. — № 23 (6). — P. 1917–1928. — Режим доступа: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11665-014-0958-z/fulltext.html>.
9. Simchi A. On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling / A. Simchi, F. Petzoldt, H. Pohl // Journal of Materials Processing Technology. — 2003. — № 141. — P. 319–328. — Режим доступа: http://www.ibrarian.net/navon/paper/On_the_development_of_direct_metal_laser_sinterin.pdf?paperid=21177098.
10. Kruth J. P. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting / J. P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, et.al. // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, USA. — 2004. — P. 44–59. — Режим доступа: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2004/2004-06-Kruth.pdf>.
11. Pal D. Prediction of mechanical properties of electron beam melted Ti6Al4V parts using dislocation density based crystal plasticity framework / D. Pal, N. Patil, B. E. Stucker // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, USA. — 2012. — P. 37–43. — Режим доступа: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2012/2012-40-Pal.pdf>.
12. Michaels S. Metal parts generation by three dimensional printing / S. Michaels, E. M. Sachs, M. J. Cima // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, USA. — 1992. — P. 244–250. — Режим доступа: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/1992/1992-28-Michaels.pdf>.
13. Atwood C. Laser engineered net shaping (LENS™): A tool for direct fabrication of metal parts / C. Artwood, M. Griffith, L. Harwell, et. al. // 17th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, Orlando, USA. — 1998. — P. 16–19. — Режим доступа: <http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc621198/>.
14. Brandla E. Additive manufactured Ti–6Al–4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications / E. Brandla, B. Baufeldb, C. Leyens, R. Gaultd // Proceedings of the Laser Assisted Net Shape Engineering. — 2010. — Vol. 5, Part B. — P. 595–606. — Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389210005134>.
15. Dave V. R. Electron beam solid freeform fabrication of metal parts / V. R. Dave, J. E. Matz, T.W. Eagar // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, USA. — 1995. — P. 64–70. — Режим доступа: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/1995/1995-09-Dave.pdf>.
16. Jandric Z. Effect of heat sink on microstructure of three-dimensional parts built by welding-based deposition / Z. Jandric, M. Labudovic, R. Kovacevic // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2004. — 44(7–8). — P. 785–796. — Режим доступа: <https://www.smu.edu/~media/Site/Lyle/RCAM/Publications/Effect%20of%20heat%20sink%20on%20microstructure%20of%20three-dimensional.ashx>.
17. Friel R. J. Ultrasonic additive manufacturing – a hybrid production process for novel functional products / R. J. Friel, R. A. Harris // Proceedings of the Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM). — 2013. — Vol. 6. — P. 35–40. — Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827113000784>.
18. Dickens P. M. Rapid prototyping using 3-D welding / P. M. Dickens, M. S. Pridham, R. C. Cobb, I. Gibson, G. Dixon // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, USA. — 1992. — P. 280–290. — Режим доступа: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/1992/1992-32-Dickens.pdf>.
19. Skiba T. Microstructure and mechanical properties of stainless steel component manufactured by shaped metal deposition / T. Skiba, B. Baufeld, O. van der Biest // ISIJ International. — 2009. — Vol. 49, № 10. — P. 1588–1591. — Режим доступа: https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/49/10/49_10_1588/_pdf.
20. Шаповалов В. А. Управление структурной металла в процессе кристаллизации / В. А. Шаповалов, Г. М. Григоренко // Современная электрометаллургия. — 2015. — № 2. — С. 51–54.

Поступила в редакцию 18.04.2016