

Щицын Ю.Д., Терентьев С.А., Неулыбин С.Д., Артемов А.О., Белинин Д.С. Формирование структуры и свойств стали 04X18H9 при аддитивном производстве заготовок // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 55–62. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.07

Shchitsyn Y.D., Terentyev S.A., Neubybin S.D., Artemov A.O., Belinin D.S. Formation of structure and properties of steel 04CR18NI9 at additive production of trainings. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 55–62. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.07

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 20, № 3, 2018
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.07
УДК 621.791

Ю.Д. Щицын, С.А. Терентьев, С.Д. Неулыбин, А.О. Артемов, Д.С. Белинин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СТАЛИ 04X18H9
ПРИ АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ЗАГОТОВОК**

Аддитивные технологии, или технологии послойного синтеза – одно из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства. Общими проблемами таких технологий являются обеспечение надлежащей микроструктуры синтезированного материала и устранение дефектности. Использование присадочной проволоки в качестве рабочего материала позволяет избавиться от проблем, связанных с низкой производительностью существующих методов, высокой стоимостью применяемого оборудования, ограниченностью типов применяемых материалов, обусловленной использованием порошковых систем. Представлены результаты исследования особенностей формирования структуры и свойств стали 04X18H9 в технологиях аддитивных процессов, а именно при СМТ (Cold Metal Transfer)-наплавке, плазменной наплавке током обратной полярности и плазменной наплавке плавящимся электродом (Plasma MIG). Изделия из нержавеющей хромоникелевых сталей находят широкое применение в самых различных отраслях промышленности. Основной проблемой при аддитивных технологиях является обеспечение свойств слоистых материалов не ниже, чем у получаемых традиционными методами. Характерными дефектами слоистых материалов, полученными наплавкой, являются повышенная пористость, неметаллические включения, снижение пластичности, а для высоколегированных сталей – потеря специальных свойств. Проведено сравнение структуры и механических характеристик материалов, полученных СМТ-наплавкой, плазменной наплавкой током обратной полярности и плазменной наплавкой плавящимся электродом. Показано, что перспективным для аддитивных технологий является применение гибридного способа плазменной наплавки плавящимся электродом. Установлено, что механические характеристики образцов из стали 04X18H9, полученных наплавкой, не ниже, чем для стали аналогичного состава в деформированном состоянии.

Ключевые слова: аддитивные технологии, СМТ (Cold Metal Transfer)-наплавка, многослойная наплавка, плазменная наплавка, ток обратной полярности, ток прямой полярности, плазменная наплавка плавящимся электродом, высоколегированные стали, термический цикл, металлографический анализ.

Y.D. Shchitsyn, S.A. Terentyev, S.D. Neubybin, A.O. Artemov, D.S. Belinin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**FORMATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF STEEL 04CR18NI9
AT ADDITIVE PRODUCTION OF TRAININGS**

Additive technologies (AT) or layer-by-layer synthesis technologies are one of the most dynamically developing areas of "digital" production. The common problem of additive technologies is to ensure the proper microstructure of the synthesized material and eliminate defects. The use of a filler wire as a working material allows to get rid of the problems associated with the low productivity of existing methods, the high cost of the equipment used, the limited types of materials used due to the use of powder systems. The paper presents the results of studying the features of the formation of the structure and properties of 04Cr18Ni9 steel in additive processes, namely, in the case of CMT (Cold Metal Transfer) surfacing, plasma surfacing with reverse polarity current and plasma surfacing with a consumable electrode (Plasma MIG). Products made of stainless chromium-nickel steels are widely used in a wide variety of industries. The main problem with additive technologies is to ensure the properties of laminates no lower than those obtained by traditional methods. Typical defects of laminates obtained by surfacing are increased porosity, nonmetallic inclusions, reduced plasticity, and for high-alloy steels, loss of special properties. A comparison is made between the structure and mechanical characteristics of materials obtained by SMT surfacing, plasma surfacing by reverse polarity current, and plasma surfacing by a consumable electrode. It is shown that the use of a hybrid method of plasma surfacing by a consumable electrode is promising for additive technologies. It is established that the mechanical characteristics of samples made of 04X18H9 steel obtained by surfacing are not lower than for steel of similar composition in the deformed state.

Keywords: additive technologies, CMT (Cold Metal Transfer) surfacing, multilayer surfacing, plasma surfacing, reverse polarity current, direct polarity current, plasma surfacing by a consumable electrode, high-alloy steels, thermal cycle, metallographic analysis.

Аддитивные технологии (АТ), или технологии послойного синтеза – одно из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства. Использование таких технологий для изготовления металлических конструкций позволяет значительно ускорить решение задач технологической подготовки производства и выпуска готовой продукции. Большими возможностями для выращивания металлических заготовок обладают наплавочные технологии. Для этих целей могут использоваться дуговые, лазерные, электронно-лучевые, плазменные и другие технологии¹ [1–4]. Материал для наплавки может быть в виде порошка или проволоки (прутков).

Получение заготовок с минимальным припуском на механическую обработку определяется точностью траектории движения рабочего инструмента и поддержанием заданного поперечного сечения наплавляемой дорожки. Высокие служебные характеристики обеспечиваются получением заданной структуры и свойств металла конструкции (определяются величиной зоны сплавления между слоями, скоростью нагрева и охлаждения металла, временем пребывания металла в расплавленном состоянии и др.). Постоянный подогрев формируемого изделия при наложении слоев может затруднять получение необходимых размеров наплавляемых слоев и желательной структуры получаемого металла.

Широкие возможности для решения перечисленных задач предоставляют технологии наплавки с использованием концентрированных источников энергии [4–7]. В настоящее время делаются успешные попытки использования лазерной порошковой наплавки для изготовления ответственных конструкций из различных материалов. Наряду с неоспоримыми преимуществами лазерные аддитивные технологии имеют ряд существенных недостатков: низкий КПД процесса, остаточная пористость при обработке активных материалов и сплавов, высокие требования к дисперсности порошка, высокая стоимость оборудования [7]. Производительность формирования деталей из порошковых материалов в существующих аддитивных технологиях остается крайне низкой, что ставит под сомнение перспективы применения этих технологий для производства крупногабаритных изделий.

Общими проблемами аддитивных технологий являются обеспечение надлежащей микроструктуры синтезированного материала и устранение де-

фектности. В ряде исследований [8–10] показано, что пористость зависит как от наплавляемого материала, так и от параметров режима наплавки. Например, для алюминиевых сплавов пористость может достигать 15 %, для титановых сплавов – до 2 %, тогда как для сталей – менее 0,2 %.

Использование присадочной проволоки в качестве рабочего материала позволяет избавиться от проблем, связанных с низкой производительностью существующих методов, высокой стоимостью применяемого оборудования, ограниченностью типов применяемых материалов, обусловленной использованием порошковых систем. В качестве дополнительного преимущества можно отметить, что присадочная проволока имеет значительно меньшую удельную площадь поверхности, чем порошковые материалы, и менее склонна к окислению и поглощению влаги или загрязняющих веществ. Важным является доступность весьма широкого спектра проволок по составу: углеродистые и легированные стали, сплавы цветных металлов, стоимость которых существенно ниже, чем стоимость в порошковом состоянии.

Наибольшее применение при использовании проволок в качестве присадочных материалов находят дуговые технологии. СМТ-процесс применительно к аддитивным технологиям имеет ряд неоспоримых преимуществ [11, 12]. СМТ – это модифицированный вариант сварки плавящимся электродом в защитном газе, основанный на механизме управляемого режима передачи металла в сварочную ванну за счет использования импульсного тока и возвратно-поступательного движения проволоки. Система обратной подачи проволоки синхронизирована с высокоскоростным цифровым управлением, которое определяет длину дуги, короткую замыкающую фазу и теплопередачу в зону сварки. Следует отметить, что включение двигателя приводного устройства основано на оптимизированных характеристиках дуги, а не на предопределенных времени или скорости [11]. Этот процесс обеспечивает отсутствие разбрызгивания металла, стабильность формирования шва, минимальную теплопередачу в зону обработки и может найти применение при изготовлении заготовок из различных металлов.

Однако СМТ-процесс имеет свои недостатки: сравнительно низкая производительность из-за использования проволоки малых диаметров, наличие внутренней дефектности (поры, включения).

Использование плазменной наплавки обеспечивает ряд преимуществ как с технологической, так и с экономической точки зрения [13]. К ним можно отнести высокую производительность, ре-

¹ Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM Int 2013. F2792-12a.

гулирование в широких пределах теплопередачи в основной и наплавляемый материал и, как следствие, управление глубиной и шириной проплавления, структурой, составом и свойствами формируемого материала. В качестве присадочного материала может использоваться проволока, порошки и их комбинации.

Кроме того, сравнительная простота и невысокая стоимость оборудования для плазменной наплавки должны вызвать интерес производителей к использованию. Плазменная наплавка током обратной полярности обеспечивает хорошее смачивание и растекание жидкого металла при минимальном нагреве поверхности и очистку поверхности предыдущего слоя от загрязнений за счет эффекта катодного распыления. При этом обеспечивается получение слоистых материалов с благоприятной структурой без внутренних дефектов [14]. Плазменные наплавочные технологии позволяют получать материалы с градиентными характеристиками.

Перспективным для аддитивных технологий является гибридный способ плазменной наплавки плавящимся электродом [15, 16]. Данный способ отличается от наплавки плавящимся электродом тем, что окружающая электрод атмосфера является горячим ионизированным газом – плазмой. Электрический ток с плавящегося электрода в таких условиях перестает зависеть только от собственного дугового разряда. Это обеспечивает самопроизвольное начало разряда, повышенную стабильность и лучший контроль над переносом металла [17–19].

Наплавка с использованием медного сопла в качестве неплавящегося кольцевого анода плазменной дуги, по оси которого подается плавящийся электрод, обеспечивает включение процесса без использования высоковольтного высокочастотного разряда, что важно для работы на оборудовании с программным управлением [20].

Кольцевой анод выдерживает большие токовые нагрузки сжатой дуги при работе на обратной полярности тока. Столб сжатой дуги отличается высокой пространственной устойчивостью, что объясняется взаимодействием электромагнитных полей сжатой дуги и плавящегося электрода. Сжатая дуга и дуга с плавящегося электрода работают на постоянном токе обратной полярности.

Плазменная наплавка плавящимся электродом отличается широким диапазоном регулирования параметров режима. Ток с плавящегося электрода может изменяться от 0 до нескольких сотен ампер, производительность наплавки при этом находится в пределах от 0,3 до 35 кг/ч. Перенос

металла в зависимости от соотношения токов с плавящегося электрода и сжатой дуги может быть крупнокапельным, мелкокапельным или струйным.

Изделия из нержавеющей хромоникелевых сталей находят широкое применение в самых различных отраслях промышленности. В данной работе представлены результаты аддитивного формирования заготовок из стали 04X19H9 и формирования структуры и свойств при использовании послойной СМТ-наплавки, плазменной наплавки током обратной полярности и плазменной наплавки плавящимся электродом.

В качестве исходного материала использована проволока Св04X19H9 диаметром 1,2 мм. Наплавка СМТ-способом производилась на оборудовании TPS 5000 СМТ с блоком подачи проволоки VR 7000-СМТ Wire feeder фирмы FRONIUS. Производительность наплавки составляла 1,5 кг/ч. Плазменная наплавка током обратной полярности и гибридная плазменная наплавка плавящимся электродом выполнялись с использованием оборудования, разработанного в Пермском национальном исследовательском политехническом университете. Производительность плазменной наплавки током обратной полярности составляла 3,5 кг/ч, гибридной наплавки – 6 кг/ч. При СМТ-наплавке ширина дорожки одного прохода составляла 5 мм, при плазменной наплавке током обратной полярности – 14 мм, при гибридной наплавке – 12 мм.

Из наплавленных заготовок фрезерованием были изготовлены образцы сечением 20×20 мм и длиной 150 мм. Потери на механическую обработку заготовок, полученных СМТ-наплавкой, составили 7 %, плазменной наплавкой током обратной полярности – 18 %, гибридной наплавкой – 10 %. Было изготовлено по 4 образца для каждого варианта наплавки. Половина образцов прошла термическую обработку (закалку от $T = 1050$ °С) для сравнения механических характеристик.

Исследование макро- и микроструктуры показало следующее: материал, полученный СМТ-наплавкой имеет остаточную пористость (рис. 1, а), объем пористости составляет 1,5 %. Размер пор от 12 до 82 мкм. Материал образца, полученный плазменной наплавкой, плотный, пористость и неметаллические включения отсутствуют (рис. 1, б). Материал, полученный плазменной наплавкой плавящимся электродом, имеет остаточную пористость (рис. 1, в), объем пористости составляет 0,75 %. Размер пор от 10 до 54 мкм.

Макроструктура материала образцов характерна для изготовления методом послойной наплавки (рис. 2).

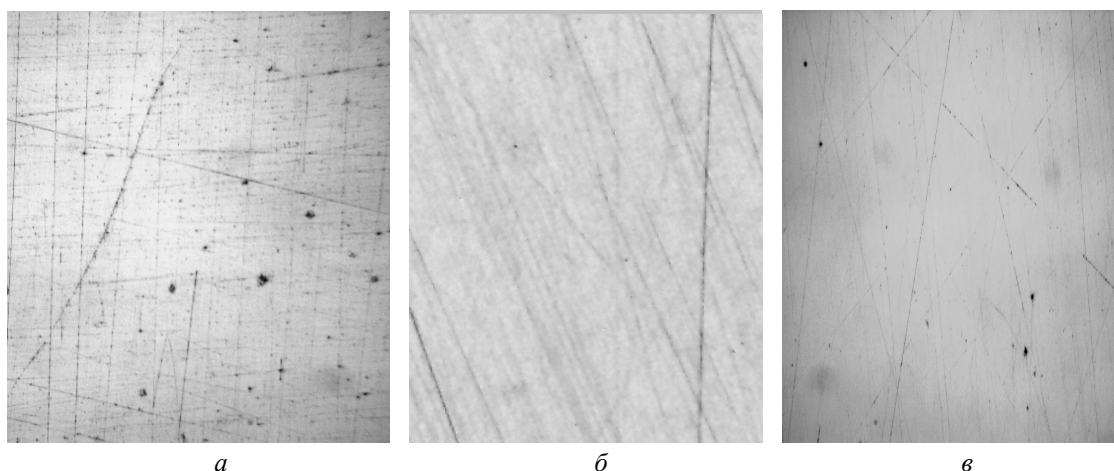


Рис. 1. Пористость и неметаллические включения в наплавленном металле, $\times 200$; *а* – СМТ-наплавка; *б* – плазменная наплавка током обратной полярности; *в* – плазменная наплавка плавящимся электродом

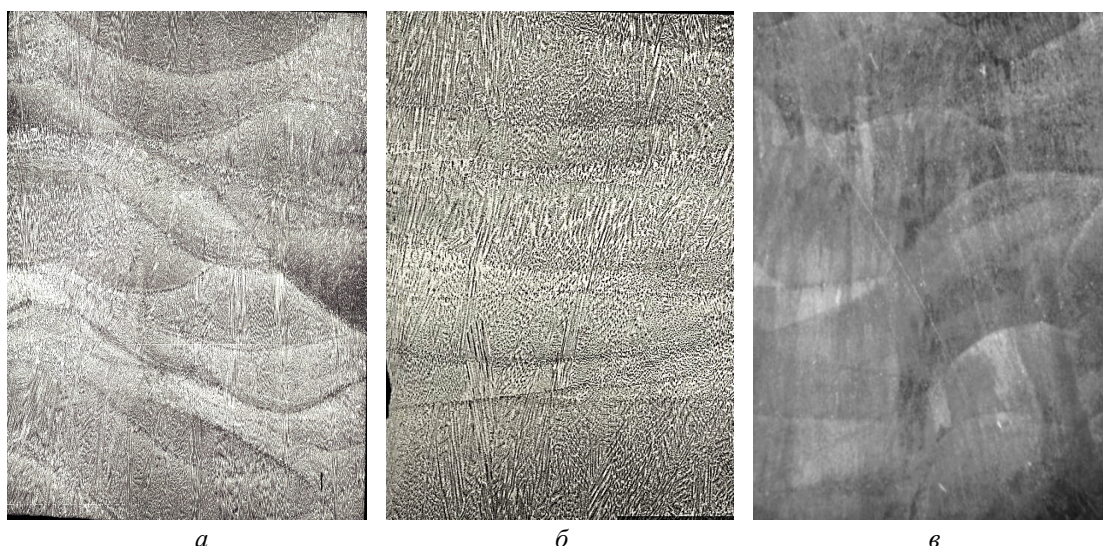


Рис. 2. Макроструктура наплавленного материала; *а* – СМТ-наплавка; *б* – плазменная наплавка; *в* – плазменная наплавка плавящимся электродом

Макроструктура материалов слоистая, дендритного строения, с перекрытием соседних дорожек. Дендриты ориентированы в направлении теплоотвода, соответствующего направлению вращения образца.

Микроструктурные исследования (рис. 3, 4) показали близкое по структуре строение материалов, полученных СМТ-наплавкой, плазменной наплавкой и плазменной наплавкой плавящимся электродом. Структура аустенитная с выделенным дельта-ферритом. Содержание феррита 3,5–5,0%. Причем верхние слои (см. рис. 3) кристаллизуются по ферритно-аустенитному (ФА) механизму с дендритной морфологией феррита [17]. Есть некоторые отличия в дисперсности.

В центральной части слоев (см. рис. 4) наплавки наблюдается строение, характерное для ау-

стенитно-ферритной (АФ) кристаллизации [18] вытянутых дендритов. Количество феррита не превышает 1,5%, наблюдается небольшое количество карбидов. Структура металла, полученного плазменной наплавкой, заметно отличается строением ферритной сетки.

Результаты механических испытаний приведены в таблице. Для сравнения приведены свойства сталей 12Х18Н9 и 04Х18Н10 в деформированном состоянии (пруток).

Механические характеристики материалов, полученных наплавкой, соизмеримы со свойствами сталей 12Х18Н9 и 04Х18Н10 в деформированном состоянии. Плазменная наплавка плавящимся электродом обеспечивает получение большего предела текучести при сохранении пластичности (см. таблицу).

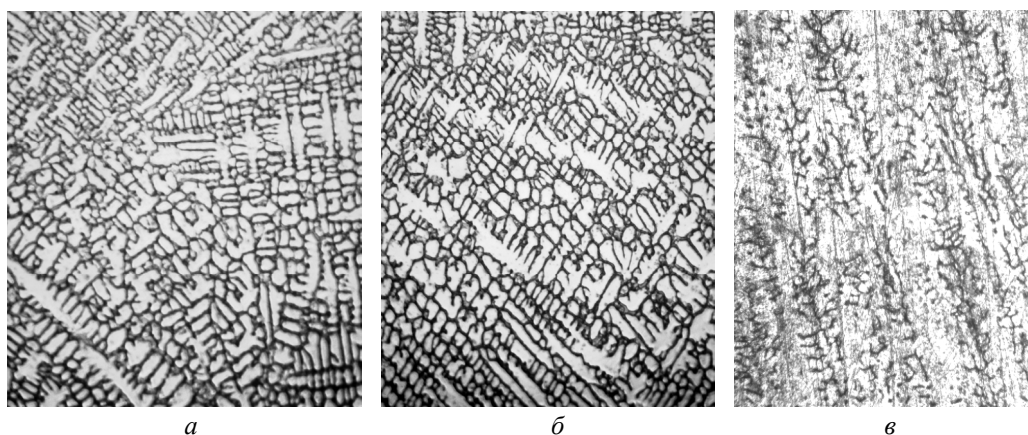


Рис. 3. Микроструктура верхнего слоя наплавленных материалов, $\times 300$: *a* – СМТ-наплавка; *б* – плазменная наплавка; *в* – плазменная наплавка плавящимся электродом

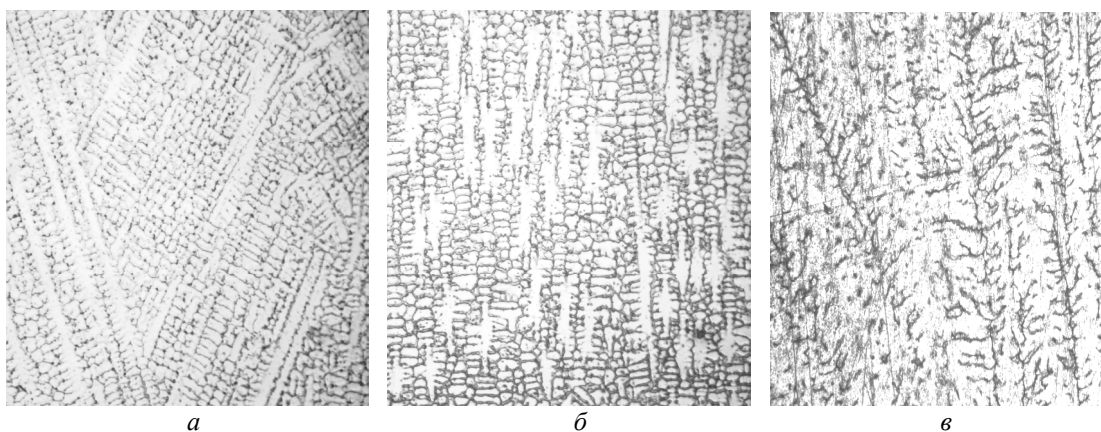


Рис. 4. Микроструктура средних слоев наплавленных материалов, $\times 300$: *a* – СМТ-наплавка; *б* – плазменная наплавка; *в* – плазменная наплавка плавящимся электродом

Механические свойства наплавленных материалов

Материал образца		σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	φ , %
СМТ-наплавка стали 04X19H9	без термообработки	52,8	27,2	56,0	69,5
	после термообработки (закалка $T = 1050$ °С)	51,5	28,0	52,6	71,0
Плазменная наплавка стали 04X19H9	без термообработки	55,2	32,6	53,6	72,5
	после термообработки (закалка $T = 1050$ °С)	55,5	30,0	49,6	74,0
Плазменная наплавка плавящимся электродом стали 04X19H9	без термообработки	56,6	36,5	42,0	772,0
	после термообработки (закалка $T = 1050$ °С)	55,7	34,0	43,0	772,6
Сталь 12X18H9 в деформированном состоянии (пруток, ГОСТ 5949–75)	термообработка (закалка $T = 1050 \dots 1100$ °С)	≥ 50	≥ 20	≥ 45	≥ 55
Сталь 04X18H10 в деформированном состоянии (пруток, ГОСТ 5949–75)	термообработка (закалка $T = 1020 \dots 1100$ °С)	≥ 45	≥ 16	≥ 40	≥ 55

Выводы

Использование СМТ-наплавки, плазменной наплавки током обратной полярности и плазменной наплавки плавящимся электродом для аддитивного производства заготовок из стали 04X19H9 обеспечивает получение структуры и механических характеристик, близких к свойствам материала, полученного традиционными способами.

СМТ-наплавка обеспечивает повышенную точность заготовок с минимальными потерями металла на механическую обработку, но наплавленный металл содержит остаточную пористость и неметаллические включения.

Плазменная наплавка обеспечивает получение плотного металла без внутренних дефектов с высокой производительностью. При этом обеспечивается повышение предела текучести наплавленного металла при высоких показателях пластичности. Точность заготовок, полученных плазменной наплавкой, ниже, чем при СМТ-наплавке.

Плазменная наплавка плавящимся электродом обеспечивает максимальную производительность процесса, высокую точность заготовок, минимальное наличие неметаллических включений и небольшую остаточную пористость.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Пермского края в рамках соглашения С-26/795 от 21.12.2017, гранта РФФИ -18-08-01016 и Фонда содействия инновациям.

Список литературы

1. Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing / W.R. Morrow, H. Qi, I. Kim, J. Mazumder, S.J. Skerlos // J. Clean Prod. – 2007. – № 15. – P. 932–943.
2. Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM Int 2013; F2792-12a.
3. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / D.H. Ding, Z.X. Pan, D. Cuiuri, H.J. Li // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2015. – № 81(1–4). – P. 465–81.
4. Смирнов В.В., Барзали В.В., Ладнов П.В. Перспективы развития аддитивного производства в российской промышленности. Опыт ФГБОУ УГАТУ // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2015. – Т. 14, № 2. – С. 23–27.
5. Laser Additive Manufacturing of Turbine Components, Precisely and Repeatable [Электронный ресурс] / A. Techel [et al.]; Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS), Laser Institute of America. – URL: <http://www.lia.org/blog/category/laser-insights-2/laser-additive-manufacturing>.
6. A comparison of laser additive manufacturing using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders / M.N. Ahsan [et. al.] // Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping. – London: Taylor & Francis Group, 2012. – P. 108–120.
7. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки / под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
8. Sciaky Inc. Electron beam additive manufacturing (EBAM) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.sciaky.com/images/pdfs/product-sheets/Sciaky-EBAM-technology.pdf>.
9. Jhavar S., Jain N.K., Paul C.P. Development of micro-plasma transferred arc (p-PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol. 214, №. 5. – P. 1102–1110.
10. Selective laser melting of aluminium components / E. Louvis [et. al.] // Journal of Materials Pro-cessing Technology / The University of Liverpool. – 2011. – Vol. 211. – P. 275–284.
11. Almeida P., Williams S. Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT) // Solid Free. Fabr. Symp. – 2010. – June. – P. 25–36.
12. Dwivedi R., Kovacevic R. Automated torch path planning using polygon subdivision for solid freeform fabrication based on welding // J. Manuf. Syst. – 2004. – Vol. 23, № 4. – P. 278–291.
13. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А., Щицын В.Ю. Возможности плазменной обработки металлов током обратной полярности // Сварка. Диагностика. – 2009. – № 2. – С. 42–45.
14. Shitsyn Yu.D., Belinin D.S., Neulybin S.D. Plasma surfacing of high-alloy steel 10cr18ni8ti on low-alloy steel 09mg2si // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 20. – P. 41103–41109.
15. Дедюх Р.И. Особенности процесса плазменной сварки плавящимся электродом // Сварочное производство. – 2014. – № 5. – С. 34–39.
16. Щицын Ю.Д. Плазменные технологии и оборудование. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 76 с.
17. Elmer J.W., Allen S.M., Eagar T.W. Microstructural development during solidification of stainless steel alloys // Met. Trans. – 1989. – October. – Vol. 20A. – P. 2117–2131.
18. Allan G. Castability solidification mode and residual ferrite distribution in highly alloyed stainless steels // European Commission, EUR 13941-Steelmaking. – 1997. – 85 p.
19. Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing / Y. Zhang, A. Bernard, R. Harik, K.P. Karunakaran // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2015. – P. 34–48.
20. Hybrid layered manufacturing using tungsten inert gas cladding / Sajan Kapil, Fisseha Legesse, Pravin Milind Kulkarni, Prathmesh Joshi, Ankit Desai, K.P. Karunakaran // Progress in Additive Manufacturing. – 2016. – № 1(1). – P. 79–91.

References

1. Morrow W.R., Kim H. Qi, I., Mazumder J., Skerlos S.J. Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing. *Journal Clean Prod.*, 2007, no. 15, pp. 932–943.
2. Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM Int 2013; F2792-12a.
3. Ding D.H., Pan Z.X., Cuiuri D., Li H.J. Wirefeed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2015, no. 81(1–4), pp. 465–81.
4. Smirnov V.V., Barzali V.V., Ladnov P.V. Perspektivy razvitiia additivnogo proizvodstva v rossiiskoi promyshlennosti. Opyt FGBOU UGATU [The prospects of development of additive production in the Russian industry]. *Novosti materialovedeniia. Nauka i tekhnika*, 2015, vol. 14, no. 2, pp. 23–27.
5. A. Techel et al. Laser Additive Manufacturing of Turbine Components, Precisely and Repeatable [Elektronnyi resurs]. Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS), Laser Institute of America. – URL: <http://www.lia.org/blog/category/laserinsights-2/laser-additive-manufacturing>.
6. M.N. Ahsan et. al. A comparison of laser additive manufacturing using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders. *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping*, London: Taylor & Francis Group, 2012, pp. 108–120.
7. Grigor'iants A.G., Shiganov I.N., Misiurov A.I. Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki [Technological processes of laser processing]. Ed. A.G. Grigor'iantsa. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana, 2006, 664 p.
8. Sciaky Inc. Electron beam additive manufacturing (EBAM) [Elektronnyi resurs]. – URL: <http://www.sciaky.com/images/pdfs/product-sheets/Sciaky-EBAM-technology.pdf>.
9. Jhavar S., Jain N.K., Paul S.P. Development of micro-plasma transferred arc (p-PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214, no. 5, pp. 1102–1110.
10. E. Louvis et. al. Selective laser melting of aluminum components. *Journal of Materials Processing Technology. The University of Liverpool*, 2011, vol. 211, pp. 275–284.
11. Almeida P., Williams S. Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT). *Solid Free. Fabr. Symp.*, 2010, pp. 25–36.
12. Dwivedi R., Kovacevic R. Automated torch path planning using polygon subdivision for solid freeform fabrication based on welding. *Journal Manuf. Syst*, 2004, vol. 23, no. 4, pp. 278–291.
13. Shchitsyn Iu.D., Kosolapov O.A., Shchitsyn V.Iu. Vozmozhnosti plazmennoi obrabotki metallov tokom obratnoi poliarnosti [Possibilities of plasma processing of metals current of the return polarity]. *Svarka. Diagnostika*, 2009, no. 2, pp. 42–45.
14. Shitsyn Yu.D., Belinin D.S., Neulybin S.D. Plasma surfacing of high-alloy steel 10Cr18Ni8Ti on low-alloy steel 09Mg2Si. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 20, pp. 41103–41109.
15. Dediukh R.I. Osobennosti protsessa plazmennoi svarki plaviashchimsia elektrodom [Features of process of plasma welding by the melting electrode]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2014, no. 5, pp. 34–39.
16. Shchitsyn Iu.D. Plazmennye tekhnologii i oborudovanie [Plasma technologies and equipment]. Perm': Izdatel'stvo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2014, 76 p.
17. Elmer J.W., Allen S.M., Eagar T.W. Microstructural development during solidification of stainless steel alloys. *Met. Trans.*, 1989, vol. 20A, pp. 2117–2131.
18. Allan G. Castability solidification mode and residual ferrite distribution in highly alloyed stainless steels. *European Commission, EUR 13941-Steelmaking*, 1997, 85 p.
19. Build orientation optimization for multipart production in additive manufacturing / Y. Zhang, A. Bernard, R. Harik, K.P. Karunakaran. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2015, pp. 34–48.
20. Sajan Kapil, Fisseha Legesse, Pravin Milind Kulkarni, Prathmesh Joshi, Ankit Desai, Karunakaran K.P. Hybrid layered manufacturing using tungsten inert gas cladding. *Progress in Additive Manufacturing*, 2016, no. 1(1), pp. 79–91.

Получено 15.08.18

Об авторах

Щицын Юрий Дмитриевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru.

Терентьев Сергей Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства и технологии конструкционных материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru.

Неулыбин Сергей Дмитриевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sn-1991@mail.ru.

Артемов Арсений Олегович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: artemoff87@mail.ru.

Белинин Дмитрий Сергеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: 5ly87@mail.ru.

About the authors

Yuri D. Shitsyn (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head, Department of Welding Production, Metrology and Technology Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.

Sergei A. Terentyev (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Engineering and of Materials of Construction Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.

Sergei D. Neulybin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production, Metrology and of Technology Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sn-1991@mail.ru.

Arsenii O. Artemov (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Welding Production and of Technology Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.

Dmitri S. Belinin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and of Technology Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: 5ly87@mail.ru.