

УДК 621.791.92; 621.791.754; 621.791.042

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ ИЗ СТАЛИ\*

**Жаткин С.С.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии»

**Никитин К.В.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор, декан факультета машиностроения,  
металлургии и транспорта

**Деев В.Б.<sup>2</sup>**, д.т.н., профессор, ведущий эксперт кафедры обработки  
металлов давлением (deev.vb@mail.ru)

**Панкратов С.С.<sup>1</sup>**, магистрант кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии»

**Дунаев Д.А.<sup>1</sup>**, магистрант кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии»

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет  
(443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 244)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

**Аннотация.** Приведены результаты исследования по влиянию режимов объемной электродуговой наплавки на геометрическую точность объектов типа «куб» (20×20×20 мм) из стальных присадочных материалов 09Г2С и 06Х19Н9Т. Установлено, что при наплавке образцов из стали 09Г2С фактические размеры по длине и ширине в основном превышают, а по высоте меньше заданных размеров модели. Это может быть связано с повышенным растеканием расплава по подложке при формировании первых слоев. Определен оптимальный режим наплавки объектов типа «куб» из стали 09Г2С. При наплавке образцов из стали 06Х19Н9Т растекания не происходит, однако все фактические размеры получились меньше по отношению к заданным. Вероятно, это обусловлено влиянием усадочных процессов, протекающих в наплавляемых слоях в процессе их затвердевания. Для образцов из стали 06Х19Н9Т наиболее оптимальным является режим, при котором уменьшение размеров по длине и ширине составило не более 2,5 %, а по высоте – 13,5%. Исследования по влиянию напряжения сварочной дуги и марки присадочного материала на ширину наплавляемой дорожки подтвердили склонность стали 09Г2С к растеканию по подложке во всем исследованном интервале напряжения (11 ÷ 19 В). Изучена микроструктура наплавленных образцов. Механические испытания при комнатной температуре на растяжение наплавленных образцов показали, что они обладают приемлемым комплексом механических свойств, превышающих справочные значения. Это подтверждает, что процесс формирования идет с высоким качеством без образования зон несплавления и пористости.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, электродуговая наплавка, присадочные материалы, структура, механические свойства.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-443-450

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время технологии аддитивного производства находят все более широкое применение для изготовления отдельных деталей [1–4] в машиностроении, двигателестроении и, особенно, в аэрокосмической отрасли [5]. Это связано с тем, что производство фасонных изделий традиционными способами (литье, кузнечно-прессовое производство, механическая обработка и т. д.) требует существенных временных и энергетических затрат.

Одним из наиболее перспективных направлений аддитивного производства являются развитие и адаптация технологий послойного получения трехмерных объектов (Additive Layered Manufacturing, ALM), которые известны под более общим термином – «быстрое производство» (Rapid Manufacturing, RM) [2].

Методы аддитивного производства могут быть классифицированы по природе и агрегатному состоянию исходного сырья, а также по механизмам связывания между собой слоев материала [6, 7]. Среди большого разнообразия технологий аддитивного производства для непосредственного получения деталей сложной конфигурации и ответственного назначения наибольшее внимание уделяется технологиям, основанным на использовании металломатричных материалов [8–10].

Технологии, основанные на лазерном спекании или сплавлении металлических порошков из стали, титановых и алюминиевых сплавов, получили широкое распространение для производства изделий сложной конфигурации, но небольших размеров [7]. Однако для производства изделий из вышеперечисленных материалов, но большей массы и размеров, наиболее целесообразен метод, основанный на послойной электродуговой наплавке присадочного материала в виде проволоки

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проектной части государственного задания № 0778-2020-0005.

(Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM) [11 – 15]. Среди проволоочно-дугового аддитивного производства следует выделить сварку металлическим электродом в газовой среде (GMAW), газoeлектрическую сварку вольфрамовым электродом (GTAW) и сварку плазменной дугой (PAW) [16, 17]. В целях расширения области применения технологий WAAM проводятся исследования по использованию различных материалов: из сплавов на основе титана [18, 19], никеля [20], алюминия [21, 22], стали [23, 24]. Наряду с совершенствованием оборудования для реализации технологий WAAM, разрабатываются стратегии построения металлических изделий сложной конфигурации, обеспечивающие качественные показатели по структуре и геометрии [25].

Таким образом, аддитивное производство, основанное на технологиях WAAM, является перспективным научно-техническим направлением.

Цель работы – исследование процессов формирования объектов, их структуры и свойств из стальных присадочных материалов 09Г2С и 06Х19Н9Т объемной дуговой наплавкой при помощи сварочного инверторного аппарата на базе станка с числовым программным управлением.

Работы выполнялись в лаборатории электрофизических технологий Центра литейных технологий Самарского государственного технического университета.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В исследованиях по объемной электродуговой наплавке использовался сварочный инверторный полуавтомат СВАРОГ MIG 200PRO (N229) с системой подачи проволоки внутреннего исполнения. Для автоматизации процесса наплавки применяли станок с числовым программным управлением (ЧПУ) МШ-2.2. Для реализации процесса объемной дуговой наплавки на данном станке на место крепления шпиндельной головки устанавливался специально изготовленный держатель, позволяющий закреплять и позиционировать сварочную головку с подачей присадочной проволоки. Дополнительно для управления процессом наплавки в комплекс был включен электронный прерыватель, представляющий собой блок управления для включения и выключения сварочной горелки в процессе ее движения по задаваемой программе. Работа штатива осуществля-

лась при подключенных PC-совместимом компьютере и блоке управления БУ-03 через программы управления CNC (например, Mach3, KAM4 и пр.). Для создания управляющих программ и последующей реализации объемной электродуговой наплавки использовались пакет трехмерного моделирования КОМПАС-3D фирмы АСКОН, программа подготовки управляющей программы Simplify-3D, а также программное обеспечение Mach3Loader (профиль ReabinMill), предназначенное для управления станком с ЧПУ МШ-2.2. Трехмерная модель объекта создавалась в КОМПАС-3D. Полученная модель загружалась в Simplify-3D, где происходила подготовка траектории движения горелки с заданным размером «сопла» и последующее сохранение разработанного файла управляющей программы с использованием G-кодов, необходимых для работы в программе Mach3Loader.

Сформированные объемной наплавкой образцы исследовались на соответствие фактических и заданных размеров, а также на однородность структуры по всей зоне наплавки и наличие дефектов. Определение механических свойств объектов, полученных объемной наплавкой, осуществляли на вырезанных из них образцах в соответствии с ГОСТ 1497-84.

Исследования микроструктуры зон наплавки проводились на аналитическом растровом электронном микроскопе JSM-6390А фирмы JEOL, а механические испытания на растяжение – на разрывной испытательной машине ИР 5057-50.

В качестве присадочного материала использовались стальные проволоки марок 09Г2С и 06Х19Н9Т диаметром 0,8 мм (табл. 1).

Для исследований наплавлялись образцы типа «куб» (20×20×20 мм). Объемная наплавка осуществлялась в непрерывном автоматическом режиме в среде аргона послойно по траекториям, созданным в программе Simplify-3D.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе экспериментов варьировали следующими параметрами наплавки (табл. 2): скоростью движения горелки  $v_{дв}$  относительно стола; скоростью подачи  $v_{под}$  присадочной проволоки; напряжением  $U$  дуги (число слоев во всех экспериментах равнялось 7).

Таблица 1

Химический состав присадочной проволоки для наплавки

Table 1. Chemical composition of the filler wire for surfacing

Материал	Химический состав, % (по массе)						
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Ti
09Г2С (ГОСТ 2246-70)	<0,12	0,5 – 0,8	1,3 – 1,7	<0,3	<0,3	<0,3	–
06Х19Н9Т (ГОСТ 2246-70)	<0,08	<1,0	1,0 – 2,0	8,0 – 10,0	18,0 – 20,0	–	0,5 – 1,0

Таблица 2

## Параметры режимов наплавки образцов

Table 2. Parameters of surfacing modes of the samples

Параметр	Режим						
	1	2	3	4	5	6	7
Сталь 09Г2С							
$v_{\text{под}}$ , м/мин	3,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,5	4,0
$U$ , В	15	18	18	15	15	18	20
$v_{\text{дв}}$ , м/мин	0,30	0,30	0,45	0,45	0,60	0,60	0,60
Сталь 06Х19Н9Т							
$v_{\text{под}}$ , м/мин	3,0	3,0	3,0	3,5	3,5	3,5	4,0
$U$ , В	15	15	15	18	18	18	20
$v_{\text{дв}}$ , м/мин	0,30	0,45	0,60	0,30	0,45	0,60	0,60

На рис. 1 представлены наплавленные образцы в виде куба, полученные при различных режимах наплавки из сталей 09Г2С и 06Х19Н9Т.

Анализ влияния режимов наплавки на точность воспроизведения математической модели производили по величине отклонения  $\Delta$  (%) фактического линейного размера от заданного ( $20 \times 20 \times 20$  мм):

$$\Delta = \frac{h - H}{H} 100, \quad (1)$$

где  $h$  – фактический линейный размер, мм;  $H$  – заданный линейный размер.

При наплавке образцов из стали 09Г2С (рис. 2, а) фактические размеры по длине и ширине в основном больше (положительные значения  $\Delta$ ), а по высоте меньше (отрицательные значения  $\Delta$ ) заданных размеров модели. Это может быть связано с повышенным растеканием расплава по подложке при формировании первых наплавленных слоев. Наиболее оптимальным для образцов из стали 09Г2С является режим 3 (см. табл. 2, рис. 2, а), при котором отклонение всех фактических размеров не превышает 5 % от заданных размером модели.

При наплавке образцов из стали 06Х19Н9Т (рис. 2, б) растекания не происходит, однако все фактические размеры получились меньше по отношению к заданным. Вероятно, это обусловлено большим влиянием усадочных процессов, протекающих в наплавляемых слоях в процессе их затвердевания. Наиболее оптимальным для образцов из стали 06Х19Н9Т является режим 7 (см. табл. 2, рис. 2, б), при котором уменьшение размеров по длине и ширине составило не более 2,5 %, а по высоте – 13,5 %.

Исследовано влияние напряжения сварочной дуги и марки присадочного материала на ширину ( $h$ , мм) наплавленной дорожки. Режимы наплавки: скорость подачи  $v_{\text{под}}$  проволоки 3 м/мин; скорость перемещения  $v_{\text{дв}}$  стола 0,45 м/мин; количество слоев 7. При одинаковых режимах наплавки ширина дорожки из стали 09Г2С больше по сравнению с шириной дорожки, полученной при наплавке стали 06Х19Н9Т (рис. 3). Полученные данные подтверждают склонность присадочного материала из стали 09Г2С к растеканию по подложке. При этом установлена общая тенденция к увеличению

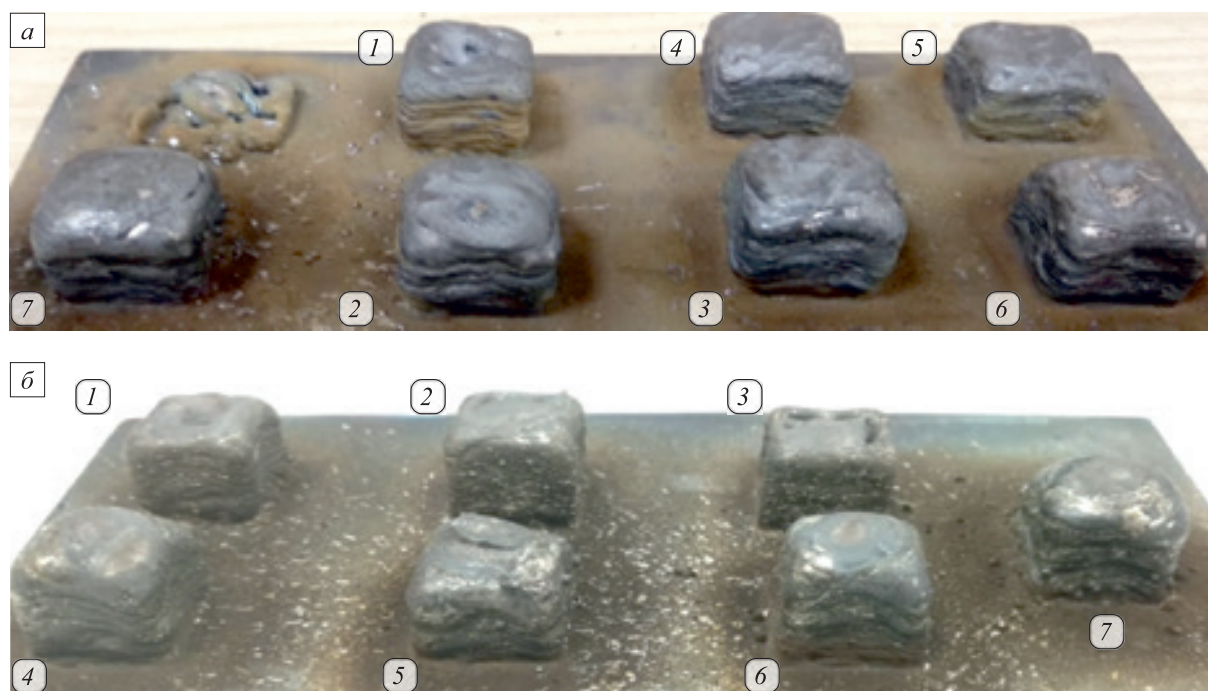


Рис. 1. Наплавленные образцы «куб» из сталей 09Г2С (а) и 06Х19Н9Т (б)

Fig. 1. Surfaced samples of “cube” type of steels 09G2S (a) and 06Kh19N9T (б)



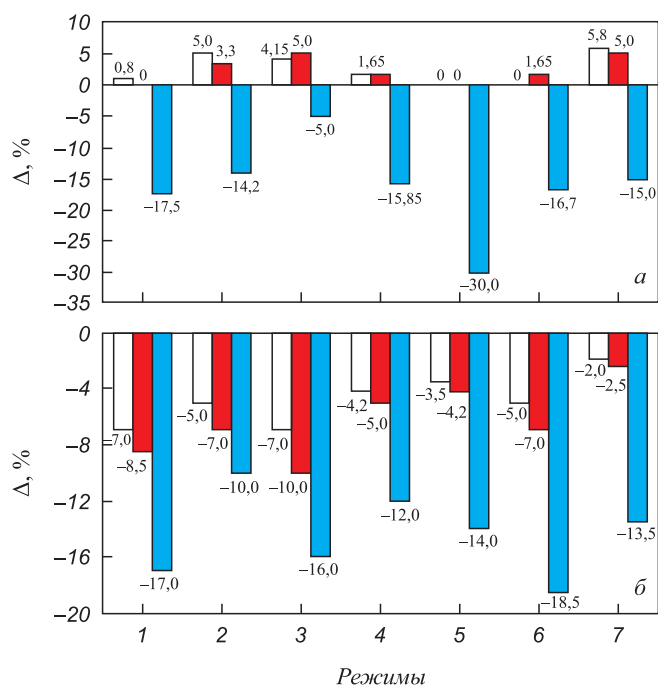


Рис. 2. Влияние режимов наплавки на отклонение фактических линейных размеров от заданных:

□ – длина; ■ – ширина; ■ – высота;  
а – сталь 09Г2С; б – сталь 06Х19Н9Т

Fig. 2. Effect of surfacing modes on deviation of the actual linear dimensions from the set ones:

□ – length; ■ – width; ■ – height;  
а – 09G2S steel; б – 06Kh19N9T steel

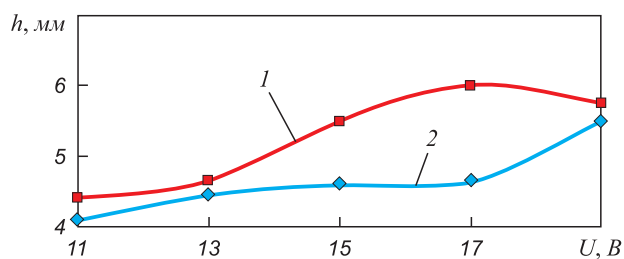


Рис. 3. Влияние напряжения сварочной дуги и марки присадочного материала на ширину наплавляемой дорожки:

1 – сталь 09Г2С; 2 – сталь 06Х19Н9Т

Fig. 3. Effect of voltage of the welding arc and grade of the filler material on width of surfacing track:  
1 – 09G2S steel; 2 – 06Kh19N9T steel

ширины наплавляемой дорожки с ростом напряжения сварочной дуги.

Микроструктуру заготовок «куб» исследовали на образцах, полученных по режимам, которые обеспечили получение наиболее точных фактических размеров: из стали 09Г2С – режим 3; из стали 06Х19Н9Т – режим 7 (рис. 4).

Видно, что в образцах присутствует незначительное количество пор при достаточно однородной структуре по высоте наплавки (см. рис. 4). Микроструктура наплавки из стали 09Г2С состоит из бейнита, феррита и перлита. В микроструктуре стали 06Х19Н9Т наблюдаются хорошо выраженные аустенитные зерна. В ниж-

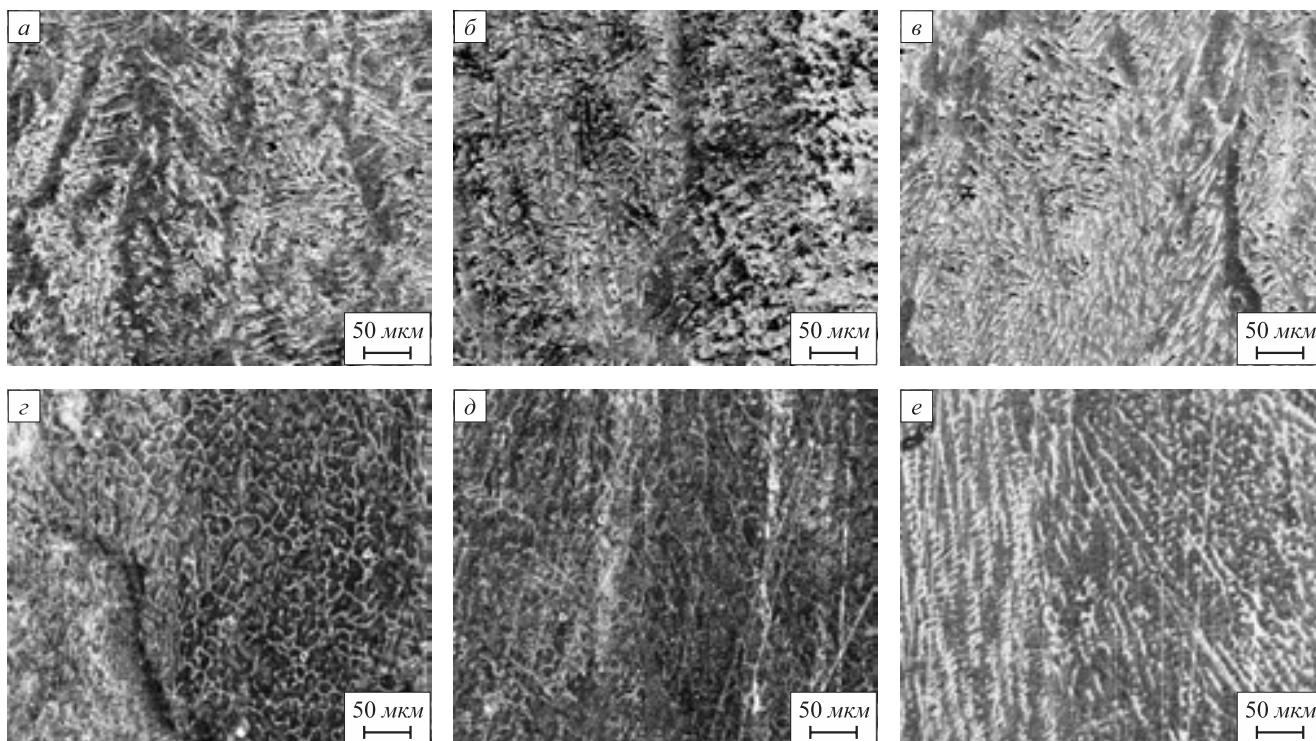


Рис. 4. Микроструктура наплавленных образцов:  
а – в – сталь 09Г2С; г – е – сталь 06Х19Н9Т; верх, середина, низ, соответственно

Fig. 4. Microstructure of the surfaced samples:  
а – в – 09G2S steel; г – е – 06Kh19N9T steel; top, middle, bottom, respectively

ней части зоны наплавки формируется выраженная дендритная структура (аустенит и  $\alpha$ -фаза), обусловленная более высоким теплоотводом через подложку.

Далее получали наплавкой заготовки ( $d \times ш \times в = 70 \times 20 \times 25$  мм) для испытания механических свойств при растяжении (рис. 5, а, б). Режимы наплавки были одинаковы для обоих присадочных материалов:  $v_{\text{под}} = 4,0$  м/мин;  $v_{\text{дв}} = 0,3$  м/мин;  $U = 2$  В. Усредненные значения механических свойств получали по результатам пяти испытаний (табл. 3). Изображения вырезанных образцов после механических испытаний представлены на рис. 5, в, г.

Механические свойства наплавленных образцов превосходят минимально допустимые значения, что

указывает на качественное формирование слоев и отсутствие зон несплавления и пористости.

### Выводы

На основе разработанного комплекса и управляющих программ для объемной электродуговой наплавки проведена отработка режимов и получены опытные образцы объемных объектов типа «куб» из сталей 09Г2С и 06Х19Н9Т.

Экспериментально установлены следующие наиболее оптимальные режимы, обеспечивающие при наплавке максимальное соответствие фактических размеров размерам модели:  $U = 18$  В,  $v_{\text{под}} = 3,5$  м/мин,



Рис. 5. Наплавленные заготовки (а, б) и вырезанные образцы (в, г) после механических испытаний: а, в – сталь 09Г2С; б, г – сталь 06Х19Н9Т

Fig. 5. Surfaced billets (a, b) and cut samples (v, g) after mechanical tests: a, v – 09G2S steel; b, g – 06Kh19N9T steel

Таблица 3

### Результаты испытаний на растяжение после наплавки

Table 3. The results of tensile testing after surfacing

Материал образца	$\sigma_b$ , МПа		$\sigma_t$ , МПа		$\delta$ , %	
	эксп.	справ.	эксп.	справ.	эксп.	справ.
09Г2С	536,7	510 – 520 [26, 27]	423,3	400 – 420 [24, 25]	23	Не менее 22 [26, 27]
06Х19Н9Т	683,3	Не менее 640 [28, 29]	493,3	Не менее 430 [26, 27]	41	Не менее 35 [28, 29]

$v_{\text{дв}} = 0,45$  м/мин (сталь 09Г2С);  $U = 20$  В,  $v_{\text{под}} = 4,0$  м/мин,  
 $v_{\text{дв}} = 0,60$  м/мин (сталь 06Х19Н9Т).

Исследования микроструктуры наплавленных образцов показали, что при многопроходной наплавке в оптимальных режимах формируется однородная структура по высоте наплавки с минимальным количеством пор.

Проведенные механические испытания при комнатной температуре на растяжение наплавленных образцов показали, что они обладают приемлемым комплексом механических свойств, превышающих справочные значения. Это подтверждает, что процесс формирования идет с высоким качеством, без образования зон несплавления и пористости.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Huang S., Liu P., Mokasdar A., Hou L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review // *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 67. No. 5 – 6. P. 1191 – 1203.
- Petrovic V., Gonzales J., Ferrando O. etc. Additive layered manufacturing: sectors of industrial applications shown through case studies // *Int. Journal of Production Research*. 2011. Vol. 49. No. 4. P. 1061 – 1079.
- Sharon L.N. Ford. Additive Manufacturing Technology: Potential Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness // *Journal of Int. Commerce and Economics*. September 2014. Electronic resource. Available at URL: [https://usitc.gov/publications/332/journals/vol\\_vi\\_article4\\_additive\\_manufacturing\\_technology.pdf](https://usitc.gov/publications/332/journals/vol_vi_article4_additive_manufacturing_technology.pdf) (Accessed 06.06.2020).
- Gebhardt A., Höttner J.-S. Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. – Munich Hanser: Carl GmbH + Co., 2016. – 611 p.
- Liu P., Huang S., Mokasdar A. etc. The impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain: supply chain operation reference (SCOR) model based analysis // *Production Planning and Control*. 2014. Vol. 25. No. 13 – 14. P. 1169 – 1181.
- Gebhardt A. Rapid Prototyping. – Hanser: Carl GmbH + Co., 2003. – 379 p.
- Kruth J.-P., Mercelis P., Van Vaerenbergh J. etc. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting // *Rapid Prototype Journal*. 2005. Vol. 11. No. 1. P. 26 – 36.
- Zhukov V.V., Grigorenko G.M., Shapovalov V.A. Additive manufacturing of metal products (review) // *The Paton Welding Journal*. 2016. No. 5 – 6. P. 137 – 142.
- Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 117. P. 371 – 392.
- DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S. etc. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties // *Progress in Materials Science*. 2018. Vol. 92. P. 112 – 224.
- Knezović N., Topić A. Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) – a new advance in manufacturing // *New Technologies, Development and Application*. Karabegović I. ed. 2018. Vol. 42. P. 65 – 71.
- Williams S. W., Martina F., Addison A. C. etc. Wire + Arc Additive Manufacturing // *Materials Science and Technology*. 2016. Vol. 32. No. 7. P. 641 – 647.
- Ding D., Pan Z., Stephen van Duin etc. Fabricating Superior NiAl bronze components through wire arc additive manufacturing // *Materials*. 2016. Vol. 9. No. 652. P. 1 – 12.
- Nagamatsua H., Sasahara H., Mitsutake Y., Hamamoto T. Development of a cooperative system for wire and arc additive manufacturing and machining // *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 31. Article 100896.
- Chen X., Su C., Wang Y. etc. Cold Metal Transfer (CMT) Based Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) System // *Journal of Surface Investigation*. 2018. Vol. 12. No. 6. P. 1278 – 1284.
- Wang X., Fan D., Huang J., Huang Y. Numerical simulation of arc plasma and weld pool in double electrodes tungsten inert gas welding // *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 85. P. 924 – 934.
- Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests // *The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 81. No. 1 – 4. P. 465 – 481.
- Baufeld B., Van der Biest O., Gault R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties // *Materials & Design*. 2010. Vol. 31. P. 106 – 111.
- Wang F., Williams S., Colegrove P., Antonysamy A.A. Microstructure and mechanical properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012. Vol. 44. No. 2. P. 968 – 977.
- Clark D., Bache M.R., Whittaker M.T. Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 203. No. 1 – 3. P. 439 – 448.
- Ланченко О.В., Жабров Л.А., Курушкин Д.В., Попович А.А. Макроструктура и механические свойства Al – Si, Al – Mg – Si, Al – Mg – Mn-сплавов, полученных электродуговым аддитивным выращиванием // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2018. No. 11. С. 63 – 69.
- Korzyk V.N., Khaskin V.Yu., Grinyuk A.A. etc. The study of the technological characteristics of hybrid plasma arc welding of aluminum alloys // *Sciences of Europe*. 2016. No. 6. P. 45 – 51.
- Peleshenko S., Korzyk V., Voitenko O. etc. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review) // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 87. No. 3/1. P. 42 – 52.
- Konovalov S.V., Kornyshev V.E., Gromov V.E. etc. Formation features of structure-phase states of Cr–Nb–C–V containing coatings on martensitic steel // *Journal of Surface Investigation*. 2016. Vol. 10. No. 5. P. 1119 – 1124.
- Michel F., Lockett H., Ding J. etc. A modular path planning solution for Wire + Arc Additive Manufacturing // *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. 2019. No. 60. P. 1 – 11.
- Св-08Г2С. Омедненная сварочная проволока ESAB // Производство сварочной проволоки: официальный сайт. 2019. Режим доступа: [http://akar.pro/images/docs/listovka\\_sv-08g2s.pdf](http://akar.pro/images/docs/listovka_sv-08g2s.pdf) (дата обращения 10.12.2019).
- Проволока сварочная ESAB CB-08Г2С // Компания НТД: официальный сайт. 2019. Режим доступа: <https://www.ventsvr.ru/catalog/esab-sv-08g2s.html?pid=17200> (дата обращения 10.12.2019).
- Проволока нержавеющая Св-06Х19Н9Т // Компания «РЭП»: официальный сайт. 2019. Режим доступа: <http://sarsvarka.ru/content/provoloka-nerzhaveyushchaya-sv-06kh19n9t> (дата обращения 10.12.2019).
- Характеристики сварочной проволоки Св-06Х19Н9Т. Текст: электронный // ООО Терминал. Цветные металлы, нержавеющие, конструкционные, инструментальные, легированные и качественные стали, прокат: официальный сайт. 2019. Режим доступа: <http://www.xn--18-qmc.xn--plai/page124.html> (дата обращения 10.12.2019).

Поступила в редакцию 2 января 2020 г.

После доработки 11 июня 2020 г.

Принята к публикации 6 июня 2020 г.



## APPLICATION OF ELECTRIC ARC SURFACING IN MANUFACTURE OF THREE-DIMENSIONAL STEEL OBJECTS

S.S. Zhatkin<sup>1</sup>, K.V. Nikitin<sup>1</sup>, V.B. Deev<sup>2</sup>, S.S. Pankratov<sup>1</sup>,  
D.A. Dunaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara State Technical University, Samara, Russia

<sup>2</sup> National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),  
Moscow, Russia

**Abstract.** The article presents the results of research on the influence of modes of the volume electric arc surfacing on the geometric accuracy of objects of the “cube” type made of 09G2S and 06Kh19N9T steel fillers. It was found, that when surfacing the samples made of 09G2S steel, the actual dimensions in length and width, generally exceed, and in height are smaller than the specified dimensions of the model. It may be due to melt spreading on the substrate during formation of the first layers. The optimal surfacing mode for objects of the “cube” type made of 09G2S steel was defined. When surfacing the samples of 06Kh19N9T steel, spreading does not occur, but all the actual dimensions are smaller in relation to the specified. It might be due to the influence of shrinkage processes occurring in the surfaced layers during their solidification. The most optimal mode for the samples made of 06Kh19N9T steel is the mode in which the size reduction in length and width was no more than 2.5 %, and in height – 13.5 %. Studies on the influence of welding arc voltage and the grade of filler material on width of the surfaced track confirmed the tendency of 09G2S steel to spread over the substrate in the entire studied voltage range (11 – 19 V). The structure of the surfaced samples was investigated. Mechanical tests on the tensile strength of the surfaced samples at room temperature have shown that they have an acceptable set of mechanical properties that exceed the reference values.

**Keywords:** additive technologies, electric arc surfacing, filler materials, structure, mechanical properties.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2020-6-443-450

## REFERENCES

- Huang S., Liu P., Mokasdar A., Hou L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013, vol. 67, no. 5-6, pp. 1191–1203.
- Petrovic V., Gonzales J., Ferrando O., Gordillo J., Puchades J., Grinan L. Additive layered manufacturing: Sectors of industrial applications shown through case studies. *Int. Journal of Production Research*. 2011, vol. 49, no. 4, pp. 1061–1079.
- Sharon L.N. Ford. Additive Manufacturing Technology: Potential Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness. *Journal of Int. Commerce and Economics*. September 2014. Available at URL: [https://usitc.gov/publications/332/journals/vol\\_vi\\_article4\\_additive\\_manufacturing\\_technology.pdf](https://usitc.gov/publications/332/journals/vol_vi_article4_additive_manufacturing_technology.pdf) (Accessed 06.06.2020).
- Gebhardt A., Hötter J.-S. *Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. Munich Hanser: Carl GmbH & Co., 2016, 611 p.
- Liu P., Huang S., Mokasdar A., Zhou H., Hou L. The impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain: Supply chain operation reference (SCOR) model based analysis. *Production Planning and Control*. 2014, vol. 25, no. 13–14, pp. 1169–1181.
- Gebhardt A. *Rapid Prototyping*. Hanser: Carl GmbH & Co., 2003, 379 p.
- Kruth J.-P., Mercelis P., Van Vaerenbergh J., Froyen L., Rombouts M. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototype Journal*. 2005, vol. 11, no. 1, pp. 26–36.
- Zhukov V.V., Grigorenko G.M., Shapovalov V.A. Additive manufacturing of metal products (review). *The Paton Welding Journal*. 2016, no. 5-6, pp. 137–142.
- Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. 2016, vol. 117, pp. 371–392.
- DeRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018, vol. 92, pp. 112–224.
- Knezović N., Topić A. Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) – a new advance in manufacturing. In: *New Technologies, Development and Application*. Karabegović I. ed. 2018, vol. 42, pp. 65–71.
- Williams S.W., Martina F., Addison A.C., Ding J., Parda G., Colegrove P. Wire + Arc Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology*. 2016, vol. 32, no. 7, pp. 641–647.
- Ding D., Pan Z., Stephen van Duin, Li H., Shen C. Fabricating Superior NiAl bronze components through Wire Arc Additive Manufacturing. *Materials*. 2016, vol. 9, no. 652, pp. 1–12.
- Nagamatsua H., Sasahara H., Mitsutake Y., Hamamoto T. Development of a cooperative system for wire and arc additive manufacturing and machining. *Additive Manufacturing*. 2020, vol. 31, article 100896.
- Chen X., Su C., Wang Y., Siddiquee A.N., Konovalov S., Jayalakshmi S., Singh R.A. Cold Metal Transfer (CMT) based Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) System. *Journal of Surface Investigation*. 2018, vol. 12, no. 6, pp. 1278–1284.
- Wang X., Fan D., Huang J., Huang Y. Numerical simulation of arc plasma and weld pool in double electrodes tungsten inert gas welding. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015, vol. 85, pp. 924–934.
- Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, vol. 81, no. 1-4, pp. 465–481.
- Baufeld B., Van der Biest O., Gault R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties. *Materials & Design*. 2010, vol. 31, pp. 106–111.
- Wang F., Williams S., Colegrove P., Antonysamy A.A. Microstructure and mechanical properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012, vol. 44, no. 2, pp. 968–977.
- Clark D., Bache M.R., Whittaker M.T. Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008, vol. 203, no. 1-3, pp. 439–448.
- Panchenko O.V., Zhabrev L.A., Kurushkin D.V., Popovich A.A. Macrostructure and mechanical properties of Al – Si, Al – Mg – Si, and Al – Mg – Mn aluminum alloys produced by electric arc additive growth. *Metal Science and Heat Treatment*. 2019, vol. 60, no. 11-12, pp. 749–754.
- Korzyk V.N., Khaskin V.Yu., Grinyuk A.A., Babich A.A., Sutkovo A.D., Olyynichenko T.V. The study of the technological characteristics of hybrid plasma arc welding of aluminum alloys. *Sciences of Europe*. 2016, no. 6, pp. 45–51.
- Peleshenko S., Korzyk V., Voitenko O., Khaskin V., Tkachuk V. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017, vol. 87, no. 3/1, pp. 42–52.

24. Konovalov S.V., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Y.F., Kapralov E.V., Semin A.P. Formation features of structure-phase states of Cr–Nb–C–V containing coatings on martensitic steel. *Journal of Surface Investigation*. 2016, vol. 10, no. 5, pp. 1119–1124.
25. Michel F., Lockett H., Ding J., Martina F., Marinelli G., Williams S. A modular path planning solution for Wire + Arc Additive Manufacturing. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. 2019, no. 60, pp. 1–11.
26. Sv-08G2S Omednennaya svarochnaya provoloka ESAB. *Proizvodstvo svarochnoi provoloki: ofitsial'nyi sait* [SV-08G2 Scopper-plated welding wire ESAB. Welding wire production: official website]. 2019. Available at URL: [http://akar.pro/images/docs/listovka\\_sv-08g2s.pdf](http://akar.pro/images/docs/listovka_sv-08g2s.pdf) (Accessed 10.12.2019).
27. Provoloka svarochnaya ESAB SV-08G2S. *Kompaniya NTD: ofitsial'nyi sait* [Welding wire ESAB SV-08G2S. NTD Company: Official website]. 2019. Available at URL: <https://www.ventsvar.ru/catalog/esab-sv-08g2s.html?pid=17200> (Accessed 10.12.2019).
28. Provoloka nerzhavayushchaya Sv-06Kh19N9T. *Kompaniya "REP": ofitsial'nyi sait* [Stainless wire SV-06H19N9T. REP Company: Official website]. 2019. Available at URL: <http://sarsvarka.ru/content/provoloka-nerzhavayushchaya-sv-06kh19n9t> (Accessed 10.12.2019).
29. *Kharakteristiki svarochnoi provoloki Sv-06Kh19N9T. OOO Terminal. Tsvetnye metally, nerzhavayushchie, konstruktsionnye, instrumental'nye, legirovannye i kachestvennye stali, prokat: ofitsial'nyi sait* [Characteristics of welding wire SV-06H19N9T.

LLC Terminal. Non-ferrous metals, stainless, structural, tool, alloy and high-quality steel, rolled products: official website]. 2019. Available at URL: <http://www.xn--18-qmc.xn--p1ai/page124.html> (Accessed 10.12.2019).

**Funding.** The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the design part of state assignment No. 07782020-0005.

#### Information about the authors:

**S.S. Zhatkin**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Foundry and Enabling Technologies"

**K.V. Nikitin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Dean of the Faculty of Mechanical Engineering, Metallurgy and Transport

**V.B. Deev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Expert of the Chair of Metal Forming (deev.vb@mail.ru)

**S.S. Pankratov**, MA Student of the Chair "Foundry and Enabling Technologies"

**D.A. Dunaev**, MA Student of the Chair "Foundry and Enabling Technologies"

Received January 2, 2020

Revised June 11, 2020

Accepted June 6, 2020