

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННЫХ ЗОН ИЗ ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ Св-АК5 ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ НАПЛАВКЕ

© 2022 г. К.В. Никитин, Д.А. Дунаев, С.С. Жаткин, В.И. Никитин

Самарский государственный технический университет (СамГТУ), г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 20.04.2022 г., доработана 07.06.2022 г., подписана в печать 09.06.2022 г.

Аннотация: Исследовано влияние тока сварочной дуги (47, 57 и 67 А) на структуру и свойства наплавленных образцов, получаемых электродуговой роботизированной наплавкой. В качестве присадочного материала использовали сварочную проволоку Св-АК5 (ER4043) системы Al–Si. Наплавку проводили на субстрат в виде плиты толщиной 6 мм из сплава АМг6 системы Al–Mg. При наплавке в образцах формируется типичная двухфазная структура доэвтектического состава, характерная для сплавов системы Al–Si, с содержанием кремния 5 %. По высоте наплавленных слоев отмечается тенденция к укрупнению структуры по направлению от субстрата, что связано с аккумуляцией теплоты в наплаваемых по высоте слоях. С увеличением тока сварочной дуги происходит измельчение дендритов на основе α -Al и кристаллов эвтектического кремния, а также возрастает плотность и падает микротвердость наплавленных образцов. Повышение плотности обусловлено снижением доли и размеров газовых пор, а также измельчением структурных составляющих. Уменьшение микротвердости связано с увеличением доли мягкой фазы (дендритов α -Al) и сокращением количества твердых кристаллов эвтектического кремния. Среднее содержание кремния в образцах, наплавленных по трем режимам, находится в интервале 5,46–5,91 %, что соответствует химическому составу сварочной проволоки марки Св-АК5 (ER4043). Увеличение тока сварочной дуги способствует росту значений предела прочности при растяжении и незначительному снижению условного предела текучести и относительного удлинения. Особенности изменения механических свойств наплавленных образцов обусловлены спецификой формирования литой структуры наплаваемых слоев в условиях направленного затвердевания по направлению от субстрата.

Ключевые слова: аддитивные технологии, электродуговая наплавка, роботизированная наплавка, алюминиевые сплавы, микроструктура, микротвердость, механические свойства.

Никитин К.В. — докт. техн. наук, проф., декан факультета машиностроения, металлургии и транспорта, СамГТУ (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244). E-mail: kvn-6411@mail.ru.

Дунаев Д.А. — аспирант, инженер кафедры литейных и высокоэффективных технологий, СамГТУ. E-mail: dimjkee830@gmail.com.

Жаткин С.С. — канд. техн. наук, профессор кафедры литейных и высокоэффективных технологий, СамГТУ. E-mail: sergejat@mail.ru.

Никитин В.И. — докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой литейных и высокоэффективных технологий, СамГТУ. E-mail: tlp@samgtu.ru.

Для цитирования: Никитин К.В., Дунаев Д.А., Жаткин С.С., Никитин В.И. Исследование структуры и свойств наплавленных зон из присадочной проволоки Св-АК5 при роботизированной наплавке. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022. Т. 28. № 4. С. 67–74. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-4-67-74.

Effect of the structure and properties of welded zones made of Sv-AK5 welding wire at robotic surfacing

K.V. Nikitin, D.A. Dunaev, S.S. Zhatkin, V.I. Nikitin

Samara State Technical University (SSTU), Samara, Russia

Received 20.04.2022, revised 07.06.2022, accepted for publication 09.06.2022

Abstract: The study covers the effect of welding arc current (47, 57, and 67 A) on the structure and properties of deposited samples obtained by robotic electric arc surfacing. Sv-AK5 (ER4043) welding wire of the Al–Si system was used as a filler material. Surfacing was carried out on a substrate in the form of a 6 mm thick plate made of AMg6 alloy (Al–Mg system). During surfacing, a typical two-phase structure of a hypoeutectic composition is formed in samples typical for Al–Si alloys with a silicon content of 5 %. Along the height of deposited layers, there is a tendency to structure enlargement in the direction from the substrate, which is associated with the accumulation of heat in layers deposited along the height. As welding arc current increases, α -Al-based dendrites and eutectic silicon crystals are refined with an increase in

the density and a decrease in the microhardness of deposited samples. The increase in density is due to the reduced proportion and size of gas pores, as well as refined structural components. The decrease in microhardness is associated with the increased proportion of the soft phase (α -Al dendrites) and decreased quantity of hard eutectic silicon crystals. The average content of silicon in samples deposited in three modes is in the range of 5.46–5.91%, which corresponds to the chemical composition of Sv-AK5 (ER4043) welding wire. Higher welding arc current contributes to an increase in the tensile strength and a slight decrease in the offset yield strength and relative elongation. The features of changes in the mechanical properties of deposited samples are determined by the specific cast structure of deposited layers formed under conditions of directional solidification in the direction from the substrate.

Keywords: additive technologies, electric arc surfacing, robotic surfacing, aluminum alloys, microstructure, microhardness, mechanical properties.

Nikitin K.V. — Dr. Sci. (Eng.), Prof., Dean of the Faculty of mechanical engineering, metallurgy and transport, Samara State Technical University (SSTU) (443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244).
E-mail: kvn-6411@mail.ru.

Dunaev D.A. — Postgraduate student, Engineer of the Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU.
E-mail: dim-jkee830@gmail.com.

Zhatkin S.S. — Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU.
E-mail: sergejat@mail.ru.

Nikitin V.I. — Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU.
E-mail: tlp@samgtu.ru.

For citation: Nikitin K.V., Dunaev D.A., Zhatkin S.S., Nikitin V.I. Effect of the structure and properties of welded zones made of Sv-AK5 welding wire at robotic surfacing. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2022. Vol. 28. No. 4. P. 67–74 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-4-67-74.

Введение

Аддитивные технологии относятся к цифровым и находят все более широкое применение для получения прототипов, заготовок и деталей из различных материалов в таких отраслях промышленности, как аэрокосмическая и машиностроительная, в энергетике, кораблестроении, медицине и т.д. [1–4]. Для непосредственного изготовления заготовок (деталей) сложной конфигурации все большее внимание уделяется технологиям аддитивного производства, в которых в качестве расходных материалов применяют стали, титановые и алюминиевые сплавы [5–8].

При использовании металлических порошков применяют методы, основанные на применении лазера в качестве источника концентрированных потоков энергии: SLS (Selective Laser Sintering — селективное лазерное спекание) и SLM (Selective Laser Melting — селективное лазерное сплавление). К основным недостаткам SLS- и SLM-технологий относятся высокая стоимость расходных материалов и небольшие объемы печати [9].

Для производства изделий из металломатричных материалов больших объемов наиболее эффективен метод послойной электродуговой наплавки присадочных материалов в виде проволоки (Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM) [8, 10–15]. Среди проволоочно-дугового аддитивного производства следует выделить сварку металлическим электродом в газовой среде (GMAW), газо-

электрическую сварку вольфрамовым электродом (GTAW) и сварку плазменной дугой (PAW) [16, 17]. Изделие формируется за счет расплавления проволоочного присадочного материала под действием электрической дуги, а при контакте с подложкой затвердевает, образуя твердый наплавленный слой. По сравнению с методом SLS преимущество WAAM-технологии заключается в том, что в изделии формируется плотная мелкодисперсная структура, во многом аналогичная литой.

В целях расширения области применения методов WAAM проводятся исследования по использованию различных материалов — сплавов на основе титана [18, 19], никеля [20], стали [21], алюминия [22, 23], меди [24].

В связи с тем, что для реализации WAAM-технологии применяют многоосевые роботы-манипуляторы, этот аддитивный процесс достаточно легко интегрируется с методами механической обработки наплавленных заготовок на таких же роботах-манипуляторах [25, 26].

Одним из перспективных направлений в настоящее время является создание протяженных, крупногабаритных заготовок из алюминиевых сплавов посредством WAAM-технологии. Основными проблемами при этом являются обеспечение плотной бездефектной структуры наплавленных слоев с требуемым уровнем свойств и соответствие геометрии наплавленной заготовки геометрии 3D-модели.

Цель работы¹ состояла в исследовании структуры и свойств наплавленных образцов из присадочной проволоки Св-АК5 (система Al—Si) при роботизированной электродуговой наплавке.

Материалы и методика экспериментов

В экспериментах по объемной электродуговой наплавке использовался сварочный инверторный полуавтомат EWMTitan 350 XQpulsD («EWMAG», Германия) с системой подачи проволоки внутреннего исполнения. Для автоматизации процесса наплавки применялся промышленный робот-манипулятор KUKA KR-210-2 2000 («KUKA GmbH», Германия), оснащенный разработанной и изготовленной своими силами специализированной оснасткой для крепления сварочной горелки (рис. 1). Для наплавки использовалась алюминиевая проволока марки Св-АК5 (ГОСТ 7871-2019) (ER4043), химический состав которой приведен ниже, мас. %:

Осн. легирующие элементы:

Si.....4,5—6,0

Ti.....0,1—0,2

Примеси, не более:

Mn.....0,01

Zn.....0,01

Fe.....0,2

Наплавка проводилась на подложку в виде плиты толщиной 6 мм из сплава АМг5. Реализация процесса объемной электродуговой наплавки и исследований включала в себя следующие этапы.

1. Создание управляющей программы (УП):

— разработка модели наплавляемой заготовки с требуемыми геометрическими размерами в специализированной программе КОМПАС-3D V17.1;

— задание траектории и скорости движения сварочной горелки, закрепленной на роботе, с помощью программы² SprutCAM 14 Robot (ООО «СПРУТ-Технология», РФ).

¹ Исследования выполнялись в лаборатории электрофизических технологий Центра литейных технологий Самарского государственного технического университета. Лаборатория оснащена оборудованием, предоставленным индустриальным партнером ООО «Велдинг Групп Самара» (г. Самара, РФ).

² Программа предоставлена индустриальным партнером ООО «СПРУТ-Технология» (г. Набережные Челны, РФ).



Рис. 1. Промышленный робот манипулятор KUKA KR-210-2 2000 со специализированной оснасткой для крепления сварочной горелки

Fig. 1. KUKA KR-210-2 2000 industrial articulated robot with special tooling for welding torch mounting

2. Загрузка УП в блок управления роботом-манипулятором (программа открывается через встроенный контроллер робота).

3. Выбор параметров наплавки (сила тока сварочного аппарата (I) и скорость подачи присадочной проволоки ($v_{\text{под}}$)), задаваемых на сварочном аппарате, а также скорости движения сварочной горелки и расхода газа.

4. Исследование качества наплавленных образцов:

- анализ микроструктуры наплавленных зон;
- измерение микротвердости наплавленного материала;
- проведение механических испытаний на разрыв наплавленных заготовок.

Исследуемые образцы наплавливались на токе обратной полярности по режимам, представленным в табл. 1. Процесс полуавтоматической наплавки существенно определяется расходом проволоки (скоростью ее подачи), напряжением и током сварочной дуги. В данных исследованиях напряжение дуги не менялось и составляло $U = 14,7$ В. При наплавке по указанным режимам сила тока в синергетическом режиме связана со скоростью подачи проволоки зависимостью, представленной на рис. 2.

Для изучения микроструктуры зон наплавки

Таблица 1. Режимы наплавки исследуемых образцов

Table 1. Welding modes for samples under study

№ режима	Скорость наплавки, мм/мин	Расход газа, л/мин	Сила тока I , А	Скорость подачи $v_{\text{под}}$, м/мин	Кол-во слоев, шт.
1	620	10	47	3,8	6
2			57	4,8	
3			67	5,7	

использовали микроскоп JEOL METAM 1C (JEOL, Япония). Анализ микроструктуры проводили по высоте наплавленной заготовки высотой 18 мм по схеме «низ—середина—верх» (рис. 3).

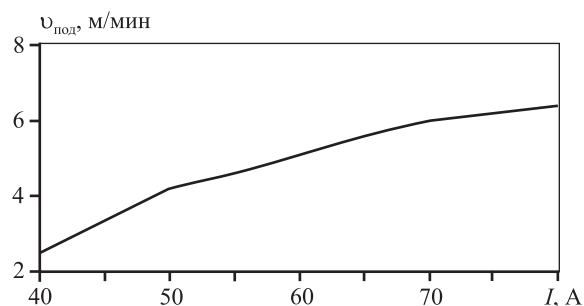


Рис. 2. Зависимость скорости подачи присадочной проволоки от силы тока сварочной дуги (синергетический режим)

Fig. 2. Dependence of welding wire feed rate on welding arc current (synergetic mode)

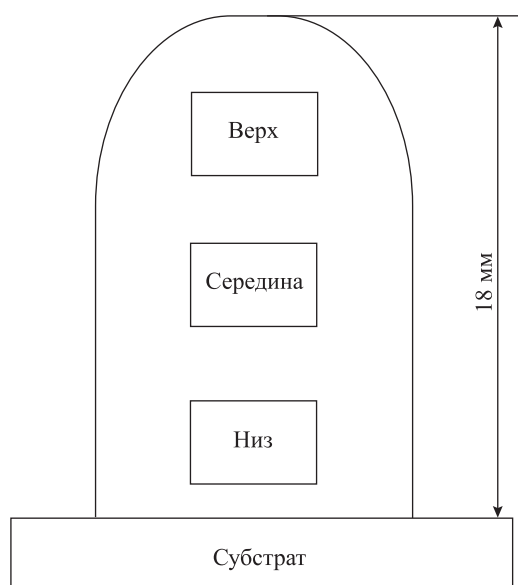


Рис. 3. Схема анализа микроструктуры наплавленных зон

Fig. 3. Microstructure analysis for welded zones

Плотность образцов после наплавки определяли методом гидростатического взвешивания. Микротвердость наплавленного материала измеряли на микротвердомере ПМТ-3 (ОАО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург, РФ) при нагрузке 200 г по высоте наплавленного слоя с шагом 0,25 мм, начиная от субстрата.

Механические испытания на растяжение осуществляли на разрывной испытательной машине ИР 5057-50 (ООО «ЗИП», г. Иваново, РФ) в соответствии с ГОСТ 1497-84. Образцы размером 70×20×25 мм для испытаний наплавливались по режимам 1–3 (см. табл. 1).

Результаты экспериментов и их обсуждение

Анализ микроструктуры зон наплавки (рис. 4) показал, что в целом по высоте формируется достаточно стабильная однородная двухфазная структура доэвтектического сплава, состоящая из дендритов α -Al на основе твердого раствора кремния в алюминии и эвтектики в междендритном пространстве. С увеличением тока дуги происходит измельчение структурных составляющих. По высоте наплавленных слоев отмечается тенденция к укрупнению структуры по направлению от субстрата. Это связано с тем, что при наплавке первого слоя происходит более интенсивный теплоотвод через субстрат. С увеличением высоты наплавки тепло аккумулируется в предыдущих слоях, что и обуславливает рост фазовых составляющих наплавленных слоев.

Увеличение силы тока способствует повышению плотности (ρ) наплавленных образцов (рис. 5) и приближению ее значений к плотности присадочной проволоки (2,69 г/см³).

Результаты измерения микротвердости (H_{μ}) наплавленных зон представлены на рис. 6. Видно, что с увеличением тока сварочной дуги этот показатель снижается, что может быть обусловлено

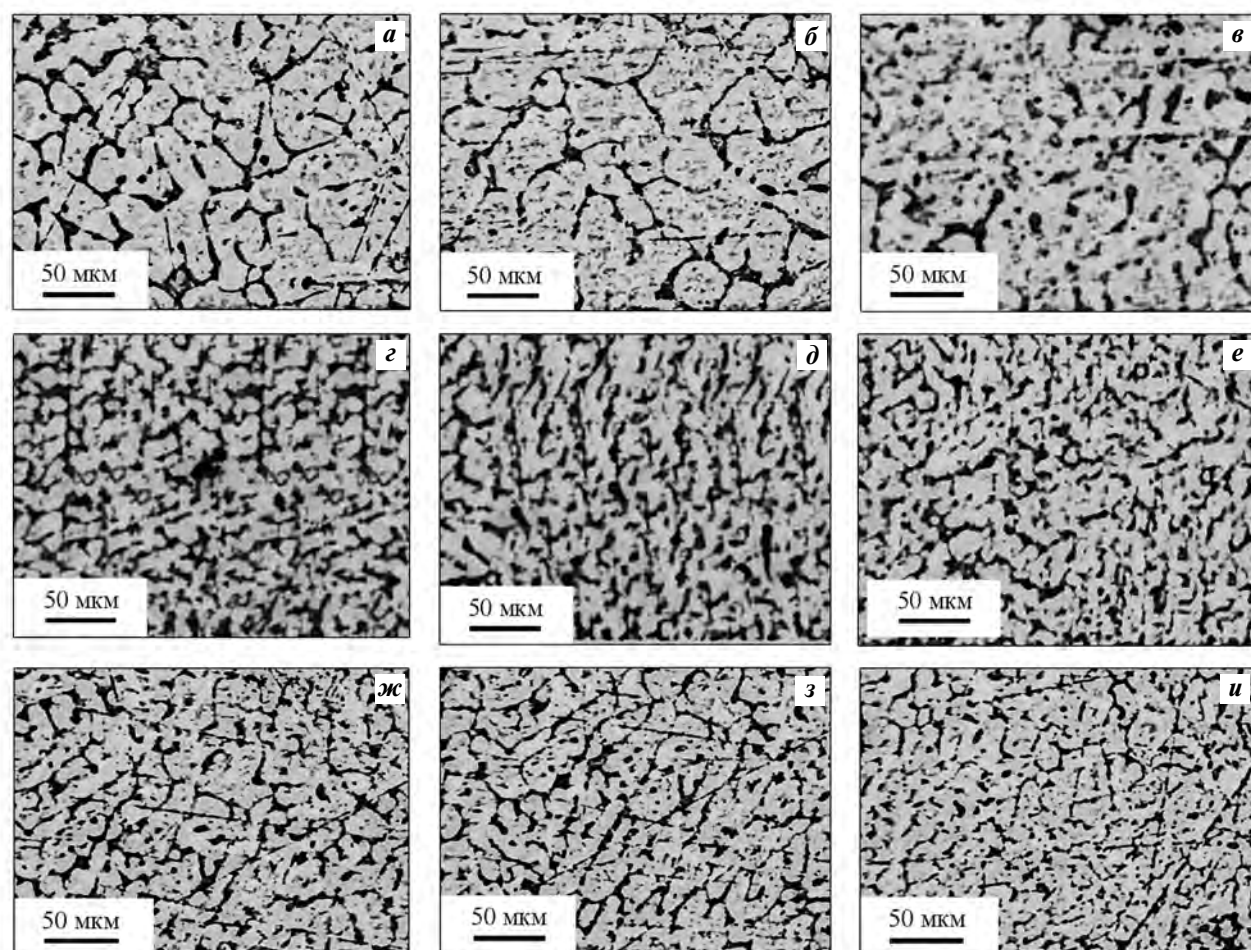


Рис. 4. Влияние тока сварочной дуги на микроструктуру наплавленных слоев
а–в – $I = 47$ А (низ заготовки); *г–е* – 57 А (середина); *ж–и* – 67 А (верх)

Fig. 4. Effect of welding arc current on the microstructure of deposited layers
а–в – $I = 47$ А (bottom of the workpiece); *г–е* – 57 А (middle); *ж–и* – 67 А (top)

увеличением доли дендритов α -Al и уменьшением количества твердых включений эвтектического кремния. Наибольшей однородностью по микротвердости характеризуется образец, наплавленный при токе сварочной дуги 67 А.

Наилучшей однородностью в распределении кремния по высоте наплавки характеризуются образцы, наплавленные при $I = 67$ А (рис. 7). Полученные результаты хорошо согласуются с данными по микротвердости, установленные для этих же образцов (см. рис. 6). Среднее содержание кремния в образцах, наплавленных по трем режимам ($I = 47, 57$ и 67 А), находится в интервале 5,46–5,91 %, что соответствует химическому составу сварочной проволоки марки Св-АК5.

При анализе структуры на границе «субстрат — наплавленный слой» установлено, что при всех

исследованных значениях тока сварочной дуги происходит проникновение материала наплавки в субстрат. С увеличением тока сварочной дуги газовая пористость снижается (рис. 8, *а, б*), а при наплавке с током 67 А вообще отсутствует (рис. 8, *в*).

Также установлено, что с ростом тока сварочной дуги происходит увеличение предела прочности при растяжении (σ_b), а условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$) и относительное удлинение (δ) незначительно снижаются, но тем не менее существенно превышают регламентированные значения сварочной проволоки в состоянии поставки (табл. 2).

Особенности изменения механических свойств наплавленных образцов могут объясняться тем, что в ходе наплавки формирование их структуры аналогично процессам, протекающим при застывании сплавов в форме при литье. Отличие

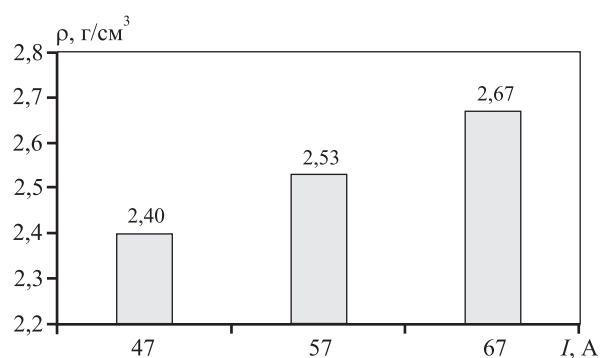


Рис. 5. Влияние тока сварочной дуги на плотность наплавленных образцов

Fig. 5. Effect of welding arc current on the density of deposited samples

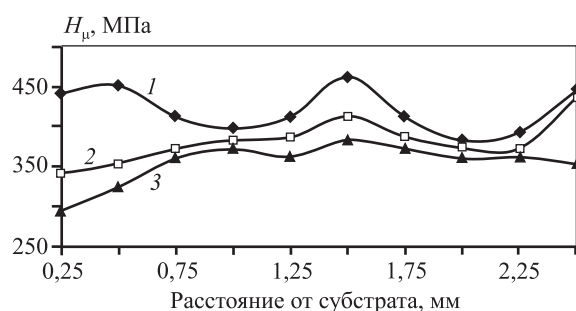


Рис. 6. Влияние тока сварочной дуги на распределение микротвердости по высоте наплавки
1 – $I = 47$ А, 2 – 57 А, 3 – 67 А

Fig. 6. Effect of welding arc current on microhardness distribution along deposition height
1 – $I = 47$ А, 2 – 57 А, 3 – 67 А

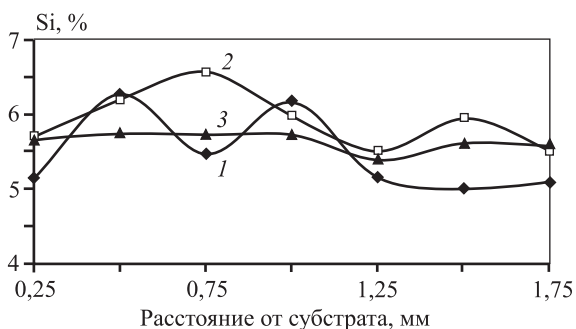


Рис. 7. Влияние тока сварочной дуги на распределение кремния по высоте наплавки
1 – $I = 47$ А, 2 – 57 А, 3 – 67 А

Fig. 7. Effect of welding arc current on silicon distribution along deposition height
1 – $I = 47$ А, 2 – 57 А, 3 – 67 А

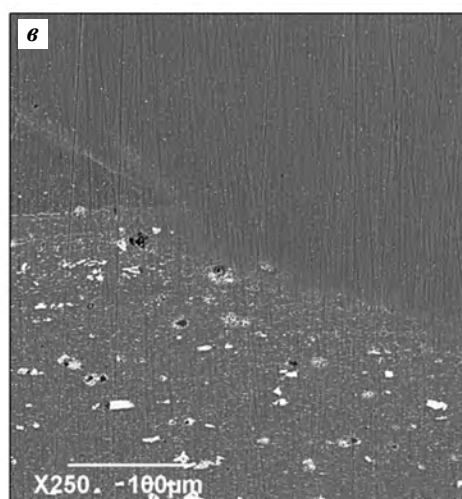
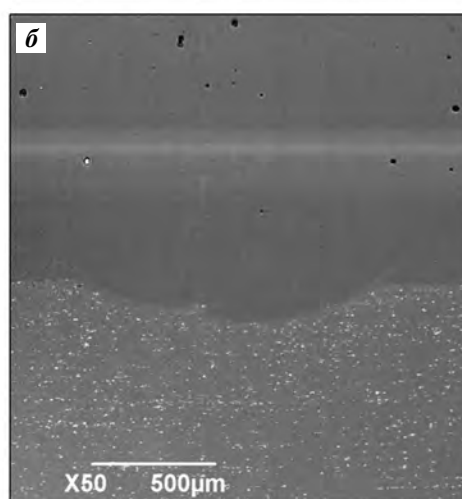
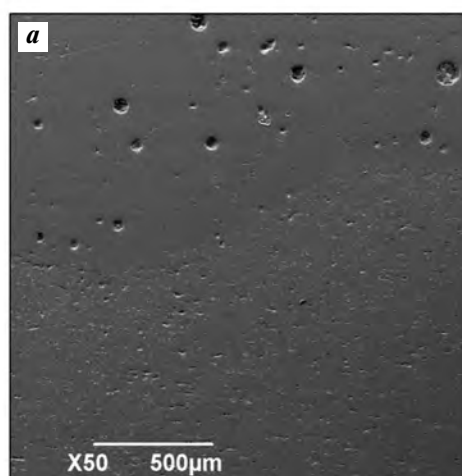


Рис. 8. Микроструктура наплавленных образцов на границе «субстрат – наплавленный слой» в зависимости от тока сварочной дуги
а – $I = 47$ А, б – 57 А, в – 67 А

Fig. 8. Microstructure of deposited samples on the «substrate – deposited layer» boundary depending on welding arc current
а – $I = 47$ А, б – 57 А, в – 67 А

Таблица 2. Результаты испытаний на разрыв наплавленных образцов

Table 2. Results of tensile tests for deposited samples

I , А	σ_b , МПа	δ , %	$\sigma_{0,2}$, МПа
47	135,6	24	115,6
57	140,1	23	113,7
67	142,1	20	110,2
0*	165,0*	18*	55,0*

* Свойства исходной сварочной проволоки в состоянии поставки согласно ISO 18273-2004.

заключается лишь в том, что затвердевание происходит в микрообъемах (наплавляемый слой), а формирование литой структуры имеет строгую направленность в направлении от субстрата. Повышение предела прочности с увеличением тока сварочной дуги обусловлено измельчением структурных составляющих и сокращением доли и размеров газовой пористости. Высокие (по отношению к наплавленным образцам) значения предела прочности сварочной проволоки в состоянии поставки объясняются особенностями структуры, формирующейся в процессах деформации при ее получении.

Выводы

Исследовано влияние тока сварочной дуги ($I = 47, 57$ и 67 А) при роботизированной электродуговой наплавке на микроструктуру и свойства наплавленных образцов из присадочной проволоки марки Св-АК5. На основании проведенных исследований установлено следующее.

1. При наплавке в образцах формируется типичная двухфазная структура доэвтектического состава, характерная для сплавов системы Al—Si с содержанием кремния 5 %. По высоте наплавленных слоев отмечается тенденция к укрупнению структуры по направлению от субстрата, что связано с аккумуляцией теплоты в наплавляемых по высоте слоях. С увеличением тока сварочной дуги происходит измельчение дендритов на основе α -Al и кристаллов эвтектического кремния.

2. С увеличением тока сварочной дуги установлен рост плотности и снижение микротвердости наплавленных образцов. Повышение плотности обусловлено снижением доли и размеров газовых пор, а также измельчением структурных составляющих. Снижение микротвердости связано с

увеличением доли мягкой фазы (дендритов α -Al) и уменьшением твердых кристаллов эвтектического Si.

3. Среднее содержание кремния в образцах, наплавленных по трем режимам ($I = 47, 57$ и 67 А), находится в интервале 5,46—5,91 %, что соответствует химическому составу сварочной проволоки марки Св-АК5.

4. Увеличение тока сварочной дуги способствует росту значений предела прочности при растяжении и незначительному снижению условного предела текучести и относительного удлинения. Особенности изменения механических свойств наплавленных образцов обусловлены спецификой формирования литой структуры наплавляемых слоев в условиях направленного затвердевания по направлению от субстрата.

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

Acknowledgments. The research was funded by the Ministry of Education and Science as part the project part of Government Task № 0778-2020-0005.

Литература/References

- Huang S., Liu P., Mokasdar A., Hou L. Additive manufacturing and its societal impact: A literature review. *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2013. Vol. 67. No. 5-6. P. 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. J. Prod. Res.* 2011. Vol. 49. No. 4. P. 1061—1079.
- Ford S.L.N. Additive manufacturing technology: potential implications for U.S. manufacturing competitiveness. *J. Int. Commer. Econ.* 2014. https://usitc.gov/publications/332/journals/vol_vi_article4_additive_manufacturing_technology.pdf (Accessed June 6. 2020).
- Gebhardt A., Hotter J.-S. Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing. Munich: Carl Hanser Verlag, 2016.
- Zhukov V.V., Grigorenko G.M., Shapovalov V.A. Additive manufacturing of metal products (review). *Paton Welding Journ.* 2016. No. 5-6. P. 137—142.
- Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Mater.* 2016. No. 117. P. 371—392.
- Deb Roy 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 compo-

- nents — Process, structure and properties. *Progr. Mater. Sci.* 2018. Vol. 92. P. 112—224.
8. Zhatkin S.S., Nikitin K.V., Deev V.B., Pankratov S.S., Dunaev D.A. Application of electric arc surfacing in the manufacturing of three-dimensional steel products. *Steel. Trans.* 2020. Vol. 50. No. 6. P. 381—386.
 9. Kruth J.-P., Mercelis P., Van Vaerenbergh J., Froyen L., Rombouts M. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyp Jour.* 2005. Vol. 11. No. 1. P. 26—36.
 10. Alberti E.A., Silva L.J., D'Oliveira A.S. Additive manufacturing: the role of welding in this window of opportunity. *Weld. Int.* 2016. Vol. 30. No. 6. P. 413—422.
 11. Knezović N., Topić A. Wire and arc additive manufacturing (WAAM): A new advance in manufacturing. In: *New technologies, development and application. NT 2018. Lecture notes in networks and systems* (Ed. Karabegović I.). Springer, Cham. 2018. Vol. 42. P. 65—71.
 12. Williams S. W., Martina F., Addison A. C., Ding J., Pardal G., Colegrove P. Wire + Arc additive manufacturing. *Mater. Sci. Technol.* 2016. Vol. 32. Iss. 7. P. 641—647.
 13. 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. P. 1—12.
 14. Cunningham C.R., Flynn J.M., Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Add. Manufact. Rev.* 2018. Vol. 22. P. 672—686.
 15. Nagamatsua H., Sasaharaa H., Mitsutakeb Y., Hamamoto T. Development of a cooperative system for wire and arc additive manufacturing and machining. *Add. Manufact.* 2020. Vol. 31. P. 1—11.
 16. Wang X., Fan D., Huang J., Huang Y. Numerical simulation of arc plasma and weld pool in double electrodes tungsten inert gas welding. *Int. J. Heat Mass Trans.* 2015. Vol. 85. P. 924—934.
 17. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2015. Vol. 81. P. 465—481.
 18. Baufeld B., Biest O.V., Gault R. Additive manufacturing of Ti—6Al—4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties. *Mater. Design.* 2010. Vol. 31. P. 106—111.
 19. Wang F., Williams S., Colegrove P., Antonysamy A.A. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti—6Al—4V. *Metal. Mater. Trans. A.* 2012. Vol. 44. Iss. 2. P. 968—977.
 20. Clark D., Bache M.R., Whittaker M.T. Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications. *J. Mater. Proc. Technol.* 2008. Vol. 203. Iss. 1-3. P. 439—448.
 21. Peleshenko S., Korzhyk V., Voitenko O., Khaskin V., Tkachuk V. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (Review). *East-Eur. J. Enterpr. Technol.* 2017. No. 3/1 (87). P. 42—52.
 22. Панченко О.В., Жабрев 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. *MuTOM.* 2018. No. 11. С. 63—69.
 23. Panchenko O.V., Zhabrev L.A., Kurushkin D.V., Popovich A.A. Macrostructure and mechanical properties of Al—Si, Al—Mg—Si, Al—Mg—Mn alloys obtained by electric arc additive cultivation. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov.* 2018. No. 11. P. 63—69 (In Russ.).
 24. Korzhyk V.N., Khaskin V.Yu., Grinyuk A.A., Babich A.A., Sutkovoi A.D., Olyinychenko T.V. The study of the technological characteristics of hybrid plasma arc welding of aluminum alloys. *Sciences of Europe.* 2016. Iss. 6. P. 45—51.
 25. Wang Y., Konovalov S.V., Chen X., Ivanov Y., Singh R.A., Jayalakshmi S., Pan X. Microstructure and mechanical properties of Cu—Al alloy deposited by additive manufacturing. *Mater. Highl.* 2021. Vol. 2 (3). P. 46—51.
 26. Киричек А.В., Федонин О.Н., Соловьев Д.Л., Жирков А.А., Хандожко А.В., Смоленцев Е.В. Аддитивно-субтрактивные технологии — эффективный переход к инновационному производству. *Вестник Брянского гос. техн. ун-та.* 2019. No. 8. С. 4—10.
 27. Kirichek A.V., Fedonin O.N., Soloviyov D. L., Zhirkov A.A., Khandozhko, Smolentsev E.V. Additive-subtractive technologies — effective transition to innovation production. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2019. No. 8. P. 4—10 (In Russ.).
 28. Strong D., Kay M., Conner B., Wakefield Th., Manogharan G. Hybrid manufacturing — integrating traditional manufacturers with additive manufacturing (AM) supply chain. *Additive Manufact.* 2018. No. 21. P. 159—173.