

Исследование микроструктуры образцов, полученных методом послойного построения электрической дугой в защищённой атмосфере

И. Ю. Григоров ¹, А. Н. Гречухин ¹ ✉, И.А. Чернышев ²

¹ Юго-Западный государственный университет,
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Региональный центр инжиниринга,
ул. Максима Горького, д. 34, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Статья посвящена металлографическому исследованию структуры характерных зон образцов, полученных методом послойного построения электрической дугой в среде защитного газа. Образцы для исследования микроструктуры были получены с применением лабораторного стенда, содержащего мехатронную систему с числовым программным управлением, обеспечивающую позиционирование устройства для подачи присадочного материала в виде проволоки относительно рабочего стола по трем управляемым координатным осям. Формирование образцов осуществлялось на приемную поверхность из стали 3, материал для послойного построения – легированная сталь Св-09Г2С, источник питания электрической дуги – сварочный аппарат инверторного типа Кедр MIG-160GDM, защищенная атмосфера – среда защитного газа (аргон+углекислый газ). Послойное формирование экспериментальных образцов было реализовано с применением следующих схем: в горизонтальной плоскости приемной поверхности; в вертикальной плоскости приемной поверхности. Подготовка к металлографическому исследованию осуществлялась в соответствии с ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна», ГОСТ Р 57180-2016 «Соединения сварные. Методы определения механических свойств, макроструктуры, микроструктуры». В результате проведенных исследований выявлено наличие пустот и непроваров между соседними единичными слоями в горизонтальной плоскости; материал приемной поверхности в зоне корневого прохода и зоне термического влияния имеет структуру, характеризующую более низкими физико-механическими свойствами, а так же более низкой коррозионной стойкостью по сравнению с материалом приемной поверхности. Материал образцов, сформированных в вертикальной плоскости, имеет структуру, схожую по размеру зерен с материалом приемной поверхности, материалом построения.

Методы. В процессе выполнения работ были применены методы исследования микроструктуры.

Результаты. В результате выполнения работ по настоящему исследованию выявлено, что при формировании единичных слоев на приемной поверхности в горизонтальной плоскости имеет место образование критических дефектов – пустот и «непроваров». Зона термического влияния, зона корневого прохода содержит микроструктуру металла, обладающую более низкими по сравнению с материалом приемной поверхности, физико-механическими характеристиками и коррозионной стойкостью.

Заключение. При формировании изделий методом послойного построения электрической дугой в защищенной атмосфере необходимо учитывать следующие технологические особенности процесса: с целью предотвращения образования критических дефектов при послойном построении слоев в горизонтальной плоскости, необходимо установить диапазон значений коэффициента перекрытия слоев; с целью обеспечения создания однородных структур металла в зоне сплавления приемной поверхности и материала построения, а так же минимизации размеров зоны термического влияния и зоны корневого прохода, необходимо построение слоев производить с использованием приемной поверхности из материалов, максимально соответствующих по химическому составу материалу построения.

Ключевые слова: аддитивные технологии; микроструктура; аддитивное построение.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Григоров И. Ю., Гречухин А. Н., Чернышев И.А. Исследование микроструктуры образцов, полученных методом послойного построения электрической дугой в защищенной атмосфере // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(2): 8-23. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-8-23>.

Поступила в редакцию 11.04.2023

Подписана в печать 27.06.2023

Опубликована 02.08.2023

Investigation of the Microstructure and Elemental Composition of Samples Obtained by the Method of Layer-by-Layer Construction by an Electric Arc in a Protected Atmosphere

Igor Yu. Grigorov ¹, Alexander N. Grechukhin ¹ ✉, Ilya A. Chernyshev ²

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² Regional Engineering Center
34 Maxim Gorky str., Kursk 305000, Russian Federation

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The article is devoted to the metallographic study of the structure, as well as the elemental composition of the characteristic zones of samples obtained by the method of layer-by-layer construction of an electric arc in a protected atmosphere. The samples for the study were obtained using a mechatronic system with numerical control, which provides positioning of the device for feeding the filler material in the form of a wire along three coordinate axes. The samples were formed on a receiving surface made of steel 3, the material for layer-by-layer construction was alloy steel Sv-09G2S, the electric arc power source was an inverter-type welding machine Cedar MIG-160GDM, the protected atmosphere was a protective gas environment. The layered formation of

experimental samples was implemented using the following schemes: in the horizontal plane; in the vertical plane. Preparation for metallographic examination was carried out in accordance with GOST 5639-82 "Steels and alloys. Methods of detection and determination of grain size", GOST R 57180-2016 "Welded joints. Methods for determining mechanical properties, macrostructure, microstructure". The elemental composition of the obtained samples was carried out by X-ray fluorescence analysis using the X-MET 5100 analyzer. As a result of the conducted studies, the presence of voids between single layers in the horizontal plane was revealed; the material of the receiving surface in the root passage zone and the zone of thermal influence have a structure with lower physical and mechanical properties, as well as lower corrosion resistance compared to the material of the receiving surface. The material of the samples formed in the vertical plane has a structure similar in grain size to the material of the receiving surface

Methods. In the course of the work, methods of microstructure research, as well as elemental analysis were applied

Results. As a result of the work performed on this study, it was revealed that during the formation of single layers on the receiving surface in the horizontal plane, the formation of critical defects - voids and "non-vapors" takes place. The zone of thermal influence, the zone of the root passage contains a metal microstructure that has lower physical and mechanical characteristics and corrosion resistance compared to the material of the receiving surface

Conclusion. When forming products by the method of layer-by-layer construction of an electric arc in a protected atmosphere, the following technological features of the process must be taken into account: in order to prevent the formation of critical defects during layer-by-layer construction of layers in a horizontal plane, it is necessary to establish a range of values of the overlap coefficient of layers; in order to ensure the creation of homogeneous metal structures in the fusion zone of the receiving surface and the construction material, as well as to minimize the size of the zone of thermal influence and the root passage zone, it is necessary to build layers using the receiving surface of materials that maximally correspond in chemical composition to the construction material.

Keywords: additive; technologies; protective atmosphere; microstructure.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Grigorov I. Yu., Grechukhin A. N., Chernyshev I. A. Investigation of the Microstructure and Elemental Composition of Samples Obtained by the Method of Layer-by-Layer Construction by an Electric Arc in a Protected Atmosphere. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(2): 8-23 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-8-23>.

Received 11.04.2023

Accepted 27.06.2023

Published 02.08.2023

Введение

Аддитивные технологии находят все более широкое применение в решении различных задач промышленности. В отличие от традиционных технологий изготовления методом вычитания материала из заготовки, использование аддитивных технологий позволяет выращивать объекты путем добавления слоя за слоем до получения готового изделия.

Ограниченное применение получили комплексы технологического оборудования для аддитивного построения на

базе лазерных и электронно-лучевых источников энергии, применение которых позволяет с высокой производительностью формировать геометрический профиль изделий из металлов и их сплавов [1-9].

Такие комплексы не получили широкого применения, в первую очередь, по причине высокой цены технологического оборудования. Поэтому, наряду с аддитивными технологиями на основе использования концентрированных источников энергии, все более широкое применение получают технологии, ис-

пользующие электрическую, либо плазменную дуги – такие источники энергии являются наиболее дешевыми в применении, а в сочетании с мехатронной системой с числовым программным управлением, позволяют производить послойное построение изделий из проволоки металлов и их сплавов с высокой производительностью. Такой способ аддитивного построения реализуют в защищенной атмосфере, к примеру в вакуумной камере, либо в среде защитного газа [10-15].

Однако не достаточно изученными остаются вопросы формирования внутренней структуры изделий из металлов и их сплавов, изготовленных способом аддитивного формообразования электрической дугой в защищенной атмосфере. Для установления закономерностей формирования внутренней структуры изделий из сталей были проведены настоящие исследования [15-20].

Материалы и методы

Целью исследования является металлографическое исследование структуры образцов, полученных способом аддитивного формообразования электрической дугой в среде защитного газа.

Для изготовления экспериментальных образцов был разработан и построен лабораторный стенд, реализующий способ аддитивного построения объектов электрической дугой. В состав стенда входила мехатронная система с числовым программным управлением,

реализующая перемещение устройства построения относительно рабочего стола по 3 управляемым координатным осям. Подача материала построения в виде проволоки осуществлялась посредством разработанного механизма подачи, включающего прижимные ролики и шаговый двигатель. Подача защитного газа производилась посредством электромагнитного клапана. Управление мехатронной системой, механизмом подачи материала построения, клапаном подачи защитного газа реализовано с помощью специализированного программного обеспечения.

Формирование образцов для проведения металлографического исследования и структурного анализа производилось путем послойного наплавления проволоки из стали Св. 09Г2С на приемную поверхность из стали 3. Слои наплавливались в горизонтальной и в вертикальной плоскостях. В горизонтальной плоскости слои наплавливались с коэффициентом перекрытия 0,3. В качестве источника энергии электрической дуги был применен сварочный полуавтомат инверторного типа модели Кедр MIG-160GDM. Схема формирования слоев представлена на рис. 1.

Исходные данные для построения образцов для металлографического исследования представлены в табл. 1.

Внешний вид лабораторного стенда представлен на рис. 2.

Внешний вид полученных образцов показан на рис. 3.

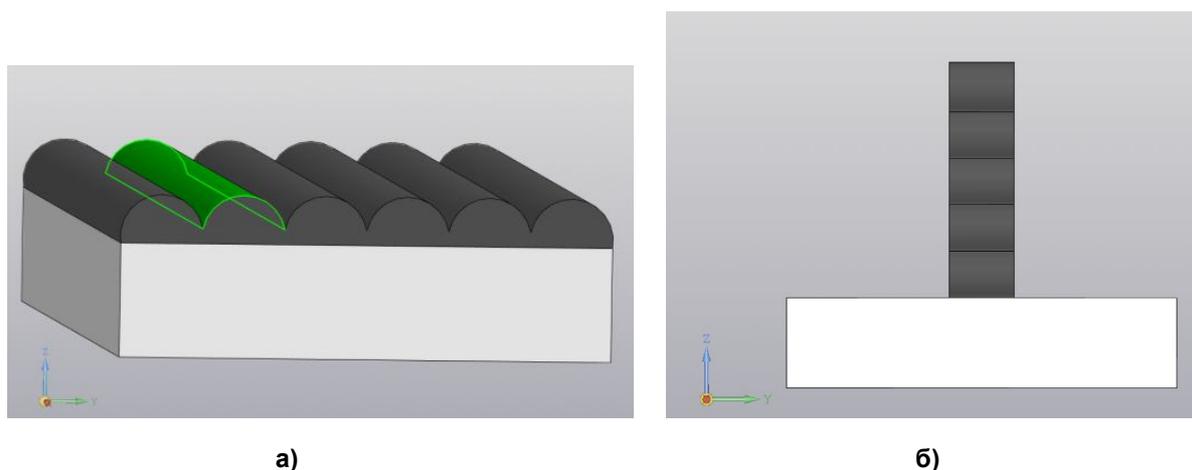


Рис. 1. Схема формирования слоев образцов: **а** – в горизонтальной плоскости;
б – в вертикальной плоскости

Fig. 1. The scheme of formation of layers: **a** – in the horizontal plane; **b** – in the vertical plane

Таблица 1. Исходные данные для построения слоев

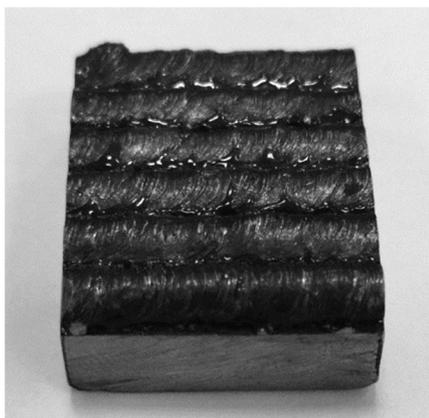
Table 1. Source data for building layers

№ образца / Sample No.	Плоскость построения / Construction plane	Материал приемной поверхности /Receiving surface material	Материал построения /Construction material	Количество слоёв /Number of layers	Коэффициент перекрытия слоев /Layer overlap coefficient	Давление подачи газа, Мпа /Gas supply pressure	Скорость перемещения сварочной горелки, мм/мин /The speed of movement of the welding torch,	Скорость подачи проволоки, мм/мин / Feed rate	Напряжение на холостого хода, V / Idle voltage
1	Горизонтальная	Сталь 3	Сталь Св. 09Г2С	6	3	14	200	3000	19,5
2	Вертикальная	Сталь 3	Сталь Св. 09Г2С	6	-	14	200	3000	19,5



Рис. 2. Лабораторный стенд

Fig. 2. Laboratory stand



а)



б)

Рис. 3. Экспериментальные образцы, образованные путем наплавления слоев: **а** – образец 1, **б** – образец 2

Fig. 3. Experimental samples formed by melting layers: **a** – sample 1; **b** – sample 2

Для проведения металлографического исследования и были выполнены срезы наплавленных слоев в направлении, перпендикулярном к их оси. Подготовлены шлифы одноименных сечений. Травление производилось химически в 4%-ном растворе азотной кислоты HNO_3 в спирте.

Исследование микроструктуры проводилось на световом металлографическом микроскопе 4XC-NXV.

Оценка микроструктуры производилась по ГОСТ 5639 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна» и ГОСТ Р 57180-2016 «Соединения сварные. Методы определения механических свойств, макроструктуры и микроструктуры».

Результаты и их обсуждение

В результате проведенного металлографического исследования были вы-

явлены следующие результаты: на поверхности шлифов как образца 1, так и образца 2 наблюдаются три четко различимые зоны: зона материала приемной поверхности, зона корневого прохода, зона послойного построения, фото образцов представлены на рис. 4. У образца 2 не наблюдается нарушения целостности между единичными слоями, в то же время образец 1 имеет ярко выраженные зоны несплавления, преимущественно в стыках между соседними слоями, геометрические размеры дефектов не превышают до 1 мм в длину и до 0,5 мм в ширину. На образце 2 аналогичный дефект выражен в меньшей степени, пустоты между слоями построения расположены только по обеим сторонам, так же наблюдается существенное различие в ширине слоев построения по мере заполнения слоев от первого слоя к шестому.

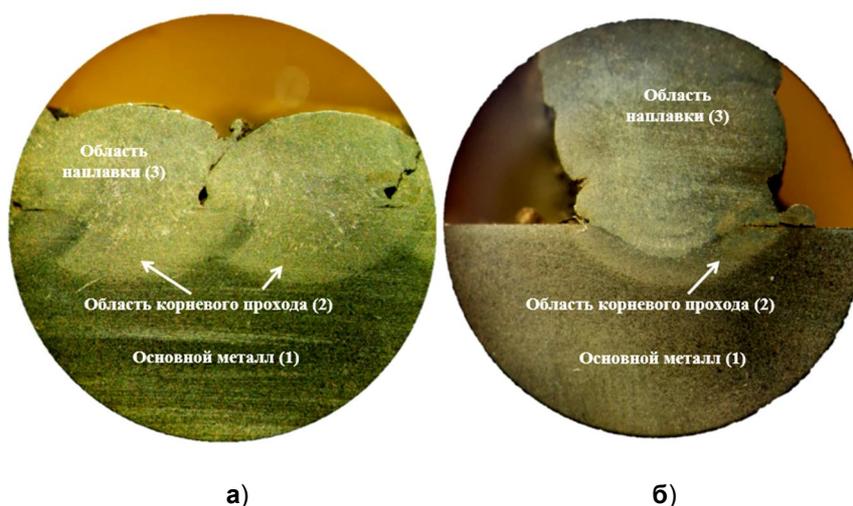


Рис. 4. Микроструктура образцов (увеличение $\times 40$): а – образец 1; б – образец 2

Fig. 4. Microstructure of samples (magnification $\times 40$): а – sample 1; б – sample 2

На рисунках 4 – 9 представлены микрофотографии исследуемых образцов. Структура металла подложки образцов 1, 2 состоит из светлых зерен феррита с распределенным по краям зерен пластинчатым перлитом, объемная доля которого в основном металле не превышает

10% – рис. 5 а. В области перехода металла приемной поверхности в зону термического влияния зерна феррита имеют вытянутую форму рис. 5 б.

В области корневого прохода образцов 1, 2 наблюдается выделение сферических частиц (карбидов) (рис. 6 а, б).

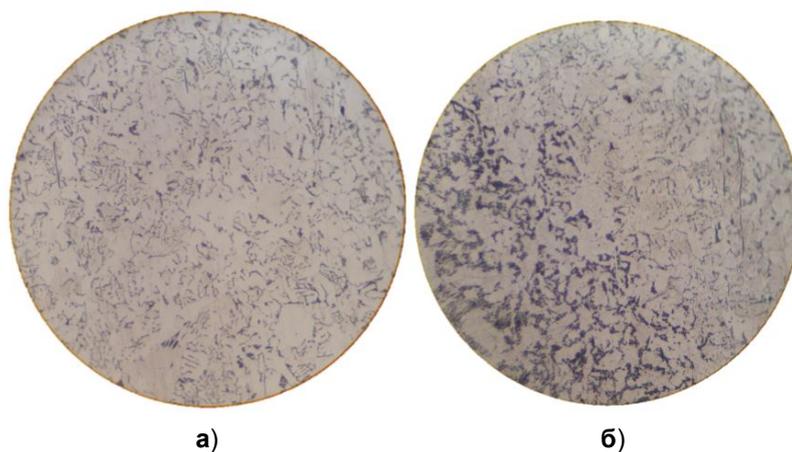


Рис. 5. Структура металла приемной поверхности (увеличение x400)

Fig. 5. Metal structure of the receiving surface (magnification x400)

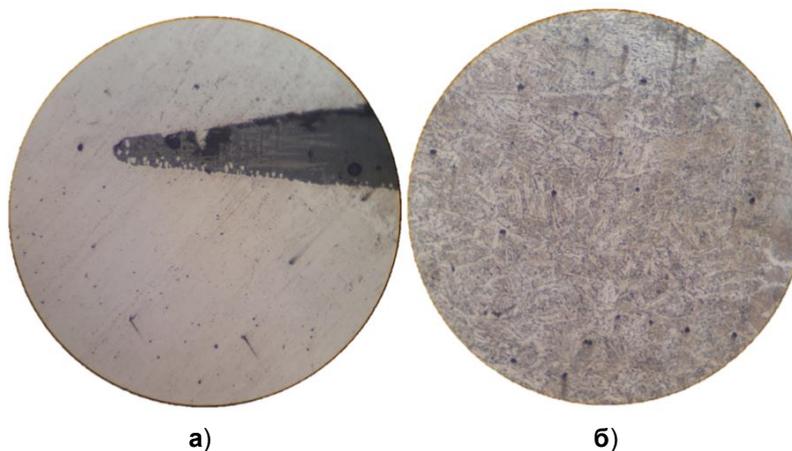


Рис. 6. Зона корневого прохода: а – увеличение x400; б – увеличение x100

Fig. 6. Root passage zone: а – x400 magnification; б – x100 magnification

Переход от материала приемной поверхности к зоне термического влияния имеет четкие границы. Для образцов 1, 2 в зоне термического влияния наблюдается выделение бейнита в ферритной матрице (рис. 7,а). В направлении удаления

от металла подложки бейнит располагается в пределах опоясанных ферритной сеткой зерен (рис. 7 б). В зоне термического влияния выделения сферических частиц не наблюдается.

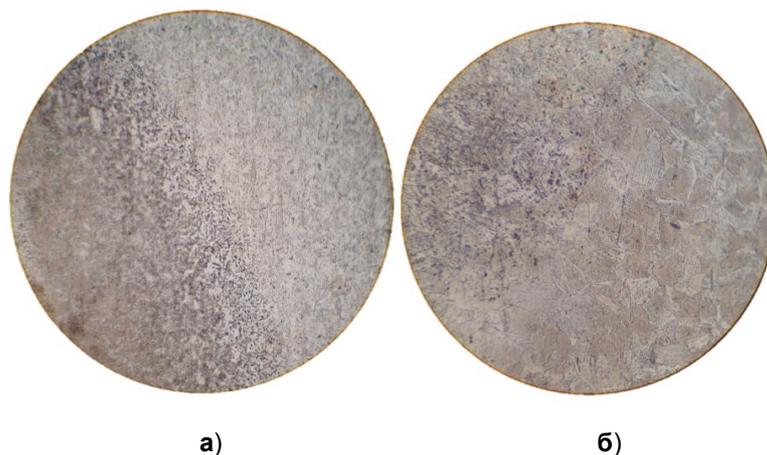


Рис. 7. Микроструктура зоны термического влияния образцов 1, 2 (увеличение $\times 400$)

Fig. 7. Microstructure of the zone of thermal influence of samples 1, 2 (magnification $\times 400$)

Область построения имеет микроструктуру с высоким объемным содержанием Видманштеттовой структуры, отсутствием сферических выделений, при удалении от зоны корневого прохода в микроструктуре наблюдается проявление равноосных ферритных зерен (рис. 8 *a*). В образце 1 ближе к краю

нанесения слоев наблюдаются области, состоящие из ферритных зерен (рис. 8 *б*), а в образце 2 области, расположенные на расстоянии свыше 8 мм от области корневого прохода, имеют структуру, аналогичную структуре металла приемной поверхности (рис. 9 *a*).

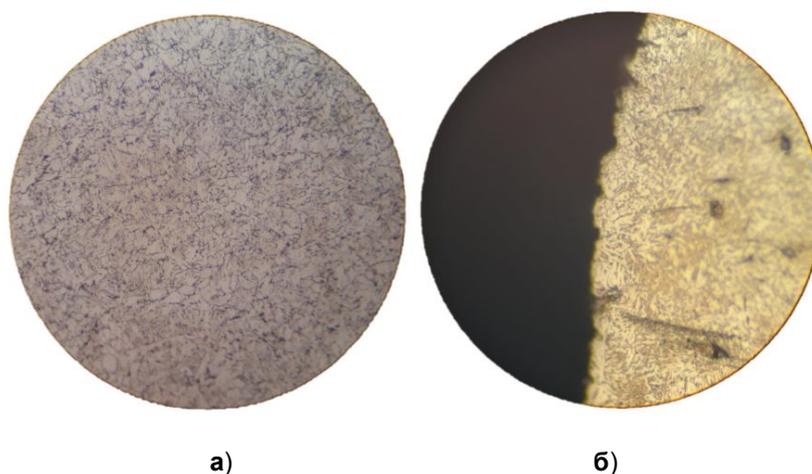


Рис. 8. Микроструктура области построения (увеличение $\times 400$)

Fig. 8. Microstructure of the construction area (magnification $\times 400$)

По краям металла приемной поверхности и слоев построения не наблюдается явных признаков межкристаллитной

коррозии, кроме слабого выкрашивания на глубину менее 3 мкм в отдельных областях.

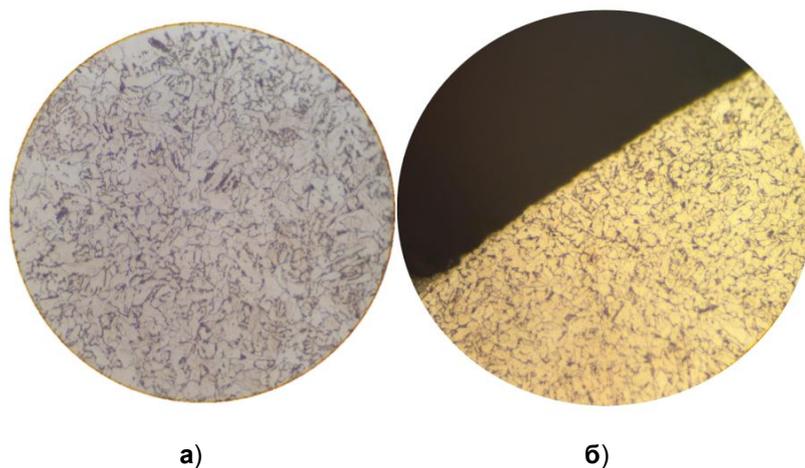


Рис. 9. Микроструктура образцов (увеличение $\times 400$): **а** – материал построения в удалении от области корневого прохода: **б** – материал построения на краю шлифа

Fig. 9. Microstructure of samples (magnification $\times 400$): **a** – the construction material at a distance from the root passage area: **b** – the construction material at the edge of the slot

Области у края однородны и не отличаются микроструктурой от соответствующих им областей в центральных частях шлифа (рис. 9 б).

Выводы

В результате проведенного металлографического исследования образцов, полученных в результате электродугового послойного построения в среде защитного газа, были выявлены следующие особенности:

– образцы единичных слоев, построение которых производилось в горизонтальной плоскости, имеют пустоты вдоль границ соседних слоев. Появление дефектов такого рода является следствием не верно заданного коэффициента перекрытия, поэтому, с целью предотвращения образования критических дефектов при послойном построении слоев в горизонтальной плоскости способом электродугового послойного построения в среде защитного газа,

необходимо установить диапазон значений коэффициента перекрытия слоев, при соблюдении которого, образование дефектов в виде пустот будет минимальным;

– зона на приемной поверхности, зона термического влияния, а так же зона корневого прохода, содержат в значительном количестве Видманштеттову структуру, что может способствовать снижению физико-механических свойств, снижению коррозионной стойкости в обозначенных выше областях. Поэтому необходимо построение слоев необходимо производить с использованием приемной поверхности из материалов, максимально соответствующих по химическому составу материалу построения;

– при анализе образцов с построением слоев в вертикальной плоскости установлено, что металл в зоне послойного построения имеет структуру, однородную структуре металла приемной поверхности, схожую по размерам зерен

и распределению феррита со структурой материала построения, поэтому применение режимов формирования слоев, реализованных для изготовления лаборатор-

ных образцов способом электродугового послойного построения, является рациональным, обеспечивающим рациональный температурный режим процесса.

Список литературы

1. Проектирование технологического оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, А.В. Олешицкий, Ю.Э. Симонова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 4.

2. Расширение технологических возможностей методов аддитивного формообразования с применением механизмов параллельно-последовательной структуры / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, А.В. Олешицкий, М.С. Разумов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 34-44. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-34-44>.

3. Механизмы управления погрешностью аддитивного формообразования с применением устройств с гибридной компоновкой / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, А.В. Олешицкий, М.С. Разумов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 23-34. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-23-34>.

4. Исследование геометрической точности устройства для аддитивного формообразования / В.В. Куц, А.В. Олешицкий, П.А. Гаркавцева, А.Н. Гречухин // Современные материалы, техника и технология. сборник научных статей 10-й Международной научно-практической конференции. Курск, 2020. С. 206-211.

5. Применение аддитивных методов формообразования как инструмент повышения качества изделий / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, А.В. Олешицкий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 12. С. 46-48.

6. Гречухин А.Н., Куц В.В., Олешицкий А.В. Повышение качества аддитивных методов формообразования с применением механизмов последовательной структуры // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. Тула, 2019. С. 147-150.

7. Гречухин А.Н., Куц В.В., Олешицкий А.В. Теоретическое исследование влияния геометрической точности узлов технологического оборудования с гибридной компоновкой на погрешность аддитивного формообразования // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 12 (85). С. 42-49.

8. Влияние частоты тока при импульсной послойной плазменной наплавке на структуру и свойства высоколегированной стали при аддитивном формировании изделий / Ю.Д. Щицын, Т.В. Ольшанская, С.Д. Неулыбин, Р.Г. Никулин, А.Ю. Душина // СТИН. 2021. № 6. С. 10-12.

9. Металлургические особенности ремонтной плазменной наплавки магниевых сплавов / Р.Г. Никулин, Ю.Д. Щицын, Е.А. Кривоносова, Д.С. Загребин, Т. Хассель // *Металлург*. 2021. № 12. С. 47-54.

10. Использование плазменной наплавки для аддитивного формирования заготовок из титановых сплавов / Ю.Д. Щицын, Е.А. Кривоносова, Т.В. Ольшанская, С.Д. Неулыбин // *Технология металлов*. 2021. № 2. С. 46-54.

11. О влиянии схем плазменной наплавки на формирование структуры и свойств титанового сплава / С.Н. Акулова, А.В. Мышкина, С.В. Варушкин, С.Д. Неулыбин, Е.А. Кривоносова, Ю.Д. Щицын, Т.В. Ольшанская // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2021. Т. 23. № 3. С. 75-83.

12. Влияние углекислого газа на тепловую эффективность плазменной поверхностной термической обработки двухкамерным плазмотроном / А.В. Казанцев, Ю.Д. Щицын, Д.С. Белинин, Р.Г. Никулин, С.Г. Никулина // *Химия. Экология. Урбанистика*. 2020. Т. 1. С. 434-438.

13. Токарев А.С., Ризванов Р.Г., Каретников Д.В. Исследование микроструктуры и механических свойств сварных соединений из коррозионностойкой стали марки 10x17n13m2t полученных ротационной сваркой трением // *Нефтегазовое дело*. 2022. Т. 20. № 4. С. 163-172.

14. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / А. А. Осколков и др. // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2018. Т. 20. № 3. С. 90-105.

15. Сравнительный анализ структуры и механических свойств аддитивных изделий, полученных электронно-лучевым методом и холодным переносом металла / А. А. Елисеев и др. // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. № 4. С. 65-73.

16. Metallurgical processes during plasma remelting of a metallized coating of the Fe–C–Cr–Ti–Al system / S. D. Neulybin et al. // *Metallurgist*. 2017. Vol. 60. № 11. P. 1202-1206.

17. Коротеев А. О., Долячко В. П., Куликов В. П. Аддитивная технология создания объемных металлических изделий на основе дуговой сварки с импульсной реверсивной подачей присадочного материала // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2019. № 4 (65). С. 15-25

18. Коротеев А. О. Особенности формирования микроструктуры при аддитивной дуговой наплавке материалов системы легирования Al–Si // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы международной научно-технической конференции*. Могилев, 2022. С. 182.

19. Аддитивно-субтрактивные технологии – эффективный переход к инновационному производству / А. В. Киричек и др. // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 8 (81). С. 4-10
20. Способ управления процессом трехмерной наплавки / Д. Н. Трушников, М. Ф. Карташев, Р. П. Давлятшин, С. З. Ф. Раймундо // СТИН. 2022. № 8. С. 29-31

References

1. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Oleshitsky A.V., Simonova Yu.E. Proektirovanie tekhnologicheskogo oborudovaniya dlya additivnogo formoobrazovaniya s gibridnoi komponovkoi [Design of technological equipment for additive shaping with hybrid layout]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2019, vol. 15, no. 4.
2. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Oleshitsky A. V., Razumov M. S. Technological Capabilities Extension of Additive Forming Methods Using Parallel-Serial Structures. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 34-44 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-34-44>.
3. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Oleshitsky A. V., Razumov M. S. Control Mechanisms of Additive Shaping Error with the Use of Hybrid Design Devices. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 23-34 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-23-34>.
4. Kutz V.V., Oleshitsky A.V., Garkavtseva P.A., Grechukhin A.N. [Investigation of the geometric accuracy of the device for additive shaping]. *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologiya. Sbornik nauchnykh statei 10-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Modern materials, technique and technology. Collection of scientific articles of the 10th International Scientific and Practical Conference]. Kursk, 2020. pp. 206-211 (In Russ.).
5. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Oleshitsky A.V. Primenenie additivnykh metodov formoobrazovaniya kak instrument povysheniya kachestva izdelii [Application of additive shaping methods as a tool for improving the quality of products]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*, 2019, no. 12, pp. 46-48.
6. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Oleshitsky A.V. [Improving the quality of additive shaping methods using sequential structure mechanisms]. *Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Otechestvennyi i zarubezhnyi opyt obespecheniya kachestva v mashinostroenii". Sbornik dokladov*. [All-Russian Scientific and Technical Conference "Domestic and foreign experience in quality assurance in mechanical engineering". Collection of reports]. Tula, 2019, pp. 147-150 (In Russ.).

7. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Oleshitsky A.V. Teoreticheskoe issledovanie vliyaniya geometricheskoi tochnosti uzlov tekhnologicheskogo oborudovaniya s gibridnoi komponovkoi na pogreshnost' additivnogo formoobrazovaniya [Theoretical study of the influence of geometric accuracy of technological equipment units with hybrid layout on the error of additive shaping]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2019, no. 12 (85), pp. 42-49.

8. Shchitsyn Yu.D., Olshanskaya T.V., Neulybin S.D., Nikulin R.G., Dushina A.Yu. Vliyanie chastoty toka pri impul'snoi posloinoi plazmennoi naplavke na strukturu i svoistva vysokolegirovannoi stali pri additivnom formirovanii izdelii [Influence of the current frequency during pulsed layered plasma surfacing on the structure and properties of high-alloy steel in the additive formation of products]. *STIN*, 2021, no. 6, pp. 10-12.

9. Nikulin R.G., Shchitsyn Yu.D., Krivonosova E.A., Zagrebin D.S., Hassel T. Metallurgicheskie osobennosti remontnoi plazmennoi naplavki magnievykh splavov [Metallurgical features of repair plasma surfacing of magnesium alloys]. *Metallurg = Metallurgist*, 2021, no. 12, pp. 47-54.

10. Shchitsyn Yu.D., Krivonosova E.A., Olshanskaya T.V., Neulybin S.D. Ispol'zovanie plazmennoi naplavki dlya additivnogo formirovaniya zagotovok iz titanovykh splavov [Use of plasma surfacing for additive formation of billets from titanium alloys]. *Tekhnologiya metallov = Technology of Metals*, 2021, no. 2, pp. 46-54.

11. Akulova S.N., Myshkina A.V., Varushkin S.V., Neulybin S.D., Krivonosova E.A., Shchitsyn Yu.D., Olshanskaya T.V. O vliyanii skhem plazmennoi naplavki na formirovanie struktury i svoistv titanovogo splava [On the influence of plasma surfacing schemes on the formation of the structure and properties of titanium alloy]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 75-83.

12. Kazantsev A.V., Shchitsyn Yu.D., Belinin D.S., Nikulin R.G., Nikulina S.G. Vliyanie uglekislogo gaza na teplovuyu effektivnost' plazmennoi poverkhnostnoi termicheskoi obrabotki dvukhkamernym plazmotronom [The effect of carbon dioxide on the thermal efficiency of plasma surface heat treatment with a two-chamber plasma torch]. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika = Chemistry. Ecology. Urbanistics*, 2020, vol. 1, pp. 434-438.

13. Tokarev A.S., Rizvanov R.G., Karetnikov D.V. Issledovanie mikrostruktury i mekhanicheskikh svoistv svarnykh soedinenii iz korrozionnostoikoi stali marki 10kh17n13m2t poluchennykh rotatsionnoi svarkoi treniem [Investigation of microstructure and mechanical properties of welded joints made of corrosion-resistant steel grade 10x17n13m2t obtained by

rotary friction welding]. *Neftegazovoe delo = Oil and Gas Business*. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 163-172.

14. Oskolkov A. A. et al. *Peredovye tekhnologii additivnogo proizvodstva metallicheskikh izdelii* [Advanced technologies of additive manufacturing of metal publications]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin of Perm Polytechnic University. Machines, materials*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 90-105.

15. Eliseev A. A. et al. *Sravnitel'nyi analiz struktury i mekhanicheskikh svoystv additivnykh izdelii, poluchennykh elektronno-luchevym metodom i kholodnym perenosom metalla* [Comparative analysis of structures and mechanical properties of additive materials obtained by electron beam method and empty advanced metal]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya = Izvestiya Vuzova. Non-ferrous Metallurgy*, 2020, no. 4, pp. 65-73.

16. Neulybin S. D. et al. *Metallurgical processes during plasma remelting of a metallized coating of the Fe-C-Cr-Ti-Al system*. *Metallurgist*, 2017, vol. 60, no. 11, pp. 1202-1206.

17. Koroteev A. O., Dolyachko V. P., Kulikov V. P. *Additivnaya tekhnologiya sozdaniya ob'emnykh metallicheskh izdelii na osnove dugovoi svarki s impul'snoi reversivnoi podachei prisadochnogo materiala* [Additive technology for creating bulk metal products based on arc welding with pulsed reversible feeding of filler material]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2019, no. 4 (65), pp. 15-25.

18. Coroteev A. O. [Features of the formation of microstructures during additive arc surfacing of materials of the Al-Si alloying system]. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Materials, arrangement and resource-saving technologies. Materials of intergovernmental Science-Technical conference]. Mogilev, 2022, pp. 182 (In Russ.).

19. Kirichek A. S. et al. *Additivno-subtraktivnye tekhnologii-effektivnyi perekhod k innovatsionnomu proizvodstvu* [Additivno-subtractive technologies-an effective transition to an innovative product]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Medical University*, 2019, no. 8 (81), pp. 4-10.

20. Trushnikov D. N., Kartashev M. F., Davlatshin R. P., Raimundo S. Z. F. *Sposob upravleniya protsessom trekhmernoi naplavki* [List of three-dimensional keyboard process control]. *STIN*, 2022, no. 8, pp. 29-31.

Информация об авторах / Information about the Authors

Григоров Игорь Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: grigorov.ighor@mail.ru

Igor Yu. Grigorov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Mechanical Engineering Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: grigorov.ighor@mail.ru

Гречухин Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: agrechuhin@mail.ru

Alexander N. Grechukhin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: agrechuhin@mail.ru

Чернышев Илья Андреевич, руководитель Регионального центра инжиниринга, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rci46@mail.ru

Ilya A. Chernyshev, Head, Regional Engineering Center, Kursk, Russian Federation, e-mail: rci46@mail.ru