

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи



Шанин Рустам Сергеевич

Разработка устройства и исследование технологии аддитивной дуговой
наплавки

Направление подготовки
15.04.01 – «Машиностроение»

АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

2026

Работа выполнена на кафедре «Технологии сварочного и металлургического производства имени В.И. Муравьева» ФГБОУ ВО «Комсомольском-на-Амуре государственном университете»

Научный руководитель: **Григорьев Владимир Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «ТСМП имени В.И. Муравьева», директор Технопарка ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственного университета»

Рецензент:

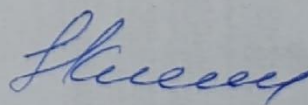
Жилин Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий обособленного подразделения Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Комсомольск-на-Амуре

Защита состоится «10» июня 2026 г. в 14:00 часов на заседании государственной аттестационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: Россия, 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, учебный корпус 2, аудитория 221.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <https://knastu.ru/page/1519> и на кафедре «ТСМП имени В.И. Муравьева» ФГБОУ ВО «КНАГУ».

Автореферат разослан 1 июня 2026 г.

Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент



О.Н. Клешнина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В процессе получения изделий с применением аддитивной дуговой наплавки требуется получить изделия с более качественной поверхностью и структурой, а также легкой отделимости от поверхности подложки без последующей механической обработки. Для этого необходимо подобрать рациональный материал подложки, а также формирующие ползуны для предотвращения деформаций при наплавке слоев. Материалом подложки и формирующих ползунов выступал графит, что сказывалось на процессе наплавки ведь графит играет ключевую роль в формировании качества и характеристик получаемых изделий.

Аддитивная дуговая наплавка перспективная технология аддитивного производства, которая имеет ряд преимуществ и активно развивается.

Однако, несмотря на очевидные преимущества, классическая дуговая наплавка (без использования формирующих элементов) имеет ряд критических недостатков, сдерживающих ее широкое промышленное внедрение: низкое качество поверхности, сложность в получении точных геометрических форм, термодформации и внутренние напряжения. Предлагаемое решение – использование формирующих графитовых ползунов (кристаллизаторов), скользящих по поверхности наплавки или закрепленных в держателе. Это меняет саму физику процесса что позволит предотвратить: растекание при наплавке за счет формирующих ползунов; шероховатость наплавленных образцов и грубой поверхности.

Цель диссертационной работы:

Увеличить геометрическую точность элемента «стенка», создаваемой аддитивной дуговой наплавки путем применения графитовых ползунов и подложки ограничивающих растекание сварочной ванны в пределах заданной ширины стенки.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- разработать устройство для дуговой аддитивной наплавки с возможностью точного контроля технологических параметров;
- исследовать влияние графитовых ползунов на степень науглероживания наплаваемых валиков;
- исследовать макро и микроструктуру, а также микротвердость полученных образцов.

Апробация работы

Основные результаты работы доложены и обсуждены на: III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению» (Комсомольск-на-Амуре, 2025); VIII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (Комсомольск-на-Амуре, 2025).

Положения, выносимые на защиту:

- аналитическая оценка выявленных преимуществ, технологического процесса проведения аддитивной дуговой наплавки с применением формирующих ползунов;
- влияние графитовых ползунов на свойства и структуру полученных изделий;
- влияние графита на степень науглероживания при аддитивной дуговой наплавке при помощи растровой электронной микроскопии;
- аналитическая оценка микроструктуры и микротвердости образцов.

Научная новизна

Главным аспектом научной новизны разработки устройства и исследование аддитивной дуговой наплавки является инновационная система контроля качества и формирования наплавляемых слоев. Эта система основывается на уникальных термических и физико-химических свойствах графита, что позволяет достигать значительного улучшения качества конечного продукта.

Практическая значимость работы:

Практическая значимость разработки устройства заключается в снижении числа комплектующих частей создаваемых деталей и уменьшении веса готовой продукции. При этом обеспечиваются экономия исходного сырья и минимизация отходов, так как аддитивные технологии используют ровно столько материала, сколько требуется для создания детали. Данная разработка востребована во многих отраслях промышленности и может быть применена при изготовлении элементов станков, упрочнении и восстановлении изношенных деталей, изготовлении оснастки для сборки элементов летательных аппаратов и судов.

Личный вклад автора:

Заключается в совместной с научным руководителем постановке задач исследований, формулировке положений и выводов, выносимых на защиту, и написании статей по теме исследования. Автор лично производил оценку существующей технологии аддитивной дуговой наплавки с применением формирующих графитовых ползунов, анализировал литературные источники и проводил экспериментальные исследования в получение изделий с последующим анализом и обработкой полученных данных, проводил металлографические, физико-механические и другие виды исследований.

Публикации:

По материалам диссертационной работы опубликовано 2 печатных работы, в том числе 1 входящая в перечень изданий рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура диссертации:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы. Диссертация содержит 77 страниц; 59 рисунков.; 11 таблиц.; список литературы 36 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, применяемая к технологии аддитивной дуговой наплавки с применением графитовых ползунов. Обоснована цель работы и задачи.

В первой главе описаны способы аддитивных технологий металлических изделий из различных сталей и сплавов, а также существующие станки аддитивной дуговой наплавки и управляющие программы для управления процессом наплавки.

Во второй главе описан процесс получения изделий с использованием графитовых ползунов

В третьей главе описано разрабатываемое устройство для аддитивной дуговой наплавки с применением графитовых ползунов.

В четвертой главе описана разработанная технология аддитивной дуговой наплавки в получение заготовок с применением графитовых ползунов. Дана оценка микроструктуры и макрошлифов образцов, а также дана оценка микротвердости образцов.

В заключении даны основные результаты проведения аддитивной дуговой наплавки и получения изделий, дана оценка микроструктуры и микротвердости.

Был разработан способ аддитивного выращивания с использованием формирующих графитовых полужонков. В процессе наплавки было получено изделие-стенка со сложной геометрией, состоящей из вертикальной и боковой стенки (см. рисунок 1).



Рисунок 1 – Полученное изделие-стенка

Процесс создания стенки изображен на рисунке 2.

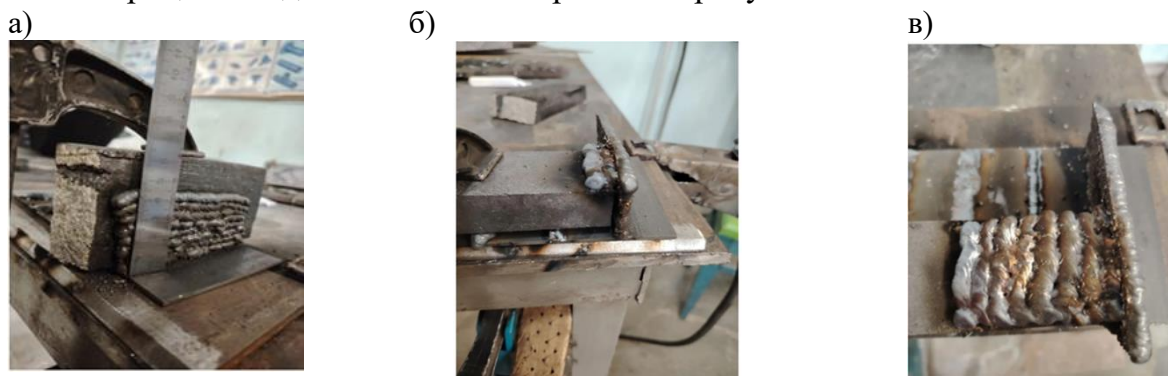


Рисунок 2 – Получение наплавленного изделия

а – получение вертикальной стенки; б – наплавка боковой стенки;

в – получение боковой стенки

На этапе исследования проводили макро и микроструктуру. Для этого у полученного изделия были вырезаны два образца для дальнейшего изучения микроструктуры. Результат макро- и микроструктуры показан на рисунке 3.

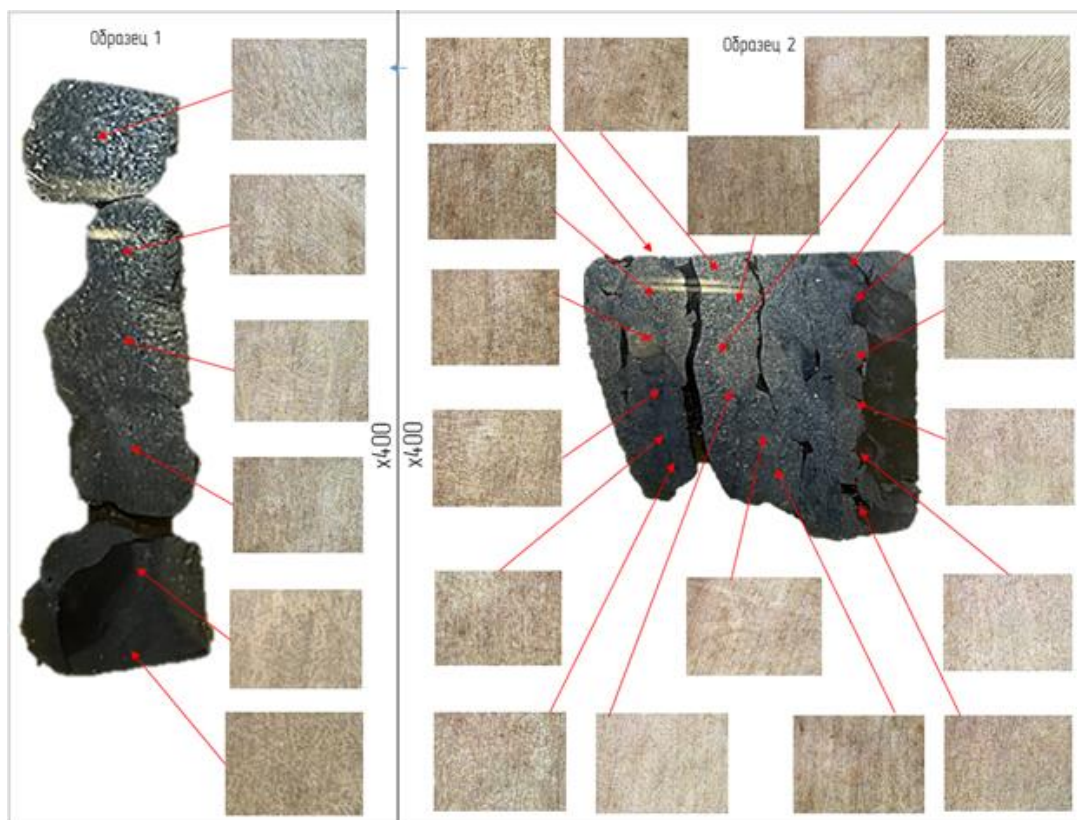


Рисунок 3 – Макро и микроструктура полученных образцов

При анализе микроструктуры образца 1 установлено, что в нижней зоне металл имеет литое ячеисто-дендритное строение. Основу составляет аустенитная матрица, внутри которой прослеживаются мелкие ячейки кристаллизации. Междендритные участки выражены темнее и образуют сетчатый рисунок. Структура достаточно равномерная, без резких переходов и грубого укрупнения. Направленность роста кристаллов в этой зоне выражена слабо.

При переходе в следующую зону сохраняется литая аустенитная структура, но дендритное строение становится более заметным. Видны вытянутые дендритные участки, ориентированные преимущественно в одном направлении. Междендритные границы проявлены отчётливее, чем в предыдущей зоне. Это указывает на более выраженный направленный рост кристаллов при затвердевании металла наплавленного слоя.

В следующей зоне структура также относится к ячеисто-дендритному типу. При этом рисунок дендритов выглядит менее контрастным и более сглаженным. В поле зрения присутствуют участки с разной ориентацией дендритных осей. Такая структура соответствует металлу, который после кристаллизации испытывал повторное тепловое воздействие от последующих проходов.

При переходе в следующую зону наблюдается выраженная дендритная структура литого металла. Дендритные оси имеют вытянутую форму, между ними видны более тёмные междендритные промежутки. Ориентация дендритов неодинакова по полю снимка, что связано с изменением направления теплоотвода в сварочной ванне. Структура остаётся плотной, без видимых трещин и крупных пор.

В следующей зоне дендритное строение выражено наиболее отчётливо. Структура состоит из вытянутых аустенитных дендритов с заметными междендритными участками. Преимущественная ориентация дендритов указывает на направленную кристаллизацию при высоком температурном градиенте. По характеру строения эта зона близка к типичной литой структуре наплавленного металла аустенитной коррозионнстойкой стали.

В верхней зоне также фиксируется литая аустенитная ячеисто-дендритная структура. Дендритные элементы вытянуты, местами наблюдается изменение их ориентации. Междендритные участки сохраняют сетчатый характер. Поскольку эта зона соответствует верхней части наплавленного образца, признаки последующего термического перераспределения структуры выражены слабее, чем в нижележащих слоях.

В итоге по всей высоте образца сформирована литая ячеисто-дендритная структура, характерная для дуговой аддитивной наплавки проволокой ER308LSi. Основной структурной составляющей является аустенитная матрица. Междендритные участки визуальнo выделяются более тёмным травлением и могут соответствовать зонам ликвационного обогащения легирующими элементами, характерным для наплавленного металла данного типа. От нижней части к верхней изменяется степень выраженности направленного дендритного роста, при этом грубых дефектов сплошности на представленных снимках не наблюдается.

Микроструктура образца 2 после дуговой аддитивной наплавки проволокой ER308LSi имеет выраженное литое строение. Основной структурной составляющей является аустенитная матрица. По всему исследованному сечению наблюдается ячеисто-дендритная структура, характерная для металла, кристаллизующегося из сварочной ванны при направленном теплоотводе.

В разных участках сечения структура проявляется неодинаково. В одних зонах преобладает более мелкое ячеистое строение с замкнутыми и полуразомкнутыми междендритными границами. В других участках хорошо видны вытянутые дендритные оси и ветви, имеющие различную ориентацию. Это указывает на изменение направления роста кристаллитов в процессе затвердевания металла.

Междендритные области на микроснимках выявляются тёмным травлением и образуют прерывистую сетку по границам ячеек и дендритных ветвей. Для наплавленного металла типа ER308LSi такая картина соответствует литой аустенитной структуре с ликвационной неоднородностью по междендритным участкам. Более тёмные протяжённые участки могут быть связаны с выделением δ феррита в междендритных пространствах, что типично для аустенитных хромоникелевых сварочных материалов данного класса.

По сечению отмечается чередование зон с более направленной и более равноосной морфологией. Направленные участки формировались при преобладающем теплоотводе в одном направлении, тогда как более ячеистые области соответствуют локальному изменению условий кристаллизации. Резкой границы между этими типами строения не наблюдается, переходы имеют постепенный характер.

Структура образца в целом достаточно однородна для металла, полученного дуговой аддитивной наплавкой. Видимых трещин и крупных несплошностей на представленных микрофотографиях не обнаружено. Отдельные тёмные точки и мелкие включения встречаются локально, однако по данным снимкам их природа однозначно не определяется и не должна трактоваться как выраженный дефект металла без дополнительного анализа.

Далее проводили измерения микротвердости образцов на микротвердомере SHIMADZU. В рамках проведенного исследования была измерена микротвердость полученных образцов, отобранных с интервалом в 3 мм по всей высоте детали, от верхнего до нижнего края. Полученные данные позволили построить графики, наглядно демонстрирующий области изменения твердости, соответствующие переходу валиков. Схема, иллюстрирующая методику проведения измерений твердости, представлена на рисунке 4.

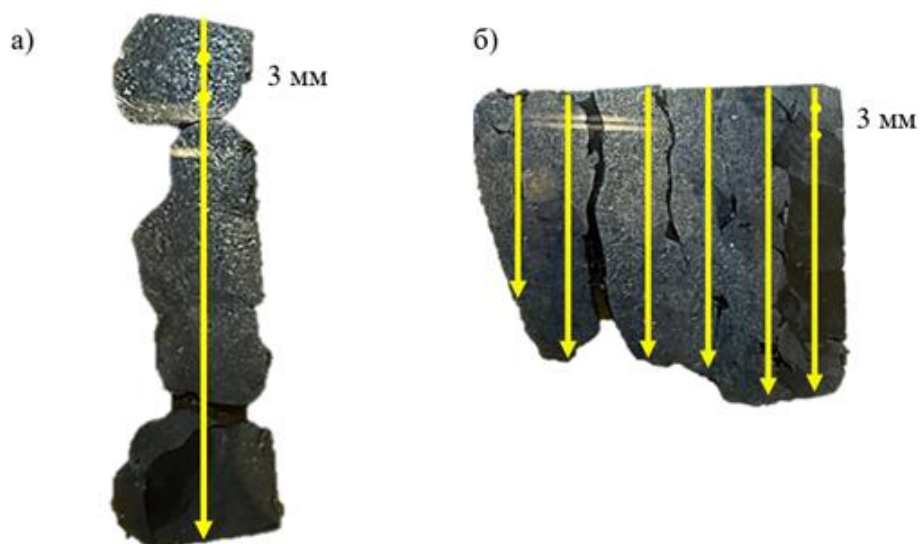


Рисунок 4 – Схема проведения измерений микротвердости:
а) образец 1; б) образец 2

График распределения микротвердости образца 1 представлен на рисунке 5.

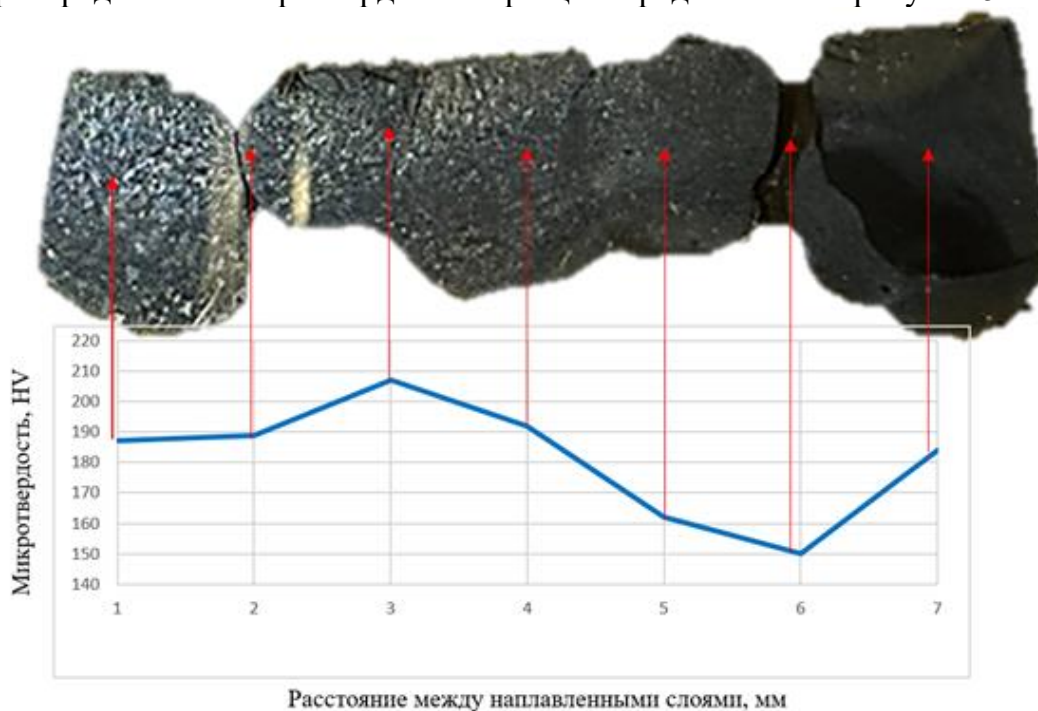


Рисунок 5 – Распределение микротвердости по сечению образца 1

График распределения микротвердости образца 2 представлен на рисунке 6.

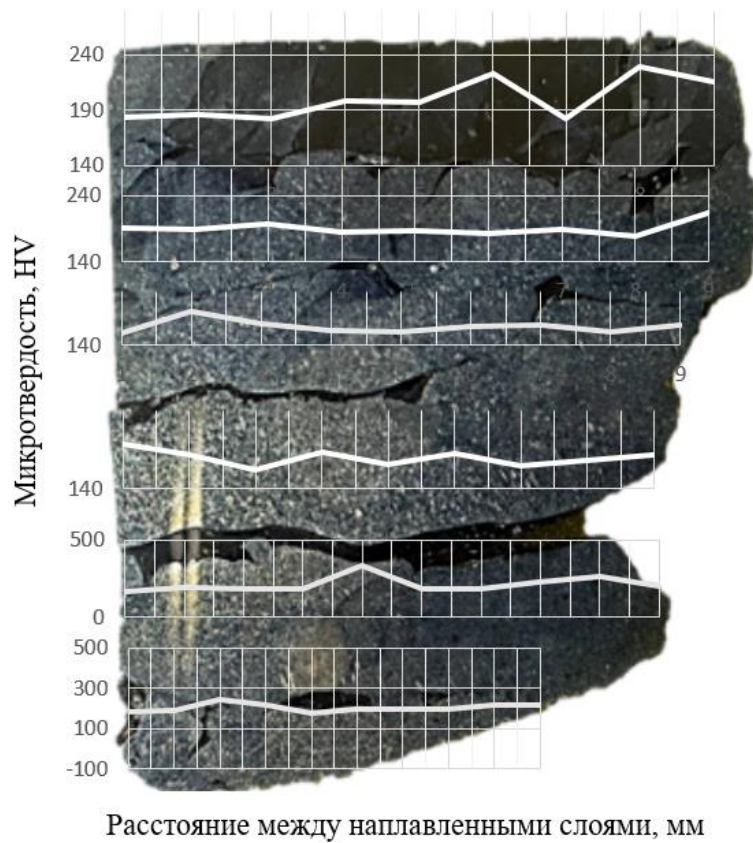


Рисунок 6 – Распределение микротвердости по сечению образца №2

После измерений микротвердости образцов необходимо было провести оценку распределения графита на степень науглероживания с использованием растрового электронного микроскопа Hitachi S-3400N, представленного на рисунке 8. Для этого был выбран образец №1, представленный на рисунке 7.



Рисунок 7 – Образец для проведения растрово-электронной микроскопии



Рисунок 8 – Растровый электронный микроскоп

На рисунке 9 представлены графики распределения углерода.

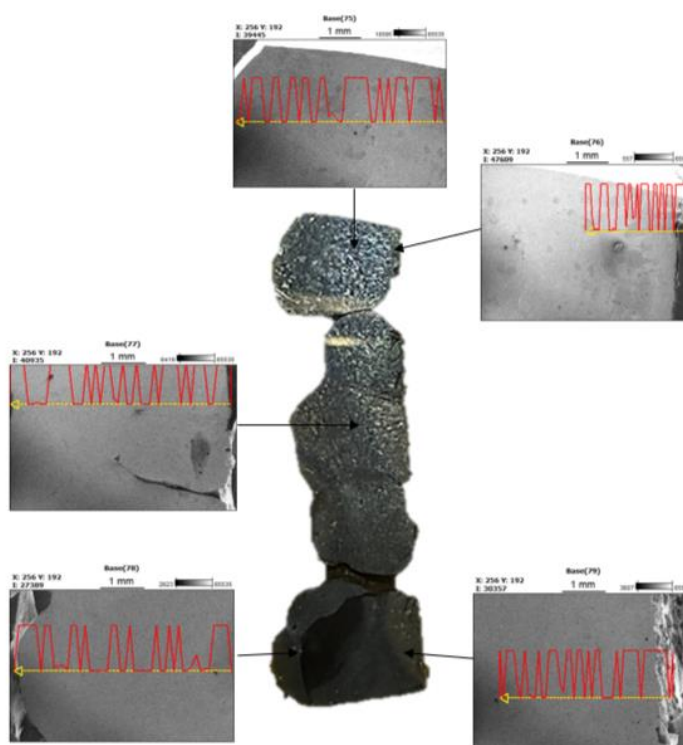


Рисунок 9 – Графики распределения углерода

На представленных графиках приведены результаты микроструктурного анализа образца, выполненного с применением растровой электронной микроскопии (РЭМ) для оценки распределения углерода на поверхности образца.

Общий вид распределения углерода на поверхности образца выглядит скачкообразными изменениями концентрации состава. Уменьшение расстояния между пиковыми значениями свидетельствует о высокой концентрации графитовых включений и наличии мелкозернистой структуры углерода, при этом, ширина диапазона пиковых значений указывает на равномерность распределение углерода в зоне образца.

В центральной части образца наблюдается увеличение графитовых образований, либо появление областей с более низкой концентрацией углерода в следствие изменения диаграммы распределения химических элементов.

В нижней части образца отмечается выраженная неоднородность. На графиках видны с распределены неравномерно: наблюдаются как протяженные участки высокой интенсивности, так и отчетливые «провалы», что указывает на прерывистый характер залегания графита. Нижние графики демонстрируют возврат к частым, но менее амплитудным колебаниям, что типично для краевых зон либо участков с более рыхлой, чешуйчатой структурой графита.

Общий вывод:

Вертикальное распределение углерода является неоднородным. В направлении сверху вниз прослеживается переход от плотной, устойчивой графитовой структуры к более крупным включениям в средней части и к менее упорядоченному, фрагментарному распределению элементов у основания образца.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В диссертационной работе была решена аналитическая задача разработка аддитивной дуговой технологии с использованием формирующих графитовых ползунов. Был разработан способ аддитивного выращивания с использованием формирующих графитовых ползунов и графитовой подложки.

В процессе наплавки было получено изделие «стенка» со сложной геометрией, состоящий из вертикальной и боковой стенки.

В результате были достигнуты цели и задачи, проведены исследования.

Установлено, что с применением графитовых ползунов, получаемое изделие обладает улучшенными свойствами и структурой.

Список работ, опубликованных по теме диссертации Научные работы, опубликованные в журналах перечня ВАК РФ:

Прочие публикации:

1. Шанин, Р. С. Получение изделий сложной конфигурации аддитивной дуговой наплавкой / Р. С. Шанин, В. В. Григорьев, Н. О. Плетнев // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 11–12 декабря 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 95-98.
2. Шанин, Р. С. Сравнительный анализ дуговых аддитивных металлических технологий / Р. С. Шанин, В. В. Григорьев // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VIII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 апреля 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 120-123.
3. Григорьев, В. В. Разработка и исследование технологии изготовления металлических конструкций с использованием аддитивной наплавки / В. В. Григорьев, Н. О. Плетнев, Р. С. Шанин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2025. – № 4(781). – С. 41-49.