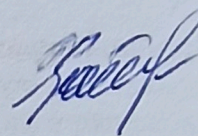


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи



Хабибов Мухаммаджон Махмадиевич

**Исследование процесса изготовления заготовок методом
послойной наплавки металла**

Направление подготовки
15.04.01 «Машиностроение»

АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» на кафедре «Технология сварочного и металлургического производства»

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Технология
сварочного и металлургического
производства»

Бахматов Павел Вячеславович

Научный консультант

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Промышленная электроника»

Фролов Алексей Валерьевич

Рецензент

кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник ИМиМ
ДВО РАН

Жилин Сергей Геннадьевич

Защита диссертации состоится «24»июня 2021 г. в 10:00 часов на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 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 «Технология сварочного и металлургического производства» ФГБОУ ВО «КНАГУ».

Автореферат разослан 16 июня 2021 г.

Секретарь ГЭК,
к.т.н., доцент

О.Н. Клешина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Двадцать первый век – век применения роботизированных технологий во всех отраслях народного хозяйства. В настоящее время сварочное производство стало одной из ведущих областей машиностроения. В производстве широко применяют высокопроизводительные и экономически эффективные технологические процессы сварки, наплавки, пайки, термической резки и металлизации, позволяющие успешно обрабатывать почти все конструкционные материалы толщиной от десятков микрометров до нескольких метров.

Многообразие свариваемых конструкций и свойств материалов, заставляют исследователей разрабатывать новые методы изготовления деталей машин и заготовок

Использование аддитивных технологий – один из ярчайших примеров того, как новые разработки и оборудование могут существенно улучшать традиционное производство. Такие технологии производства позволяют изготавливать любое изделие послойно на основе компьютерной 3D-модели.

Программное управление позволяет получать металлические изделия как путем спекания (сплавления) слоев порошкового металлического материала лазером, электронным лучом, так и дуговой наплавкой с применением присадочного материала (сплошной и порошковой проволоки). Не менее продуктивны технологии электродуговой металлизации и газопламенного напыления.

Применение аддитивных технологий отражаются в трудах как отечественных, так и зарубежных исследователей: Sviridov, Evstigneev, Zhu, Zhang, Nur, Aiyiti, Song., Huang, Xiaomao, Kulkarni, Dutta, Jamieson и др.

Несомненно, дуговая наплавка известна давно, и в основном применяется для восстановления размеров изношенных деталей (валы, колесные пары подвижного состава и тп), а сама процедура мало отличается от многопроходной сварки. Вместе с тем все еще недостаточно изучен вопрос влияния колебательных движений при дуговой наплавке и их взаимосвязь с режимами дугового воздействия на точность наплавленных валиков, структуру и свойства наплавленного металла.

Автоматизация перемещения сварочной горелки, разработка управляющих программ, способствующих генерации самых причудливых траекторий движения дуги делает эту задачу вполне разрешимой.

Цель работы: определение параметров аддитивной дуговой наплавки и их влияния на структуру и свойства металла изделия.

Для реализации цели работы поставлены следующие задачи:

- адаптация 3D портального станка плазменной резки, управляемого программой Mach 3 для автоматической дуговой наплавки в среде защитного газа плавящимся электродом с колебательными движениями сварочной горелки по траектории, сгенерированной G-кодами.

- получение послойной наплавкой фигур из низкоуглеродистой стали
- исследование наплавленного металла (оценить геометрию, измерить микротвердость исследовать микроструктуру наплавленного металла, определить эффективное сечение стенки в зависимости от траектории перемещения горелки).

Объект исследования – технология послойной наплавки фигур.

Предмет исследования – наплавленные валики из низкоуглеродистой стали, полученные автоматической дуговой наплавкой в среде защитных газов плавящимся электродом (УП) с применением программного управления траекторией перемещения дуги.

Научная новизна:

- послойным выращиванием при дуговой автоматической наплавке на стальную пластину с применением различных техник получены прямоугольные фигуры.

- установлено влияние колебательных движений сварочной горелки на геометрические параметры, структуру и свойства наплавленных валиков.

- даны рекомендации по выбору конкретной техники наплавки.

Обоснованность и достоверность полученных результатов основывается на использовании поверенного комплекса контрольно-измерительного оборудования для проведения экспериментальных исследований, использованием нормированных методик определения физико-механических свойств и макро- и микроструктурных параметров, а также соответствием полученных результатов экспериментальных данных фундаментальным положениям.

Практическая значимость. Применение адаптированного станка совместно с программным приложением позволяет выбирать траекторию движения дуги, назначать режим наплавки, создавать управляющий G-код и проводить автоматическую дуговую размерную наплавку сложных фигур. Управление траекторией перемещения горелки способствует достижению достаточной размерной точности фигур, дозированному вводу тепла и присадочного материала в сварочную ванну, поэтому минимизирует последующие операции механической обработки.

Личный вклад автора. Соискатель активно участвовал в процессе адаптации станка плазменной резки для аддитивной наплавки, отработке режимов наплавки, обработке результатов исследований, в подготовке и написании научных публикаций.

Основные положения, выносимые на защиту:

- компоновочные, принципиальные и электрические схемы элементов устройства автоматической сварки;

- программный продукт управления осцилляцией;

- результаты апробации работы установки

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы были представлены на 4 Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований», Комсомольск-на-Амуре (апрель 2021 г.).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 4 работах: заявке на грант Хабаровского края, отчете по внутреннему НИР ФГБОУ ВО «КнАГУ», 1 статье в журнале рекомендованной ВАК и 1 статье в издательстве WoS.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка литературы. Диссертация содержит 76 страниц, 36 рисунок, 11 таблиц; список литературы, состоящий из 41 наименований.

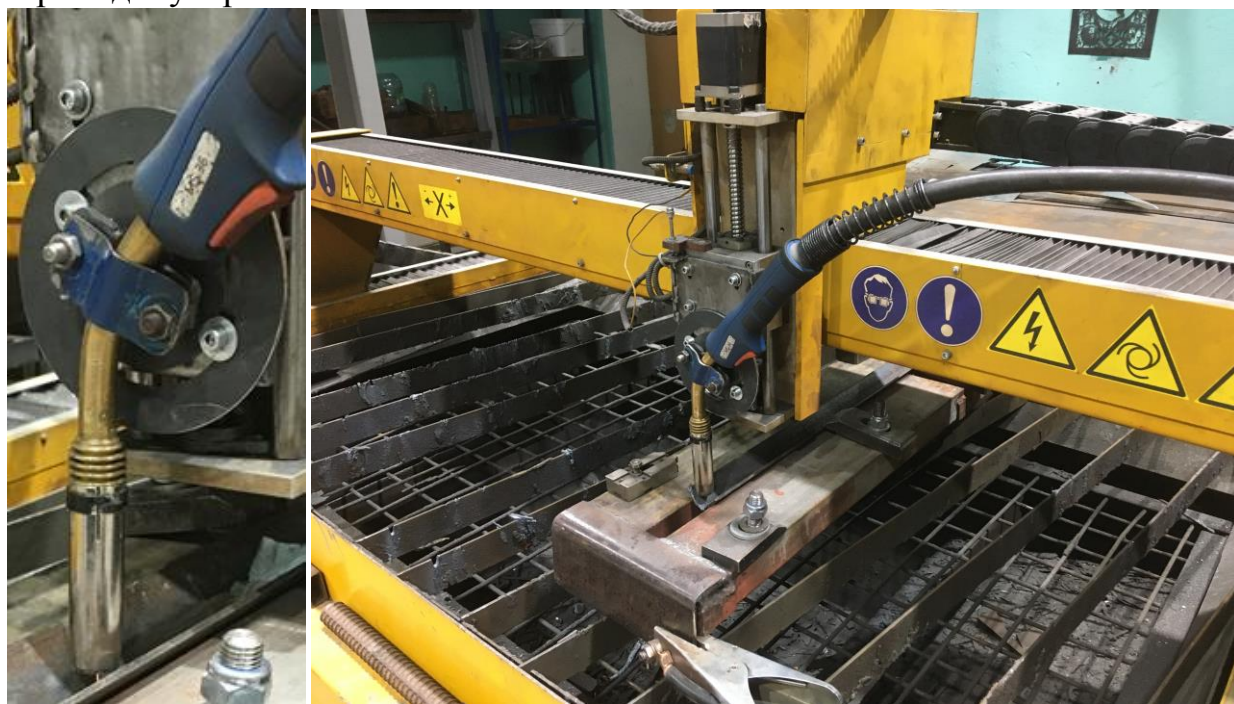
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, объект и предмет, сформулированы цели и задачи работы, используемые методы исследования, показана научная новизна.

В первой главе представлен литературный обзор последних достижений в области аддитивных технологий по созданию металлических композиций и деталей.

Во второй главе приведена методика получения наплавленных валиков и исследования их свойств. Автоматическая дуговая наплавка в среде защитного газа проводилась на адаптированном 3D портальном станке плазменной резки, управляемом программой Mach 3. При наплавке сварочная горелка совершала колебательные движения по траектории, сгенерированной G-кодами. Полученные послойной наплавкой фигуры оценивали по геометрии, изучением микротвердости и микроструктуры в поперечной сечении стенки. Пробоподготовка образцов на исследование микроструктуры велась на шлифовально-полировальном станке EcoMet 250 Pro. Микроструктура изучалась с использованием металлографического микроскопа Nikon MA200, показатели твердости по методу Виккерса с использованием микротвердомера Shimadzu HNV-2 в точках с интервалом 0,5 мм, каждый из которых проходил по центру валиков с нагрузкой 1,961 Н \approx 0,2 кг.

Для наплавки валиков в качестве исполнительного механизма используется сварочная горелка, установленная на 3D позиционер. Источником питания при наплавке служил сварочный инвертор MIG 3500 (J93) с горелкой MS 36. Закрепление горелки к позиционеру осуществляется через специально разработанный кронштейн, удерживающий горелку перпендикулярно к оси шва.



Кронштейн крепления сварочной горелки



Рисунок 1 – Адаптированный 3D станок для дуговой наплавки

Для наплавки использовалась омедненная стальная проволока сплошного сечения марки Св-08ГА-О диаметром 1,2 мм. Наплавка производилась на стальную подкладку толщиной 10 мм в нижнем положении. Наплавляли три прямоугольных фигуры в три слоя. Наплавка всех фигур осуществлялось безостановочно на одинаковых режимах:

- сила электрического тока $I_{св} = 215 - 250 \text{ А}$;
- напряжение $U_{д} = 23 \text{ В}$;
- скорость наплавки 1500 мм/мин.

Отличительной особенностью формирования валиков является техника их наплавки (колебательные движения в поперечной плоскости наплавляемого валика), показанная на рис. 2. В ходе наплавки каждого валика предусматривался автоматический подъем сварочной горелки на величину наплавленного валика при переходе на следующий.

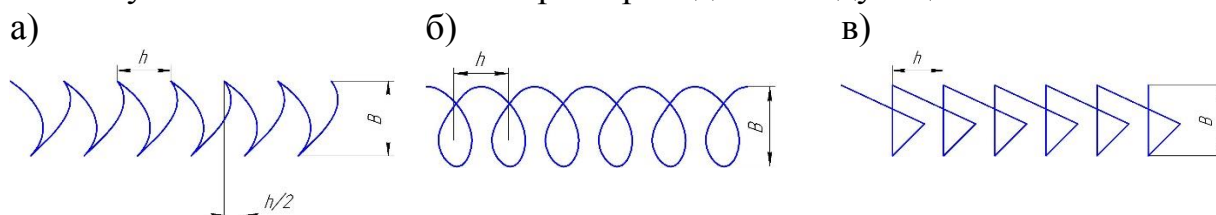


Рисунок 2 – Траектория колебательных движений при наплавке фигур
а - фигура 1; б - фигура 2; в - фигура 3.

На рисунке 3 приведен внешний вид наплавленных фигур в очередности их выполнения (обозначена цифрами 1, 2, 3).

Для заливки образцов поперечных сечений наплавленных фигур использовали эпоксидную смолу, заливая образцы специальные обоймы диаметром 40 мм. После полировки образцы подвергались травлению до

проявления структуры наплавленных валиков. Травление проводили в 5% спиртовом растворе азотной кислоты в течении двух секунд с последующей промывкой в воде и обезвоживанием в спирте.

Исследования микроструктуры велись на металлографическом микроскопе Nikon MA200, а для обработки полученных снимков применили программу Kolor Autopano Giga.

В третьей главе представлены результаты исследования структуры и свойств наплавленных валиков. На рис. 4-6 представлены макро- и микроструктуры поперечных сечений наплавленных фигур. В центре рисунков расположены склейки структуры с увеличением $\times 100$ (макроструктура). Вокруг макроструктурного изображения расположены микроструктурные изображения характерных участков с увеличением $\times 400$ (валики 1,2,3; зона термического влияния; линии сплавления; основной металл), указанных на макроструктуре.

Данное исследование помогло обозначить переходные зоны слоев наплавки, зоны термического влияния и определить структурные составляющие в каждом валике. Определили, что в микроструктуре данных образцов присутствуют три структурные составляющие в различных формах и сочетаниях. Анализируя вышеизложенное, можно сделать выводы о том, что наиболее пластичными и вязкими являются образцы с большой долей зерен феррита.

Исследование показало, что траектория колебательных движений при наплавке напрямую влияет на время термического воздействия на предыдущий слой наплавки и, соответственно, на изменение структуры металла (рис. 4-6).

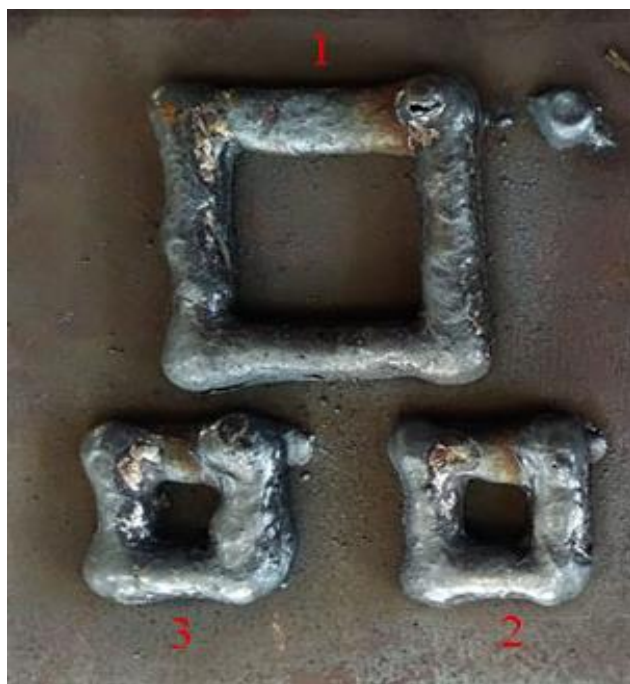


Рисунок 3 – Внешний вид наплавленных фигур

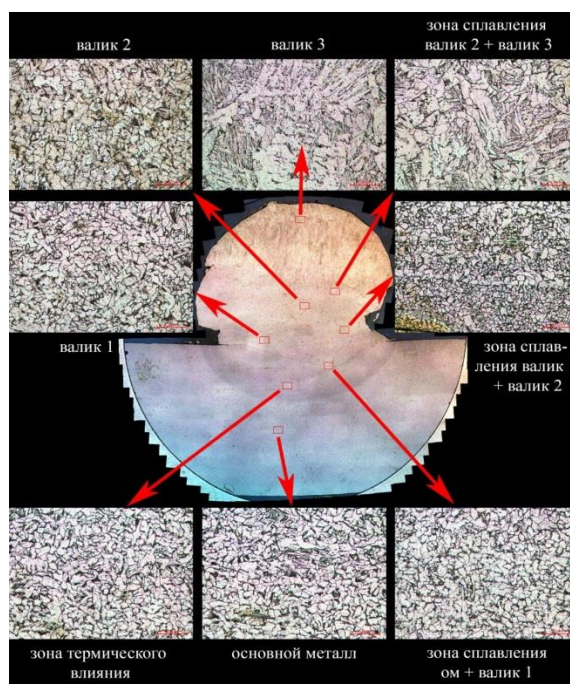


Рисунок 4 – Микроструктура фигуры 1

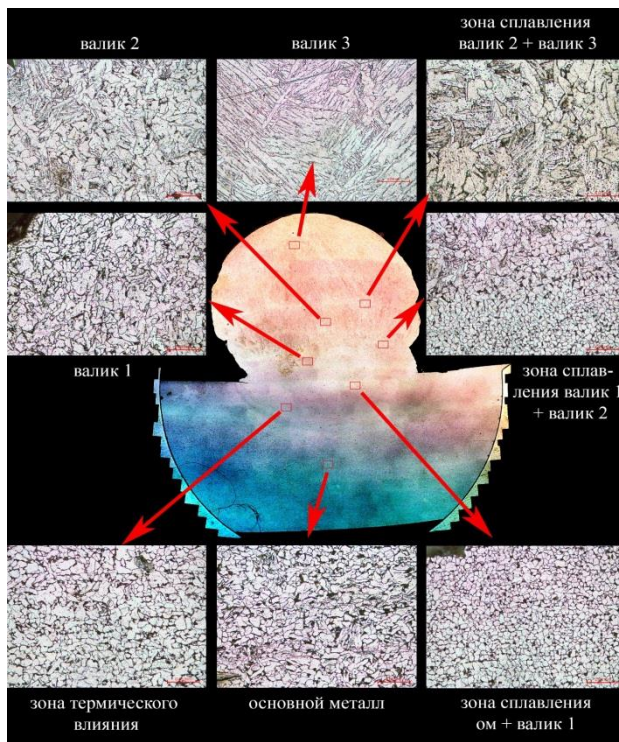


Рисунок 5 – Микроструктура фигуры 2

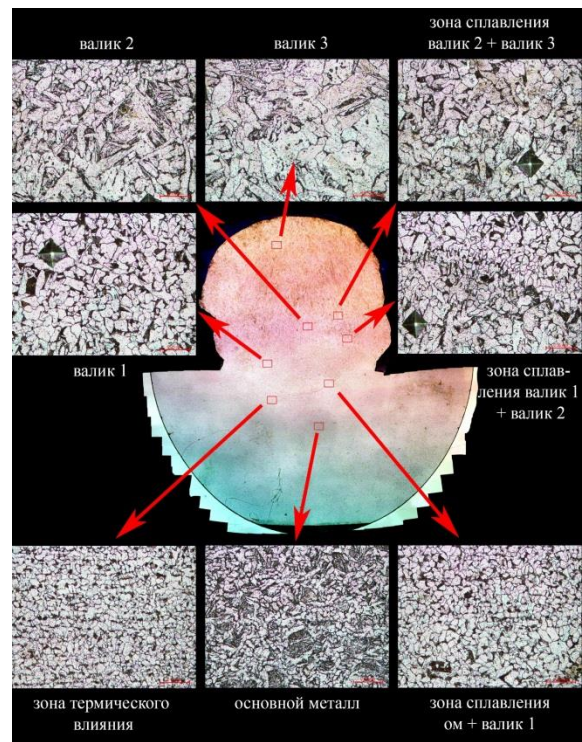


Рисунок 6 – Микроструктура фигуры 3

Установлено, что по всему сечению образцов микроструктура материала различна: верхний валик имеет большую величину зерен структуры, по сравнению с предыдущими слоями наплавки, что ведет к упрочнению и повышению хрупкости образцов от нижнего слоя к верхнему. Таким образом, прочность по сечению детали будет различна, что можно отнести к недостаткам способа изготовления образцов.

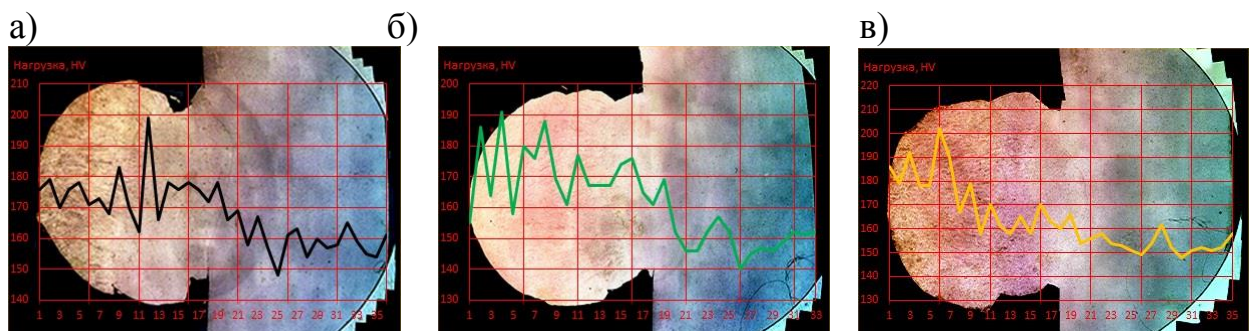


Рисунок 7 – Распределение микротвердости в поперечном сечении фигур: а - 1, б - 2, в - 3

В результате измерения микротвердости в поперечном сечении образцов построены графики (рис. 7) с возможностью визуализации зон изменения значений. Согласно полученным графикам выявлено, что распределение микротвердости по сечению увеличивается от нижних слоев к верхним, что можно объяснить изменением времени термического воздействия на разные слои наплавки. При изготовлении заготовок следует учитывать увеличение зон термического влияния в зависимости от техники

наплавки и заметное изменение структуры металла по сечению детали, а также усложнение механической обработки конечной детали.

Эффективность техники наплавки оценивали по величине отходов, образованных при формировании равномерной стенки. Оценку проводили теоретически, обрабатывая в программе КОМПАС поперечные сечения наплавленных фигур, отсекая от максимально возможной прямоугольной стенки криволинейные участки валика, рис. 8.

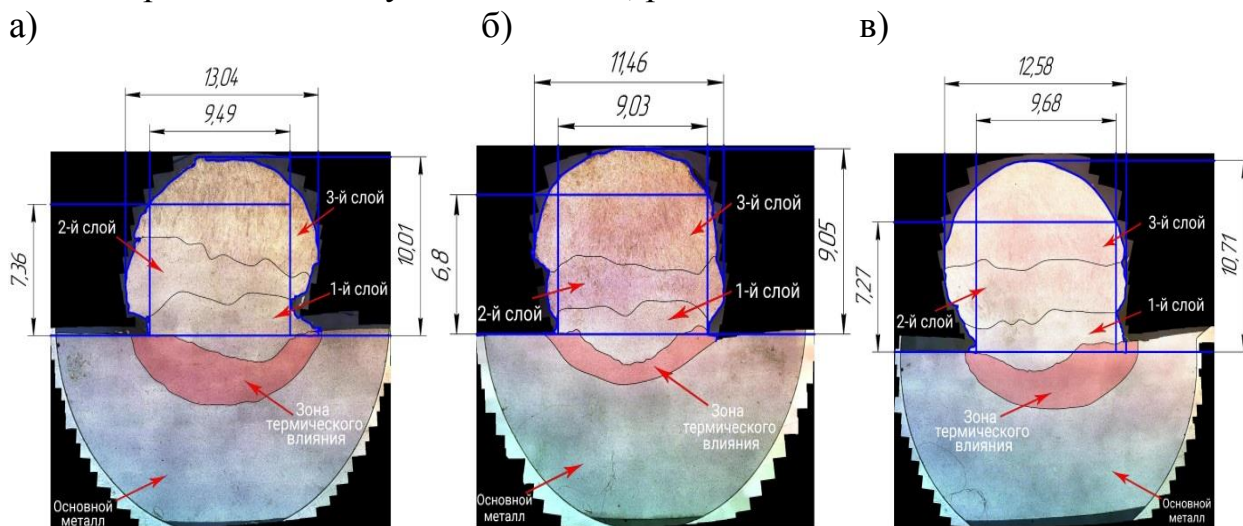


Рисунок 8 - Определение эффективности техники наплавки

Таблица 1 – Расчет допустимой стенки

Образец	Отход, %	Общая площадь наплавки, мм ²	Площадь отброшенных элементов, мм ²	Годная толщина стенки, мм	Годная высота стенки, мм	Площадь годного сечения, мм ²
1	34,2	106	36,23	9,49	7,36	69,84
2	37,5	112,6	42,2	9,68	7,27	70,4
3	29,1	86,7	25,23	9,03	6,8	61,46

Как видно из табл. 1 наибольшей площадью наплавки обладает образец, полученный по второй технике. Несмотря на довольно большой объем отходов он имеет максимальную площадь годного сечения, характеризующуюся большей толщиной и высотой стенки.

В целом, при равных параметрах режима сварки, техника формирования валика безусловно влияет на объем наплавленного металла. Как видно, форма колебательных движений изменяет общую скорость сварки, влияет на размытость границ формируемого валика.

Чем больше объем наплавленного металла, тем больше процент отхода, то есть тем больше металла нужно подвергнуть механической обработке при формировании прямолинейных стенок.

Приложение позволяет выполнять наплавку с любой траекторией перемещения сварочной горелки, рекомендованной для сварщиков. Интерфейс разрабатываемого приложения и траектории, возможные для выполнения приведены на рис. 9.

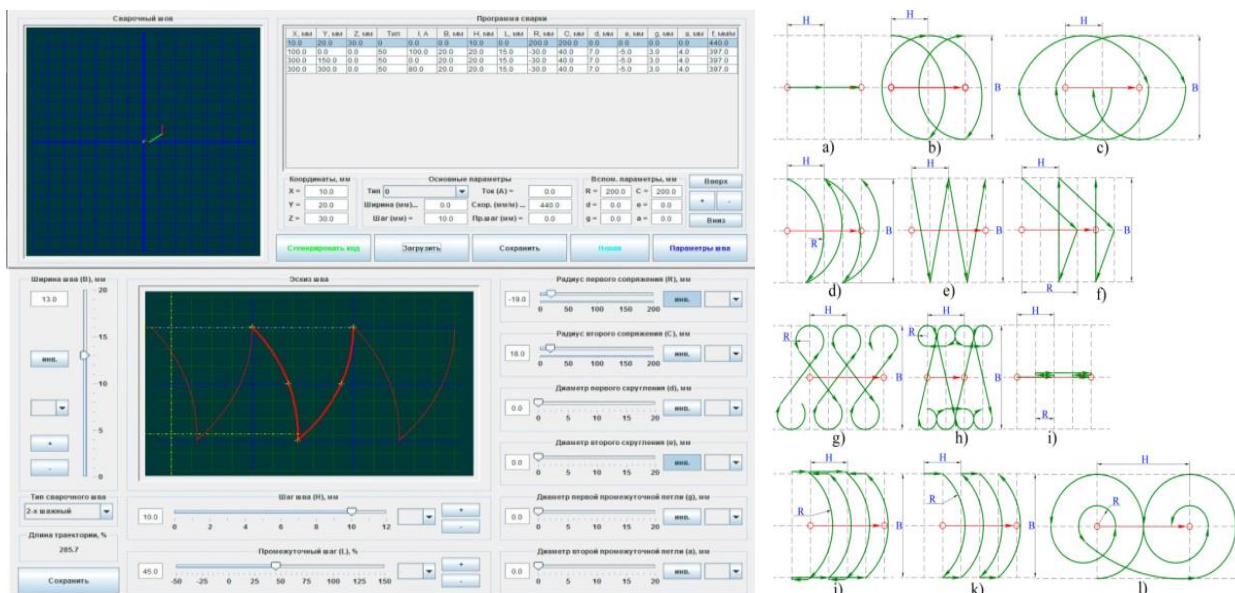


Рисунок 9 Интерфейс разрабатываемого приложения и схемы движения сварочного сопла под управлением G-кодов

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В работе исследован способ выращивания заготовок по средствам послойной наплавки. Рассмотрена техника выполнения послойной наплавки. Проведено изготовление и последующее изучение шлифов на микроструктуру и микротвердость. Построены структурные картины образцов и графики микротвердости, показывающие влияние процесса наплавки.

2. Исследование показало, что траектория колебательных движений при наплавке напрямую влияет на время термического воздействия на предыдущий слой наплавки и, соответственно, на изменение структуры металла.

3. Установлено, что по всему сечению образцов микроструктура материала различна: верхний слой валика имеет большую величину зерен структуры, по сравнению с предыдущими слоями наплавки, что ведет к упрочнению и повышению хрупкости образцов от нижнего слоя к верхнему. Таким образом, прочность по сечению детали будет различна, что можно отнести к недостаткам способа изготовления образцов.

4. Выявлено, что распределение микротвердости по сечению увеличивается от нижних слоев к верхним, что можно объяснить изменением времени термического воздействия на разные слои наплавки.

5. Установлено, что при изготовлении заготовок данным методом следует учитывать увеличение зон термического влияния в зависимости от способа наплавки и заметное изменение структуры металла по сечению детали, а также усложнение механической обработки конечной детали.

6. Траектория колебательных движений при наплавке треугольником технологичное, так как требует меньшей постобработки готового изделия, а шов получается шире, соответственно толщина стенки изделия больше.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Заявка на краевой конкурс предоставление грантов в форме субсидий из краевого бюджета на реализацию в 2021 году проектов в области научных исследований в направлении естественных и технических наук и на поддержку функционирования центров коллективного пользования научно-технологическим оборудованием, экспериментального производства и инжиниринга проекта на тему «Разработка программного комплекса управления осцилляцией при автоматической сварке/наплавке ответственных конструкций».

2. Отчет о научно-исследовательской работе в соответствии с СТО Н.002- 2018 «Положение о выполнении научно-исследовательских работ за счёт средств ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» «Разработка алгоритма и исследование процесса программируемого управления формированием сварочного/наплавочного валика (в том числе и в применении аддитивных технологий) на установке автоматической сварки в защитных газах» Приказ 170-О от 04.06.2020 г.

3. Хабибов М. М., Рубан К. Е., Бахматов П. В. / Исследование процесса автоматической размерной дуговой наплавки // Учёные записки КнАГТУ (Науки о природе и технике) - 2021 № I (51) С. 112-114.

4. Fabrication Specifics and Study Results for Metal Items Produced by Surfacing / Bakhmatov P.V., Sviridov A.V., Khabibov M.M. // Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 200. Springer, pp 283-291 Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0_30 (2021).