

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование)

22.04.01 Материаловедение и технологии машиностроения

(код и наименование направления подготовки)

Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических

материалов

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Исследование структуры и механических характеристик металла,
наплавляемого дугой комбинированного действия

Студент

Н.А. Борисов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

д.т.н., профессор В.П. Сидоров

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

Содержание

Введение.....	4
1 Проблемы повышения гибкости сварочных процессов.....	7
1.1 Гибкость технологических процессов сварки и наплавки.....	7
1.2 Плавление основного и электродного металлов в дуговых способах наплавки.....	10
1.3 Анализ способов наплавки с позиции гибкости технологического процесса.....	14
1.3.1 Ручная дуговая наплавка покрытым электродом.....	14
1.3.2 Плазменная наплавка (наплавка сжатой дугой).....	16
1.3.3 Электрошлаковая наплавка (ЭШН).....	25
1.3.4 Механизированная и автоматическая дуговая наплавка.....	27
1.3.5 Наплавка трёхфазной дугой.....	29
1.3.6 Аргонодуговая наплавка неплавящимся электродом с присадочной проволокой.....	35
2 Исследование электрических свойств комбинации дуг прямого и косвенного действия.....	40
2.1 Энергетические характеристики комбинации дуг прямого и косвенного действия	40
2.2 Разработка схемы замещения комбинации дуг и расчет параметров схемы питания.....	46
2.3 Эффективная тепловая мощность комбинации дуг.....	52
3 Разработка методики исследований.....	56
3.1 Условия проведения экспериментов.....	56
3.2 Материалы для наплавки.....	57
3.3 Разработка экспериментальных установок для наплавки комбинацией дуг и выбор оборудования.....	59
3.4 Контроль электрических и неэлектрических параметров.....	63
3.5 Контроль свойств наплавленного металла (исследование механических, химических свойств и металлография).....	64
3.6 Материалы образцов.....	65

3.7 Оборудование и методы проведения испытаний и исследований.....	66
4 Исследование технологии наплавки и свойств наплавленного металла....	69
4.1 Наплавка без поперечных колебаний горелки.....	69
4.2 Наплавка с поперечными колебаниями горелки.....	75
4.3 Механические свойства образцов наплавки.....	78
4.4 Исследование химического состава наплавливаемых валиков.....	82
Выводы по 4 главе.....	96
Заключение.....	97
Список используемой литературы и источников.....	98

Введение

В процессе эксплуатации машин и механизмов их детали зачастую работают в жестких условиях контактирования с высокотемпературными газами, различными агрессивными средами и абразивными веществами, вызывающими интенсивную коррозию или износ поверхности. По мере повышения скорости действия машин, увеличения их размеров и производительности условия работы поверхности деталей становятся все более жесткими. В связи с этим возникает необходимость применения специальных мер, обеспечивающих повышение жаропрочности, коррозионной стойкости, износостойкости и других и других важных свойств поверхности материалов.

Увеличение размеров оборудования, повышение его быстродействия и производительности также сопровождается ужесточением условий работы его узлов и механизмов.

Применение технологии улучшения свойств поверхности материалов расширяет перспективу проектирования и производства различного оборудования с более высоким уровнем эксплуатационных показателей, что, в свою очередь, позволяет сократить потребление энергии и повысить производительность труда в различных отраслях промышленности.

Часто оказывается целесообразней все изделие изготавливать из более дешевого и достаточно работоспособного металла для конкретных условий эксплуатации и только на поверхностях, работающих в особых условиях, иметь необходимый по толщине слой другого материала. Такой путь представляет значительные резервы экономии сырьевых ресурсов.

Эти задачи могут быть успешно решены применением наплавки как способа поверхностного упрочнения материалов. Современные достижения в разработке и усовершенствовании оборудования позволили значительно улучшить эксплуатационные свойства наносимых покрытий. Это особенно

важно в условиях экономии сырья и повышения эффективности использования энергии.

Расширение возможностей управления химическим составом сварных швов и повышение их однородности является одними из важнейших задач современной техники. Весьма перспективным направлением решения этих задач является использование для наплавки и сварки комбинации дуг прямого и косвенного действия. В работе [1] был исследован такой вариант сварки применительно к сжатой сварочной дуге в среде аргона. В плазмотроне при генерации сжатой дуги прямой полярности использовался вольфрамовый электрод, а «свободная дуга косвенного действия горела между неплавящимся электродом и электродной проволокой-анодом. Обе дуги питались и устойчиво работали от сварочного генератора с помощью включения в цепи электродов двух балластных реостатов» [1]. Однако в дальнейшем данный способ не получил особого развития, причиной чего, возможно, является относительно высокая сложность его реализации в условиях плазменной сварки.

Такая схема сварки или наплавки создает предпосылки устранения наиболее серьезных недостатков дуги в инертных газах с неплавящимся электродом с подачей присадочной проволоки: низкого коэффициента наплавки присадочной проволоки и его неустойчивости. Анализ литературных данных по скорости подачи присадочной проволоки показывает, что она в несколько раз меньше, чем в дуге с плавящимся электродом [2]. Небольшие изменения положения конца проволоки относительно столба дуги и сварочной ванны могут приводить к существенным изменениям скорости ее расплавления. В данной работе исследовался процесс наплавки комбинацией свободных дуг прямого и косвенного действия по схеме, аналогичной схеме работы [1].

Сущность способа заключается в том, что дуга прямого действия горит с неплавящегося вольфрамового электрода-катода на изделие, и с него же вторая дуга горит на плавящийся электрод-анод. Дуга прямого действия

осуществляет проплавление основного металла, а дуга косвенного действия только электродного. Раздельное регулирование тепловой мощности в основной и дополнительный металлы позволяет изменять соотношение объемов их расплавления, и, следовательно, сводить долю участия основного металла в наплавленном слое до минимума. Однако многие вопросы, связанные с возможностью получения стабильного процесса сварки с совместным использованием свободных дуг находящихся вблизи друг друга, совершенно не изучены.

Поэтому целью данной работы является повышение качества наплавленного слоя за счет создания процесса раздельного регулирования производительности расплавления основного и дополнительного металлов.

1 Проблемы повышения гибкости сварочных процессов

1.1 Гибкость технологических процессов сварки и наплавки

Параметры режима сварки оказывают значительное влияние на форму и состав шва. Путем изменения значений параметров удается достичь желаемого результата при различных сочетаниях их.

Основная задача, возникающая перед технологией при выборе режима сварки или наплавки, сводится к определению сочетания параметров режима, при котором обеспечивается требуемое качество сварного соединения или наплавки при максимальной производительности минимальной стоимости процесса.

Для каждого способа сварки или наплавки, марки основного материала существует оптимальный режим, который в зависимости от конкретных условий изменяется в узких пределах. При разработке технологии оптимальный режим подбирают экспериментальным путем, путем расчета на основе измерений распространения теплоты при сварке.

Для оценки преимуществ и возможностей новых способов сварки и наплавки автор работ [3,34] вводит понятие "гибкости технологического процесса". Чтобы раскрыть содержание этого понятия, рассматривается пример, характеризующий состояние гибкости для известного технологического процесса сварки.

При сварке неплавящимся электродом в аргоне требуется получить заданные ширину валика и глубину проплавления $H_{ш}$ и $B_{ш}$. Эти параметры, по которым производится настройка технологического процесса, автор [3,34] называет определяющими факторами (ОФ). Для двух основных параметров режима – тока и скорости, изолинии $I_{св}-V_{св}$, дают единственное значение режима в точке пересечения кривых $H_{ш}$ и $B_{ш}$ (рисунок 1).

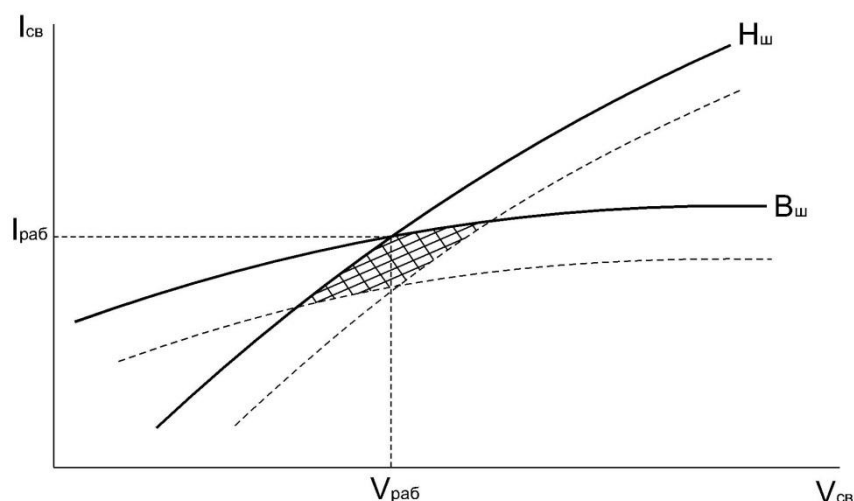


Рисунок 1 – Определение режимов сварки $W^- - Ст^+$ в Ag для двух определяющих факторов с помощью изолиний

Допустим, что будет применен другой способ, с использованием подогрева детали. Произойдет перемещение линий равного влияния $H_{ш}$ и $B_{ш}$, и параметры режимов можно будет выбирать внутри заштрихованной области ABCD. Появление дополнительного параметра процесса расширило область изменения старых параметров. Расширение области режимов создает возможности поиска в ней оптимальных режимов, например, с позиций экономичности. Если бы был выбран один ОФ, например $B_{ш}$, то область возможных режимов из точки превратилась бы в кривую. Следовательно, гибкость технологического процесса можно охарактеризовать и как возможность использования большего числа ОФ.

Другим примером, раскрывающим понятие гибкости и обратного ему понятия жёсткости, является сварка плавящимся электродом. Этому способу присуща "жёсткая" связь между проплавлением основного металла и наплавкой электродного. Изменение тока дуги, приводит к изменению площади проплавления и, в то же время, изменяет скорость подачи проволоки (рисунок 2). Соотношение проплавления и наплавки характеризуется долей участия основного металла в металле шва ψ_o . В своем основном виде процесс регулируется током, диаметром электродной проволоки и скоростью

сварки. Возможности регулирования процесса весьма ограничены. Также как и в предыдущем примере, можно построить область возможных режимов для трёх параметров, обеспечивающую заданное значение ψ_o . Разработка нового способа – подогрева электрода в вылете, создаёт новые возможности регулирования состава шва. Число параметров режима возрастает, способ усложняется, но расширяются его технологические возможности. Жёсткая связь между проплавлением и наплавкой снижается, что можно характеризовать как повышение гибкости технологического процесса в отношении ψ_o .

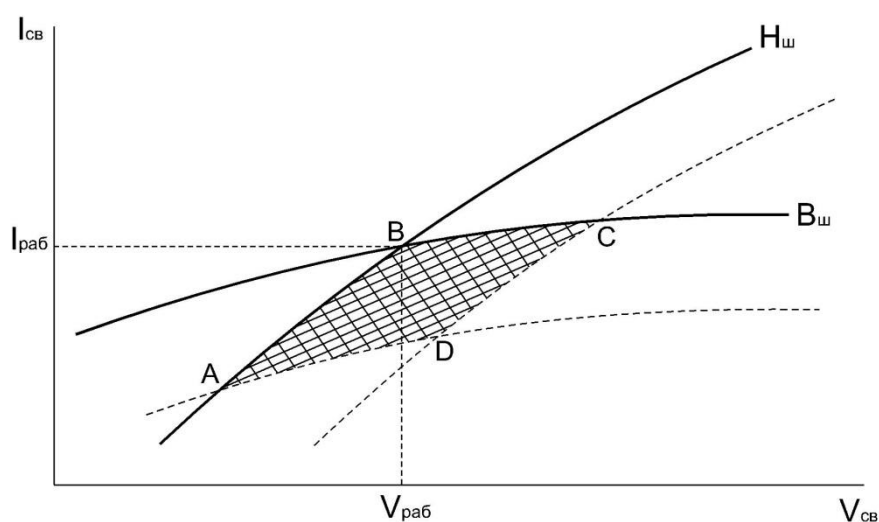


Рисунок 2 – Определение режима сварки плавящимся электродом для двух определяющих факторов с помощью изолиний

Под гибкостью технологического процесса предлагается понимать возможность реализовать в этом процессе максимальные области диапазонов варьирования режимов при заданном числе определяющих факторов и их интервалов.

Гибкость технологического процесса - это способность процесса подвергаться оптимизации, то есть выбору в области режимов наиболее оптимального по тем или иным критериям.

В то же время увеличение параметров режима приводит к усложнению процесса, что может снизить преимущества повышения гибкости.

Параметры процесса целесообразно, по-видимому, разделить на две категории: условия и режимы. Условия не могут быть целенаправленно изменены в ходе самого процесса, а режимы [4] могут изменяться и в ходе процесса. Появление нового постоянного параметра изменяет гибкость (подогрев изделия, проволоки, диаметр и длина канала сопла, расход плазмообразующего газа).

Из предложенных определений гибкости технологического процесса следует, что её повышение возможно не только увеличением параметров процесса, но и расширением области возможных значений имеющихся параметров. В этом случае также возрастает область поиска оптимальных значений.

Таким образом, развитие сварочной техники в значительной степени связано с поиском технических решений, обеспечивающих большую гибкость технологического процесса. Поиск производился в определенной степени интуитивно. Создание изложенного выше теоретического подхода позволяет более целенаправленно вести поиск в данном направлении, проводить анализ различных технологических процессов с позиций их гибкости, оптимизации или увеличения числа определяющих факторов. Фактически речь идет о целенаправленном применении математического аппарата систем уравнений функций нескольких переменных для проектирования технологических процессов сварки. Возможно, что в будущем с помощью подобного подхода удастся количественно оценить различные аспекты свариваемости материалов и более обоснованно производить ее оценку.

1.2 Плавление основного и электродного металла в дуговых способах наплавки

«При длительной эксплуатации машин изнашивание деталей сопровождается снижением эксплуатационных свойств, что ухудшает качество изготавливаемых изделий. Изнашивание рабочих поверхностей

деталей нередко требует полной их замены, что повышает себестоимость производства» [5].

«В ряде случаев изготовление деталей целиком из износостойкой легированной стали нерационально в связи с трудностью обработки и высокой стоимостью стали. Поэтому, для решения задач повышения эксплуатационных показателей и увеличения срока службы машин, используют различные способы наплавки, которые нашли применение в производстве разнообразных изделий — от крупногабаритных, таких как сосуды высокого давления, до мелких деталей типа выхлопных гнёзд и клапанов двигателей внутреннего сгорания» [5].

«Наплавка сыграла большую роль в деле увеличения производительности труда, повышения качества продукции и экономии сырья при производстве промышленного оборудования, его эксплуатации и ремонте» [5].

В сварочной технике используется изготовительная и восстановительная наплавка. Наплавка — нанесение слоя металла на поверхность заготовки или изделия посредством сварки плавлением.

Различные дуговые методы наплавки отличаются друг от друга тепловой подготовкой основного и наплавляемого металлов.

«Изготовительная наплавка служит для получения новых биметаллических (многослойных) изделий. Такие изделия состоят из основы (основной металл), обеспечивающей необходимую конструкционную прочность, и наплавленного рабочего слоя (наплавленный металл) с особыми свойствами (износостойкость, термостойкость, коррозионная стойкость и т. д.)» [6].

«Восстановительная наплавка применяется для восстановления первоначальных размеров изношенных или поврежденных деталей. В этом случае наплавленный металл может быть близок по составу и свойствам основному металлу (восстановительная размерная наплавка) или отличаться от них (восстановительная износостойкая наплавка) (рисунок 3)» [6].

«Доля основного металла в наплавленном слое Ψ_o , обычно выражаемая в процентах, колеблется в широких пределах и зависит от способа и режима наплавки (таблица 1).

$$\psi_o = (F_o 100) / (F_o + F_n), \quad (1)$$

где F_o – площадь сечения основного металла (рисунок 3); F_n – площадь сечения наплавленного металла.

Важной характеристикой процесса является производительность наплавки, которая измеряется массой металла, наплавляемой в единицу времени (кг/ч), или площадью поверхности, наплавляемой в единицу времени (м²/ч)» [6].

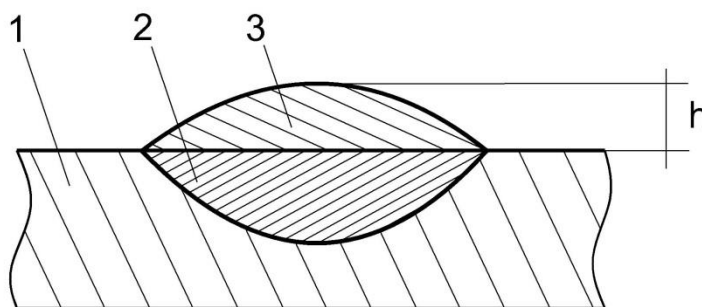


Рисунок 3 – Сечение наплавленного валика: 1 - основной металл, 2 - площадь сечения расплавленного основного металла F_o , 3 - площадь сечения наплавленного металла F_n , h – толщина наплавленного слоя

«Наплавленный металл, вследствие перемешивания с основным металлом и взаимодействия с атмосферой дуги и шлаком, отличается по составу от электродного (присадочного) металла.

Способы наплавки, как и способы сварки, классифицируются по трём группам признаков: физическим, техническим и технологическим.

По физическому признаку (используемый источник нагрева) основные способы наплавки можно разделить на три группы:

- термические (дуговая, электрошлаковая, плазменная, электроннолучевая, световая, индукционная, газовая, печная);
- термомеханические (контактная, прокаткой, экструдированием);
- механические (взрывом, трением).

Большинство из этих способов в свою очередь могут подразделяться по техническим (способ защиты металла в зоне наплавки, степень механизации наплавки, непрерывность процесса наплавки) и технологическим (по роду тока, по количеству электродов, по наличию внешнего воздействия и т. п.) признакам.

В данной работе рассматриваются только термические способы наплавки, отдельные характеристики которых такие как производительность, доля основного металла ψ_o и толщина наплавляемого слоя h , приведены в таблице 1» [7].

Таблица 1 – Характеристики термических способов наплавки

Способ наплавки	Производительность, кг/ч	Доля основного металла ψ_o , %	Толщина наплавленного слоя h , мм
Газовая наплавка: с присадкой проволоки или прутков, газопорошковая.	0,5 - 1,5 0,5 – 3,0	1 1	0,8 – 5,0 0,3 – 3,0
Дуговая W электродом в Ag Плавящимся электродом:	1,0 – 7,0	10 – 30	2,5 – 5,0
в защитном газе,	1,5 – 9,0	30 – 60	3,0 – 5,0
самозащитной проволокой,	2 – 9	25 – 50	2,5 – 5,0
самозащитной лентой,	10 – 20	15 – 40	2,5 – 5,0
под флюсом одной проволокой,	2 – 12	30 – 60	3,5 - 5,0
под флюсом многоэлектродная,	5 – 40	15 – 30	5,0 – 8,0
под флюсом лентой.	5 – 40	10 – 20	2,5 – 5,0
Ручная дуговая покрытым электродом	0,8 – 3,0	20 – 50	2,0 – 5,0
Электрошлаковая наплавка:			
двумя электродными лентами,	10 – 60	5 – 15	1,5 – 5,0
электродными проволоками,	20 – 60	10 – 20	6,0 – 50
зернистым присадочным материалом.	20 – 200	5 – 50	15,0 – 50
Плазменная порошком	0,8 – 6,0	5 – 15	0,3 – 6,
Индукционная	2 – 15	5 - 15	0,4 – 3,0

1.3 Анализ способов наплавки с позиции гибкости технологического процесса

Главным показателем при оценке гибкости технологического процесса всех методов наплавки, анализируемых в данном разделе, будет возможность регулирования объема наплавленного металла и степени проплавления основного металла независимо или ограниченно зависимо друг от друга. Такой подход актуален и для технологий сварки, где также желательно минимальное тепловое воздействие на основной металл.

Для того, что бы провести такую оценку, следует:

- выделить те параметры процессов, которые в основной степени прямо или косвенно влияют на интенсивность плавления основного и присадочного металлов;
- рассмотреть степень влияния этих параметров на плавление как основного, так и присадочного (наплавляемого) металлов;
- рассмотреть возможность способа отдельно управлять параметрами наплавки, оперируя выделенными параметрами способа.

1.3.1 Ручная дуговая наплавка покрытым электродом

«Наиболее универсальный метод, пригодный для наплавки деталей различной формы во всех пространственных положениях – это ручная дуговая наплавка покрытым электродом. Легирование наплавленного металла производится через стержень электрода и/или через покрытие» [8].

«Для наплавки используют электроды диаметром 3 - 6 мм. При толщине наплавленного слоя менее 1,5 мм применяют электроды диаметром 3 мм, при большей – диаметром 4 – 6 мм» [9].

«Для обеспечения минимального проплавления основного металла при достаточной устойчивости дуги плотность тока выбирается равной 11 – 12 А/мм²» [9].

К параметрам режима ручной дуговой наплавки следует отнести: 1) ток дуги I_d , 2) скорость наплавки V_n , 3) напряжение дуги U_d , 4) длину дуги l_d . Полярность тока и диаметр электрода d_e следует относить к условиям процесса [35].

Наиболее значимые параметры для ручной дуговой наплавки - мощность сварочной дуги $P_d = U_d \cdot I_d$, которая обычно регулируется изменением силы тока, и скорость наплавки.

Скорость плавления электрода зависит только от мощности дуги, выделяемой на его торце и от его нагрева в вылете. В процессе горения дуги стержень нагревается протекающим током и расплавление электрода ускоряется. Скорость плавления электрода переменная, что является недостатком данного способа. Прирост скорости расплавления может достигать 40% начальной скорости расплавления [10,36]. Плавление основного металла происходит за счёт тепла дуги и тепла, переносимого в ванну с наплавляемым металлом. Таким образом, в дуге прямого действия раздельное управление их плавлением путём регулирования силы тока и скорости сварки невозможно.

В определённой степени изменять соотношение влияния дуги на плавление основы и присадки, возможно изменяя полярность (прямая, обратная, переменная), но такое регулирование имеет ступенчатый характер и сравнительно узкие пределы.

Изменяя диаметр электрода можно в определённой степени влиять на плавление электродного металла. При этом меняется сосредоточенность дуги на изделии. Однако при этом остается эффект неравномерного плавления электрода.

Скорость наплавки примерно в равной степени влияет на площади проплавления и наплавки. Скорость наплавки практически не влияет на интенсивность плавления электрода, но оказывает влияние на интенсивность плавления основного металла, т.к. с увеличением скорости наплавки увеличивается скорость теплоотвода от сварочной ванны. Этим и

обусловлена небольшая разница во влиянии.

Таким образом, наплавка покрытым электродом является ярким примером способа с низкой гибкостью процесса, в котором нет параметров, управляя которыми можно в широких пределах изменять параметры наплавки не влияя на проплав основного металла и наплавляемого металла.

Производительность наплавки данным способом составляет 0,8 – 3,0 кг/ч, доля основного металла в металле наплавки ψ_o 20 – 50 %, и толщина наплавленного слоя 2,0 – 5,0 мм.

При ручной дуговой наплавке покрытыми электродами доля основного металла в наплавленном слое ψ_o , как правило, не может быть, без опасности получения непровара, снижена менее чем до 0,2.

По сравнению с другими способами поверхностной обработки металла технология ручной дуговой наплавки обладает рядом преимуществ и недостатков.

К преимуществам технологии ручной дуговой наплавки следует отнести относительную простоту конструкции источника питания и транспортабельность оборудования, приспособленного для работ вне помещений.

К недостаткам технологии ручной дуговой наплавки следует отнести низкую гибкость технологического процесса.

1.3.2 Плазменная наплавка (наплавка сжатой дугой)

«Плазменная наплавка основана на использовании в качестве источника сварочного нагрева сжатой дуги. Как правило, плазменная наплавка выполняется постоянным током прямой или обратной полярности. Наплавляемое изделие может быть нейтральным (наплавка плазменной струей) или, что имеет место в подавляющем большинстве случаев, включенными в электрическую цепь источника питания дуги (наплавка плазменной дугой). Плазменная наплавка имеет относительно

низкую производительность (4 – 10 кг/ч), но благодаря минимальному проплавлению основного металла позволяет получить требуемые свойства наплавленного металла уже в первом слое и за счет этого сократить объем наплавочных работ» [11, 37].

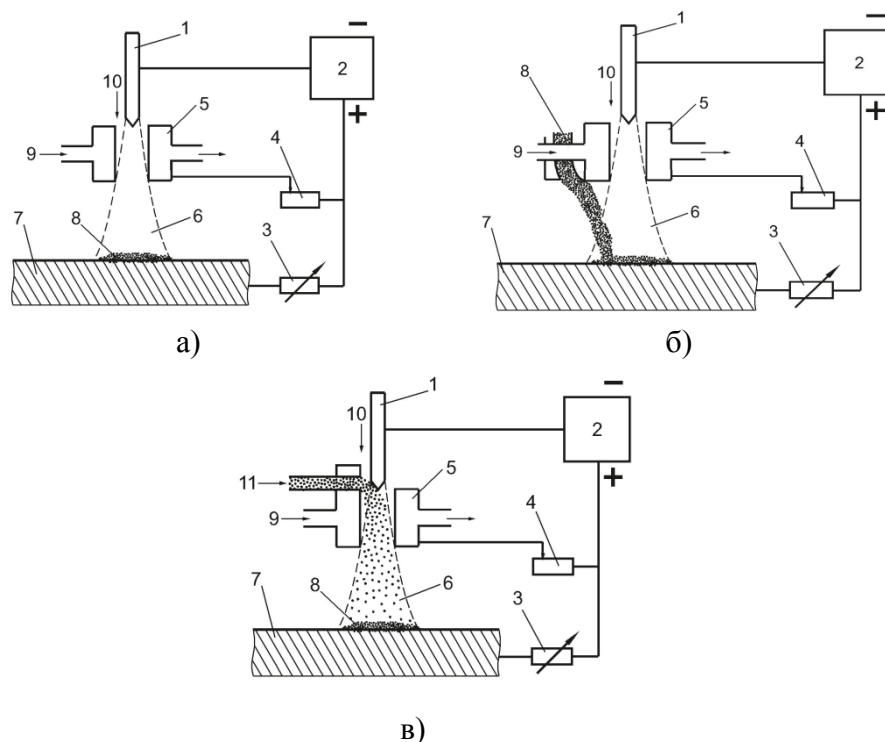


Рисунок 4 – Принципиальные схемы плазменной наплавки с применением в качестве присадочных материалов порошков: 1 – вольфрамовый электрод; 2 – источник питания; 3 – балластный сопротивление; 4 – ограничительное сопротивление; 5 – сопло; 6 – плазменная дуга; 7 – изделие; 8 – порошок; 9 – охлаждающая вода; 10 – плазмообразующий газ; 11 – транспортирующий газ.

«Существует несколько схем плазменной наплавки, но наибольшее распространение получила плазменно-порошковая наплавка – наиболее универсальный метод, так как порошки могут быть изготовлены практически из любого, пригодного для наплавки, сплава (рисунок 4)» [2].

Для наплавки используется специальная плазменно-дуговая аппаратура и источники питания, которые обеспечивают параметры режима наплавки:

- ток дуги I_d ,
- напряжение дуги U_d ,

- длины открытой дуги I_d и скрытой $I_{дскр}$,
- полярность тока,
- диаметр электрода d_w ,
- скорость наплавки V_n ,
- скорость подачи порошкообразного материала $V_{пор}$,
- длина канала,
- диаметр канала,
- расход плазмообразующего Q и транспортирующего газа $Q_{тр}$.

Формирование наплавки происходит под воздействием двух видов полей, генерируемых технологическим инструментом (дугой) – теплового и силового. Каждое из полей принято характеризовать параметрами распределения. Принятие закона нормального распределения обуславливает, что каждое поле описывается двумя параметрами. Для упрощения анализа примем, что каждое поле описывается только одним параметром – эффективной мощностью и силой давления дуги, т.е. имеем два определяющих фактора.

У сжатой дуги число параметров режима увеличивается до пяти, по сравнению с двумя для свободной дуги с неплавящимся электродом. Добавляются два постоянных параметра (длина и диаметр канала сопла) и один переменный (расход плазмообразующего газа), который, в принципе, может использоваться для регулирования в процессе обработки.

При наплавке сжатой дугой неплавящимся электродом с присадочной проволокой в защитной среде газа число параметров не меньше, чем в предыдущем случае:

- ток дуги I_d ,
- напряжение дуги U_d ,
- длина открытой дуги I_d и скрытой $I_{дскр}$,
- полярность тока,
- диаметр электрода d_w ,

- скорость наплавки $V_{н}$,
- скорость подачи присадочной проволоки $V_{пр}$,
- длина канала,
- диаметр канала,
- расход защитного и плазмообразующего газа.

На рисунке 5 представлены схемы наплавки сжатой дугой неплавящимся электродом с присадочной проволокой в защитной среде газа.

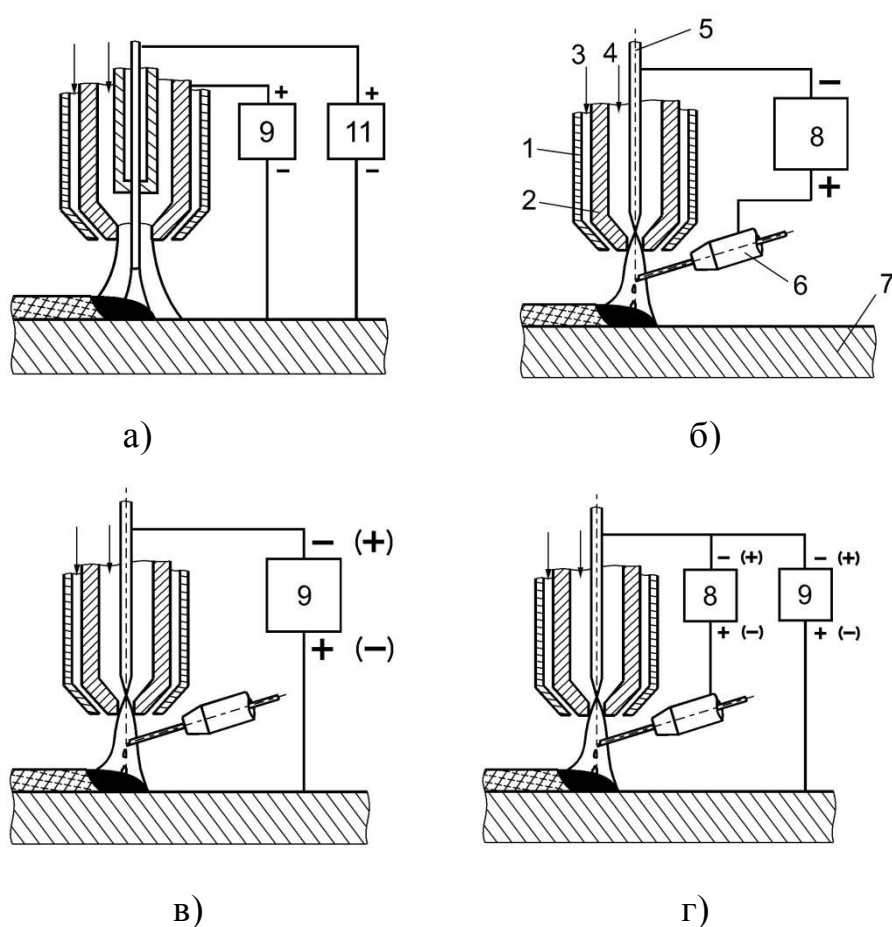


Рисунок 5 – Схемы наплавки сжатой дугой неплавящимся электродом с присадочной проволокой и без проволоки: а) сжатой дугой, б) сжатой дугой с токоведущей присадкой, в) сжатой дугой с нейтральной присадочной проволокой, г) комбинированной дугой с одной проволокой

Рассмотрим случай конкретных режимов, в которых длина и диаметр канала постоянны. Для заданного уровня эффективной

мощности и ее допустимых отклонений при трех переменных параметрах режима (ток дуги, расход газа, диаметр сопла) можно построить в системе трёхмерных координат некий объём, охватывающий область возможных значений режимов. Изменение диаметра и длины канала сопла будут изменять размеры этой области, в принципе, давая возможность её расширения. Если представить, что силовое поле не влияет на процесс, то вся область объёма допустимых режимов есть область для поиска их оптимальных значений. Возможности отыскания оптимального режима возрастают по сравнению с менее гибким технологическим процессом, имеющим меньшее число параметров режима.

Аналогично можно представить область тех же параметров режима, обеспечивающих заданный и необходимый уровень силы давления дуги. Объём, общий для двух определяющих факторов, и будет областью возможных режимов в случае необходимости учёта влияния на формирование шва поля давления дуги и поля эффективной мощности. Если учитывать распределение давления и мощности, то, несмотря на усложнение поиска областей возможных режимов, ход рассуждений остаётся тем же, и для повышения гибкости процесса необходимо увеличение параметров режима. Из описания процесса наплавки следует, что количество параметров возросло до 10.

Одним из подходов к повышению гибкости технологических процессов наплавки является их ведение в импульсном режиме, тогда количество параметров возрастает:

- ток дуги I_d ,
- напряжение дуги U_d ,
- длительность импульса и паузы,
- ток дежурной дуги,
- длина открытой дуги l_d и скрытой $l_{дскр}$,
- полярность тока,

- диаметр электрода d_w ,
- скорость наплавки V_n ,
- скорость подачи присадочной проволоки $V_{пр}$,
- длина канала,
- диаметр канала,
- расход защитного и плазмообразующего газа.

При импульсной обработке сжатой дугой после отключения фазы, подключенной к изделию, её подключают к соплу. Мощность дуги, горящей на сопло, может регулироваться. Высокая мощность дуги "электрод-сопло" обеспечивает получение стабильного динамического напора газового потока [12] (рисунок 6а). Это обусловлено тем, что теплопередача от дуги к газу в дугах "электрод-деталь" и "электрод-сопло" примерно одинакова. При равенстве мощностей дуг будут близки и среднемассовые температуры газа, а следовательно, стабилен его газодинамический напор. В то же время сохраняется импульсное тепловложение в обрабатываемое изделие, так как эффективный КПД дуги "электрод-изделие" намного выше, чем КПД дуги "электрод-сопло" по отношению к детали за счёт выделения тепла в активном пятне дуги "электрод-деталь".

Описанный выше способ фактически представляет комбинацию двух основных способов генерации сжатой дуги - прямого и косвенного действия. Способ расширяет технологические возможности сжатых дуг, создавая новый эффект и дополнительные параметры регулирования характера теплового и силового полей.

При традиционном способе импульсной сварки сжатой дугой, когда периоды увеличения тока чередуются с периодами его уменьшения, имеют место значительные пульсации динамического напора газа из-за увеличения его скорости вследствие прогрева.

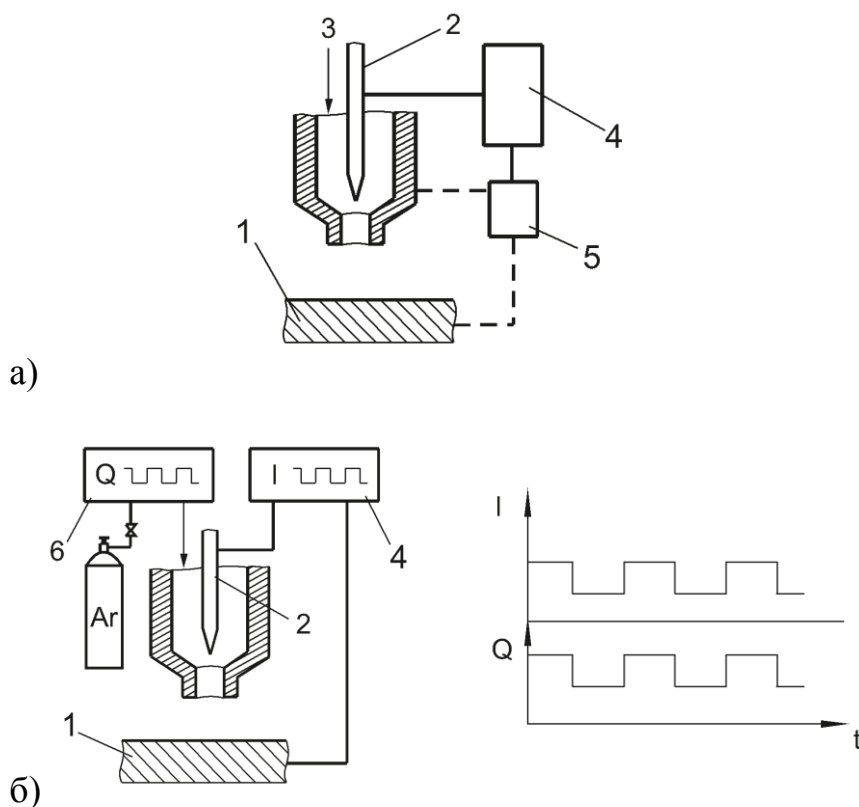


Рисунок 6 - Схема импульсной наплавки сжатой дугой: а) при переключении фазы с изделия на сопло, б) при импульсной подаче газа

Основной вклад в получение механической энергии сжатой дуги играет газокинетическое давление, примерно на порядок превышающее другие виды механической энергии, генерируемые дугой. «Соотношение между тепловой энергией дуги и её газокинетической энергией определяет качество и производительность процессов обработки и требует целенаправленного регулирования.

При обработке сжатой импульсной дугой такое регулирование осуществляют путем синхронизации импульсов изменения тока с изменением расхода плазмообразующего газа. Для этого в период импульса тока $t_{и}$ расход плазмообразующего газа уменьшают» [12] (рисунок 6б).

«Таким образом, обеспечивается возможность при заданных размерах сопла управлять тепловой энергией дуги изменением тока дуги, а газокинетической энергией дуги - изменением расхода плазмообразующего газа. При импульсной обработке сжатой дугой,

увеличивая в период снижения тока расход плазмообразующего газа, можно снизить пульсации динамического напора газа или устранить их совсем» [12].

Другим примером уменьшения "жёсткой" связи в технологическом процессе является разработка способа импульсной плазменной наплавки. Традиционным способом, аналогичным сварке или наплавке дугой с неплавящимся электродом, является вариант, в котором в столб сжатой дуги на открытом участке или в сварочную ванну подают электрически нейтральную присадочную проволоку. Этот способ по своим технологическим возможностям реализует лишь некоторые преимущества сжатой дуги по отношению к свободной. Возможность варьирования количества присадочного металла в сварочную ванну при заданном токе дуги весьма ограничена [13].

Проволока подключается, как к изделию, так и к полюсу источника питания через регулировочное сопротивление. Следует отметить, что такая проволока уже не подходит под определения "электродной" или "присадочной" [14]. Подбор сопротивлений в фазах изделия и проволоки должен позволять распределять полный ток дуги между электродом и проволокой.

Таким образом, способ позволяет независимо регулировать размеры сварочной ванны основного металла и количество дополнительного металла, тем самым, в принципе, решив проблему "жёсткости" процесса. В то же время способ [13], имеет существенный недостаток. Шунтированные дуги в сварочной технике ещё мало изучены и трудно осуществлять управление дугами, так как они взаимосвязаны через электрическую цепь. Применение независимого источника питания дуги на проволоку дорогостояще. В работе [15] был предложен принципиально новый способ импульсной наплавки.

Присадочную проволоку, и наплавляемое изделие подключают к одному полюсу источника питания. Производят периодическое отключение проволоки от источника питания. В период отключения изделия от источника

питания подключают к источнику проволоку, а в период подключения изделия к источнику, последний от проволоки отключают. Способ позволяет вести управление проплавлением непосредственно в процессе наплавки при полной независимости количества расплавляемого присадочного и основного материала и обеспечивает получение наплавленного слоя с заданными физико-химическими свойствами.

Для регулирования степени пульсации плазменной струи и управления переносом дополнительного жидкого металла отключение проволоки от источника питания может запаздывать по отношению к моменту включения изделия, подключение проволоки может опережать отключение изделия от источника питания.

Способ обеспечивает повышение качества наплавки за счёт повышения стабильности процесса, возможность вести управление проплавлением непосредственно в процессе наплавки, полную независимость количества расплавляемого дополнительного и основного материалов. Всё это позволит при использовании способа получать наплавляемый слой с заданными физико-механическими свойствами, снизить расход присадочной проволоки, сократить затраты на обработку наплавленного слоя.

Если в способе, приведённом в монографии [13], дополнительно введён один параметр процесса, то в импульсном [15] способе их два: продолжительность импульсов и пауз, что значительно повысило гибкость процесса наплавки.

«При ремонтно-восстановительной наплавке одной из самых важных характеристик сварочной ванны является ее глубина, так как именно этот параметр во многом определяет уровень остаточных напряжений и деформаций ремонтируемого изделия. Уменьшение глубины проплавления основного металла с одновременным гарантированным сплавлением основного и присадочного металла позволяет получать высокое качество наплавки. Исследования по наплавке пластин из алюминиевых сплавов трехфазной аргодуговой сваркой неплавящимися электродами с

разделением теплового потока от трехфазной дуги показали следующее. Разделить тепловой поток удастся, подсоединив к средней фазе трехфазного источника питания вместе с изделием присадочную проволоку. Такая схема включения обеспечивает горение дуги, как на основной металл, так и на присадочную проволоку, причем, регулирование тока, протекающего по присадочной проволоке, можно осуществлять, изменяя расстояние от оси электродов сварочной горелки до торца оплавляемой проволоки» [16].

К основным преимуществам плазменной наплавки следует отнести:

- высокое качество наплавленного металла,
- малая глубина проплавления основного металла при высокой прочности сцепления,
- возможность наплавки тонких слоев,
- высокая культура производства,
- пониженные деформации.

Основные недостатки процесса:

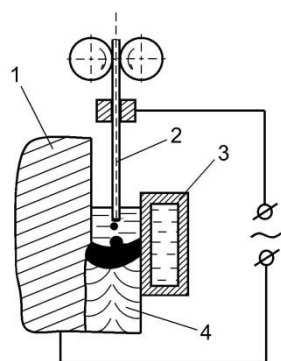
- относительно не высокая производительности.
- необходимость в сложном оборудовании,
- малый ресурс плазмотронов.

1.3.3 Электрошлаковая наплавка (ЭШН)

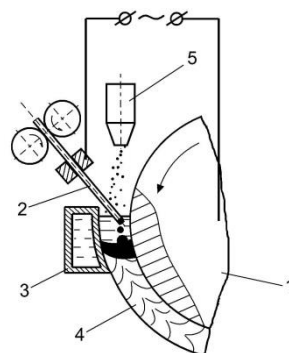
«ЭШН основана на использовании тепла, выделяющегося при прохождении электрического тока через шлаковую ванну» [17].

Основные схемы электрошлаковой наплавки приведены на рисунке

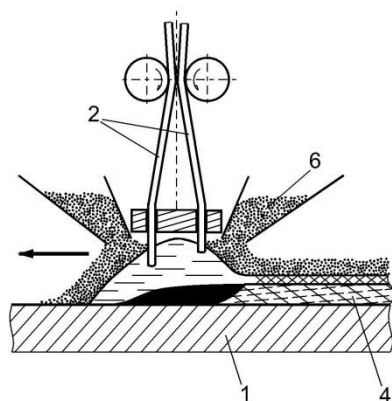
7.



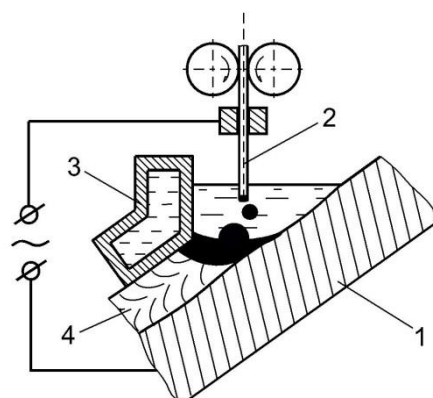
а)



б)



в)



г)

Рисунок 7 – Основные схемы электрошлаковой наплавки: *а* – плоской поверхности в вертикальном положении; *б* – цилиндрической детали; *в* – двумя электродными лентами со свободным формированием; *г* – плоской поверхности в наклонном положении; *1* – основной металл; *2* – электрод; *3* – кристаллизатор; *4* – наплавленный металл; *5* – дозатор; *6* – флюс

«ЭШН можно производить в горизонтальном, вертикальном или наклонном положении, как правило, с принудительным формированием наплавленного слоя. Наплавка на горизонтальную поверхность может идти как с принудительным, так и со свободным формированием» [17].

При электрошлаковой наплавке число параметров меньше, чем в предыдущем случае:

- ток сварки $I_{св}$,
- напряжение на шлаковой ванне $U_{шл}$,

- длина вылета l_v ,
- диаметр электродной проволоки $d_{пр}$,
- скорость наплавки V_n ,
- скорость подачи проволоки $V_{пр}$,
- расход флюса.

«Основные достоинства метода:

- высокая устойчивость процесса в широком диапазоне плотностей тока (от 0,2 до 300 А/мм²), что позволяет использовать для наплавки как электродную проволоку диаметром менее 2 мм, так и электроды большого сечения (> 35000 мм²);
- производительность достигает 200 килограммов наплавленного металла в час (таблица 1);
- возможность наплавки за один проход слоев большой толщины;
- возможность наплавки сталей и сплавов с повышенной склонностью к образованию трещин;
- возможность придавать наплавленному металлу необходимую форму, сочетать наплавку с электрошлаковой сваркой и отливкой, на чем основана стыкошлаковая наплавка.

Основные недостатки метода:

- большая погонная энергия процесса, что обуславливает перегрев основного металла в ЗТВ;
- сложность и уникальность оборудования;
- невозможность получения слоев малой толщины (кроме способа ЭШН лентами);
- большая длительность подготовительных операций» [17].

1.3.4 Механизированная и автоматическая дуговая наплавка

«Для наплавки применяются все основные способы механизированной дуговой сварки: под флюсом, самозащитными проволоками и лентами и в

среде защитных газов. Наиболее широко используется наплавка под флюсом одной проволокой или лентой (холоднокатаной, порошковой, спеченной). Производительность наплавки под флюсом одной проволокой может составлять 12 кг/ч, $\psi_o = 30 - 60 \%$, толщина наплавленного слоя до 5 мм. Для увеличения производительности (до 40 кг/ч) применяют многодуговую, многоэлектродную наплавку и наплавку лентой. Использование ленты при наплавке под флюсом позволяет при высокой производительности снизить ψ_o до 10 – 20 % (таблица 1). Легирование наплавленного металла осуществляется, как правило, через электродный материал, легирующие флюсы применяются редко» [18].

Большое распространение получила дуговая наплавка самозащитными порошковыми проволоками и лентами.

«Стабилизация дуги, легирование и защита расплавленного металла от азота и кислорода воздуха обеспечивается за счет компонентов сердечника электродного материала» [19].

«Дуговая наплавка в среде защитных газов применяется относительно редко. В качестве защитных газов используются CO_2 , аргон, гелий, азот или смеси этих газов» [18]. Производительность плавящимся электродом в среде CO_2 составляет 9,0 кг/ч, $\psi_o = 30 - 60 \%$, толщина наплавленного слоя – до 5 мм.

Вследствие большого проплавления основного металла при дуговой наплавке необходимый состав наплавленного металла удается получить только в 3—5-мм слое.

Основные достоинства метода:

- универсальность;
- высокая производительность;
- возможность получения наплавленного металла практически любой системы легирования.

Основной недостаток:

- большое проплавление основного металла, особенно при наплавке проволоками.»

Для данного способа можно выделить следующие параметры данного способа, влияющие на интенсивность плавления основного и присадочного металлов:

- ток дуги I_d ,
- напряжение дуги U_d ,
- длина дуги l_d ,
- полярность тока,
- диаметр электрода d_z ,
- вылет электрода,
- скорость подачи защитного газа или флюса,
- скорость наплавки V_n , скорость подачи проволоки $V_{пр}$.

1.3.5 Наплавка трёхфазной дугой

«При наплавке трехфазной сжатой дугой между основным металлом и неплавящимся электродом (катодом) возникает электрическая дуга, обеспечивающая ионизацию дугового промежутка. При этом из сопла горелки истекает высокотемпературная плазменная струя, обеспечивающая плавление наплавочного материала» [41].

«На рисунке 8 схематически показана плазменная наплавка нагретой наплавочной проволокой. При наплавке этим способом две проволоки, последовательно подключенные к источнику питания переменного тока, подаются с постоянной скоростью в сварочную ванну под плазменной горелкой, где происходит их быстрое расплавление под действием теплоты

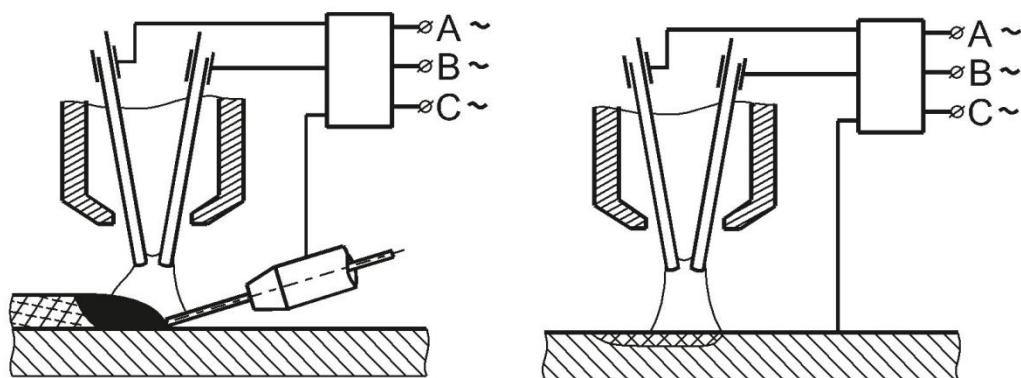


Рисунок 8 – Схема наплавки 3-фазной дугой нагретой присадочной проволокой

плазмы в сочетании с нагревом электросопротивлением самих проволок при пропускании переменного тока. Для образования плазмы используют смесь гелия (75%) с аргоном (25%), а в качестве защитного газа применяют аргон, защищающий сварочную ванну и кристаллизующийся наплавленный металл позади плазменной горелки от действия окружающего воздуха.

При наплавке в условиях поперечных колебаний плазменной горелки получают валик шириной до 64 мм. В качестве наплавочного материала используют коррозионно-стойкую сталь, никель и его сплавы, сплавы меди и др. При наплавке проволокой диаметром 2,4 мм получают слой толщиной до 6,5 мм.

В практике наплавки применяют способ, сочетающий в себе плазменную наплавку с дуговой наплавкой плавящимся электродом в среде инертного газа. При этом электрод плазменной горелки и обычный металлический электрод соединяют с противоположной полярностью, и при силе тока выше 300 А, столбчатая дуга превращается во вращающуюся, что обеспечивает наплавку валика шириной 40 мм при глубине проплавления основного металла менее 1 мм» [20].

«При наплавке трехфазной дугой глубина проплавления зависит от

соотношения токов в дугах, горящих между электродами и изделием. В этом случае также можно уменьшить глубину проплавления основного металла, но все же она остается достаточно высокой. Для уменьшения доли основного металла в металле наплавки и повышения коэффициента расплавления был предложен способ наплавки комбинированной дугой. В этом случае между электродом и изделием протекает постоянный ток, а между электродами – переменный ток. Исследовалась также наплавка с подачей присадочной проволоки в дугу, причем к проволоке ток не подводится. Коэффициент наплавки в этом случае увеличивается, а содержание доли основного металла в металле наплавки уменьшается, но все же остается на высоком уровне.

Однако этот способ не обеспечивает надежных результатов по формированию наплавленных валиков, наблюдаются непровары по их краям, подвороты, бугры и местные несплавления. Качество наплавки зависит от угла между электродами и расстояния между поверхностью изделия и точкой пересечения осей электродов. Существующая аппаратура не позволяет поддерживать эти величины строго постоянными. Поэтому эти способы наплавки дают ненадежные результаты и производственное использование их незначительно» [21].

В способе импульсной обработки свободной трёхфазной дугой её импульсное горение обеспечивают периодическим отключением фазы, подключенной к изделию через прерыватель тока [12] (рисунок 9а).

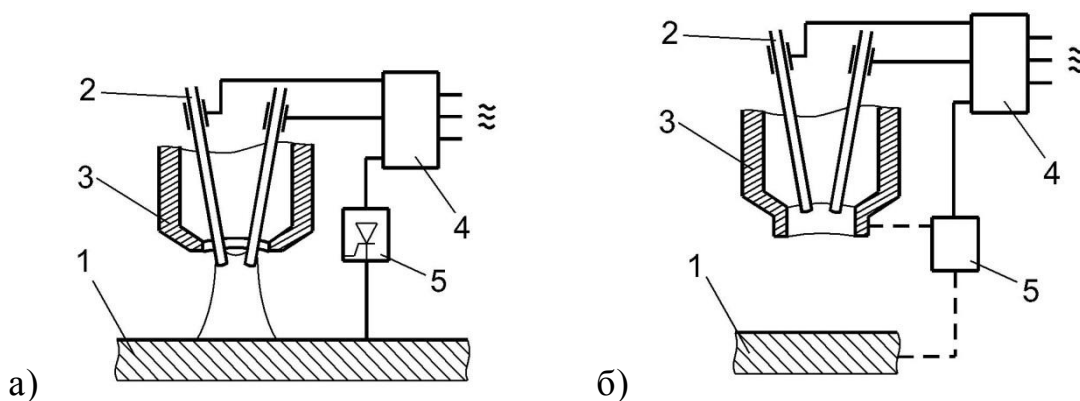


Рисунок 9 – Схема импульсной наплавки 3-фазной свободной (а) и сжатой (б) дугой: 1) изделие, 2) электроды, 3) инструмент обработки, 4) источник питания, 5) прерыватель тока свободной дуги, коммутатор тока сжатой дуги

Такой способ не позволяет получить высокого качества обработки детали. Это вызывается тем, что кроме пульсации электродинамических сил, возникающих вследствие изменения тока в детали, присущих также обработке свободной дугой, при импульсной плазменной обработке имеют место значительные пульсации динамического напора газового потока, обусловленные малой тепловой инерционностью сжатой дуги (рисунок 9б). Во время импульса газ, подогреваемый дугой большой мощности, имеет высокую скорость и динамический напор. Во время паузы маломощная дуга передаёт газу незначительное количество тепла и его скорость резко падает. Импульсный характер сил, действующих на сварочную ванну, является причиной нарушения её формирования, разбрызгивания, несплошностей, затрудняет проведение обработки в различных пространственных положениях из-за снятия поддерживающих сил во время паузы. Таким образом, в данной ситуации можно выделить два ОФ - тепловое и силовое воздействие плазменной струи, которые в известном способе генерации импульсной дуги «жестко» связаны с основным параметром режима - током дуги.

«При ремонтно-восстановительной наплавке одной из самых важных характеристик сварочной ванны является ее глубина, так как именно этот параметр во многом определяет уровень остаточных напряжений и

деформаций ремонтируемого изделия. Уменьшение глубины проплавления основного металла с одновременным гарантированным сплавлением основного и присадочного металла позволяет получать высокое качество наплавки. Исследования по наплавке пластин из алюминиевых сплавов трехфазной аргодуговой сваркой неплавящимися электродами с разделением теплового потока от трехфазной дуги показали следующее. Разделить тепловой поток удастся, подсоединив к средней фазе трехфазного источника питания вместе с изделием присадочную проволоку. Такая схема включения обеспечивает горение дуги, как на основной металл, так и на присадочную проволоку, причем, регулирование тока, протекающего по присадочной проволоке, можно осуществлять, изменяя расстояние от оси электродов сварочной горелки до торца оплавливаемой проволоки» [16] (рисунок 10).

При наплавке изделий из алюминиевых сплавов, зачастую, возникает существенная проблема – уменьшение или предотвращение его коробления от термического воздействия дуги. Известные технологические методы уменьшения сварочных деформаций при наплавочных работах малоэффективны вследствие различной жесткости деталей, а также из-за высоких значений теплофизических параметров алюминиевых сплавов.

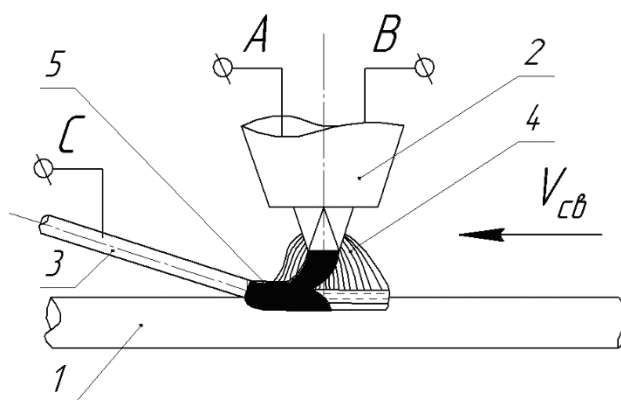


Рисунок 10 – Схема наплавки трехфазной свободной дугой с разделением теплового потока: 1) изделие, 2) горелка, 3) присадочная проволока, 4) дуга W–изделие, 5) дуга W–проволока

Предложенный способ наплавки трехфазной дугой с разделенным

тепловым потоком на газокинетическую и электродинамическую составляющие представляет наибольший интерес, с точки зрения снижения уровня сварочных деформаций, т.к. при этом воздействие электродинамической составляющей (активного пятна) на сварочную ванну практически исключается (рисунок 10). Это должно сказаться на уменьшении глубины проплавления основного металла, а значит и на уровне остаточных деформаций изделия. «Технология наплавки с разделенным тепловым потоком позволяет уменьшить глубину проплавления основного металла в два раза, а значит и существенно уменьшить коробление металла, и кроме того, увеличить количество наплавленного металла на единицу длины шва» [16].

Способ наплавки трехфазной дугой в непрерывном и импульсном режимах характеризуют следующими параметрами:

- ток дуги в фазах А, В,С I_d ,
- фазные напряжения дуги U_d ,
- длительность импульса и паузы,
- ток дежурной дуги,
- длина открытой дуги l_d ,
- расстояние между электродами,
- диаметр электрода d_w ,
- скорость наплавки V_n ,
- скорость подачи присадочной проволоки $V_{пр}$,
- ток через проволоку,
- расход защитного газа.

Основные достоинства метода:

- высокая производительность;
- возможность получения малого проплавления основного металла п

Основной недостаток:

- малый ресурс работы рабочего инструмента.

1.3.6 Аргодуговая наплавка неплавящимся электродом с присадочной проволокой

На рисунке 11 схематически показана наплавка свободной дугой постоянного тока с наплавочной проволокой. При наплавке этим способом проволока подается с постоянной скоростью в сварочную ванну под горелкой. В качестве защитного газа применяют аргон, защищающий сварочную ванну и кристаллизующийся наплавленный металл позади горелки и от действия окружающего воздуха.

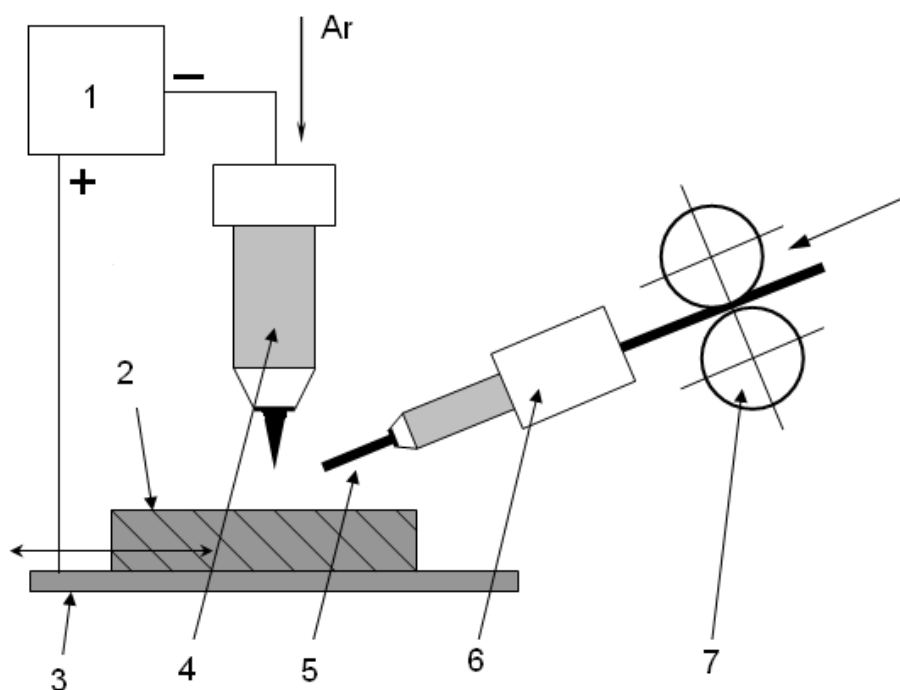


Рисунок 11 – Схема наплавки дугой с неплавящимся электродом присадочной проволокой в защитной среде: 1– источник питания; 2 – изделие; 3 – подвижный стол; 4 – горелка; 5 – проволока; 6 – муштук; 7 – подающие ролики.

При наплавке в условиях поперечных колебаний горелки получают валик шириной до 64 мм. В качестве наплавочного материала используют коррозионно-стойкую сталь, никель и его сплавы, сплавы меди и др. При наплавке проволокой диаметром 2,4 мм получают слой толщиной до 6,5 мм.

К параметрам дуги при данном способе сварки следует отнести:

- ток дуги I_d ,
- напряжение дуги U_d ,
- длина открытой дуги l_d ,
- полярность тока,
- диаметр электрода d_w ,
- скорость наплавки V_n ,
- скорость подачи присадочной проволоки $V_{пр}$,
- расход газа.

Прерывая подачу проволоки можно сколь угодно снизить долю ее металла в сварном шве. Но увеличивать эту долю можно только до определённого значения (70 – 90 %), т. к. плавление проволоки происходит за счет тепла дуги, горящей на изделие и, увеличивая скорость подачи проволоки, приходится повышать мощность дуги, от которой напрямую зависит плавление металла изделия. Таким образом, данный способ имеет меньшую гибкость процесса, чем способы, в которых за плавление наплавляемого металла отвечает отдельно регулируемый параметр.

Основные достоинства метода:

- универсальность,
- возможность получения наплавленного металла практически любой системы легирования.

Основные недостатки:

- большое проплавление основного металла,
- низкая производительность.

Рассматривая такое преимущество способов наплавки, как управляемое теплораспределение, как правило, говорят о минимальной степени проплавления основного металла.

Анализ рассмотренных выше способов наплавки показывает, что осуществить процесс наплавки металлов с минимальным расплавлением основного металла можно, очевидно, лишь в том случае, «если основным

источником теплоты для него будет расплавленный и нагретый до определённой температуры присадочный металл.

При применении дугового разряда между электродом (плавящимся или неплавящимся) и изделием фактически имеются два источника теплоты:

- собственно дуга,
- расплавленный электродный металл (в случае наплавки плавящимся электродом) или расплавленный присадочный металл (в случае наплавки неплавящимся электродом с подачей присадочной проволоки в зону дуги).

Поэтому при применении дугового разряда между электродом и изделием можно в какой-то степени уменьшить глубину проплавления основного металла, но всегда будет присутствовать жидкая фаза основного металла.

В идеальном виде необходим источник теплоты, обеспечивающий заливку на изделие жидкого присадочного металла, его растекание и сплавление его с основным металлом. Однако имеющиеся подобные способы наплавки, такие, как наплавка струёй перегретого металла, не обладают достаточной для производственных условий технологичностью.

Осуществить процесс, аналогичный наплавке струей перегретого металла, можно также и с помощью дугового разряда, если возбудить и поддерживать его в пространстве над изделием между двумя электродами, один из которых плавящийся. В этом случае дуговой разряд практически представляет собой лишь источник тепла для плавления и перегрева наплавляемого металла (так как изделие электрически нейтрально), а источником теплоты для основного металла является непосредственно жидкий наплавляемый металл. Образующийся при горении дуги плазменный факел оказывает на основной металл некоторое дополнительное тепловое воздействие в основном за счет лучистого теплообмена, при чем с увеличением расстояния до изделия это воздействие уменьшается. Поэтому такое воздействие не может само по себе привести к расплавлению основного металла» [21].

«Подобный способ наплавки был разработан Ю. Л. Красулиным, предложившим способ сварки металлов двойной независимой дугой. При такой наплавке одна дуга (переменного тока) горит между двумя неплавящимися электродами, а вторая дуга (постоянного тока) горит между одним из неплавящихся электродов и присадочной проволокой. Основной металл электрически нейтрален. Ввиду того, что дуга переменного тока горит не на изделие, ее косвенное влияние на металл основы, скорее всего, соизмеримо по величине с влиянием на присадочный металл. Такие способы более применимы для наплавки на тонкостенные изделия» [40].

Гибкостью технологического процесса наплавки во многом определяется универсальность способа. Наиболее гибким выглядит процесс, в котором источники тепла наиболее сконцентрированы на металлах, за плавление которых они отвечают, т.к. это позволяет точнее управлять распределением тепла. При этом способ может удовлетворять не только условию результата: максимум наплавки - минимум проплавления; но и любому другому: максимум проплавления при заданном объеме наплавки; заданная глубина проплава при заданном объеме наплавки. Последнее условие может возникнуть когда, например, требуется определенное процентное содержание металла основы в металле наплавленного слоя. Наиболее соответствующим такому подходу из рассмотренных способов являются наплавка сжатой дугой.

Однако в виду технологической сложности таких способов и высокой стоимости оборудования остаётся актуальной разработка менее сложного способа, не уступающего по качеству наплавки, но имеющего технико-экономические преимущества, позволяющие значительно расширить область своего применения.

На основе выше изложенных данных можно сформулировать следующие задачи работы:

– разработать способ наплавки комбинацией свободных дуг (прямого и

косвенного действия), обеспечивающий отдельное регулирование плавления основного и дополнительного металлов.

- разработать экспериментальное оборудование для наплавки комбинацией дуг.
- провести исследование энергетических параметров комбинации дуг.
- экспериментально исследовать зависимости параметров наплавляемого валика от режимов наплавки.
- исследовать механические и химические свойства наплавленного металла.
- разработать рекомендации по проектированию наплавочных головок и схемы питания дуг.

2 Исследование электрических свойств комбинации дуг прямого и косвенного действия

2.1 Энергетические характеристики комбинации дуг прямого и косвенного действия

Схема питания комбинации свободных дуг от источника питания постоянного тока представлена на рисунке 12.

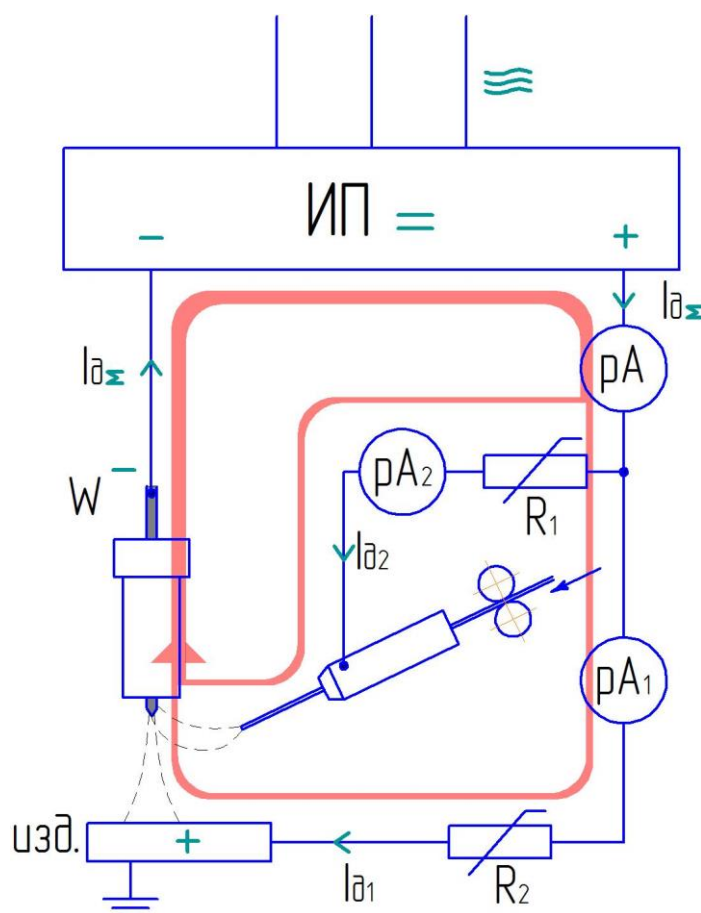


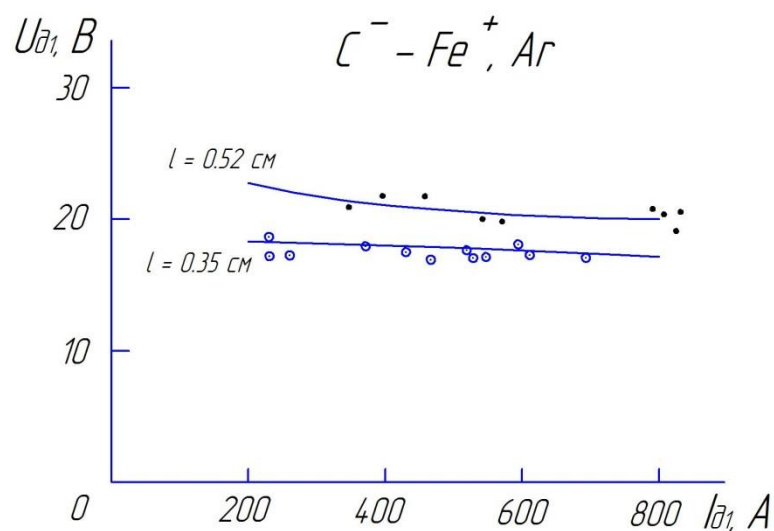
Рисунок 12 – Схема питания свободной двойной дуги: а) ИП – источник питания; R1, R2 – балластные реостаты РБ-300

Двойная свободная дуга обладает такими характеристиками, как статическая ВАХ дуги $W^- - St^+$ (изделие) $U_{д1} = f(I_{d1})$, и статическая ВАХ дуги $W^- - St^+$ (проволока) $U_{д2} = f(I_{d2})$, которые существенно зависят от длины дуг l_{d1} и l_{d2} . Известны работы авторов [22,23] по исследованию статической ВАХ дуг.

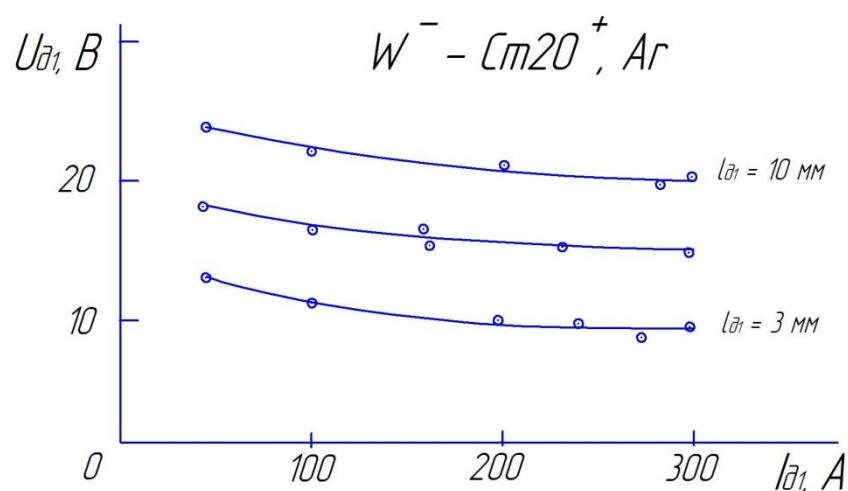
Учитывая тот факт, что в данном случае длина дуги основной дуги должна быть больше, чем при сварке $W^- - Ст^+$ в Ar, определяем зависимость $U_{д1} = f(I_{д1})$ для материала $W^- - Ст 20$ в Ar.

Установочная длина дуги контролируется мерительным инструментом в пределах от 3 до 10 мм и фиксируется киносъёмкой.

На рисунке 13а приведены экспериментально полученные статические ВАХ при сварке неплавящимся электродом в Ar, (по данным Т.М. Тиходеева) [24]. На рисунке 13б приведены статическая ВАХ при св $W^- - Ст 20^+$ в Ar.



а)



б)

Рисунок 13 – Статическая ВАХ дуги при сварке неплавящимся электродом в Ar.

В настоящее время отсутствуют полные данные о статической ВАХ двойной свободной дуги.

При сварке двойной свободной дугой количество геометрических параметров возрастает, т.к. появляется возможность перемещать дугу $W^- - C_m^+$ (изделие) по осям X и Y , изменяя и угол подачи проволоки α .

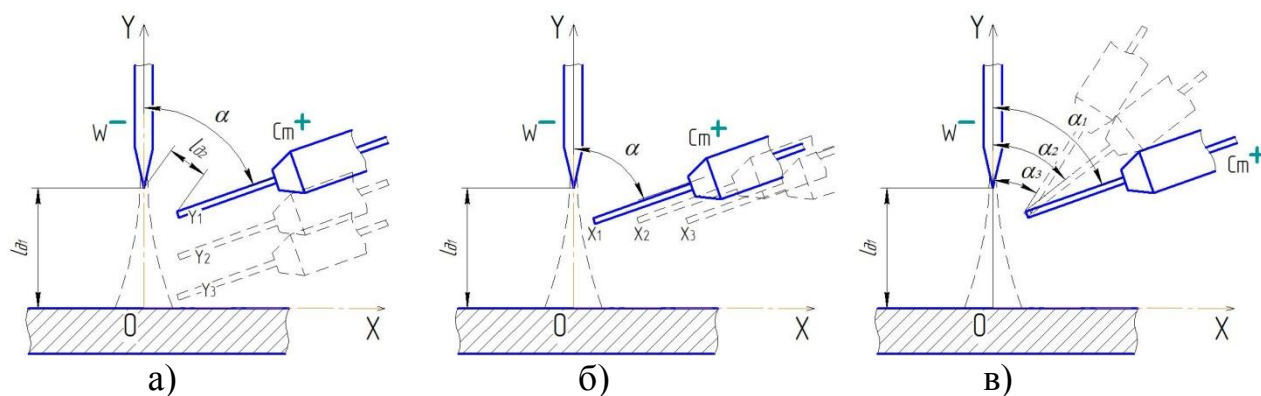


Рисунок 14 – Схема изменения положения присадочной проволоки.

В связи с тем, что взаимодействуют две дуги, в которых переменными могут быть такие параметры, как $I_{д1}$, $I_{д2}$, $U_{д1}$, $U_{д2}$, $I_{д1}$, $I_{д2}$, α , не считая $d_{пр.пр.}$. Т.к. предложенный способ предпочтительно использовать для наплавки, необходимо определить расположение присадочной проволоки относительно основной дуги с учетом максимального расплавления проволоки и минимального её разбрызгивания.

Поэтому проводим серию экспериментов, определяющих пространственное расположение проволоки с учетом условий наплавки. Т.е. определяем точку схождения дуг $W^- - C_m^+$ (изделие) и $W^- - C_m^+$ (проволока), где меньше всего действует сила Ампера [38].

Известно, что всякое магнитное поле оказывает воздействие на ток. Сила, с которой магнитное поле с индукцией $\vec{B}$ воздействует на прямой проводник длиной l , в котором течет ток, определяется по формуле (2).

$$F = I_2 \cdot B \cdot l_2 \cdot \sin(\vec{l}\vec{B}), \quad (2)$$

где F – сила Ампера,

B – сила ампера в т. А

$$B = \frac{MM_o I_1}{4\pi R} (\sin \beta_1 + \cos \beta_2), \quad (3) \quad (\text{рисунок 15})$$

где I_1 – ток в дуге W^- - изделие⁺ в Ar,

$R = l_{d2}$,

I_2 – ток в дуге W^- - Ст⁺(проволока) в Ar,

l_2 – длина проволоки (длина дуги l_{d2})

α - угол между l и B

β_1, β_2 – углы β

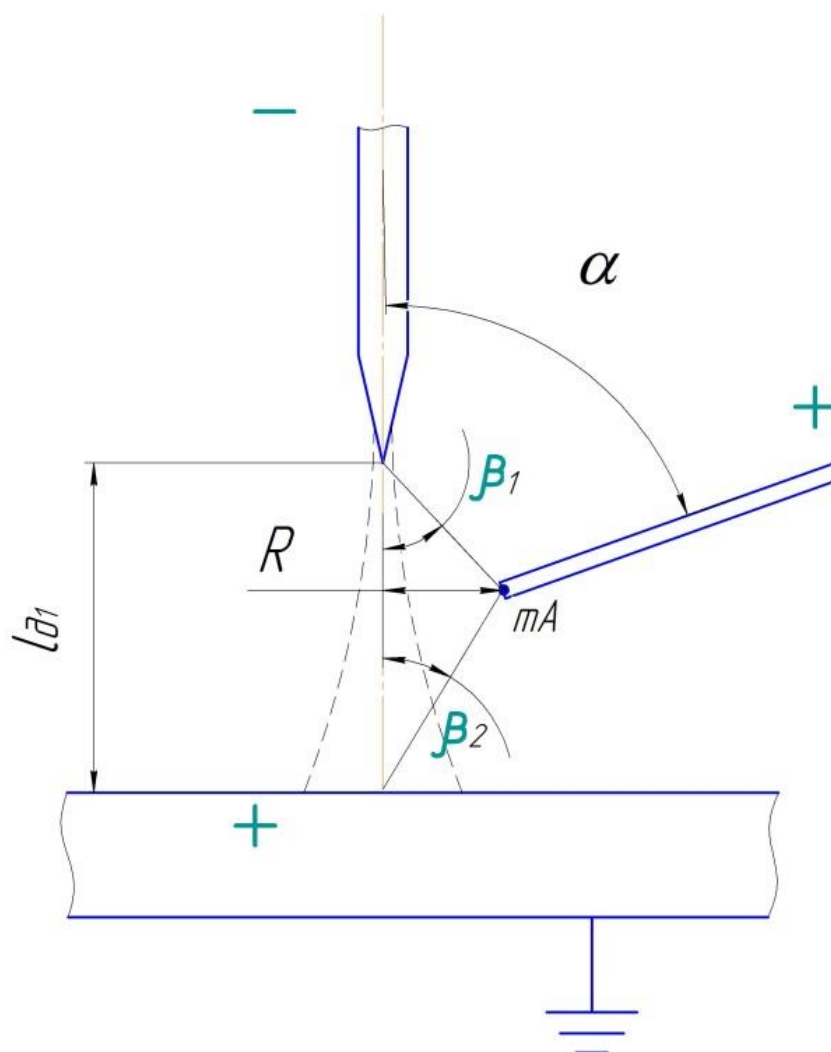


Рисунок 15 - Схема определения силы Ампера и магнитной индукции в заданной точке

Таблица 2 – Характеристики комбинированной дуги при $X \sim 2,5$ мм

фото	X, мм	Y, мм	I ₁ , W ₁ -Me, A	I ₂ , W ₁ -W ₂ , A	U ₂ , W ₁ -W ₂ , B
	3,2	9,5	51,20	8,00	16,50
	2,5	8,3	49,60	6,40	15,00
	2,3	5,9	49,60	8,00	14,5
	2,2	3,9	51,20	6,40	15,00
	1,8	2	51,20	8,00	16,00

Таблица 3 – Характеристики комбинированной дуги при $X \sim 4$ мм

фото	X, мм	Y, мм	I_1 , W_1-Me , A	I_2 , W_1-W_2 , A	$ U_2$, W_1-W_2 , B
	3,8	9,1	51,20	8,00	15,50
	3,4	8	51,20	8	17,50
	4	6,7	49,60	6,40	17
	4	4	49,60	6,40	20
	3,8	2,1	49,60	6,40	18

В связи с тем, что в формулах (2) и (3) фигурирует длина проводника, заменим присадочную проволоку на вольфрамовый электрод для того, чтобы произвести расчет силы Ампера при различных значениях X , Y , α , $I_{д1}$, $I_{д2}$.

В таблицах 2, 3 приведены результаты экспериментов.

Изменяя положение 2-го электрода относительно оси X от 2 до 9,5 мм, сила Ампера начинает существенно отклонять основную дугу на расстоянии 5,9 мм. При этом второй электрод отстоит от оси Y на 1,8-3,2 мм (табл. 2). Увеличив расстояние по оси X до 3,8-4 мм отклонение дуги наблюдаем с расстояния 6,7 мм по оси Y .

Ориентировочный расчет параметров показал, что при $I_{д1} = 50A$, магнитная индукция составляет 0,005 Тл

$$B = \frac{MM_o I_1}{4\pi R} (\sin \beta_1 + \cos \beta_2) = B = \frac{MM_o 50A}{4\pi 8 \cdot 10^{-3}} (\cos 30^\circ + \cos 30^\circ) = 0,005 \text{ Тл}$$

Тогда сила Ампера равна:

$$F = I_2 \cdot B \cdot l_2 \cdot \sin(\alpha) = 80 \cdot 7 \cdot 10^{-3} \cdot B \sin 60^\circ = 0,002 \text{ Н/м}$$

Изменяя параметры $I_{д1}$, $I_{д2}$, $l_{д2}$, α , двойной свободной дуги находим минимальное значение силы Ампера и положение присадочной проволоки в пространстве (ориентировочно).

2.2 Разработка схемы замещения комбинации дуг и расчет параметров схемы питания

Схема питания двойной свободной дуги с контрольными приборами приведена на рисунке 12.

В качестве источника питания используется сварочный выпрямитель Migatronіc BDH 550, который позволяет плавно регулировать величину тока. Для регулирования тока дуги $I_{д2}$ и $I_{д1}$ в сварочную цепь включены сопротивления $R1$ – РБ 200 и $R2$ – РБ 315 с дискретным регулированием сопротивлений.

Анализ действия двойной свободной дуги и расчёт её параметров проводим по схеме замещения, которую рассматриваем, как модель дуги. Схема замещения двойной свободной дуги представлена на рисунке 16, где e – источник энергии,

$R_{д1}$ – сопротивление дуги W^- - изделие⁺ в Ar, которое определяется по статической ВАХ дуги, снятой экспериментально;

R_w – сопротивление неплавящегося электрода рассчитывается по формуле (4)

$$R_w = \rho_w \frac{l_w}{S_w}, \quad (4)$$

где ρ_w – удельное электрическое сопротивление вольфрамового электрода, Ом*м/мм²,

l_w – длина вольфрамового электрода от контакта с источником питания, $l_w = 50$ мм;

S_w – сечение вольфрамового электрода, мм² ($d_w = 3$ мм);

Сопротивление присадочной проволоки считается по формуле (5)

$$R_{пп} = \rho_{пп} \frac{l_{пп}}{S_{пп}}, \quad (5)$$

где : $\rho_{пп}$ – удельное электрическое сопротивление проволоки, Ом*м/мм²,

$S_{пп}$ – сечение присадочной проволоки, мм² ($d_{пп} = 1,0$ мм);

$l_{пп}$ – длина вылета присадочной проволоки электрода, $l_{пп} = 70,0$ мм.

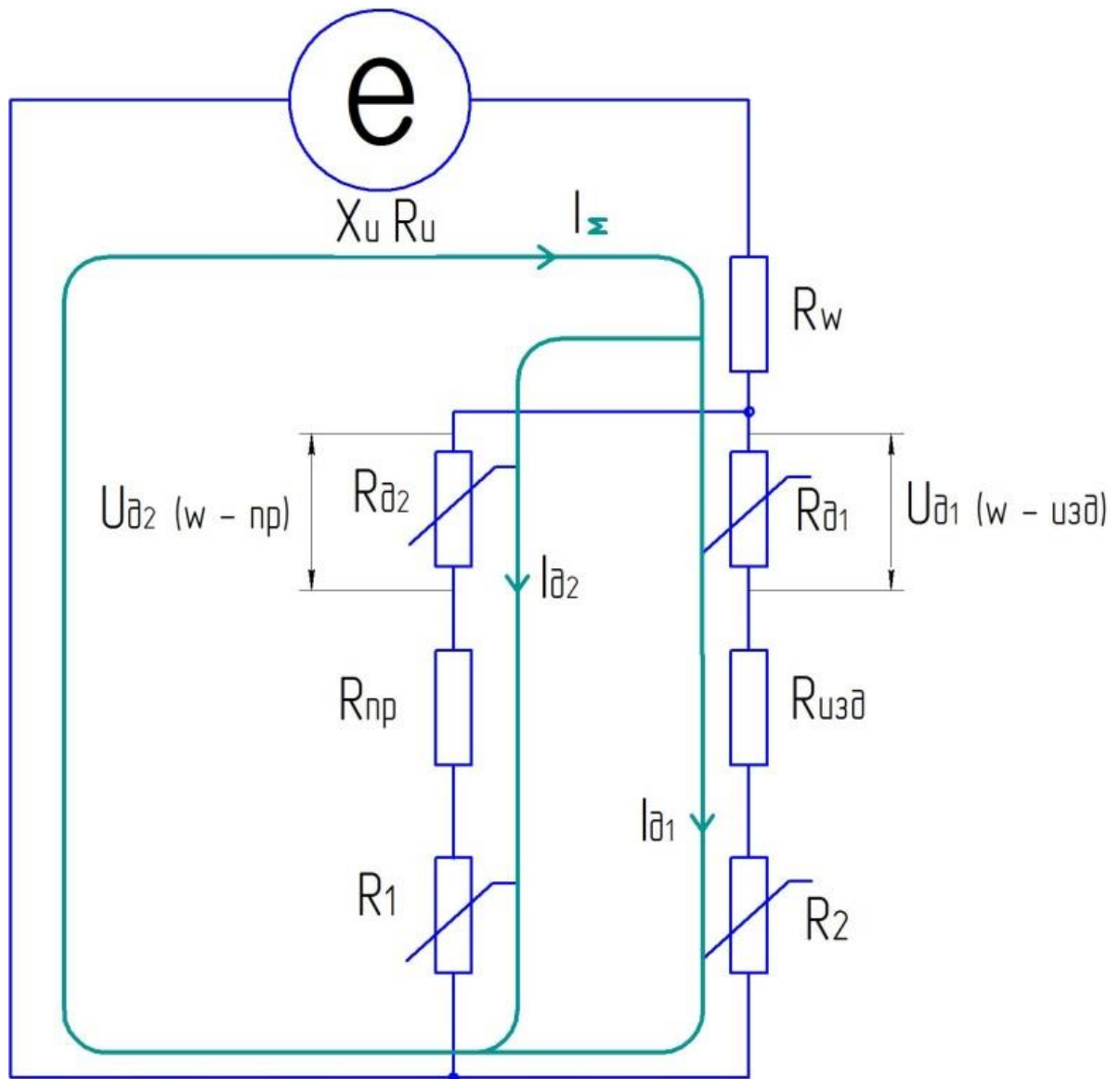


Рисунок 16 – Схема замещения свободной двойной дуги

$$R_{\text{изд}} = \rho_{\text{изд}} \frac{l_{\text{изд}}}{S_{\text{изд}}} - \text{сопротивление изделия,}$$

где $l_{\text{изд}}$ - путь тока в изделии и сечение $S_{\text{изд}}$ обозначены на рисунке 17.

R_1 - сопротивления балластного реостата РБ 200, которое регулируется в диапазоне от 0,15 до 2,5 Ома;

R_2 - сопротивления балластного реостата РБ 315, которое регулируется в диапазоне от 0,095 до 2,5 Ома.

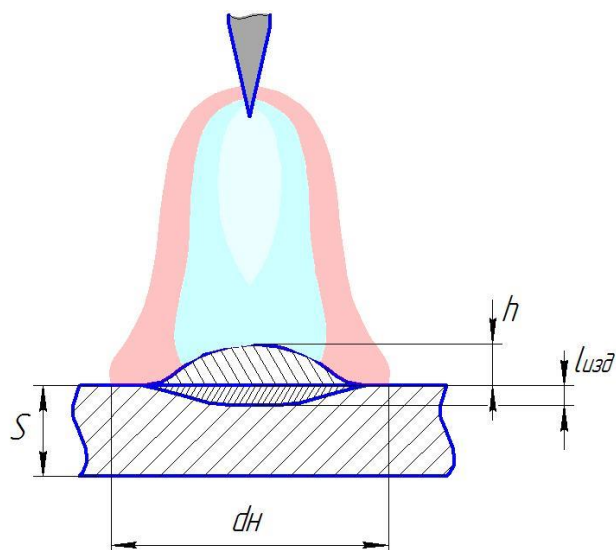


Рисунок 17 – Эскиз наплавки к расчету сопротивления изделия

Сопротивление дуги $Ст_{пр.пр.}^- - Ст^+ - R_{д1}$ определяется по статической ВАХ этой дуги. Для этого экспериментально определяется характер статической ВАХ при следующих координатах присадочной проволоки относительно основной дуги: $x = 4$ мм, $y = 6$ мм. Вид статической ВАХ дуги $W^- - Ст_{пр.}^+$ приведена на рисунке 18.

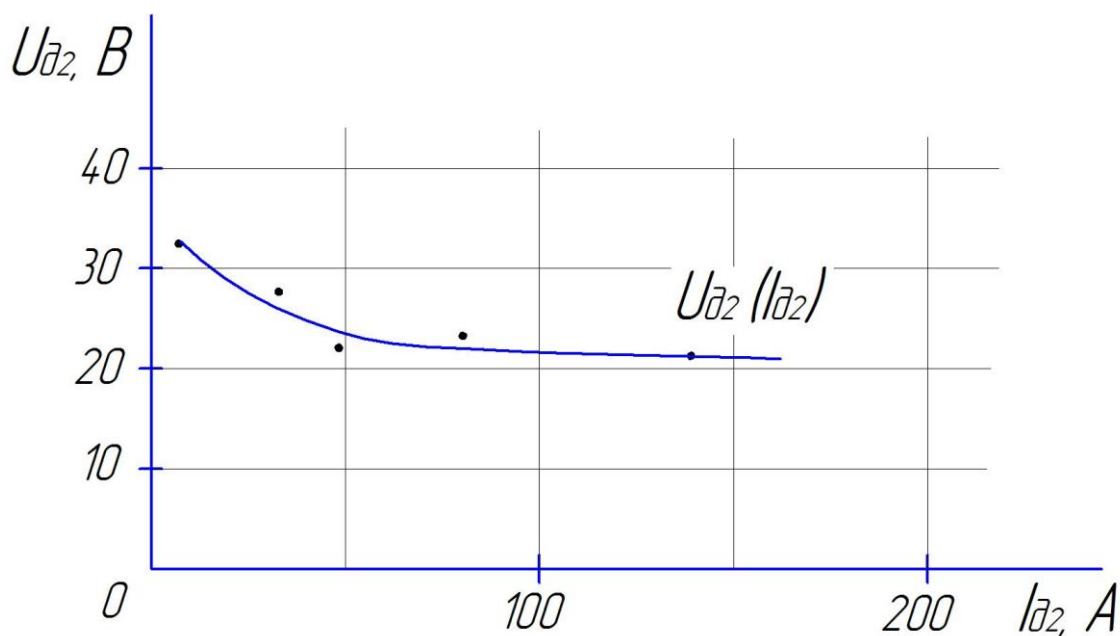


Рисунок 18 – Статическая ВАХ $W^- - Ст_{пр.}^+$ в среде аргона

Исходные данные для расчета параметров схемы питания свободной двойной дуги сведены в таблице 4.

Таблица 4 - Исходные данные для расчета параметров свободной двойной дуги

U _{xx} , В	R ₁ [*] , Ом	R ₂ [*] , Ом	R _w , Ом	R _{пр} , Ом	R _{изд} , Ом	I _{д1} , А	R _{д1} [*] , Ом	I _{д1} [*] , А	R _{д2} , Ом
80	0,15	0,095	0,005	0,015	0,015	50	0,44	4,6	6,4
	·	·	·	·	·	100	0,22	0,6	37-40
	·	·	·	·	·	200	0,1	0,25	80
	2,5	2,5	0,01	0,1	0,1				

*- I задается

Падение напряжения в цепи дуги W⁻ - изделие⁺ обозначим U_{ab}; тогда

$$U_{ab} = I_{д1}(R_{д1} + R_{изд} + R_2) = I_{д1} \sum R_1, \quad (6)$$

$$U_{ab} = I_{д2}(R_{д2} + R_{пр} + R_1) = I_{д2} \sum R_2 \quad (7)$$

Решаем совместно уравнения (1) и (2)

$I_{д1}(R_{д1} + R_{изд} + R_2) = I_{д2}(R_{д2} + R_{пр} + R_1)$, тогда

$$I_{д1} = I_{д2} \frac{(R_{д2} + R_{пр} + R_1)}{(R_{д1} + R_{изд} + R_2)}. \quad (8)$$

Ток дуги от источника питания до разветвления его обозначим $\sum I$, тогда

$$\sum I = I_{д1} + I_{д2} = \frac{U_{ab}}{\sum R_1} + \frac{U_{ab}}{\sum R_2}, \quad (9)$$

где $\sum R_1 = R_{д1} + R_{изд} + R_2$, Ом; $\sum R_2 = R_{д2} + R_{пр} + R_1$, Ом.

Исходя из уравнений 6 – 9, задаёмся значениями $I_{д1}$ и $I_{д2}$ и рассчитаем величину сопротивлений R_1 и R_2 .

Так как двойная свободная дуга применяется для наплавки, задаёмся значениями тока основной дуги от минимальной величины до максимальной величины.

Предварительные эксперименты показали, что минимальное значение тока основной дуги составляет $I_{д1} = 6,4$ А, дальнейшее снижение тока приводит к обрыву дуги ($d_w = 3$ мм, заточка под $\alpha = 45^\circ$). Однако, плавление основного металла начинается с величины тока равной ~ 40 А.

Максимальная величина тока основной дуги при $d_w = 3$ мм составляет ~ 120 А, исходя из допустимой плотности тока на вольфрам ($j_{доп\ w} = 17$ А/мм²).

Схема питания двойной свободной дуги позволяет изменять ток в дуге $Ст_{пр.пр.}^- - Ст^+$ от 8 А до 170 А при $d_{пр} = 1,2$ мм. ($j_{доп} = 150$ А/мм²) (50-150 А/мм²). Исходя из этого, определяем значения R_1 и R_2 для заданных величин $I_{д1}$ и $I_{д2}$.

Результаты расчета сводим в таблицу 5.

Таблица 5 - Расчет параметров двойной свободной дуги

№	$I_{д1}$, А	$I_{д2}$, А	$R_{д1}$, Ом	$R_{д2}$, Ом	R_1 , Ом	R_2 , Ом	Прим.
1	50	170	0,44	0,7	5	5	$I_{д1} - \min$
2	100	150	0,22	0,2	10	10	-
3	120	50	0,15	0,52	15	15	$I_{д1} - \max$

$x \approx 5$ мм, $y \approx 10$ мм (основная дуга), $y \approx 6$ мм (для дуги $Ст^- - Ст^+$ в Ar)

При расчёте учитываются условия наплавки:

- 1) минимальное проплавление основного металла ($I_{д1} - \min$);
- 2) максимальная величина высоты наплавки ($I_{д2} - \max$);
- 3) координаты присадочной проволоки относительно основной дуги $x = 5$ мм, $y = 6$ мм.

Параметры схемы питания определены для $d_{пр} = 0,8 - 1,6$ мм, $d_w = 3$ мм.

Увеличение диаметра $d_{пр.пр}$ повлечёт за собой рост тока в дуге $Ст_{пр.пр}^- - Ст^+$.

Учитывая диапазон изменения проволоки от 0,8 до 1,6мм, выбирается источник питания на 300А и регулируемые сопротивления R_2 и R_2 .

2.3 Эффективная тепловая мощность комбинации дуг

Схема питания свободной двойной дуги позволяет регулировать электрическую мощность основной дуги $P_{д1}$ ($W^- - изделие^+$) и второй дуги $P_{д2}$ $W^- - Ст^+$ (проволока).

Рассмотрим отдельно тепловую мощность $q_{д1}$ дуги $W^- - Ст$ 20^+ (изделие) в Ag и $q_{д2}$ дуги $W^- - Ст^+$ (проволока).

Тепловую мощность дуги $q_{д1}$, условно принимаем равной тепловому эквиваленту электрической энергии [39].

$$q_{д1} = \eta_u U I t \quad (5)$$

Такое предположение условно, т.к. нагрузка дуги рассматривается как чисто омическая, пульсации выпрямленного тока не учитываются.

Эффективный КПД дуги $W^- - Ст^+$ в Ag по данным авторов [27] составляет 48 – 60 % при изменении тока от 100 до 200А.

Очертания поверхности, через которую дуга вводит тепло в изделие, зависит от ряда причин, к которым относятся магнитное дутьё, отклоняющее столб дуги, расход защитной среды, углубление дуги в ванну расплавленного металла. Схема распределения теплового потока дуги по пятну нагрева показана на рисунке 19.

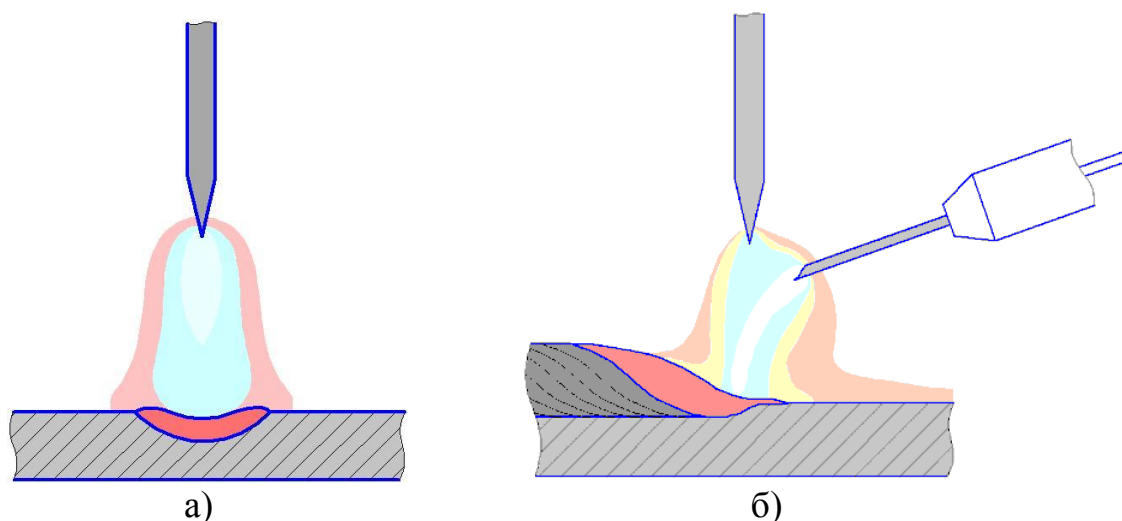


Рисунок 19 – Распределение теплового потока дуги по пятну нагрева

В зависимости от параметров дуги $W^- - Ст 20^+$ в защитной среде Ar тепловой поток на слой расплавленного металла изделия может быть более или менее мощным (рисунок 19а).

Вторая дуга $W^- - Ст^+$ (проволока) создаёт свой тепловой поток, который расходуется на плавление присадочной проволоки (рисунок 19б).

Наибольший практический интерес представляет нормально-круговой источник, удельный тепловой поток q_2 (2) которого распределён по площади круга по нормальному закону (рисунок 19а)

$$q_2(2) = q_{2m} e^{-kR^2}, \quad (10)$$

где q_{2m} – наибольший тепловой поток $Вт/см^2$, k – коэффициент сосредоточенности теплового потока ($см^{-2}$).

Наибольший тепловой поток q_{2m} можно выразить через эффективную мощность дуги и коэффициент сосредоточенности

$$q_{2m} = q_u \frac{k}{\pi}, \quad (11)$$

Коэффициент сосредоточенности k можно определить из выражения

$$d_n = \frac{3,46}{\sqrt{k}} [\text{см}], \quad (12)$$

где d_n – диаметр пятна нагрева при удельном тепловом потоке равном $0,05q_{2m}$.

$$\sqrt{k} \approx \frac{3.46}{d'_n}. \quad (13)$$

Широкие возможности комбинации свободных дуг за счет большого количества параметров, которые регулируются отдельно, позволяют управлять тепловыми потоками дуг W^- - Ст 20⁺ (изделие), W^- - проволока⁺ и влиять на размеры расплавления основного металла и размеры наплавки (рисунок 20).

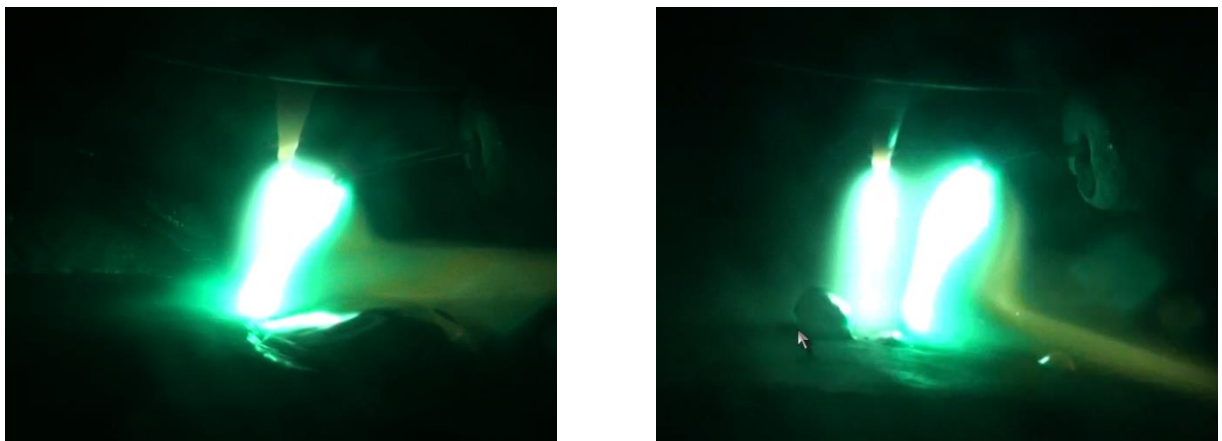
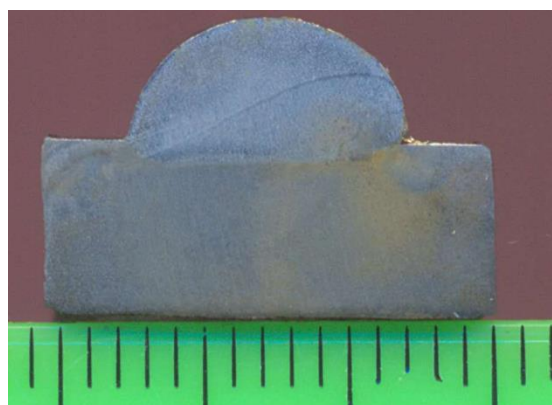


Рисунок 20 – Распределение теплового потока дуги по пятну нагрева для различных соотношений токов дуги W -Ст(изделие), W -Ст(проволока)

Предварительные эксперименты подтвердили сделанные предположения и показали, что у этого способа есть возможность регулировать тепловые потоки Q_1 и Q_2 , устанавливая соотношения между которыми можно задавать соотношение между долями расплавленного основного металла и наплавленного металла (рисунок 21).



а



б

Рисунок 21 – Макроструктура наплавки ($I_{д2} = 150A$): а - $I_{д1} = 25A$; б - $I_{д1} = 75A$

Анализ распределения электрической мощности основной дуги $P_{д1}$ (W^- - изделие $^+$) и второй дуги $P_{д2}$ W^- - Ст $^+$ (проволока). а также распределение теплового потока дуги по пятну нагрева для различных соотношений токов дуги W -Ст(изделие), W -Ст(проволока) позволяет описать тепловой баланс двойной свободной дуги. Схема баланса представлена на рисунке 21.

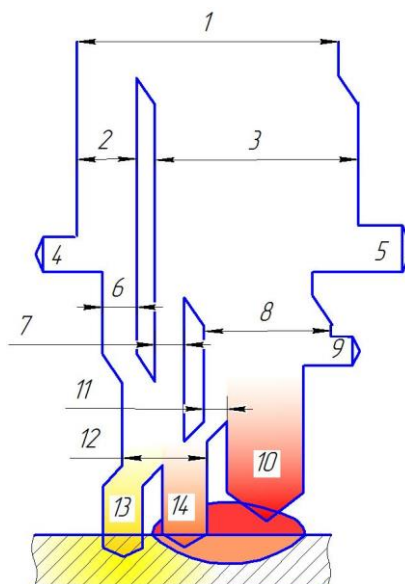


Рисунок 22 – Тепловой баланс комбинации свободных дуг: 1 – тепловая мощность комбинации дуг, 2 - $P_{д1}$, 3 - $P_{д2}$, 4 и 5 – потери мощности дуг на излучение, 9 – потери тепла с разбрызгиванием наплавляемого металла, 10 – мощность на расплавление наплавляемого металла, 12 – мощность, передаваемая основному металлу, 13 – мощность на разогрев детали, 14 – мощность на плавление основного металла.

3 Разработка методики исследований

3.1. Условия проведения эксперимента

Объектом проведения исследования является изготовительная и восстановительная термическая наплавка, при которой определяются параметры, обозначенные на рисунке 23.

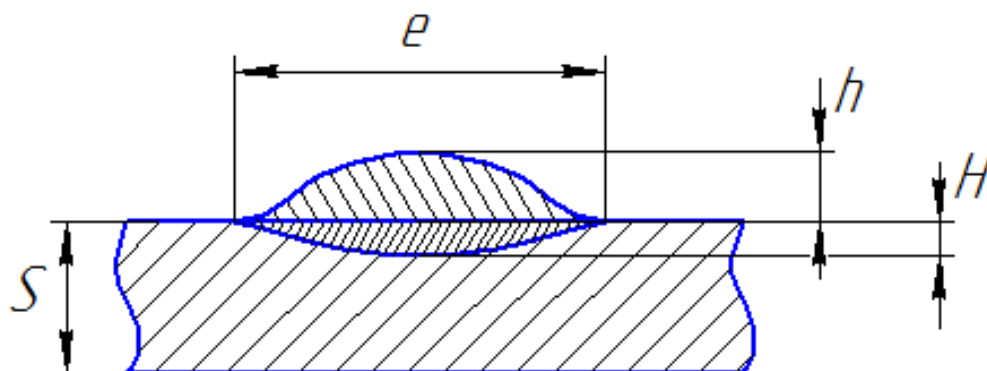


Рисунок 23 – Геометрические характеристики наплавки: e - ширина валика, h – высота наплавки, H - глубина проплавления, S - толщина металла

В работе исследуются два варианта наплавки, которые обусловлены разными значениями доли участия металла основы в металле наплавки (таблица 6)

Таблица 6 - Варианты наплавки

Доля осн. мет.	Область применения	Толщина основного металла, мм	$I_{w-д}$	$I_{w-пров}$
Min	Наплавка тонких слоёв на тонкие материалы	≤ 2	min	min
	Наплавка толстых слоёв на толстый и тонкий металл	≥ 2	min	max
Заданная	Наплавка металла отличного по хим. составу от основного для получения заданного Ф	≥ 2	требуемый	max

Исследования проводятся как на плоских, так и на цилиндрических деталях.

3.2 Материалы для наплавки

Для наплавки применяются проволоки сплошного сечения.

«Известно, что для механизированной электродуговой наплавки применяется стальная наплавочная проволока сплошного сечения по ГОСТ 10543-82. Стандартом предусмотрен выпуск проволоки из углеродистой стали 9 марок, легированной стали 11 марок и высоколегированной стали 11 марок» [26].

«Для механизированной наплавки применяют также стальную сварочную проволоку по ГОСТ 2246–70. Обычно для наплавки в защитных газах используют проволоку диаметром 0,8 – 2,2 мм.

Углеродистые наплавочные проволоки (Нп-30, Нп-40, Нп-50 и т. д.) применяются в основном для восстановления размеров изношенных деталей. Для наплавки инструмента горячего деформирования металла используют проволоки Нп-45Х4ВЗФ, Нп-45Х2В8Т, Нп-60ХЗВ10Ф. Проволоки Нп-40ХЗГ2М и Нп-40ХЗГ2МФ рекомендуются для наплавки деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания с ударами. Для антикоррозионной наплавки рекомендуются проволоки Св-08Х19Н10Г2Б, Св-04Х19Н11МЗ, Св-07Х25Н13, Св-10Х16Н25АМ6» [27].

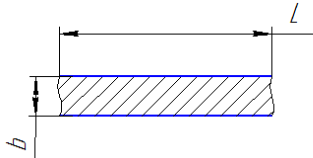
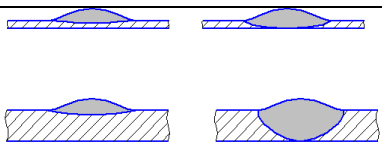
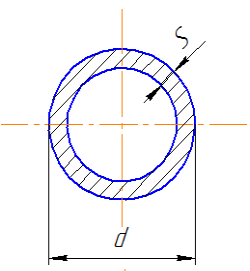
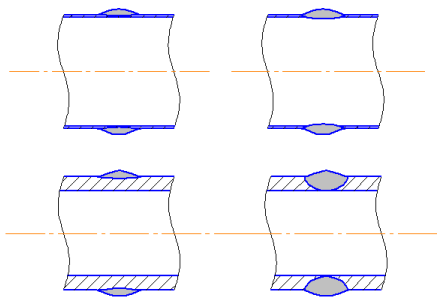
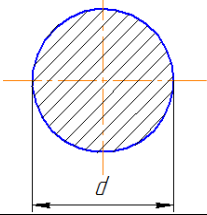
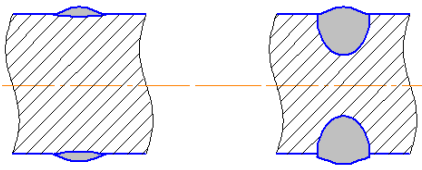
Большая номенклатура и разнообразие условий работы наплавленных деталей привели к тому, что для наплавки в настоящее время используется большое количество сталей и сплавов различных композиций.

Конкретный выбор наплавленного металла определяется условиями работы наплавленной детали и уточняется на основе лабораторных и производственных испытаний.

В случае восстановительной наплавки приходится иметь дело с различными составами основного металла. Для обеспечения минимальных напряжений и деформаций и предотвращения трещин и отколов

наплавленного металла решающее значение имеет рациональный выбор сочетания основного и наплавленного металла. Как правило, при наплавке на углеродистые стали, содержащие более 0,3 % С, требуется предварительный подогрев. Его необходимость зависит также от сочетания основного и наплавленного металла и размеров и формы наплавляемой детали. Вызывает затруднения наплавка высоколегированных инструментальных, штамповых сталей и сплавов. При их наплавке применяют предварительный и сопутствующий подогрев и термическую обработку после наплавки. В процессе исследований в качестве основного металла используются Сталь 20, Ст3 и проволока сплошного сечения Нп-50. Плоские образцы толщиной 2мм и 10мм изготовлены размером 200 х 400мм. В качестве цилиндрических деталей использовалась труба диаметром 159мм с толщиной стенок $S = 1,5-10$ мм. Эскизы наплавки приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Эскизы наплавки на плоские и цилиндрические детали

№ п/п	Материал, эскиз	Размер, мм	S, d мм	d пр, мм	Доля основного металла
1	Ст 3 	400*200 400*200	2,0 - 10	0,8, 1,2	
2	Ст 20 	159 мм L=200 мм	1,5- 8,0	0,8, 1,2	
3		L=150	5- 20	0,8 1,2	

3.3 Разработка экспериментальных установок для наплавки комбинацией дуг и выбор оборудования

Наплавка цилиндрических образцов производилась на экспериментальном стенде с автоматическим вращением трубы и подачей присадочной проволоки. Горелка с неплавящимся электродом – неподвижна. Схема поста приведена на рисунке 24.

Для наплавки выбран источник питания постоянного тока MIGATRONIC BDH 550 в комплекте с аппаратом EUROTRONIC MIG MAG i puls k, в состав которого входит механизм подачи проволоки и блок управления.

Источник питания MIGATRONIC BDH 550

Напряжение питающей сети, В	380
Частота питающей сети, Гц	50 - 60
Напряжение вторичное Х.Х, В.....	80
Номинальный максимальный первичный ток,.....	550
Номинальный максимальный вторичный ток,.....	500
Продолжительность работы при номинальном токе, ПВ%	40
Пределы регулирования тока сварки, А	15 -550
Регулирование величины тока	плавное
Внешняя вольтамперная характеристика	падающая
Охлаждение источника	воздушное
Коэффициент полезного действия, %	50
Коэффициент мощности (cos φ)	0,5
Масса источника, кг	50

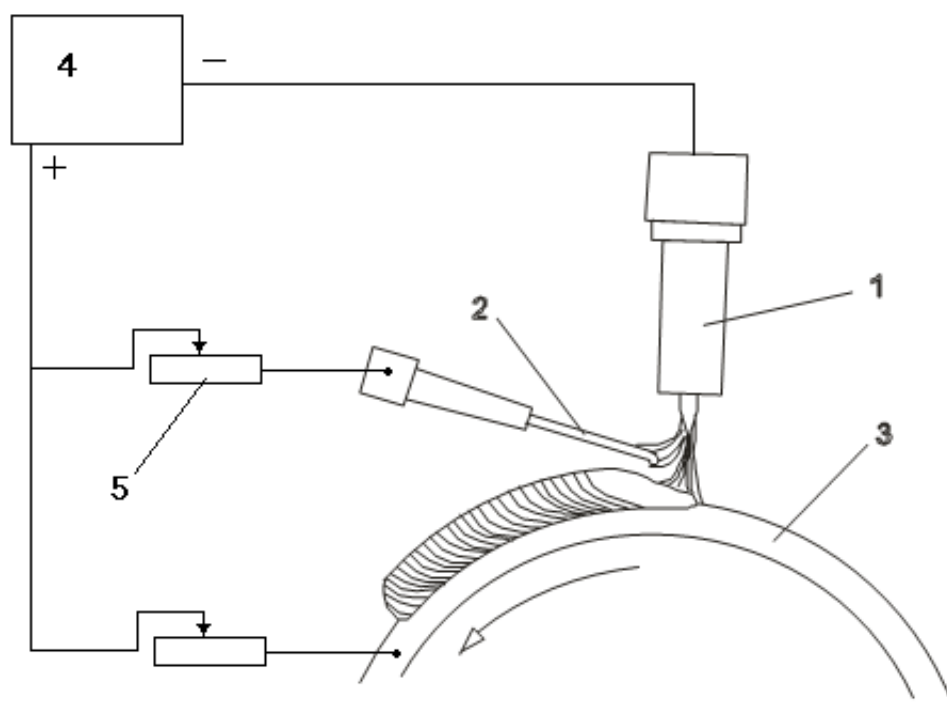


Рисунок 24 – Схема питания двойной свободной дугой при сварке цилиндрических деталей: 1-горелка , 2 присадочная проволока, 3 цилиндрическое изделие, 4- источник питания, 5- балластный реостат.

Блок подачи сварочной проволоки аппарата EUROTRONIC MIG MAG i puls
k

Диапазон толщин проволоки, мм.....0,8 – 2,5

Скорость подачи, м/мин.....1,0 - 15

Для работы схемы питания двойной свободной дугой использовались балластные реостаты R1 и R2.

Балластные реостаты РБ-302 У2

Предел регулирования тока, А.....6 – 316

Сопротивление, Ом.....0,096 – 5,5

Регулирование сопротивления.....дискретное

В качестве горелки с неплавящимся электродом применена горелка для ручной аргонодуговой сварки TIG 200 4m

Аргонно-дуговая горелка TIG 200 4m

Ток AC($\approx$).....ПВ 100% 75/87,5А,
Ток DC(=)..... ПВ 100% 110/126А,
Охлаждение.....воздушное/ жидкостное
Диаметр электрода.....1 – 3,2мм

Наплавка на цилиндрические образцы (трубы) производилась на экспериментальном стенде с вращателем. В работе использовался колебательный механизм, который специально разработан и изготовлен на базе шагового двигателя FL42STH и программируемого блока управления двигателем SMSd – 1.5K (Рисунок 25).



Рисунок 25 – Колебательный механизм.

Колебательный механизм

Амплитуда колебаний горелки, мм.....	0 - 35
Частота колебаний, Гц.....	0.1 - 4

Вращатель OERLICON DFM 100

Диапазон диаметров трубы, мм.....	10 - 300
Диапазон скоростей вращения, об/мин.....	0.2 - 25

Наплавка плоских образцов производилась на экспериментальном стенде с механическим прижатием образцов и с автоматическим перемещением горелки. Предусмотрена автоматическая подача проволоки и колебательный механизм, схема которого представлена на рисунке 26.

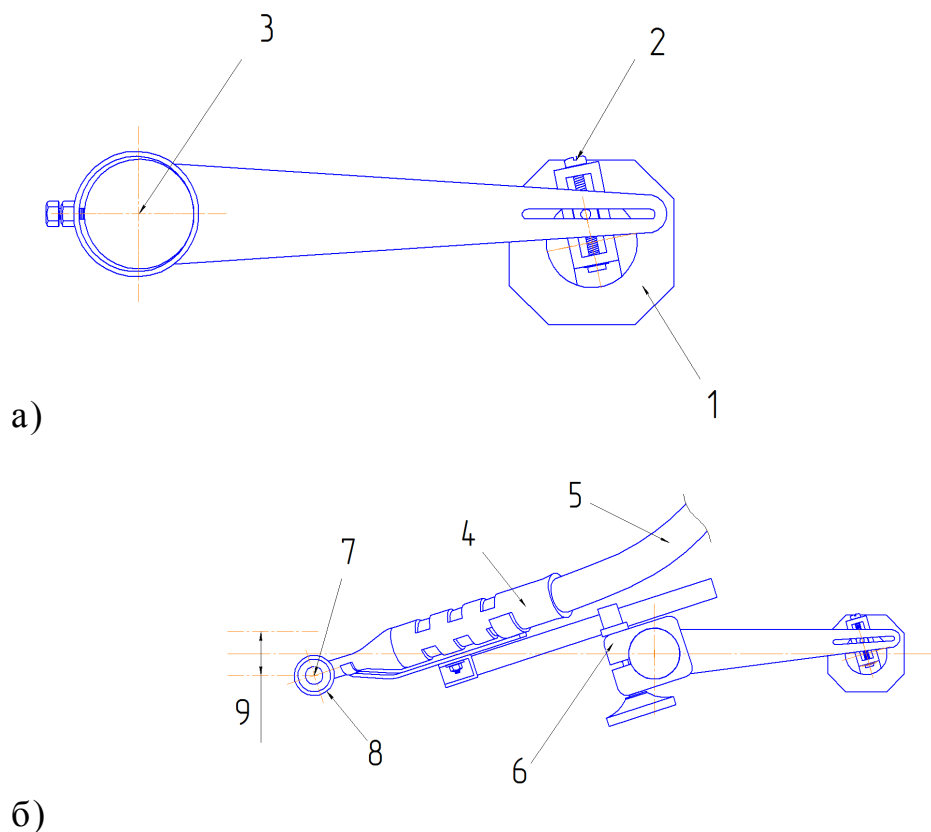


Рисунок 26 – Колебательный механизм а) 1- шаговый двигатель, 2- винт регулировки амплитуды, 3-ось вращения горелки; б) 4 – ручная аргонодуговая горелка, 5- рукав горелки, 6 – держатель горелки, 7- электрод, 8-сопло, 9-амплитуда колебания горелки(электрода).

Схема поста для сварки плоских образцов приведена на рисунке 27.

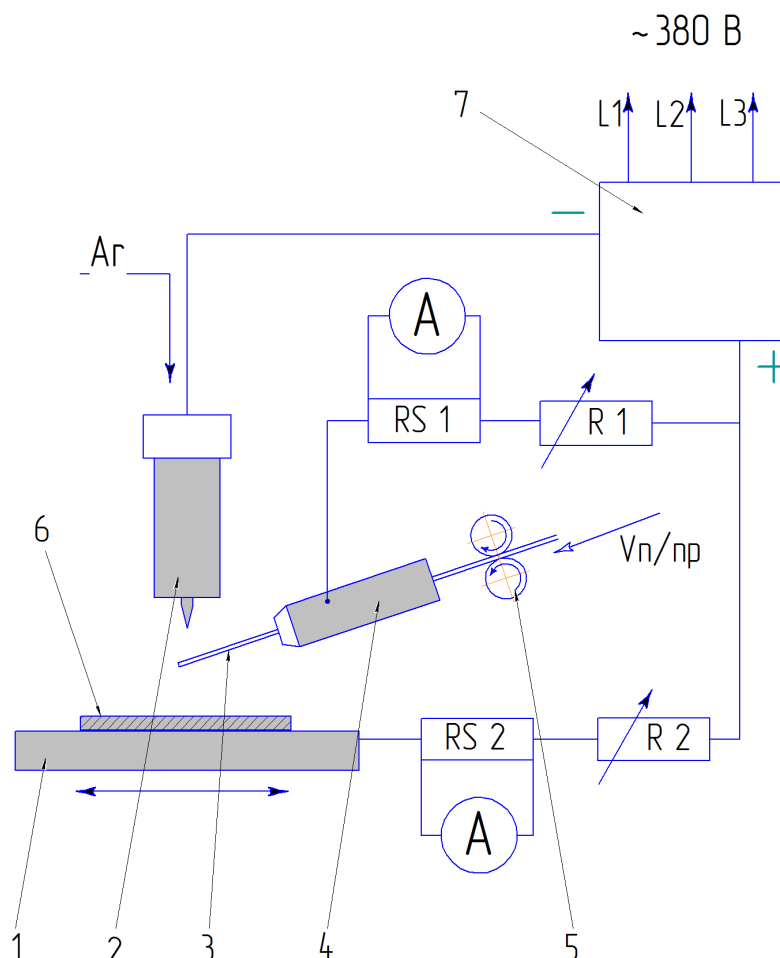


Рисунок 27 - Схема питания комбинации дуг при сварке плоских деталей: 1 – перемещающаяся каретка; 2 – аргонодуговая горелка; 3- присадочная проволока; 4- горелка для полуавтоматической сварки; 5 – подающий механизм; 6 – образец для наплавки

3.4 Контроль электрических и неэлектрических параметров

Контроль энергетических параметров наплавки $I_{д1}$, $I_{д2}$, $U_{д1}$, $U_{д2}$ производится приборами системы класса точности 1,5, осциллографом С-55 класса точности 2,5, регистратором EN 6010–1 BeeTech 820 класса точности 2,5.

Для измерения расхода защитного газа применяются ротаметры РМ 004 класса точности 2,5.

Измерения геометрических параметров наплавки производится мерительным инструментом.

Неэлектрические параметры, такие как длина дуги W -деталь, W -проволока измеряются с помощью кинокамеры (рисунок 28).

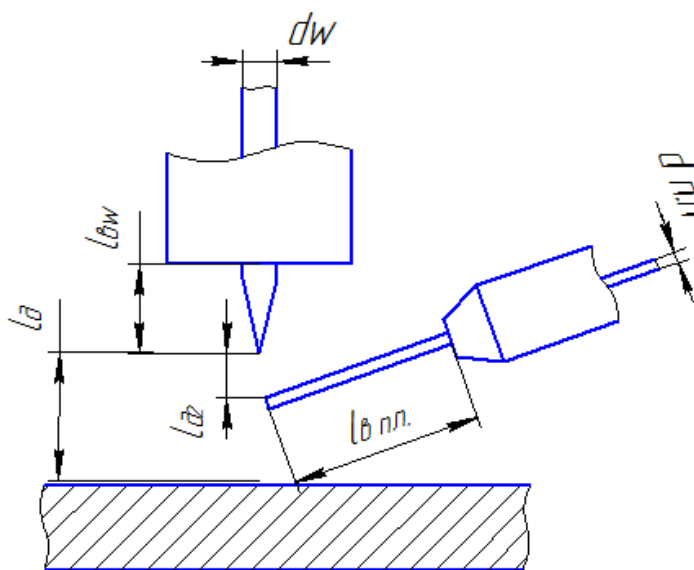


Рисунок 28 - Схема измерения неэлектрических параметров при наплавке двойной сводной дугой

Диаметр неплавящегося электрода, диаметр присадочной проволоки измеряются штангенциркулем с погрешностью 0,05 мм.

3.5 Контроль свойств наплавленного металла (исследование механических, химических свойств и металлография)

Для определения рабочих свойств наплавки проводятся исследования механических свойств и структуры металла.

Наплавляемый металл при наплавке смешивается с металлом основы, поэтому проводится анализ химсостава, по которому можно судить о значении ψ_0 и о рабочих свойствах наплавки.

3.6 Материалы образцов

Для проведения исследований использовались образцы из Стали 20 толщиной 1,5 – 8 мм.

Контроль химического состава материала образцов проводили с помощью оптико-эмиссионного спектроанализатора Foundry Master (Германия) (рисунок 29).



Рисунок 29 – Оптико-эмиссионный спектроанализатор Foundry Master

Результаты контроля химического состава сводятся в таблицы 8, 9, 10.

Таблица 8 – Форма таблицы для результатов химического анализа основного металла (изделия)

Нормативный документ	Содержание элементов, %									Марка по составу (ГОСТ 14959-79)
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	Основа	-
ГОСТ 14959-79	-	-	-	-	-	-	-	-	Основа	-

Таблица 9 – Форма таблицы для результатов химического анализа наплавляемого металла (наплавочной проволоки)

Нормативный документ	Содержание элементов, %									Марка по составу (ГОСТ 10543-82)
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	Основа	-
ГОСТ 14959-79	-	-	-	-	-	-	-	-	Основа	-

Таблица 10 – Форма таблицы для результатов химического анализа наплавленного металла (металла валика)

Содержание элементов, %								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
-	-	-	-	-	-	-	-	Основа
-	-	-	-	-	-	-	-	Основа

3.7 Оборудование и методы проведения испытаний и исследований

Подготовку образцов для исследований осуществляли с помощью отрезного станка Discotom-6 (Дания); шлифовально-полировального станка TegraPol-11 + TegraForce-1 + TegraDoser-5 (Дания).

Механические испытания проводили с помощью следующего оборудования: на твердость - стационарный твердомер по Роквеллу ТН300 (рисунок 30) (Китай); на растяжение – универсальная испытательная машина: Н50КТ (Англия) с максимальным усилием 50 кН.



Рисунок 30 –стационарный твердомер TH300

Исследование распределения твердости по Виккерсу осуществляли с помощью Скрэтч-тестера Nanovea (США) (рисунок 31).



Рисунок 31 – скрэтч-тестер Nanovea

Металлографические исследования проводили с помощью микроскопов Axiovert 40 MAT и Stemi 2000 фирмы Carl Zeiss (Германия), оснащенной высокопроизводительной системой анализа металлографических изображений Thixomet PRO (рисунок 32).

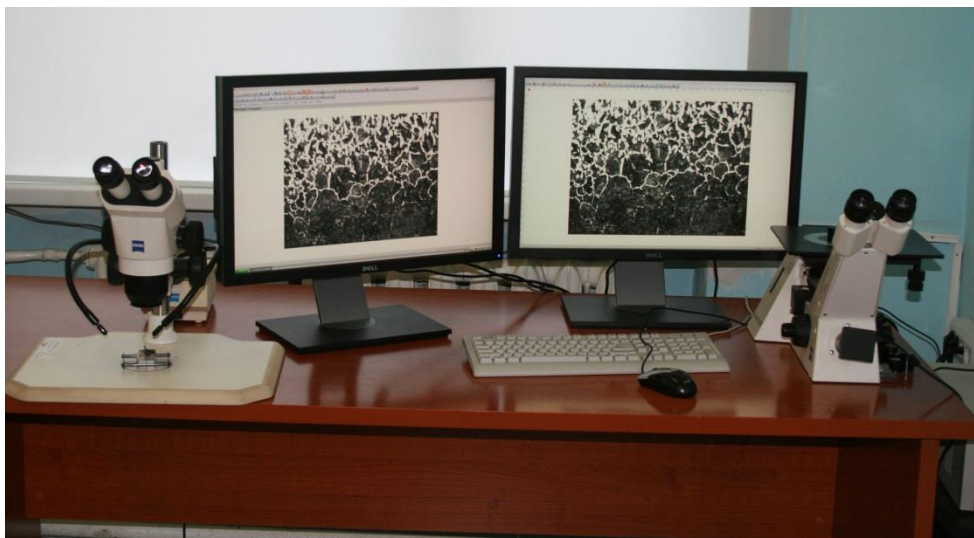


Рисунок 32 – Металлографические микроскопы Stemi 2000 и Axiovert 40 MAT

Оборудование и методы, использованные при проведении испытаний и исследований, приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Оборудование и методы испытаний и исследований

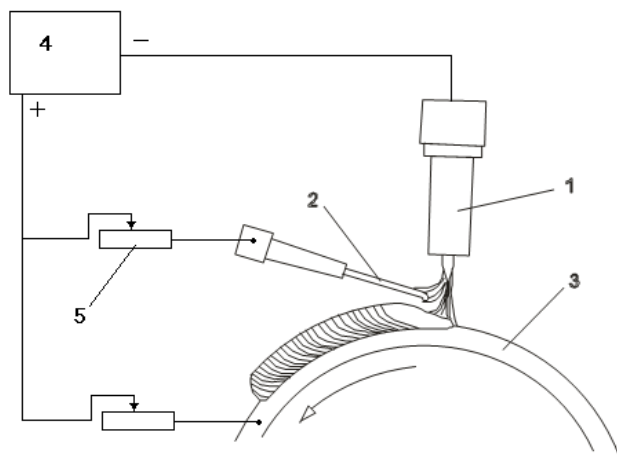
№ п/п	Наименование показателя	Метод	Оборудование
1	2	3	4
1.	Химический состав	Фотоэлектрический спектральный по ГОСТ 18895-97	Спектрометр оптико- эмиссионный Foundry-Master фирмы World Wide Analytical Systems AG (Германия)
2.	Твердость	Классический по ГОСТ 9013-59	Стационарный измеритель твердости по Роквеллу ТН300 (по шкале HRC)
3.	Макроструктура	Металлографический	Axiovert 40 MAT ф. Carl Zeiss
4.	Микроструктура	Металлографический	Stemi 2000 ф. Carl Zeiss

4 Исследование технологии наплавки и свойств наплавленного металла

4.1 Наплавка без поперечных колебаний горелки

При выполнении наплавки вольфрамовый электрод располагали впереди по отношению к направлению наплавки, а плавящийся электрод подавали под углом 35° к поверхности образца (рисунок 33). В этом положении зоны нагрева основного металла и переноса наплавляемого металла движутся в одной плоскости, поэтому влияние эффекта отклонения дуг минимально.

«Как и в большинстве случаев, при формировании сварочной ванны наплавляемый металл затекает под электрод, дуга прямого действия горит на переднюю часть ванны. Вследствие того, что анодная зона дуги прямого действия находится на поверхности сварочной ванны, сосредоточенность теплового действия дуги не оказывает значительного влияния на характер плавления основного металла» [29].



а)



б)

Рисунок 33 – Схема процесса: 1– горелка TIG, 2 – сварочная проволока, 3 – основной металл, балластное сопротивление; б) – фотография процесса

В проведенных опытах по наплавке [28,29] использовали сварочную проволоку Св-08Г2С $d = 1,0$ мм при наплавке на трубу толщиной 6 мм из стали 20. Получить равномерное формирование валика удалось при

мелкокапельном переносе при токах дуги косвенного действия 150-160 А, а скорость ее плавления составляла 9,67 см/с. Скорость сварки была 0,263 см/с.

«Мелкокапельный перенос более стабилен, чем крупнокапельный и не приводил к замыканию проволоки на сварочную ванну. Но температура капель, достигающих поверхности сварочной ванны при таком переносе может достигать 2000°С и выше [30]. Дальнейшее увеличение интенсивности плавления проволоки данного диаметра (с повышением производительности наплавки) приводит к излишнему перегреву сварочной ванны, а также к увеличению проплавления основного металла и разбрызгивания, что, в совокупности, приводит к увеличению доли основного металла в наплавленном валике. Поэтому в некоторых случаях следует избегать значительного воздействия иных источников теплоты (кроме перегретого присадочного металла)» [29].

Исходя из результатов предыдущих опытов с использованием той же проволоки, скорость её плавления во всех опытах не изменяли (0,1 м/с при токе 150 А). Коэффициент расплавления проволоки на данном режиме 14,7 г/(Ач). Результаты опытов и расчетов приведены в таблицах 12 и 13.

Таблица 11 – Данные режимов наплавки

№ опыта	I _п , А	U _п , В	I _д , А	U _д , В	Ψ _п , %	V п/п, см/с	V н, см/с
1	160	16	0	6	4,8	9,67	0,263
2	157	18	27	10	8,7	9,67	0,263
3	152	18	49	11	9,4	9,67	0,263
4	150	18	75	12	2	9,67	0,263

Напряжение дуги косвенного действия на 4-6 вольт больше, чем дуги прямого действия. Это можно объяснить тем, что дуга косвенного действия имела большую длину, анодное пятно имеет меньший размер на проволоке и также влиянием падения напряжения на вылете электрода.

Таблица 12 – Результаты измерений и расчетов

№ опыта	$F_H, \text{мм}^2$	$H, \text{мм}$	$B, \text{мм}$	$F_O, \text{мм}^2$	$\Psi_O, \%$	$F_{ш}, \text{мм}^2$	$\alpha_P, \text{г/Ач}$	$\alpha_H, \text{г/Ач}$
1	27,48	0,81	5,07	2,86	9,4	30,34	13,32	12,68
2	26,34	0,97	5,1	3,36	11,3	29,7	13,57	12,93
3	26,14	1,16	4,47	6,11	19	32,25	14,2	12,7
4	28,3	0,61	3,38	5,3	15,8	33,6	14,2	13,93

С изменением тока на дуге прямого действия от 0 до 75 А, при незначительном уменьшении глубины проплавления, увеличилась ширина сплавления и доля участия основного металла (с 9,5 % до 16,6%) (рисунок 34), что вызвано увеличением проплавления основного металла. При этом площадь сечения наплавленного металла остается почти неизменной.

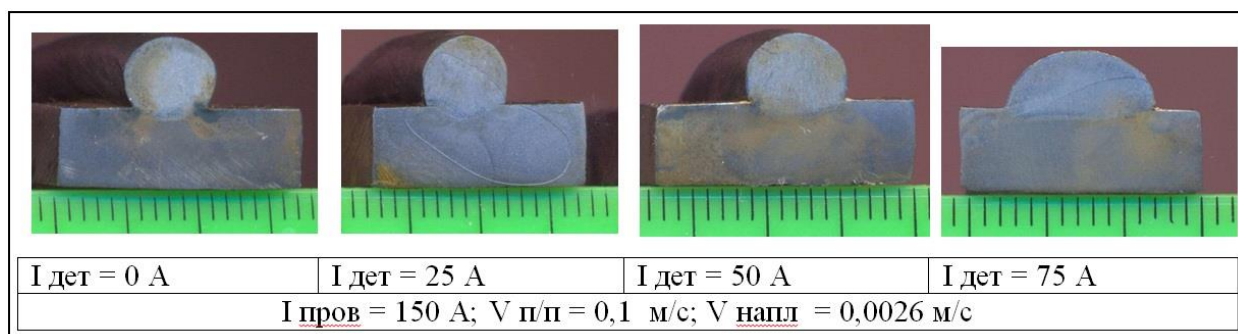


Рисунок 34 – Зависимость параметров валика от тока на дуге электрод-деталь

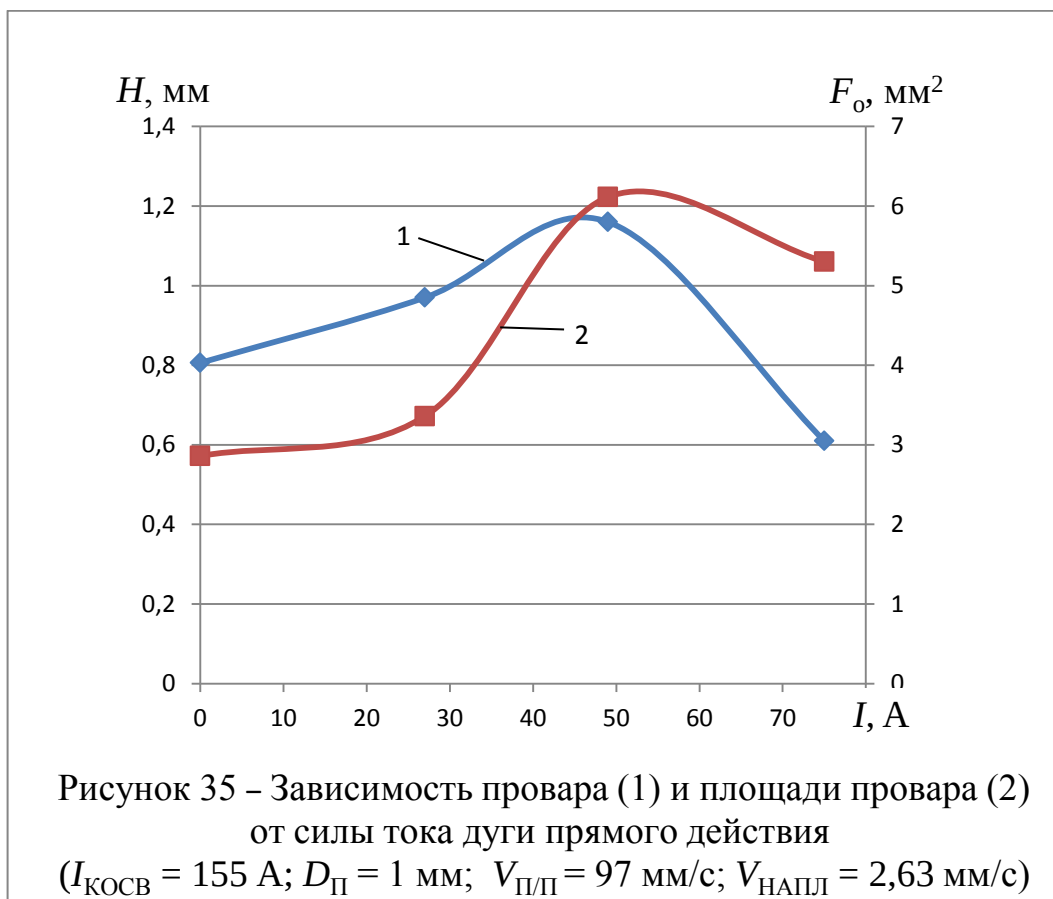
На малых токах дуги поперечное сечение валика наплавленного металла имеет форму близкую к форме круга. Поэтому ширина валика больше ширины проплавления основного металла на его поверхности. Не наблюдается растекания электродного металла по поверхности основного, так как мощности дуги недостаточно для расплавления основного металла. «Несмотря на то, что доля участия основного металла в металле шва в этом случае минимальна, такой валик сложно использовать при наплавке больших поверхностей. С увеличением тока дуги прямого действия до 75 А ширина валика и ширина расплавления основного металла становятся одинаковыми.

При этом доля участия основного металла в металле шва составила

около 20%» [29].

Коэффициент потерь электродного металла в первых двух опытах составил около 5%.

Зависимость глубины провара и площади поперечного сечения проплавления от силы тока дуги прямого действия представлена на рисунке 35.



С увеличением скорости наплавки при постоянном токе дуги прямого действия, параметры валика изменяются пропорционально (рисунок 36).

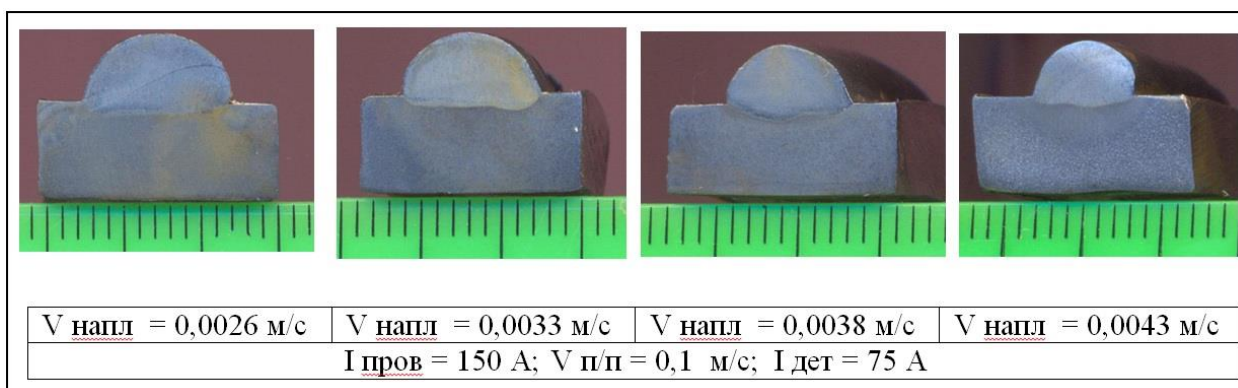


Рисунок 36 – Зависимость параметров валика от скорости наплавки

Результаты опытов и расчетов приведены в таблицах 12, 13.

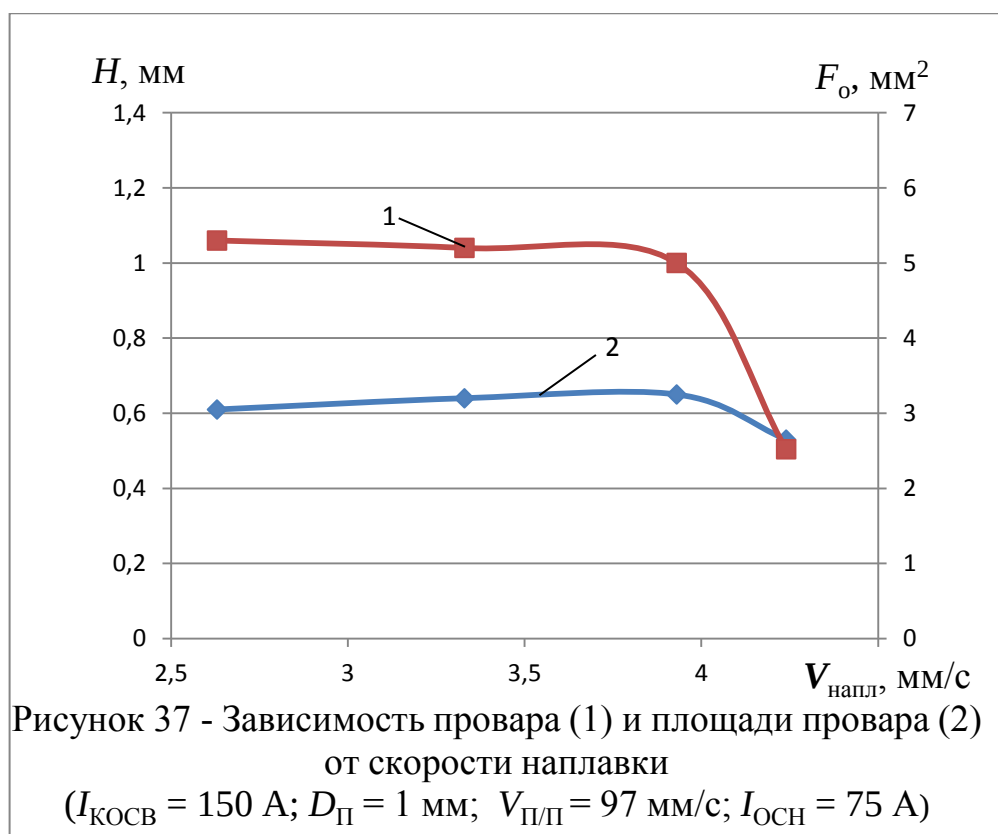
Таблица 12 – Параметры процесса при изменении скорости наплавки

№ опыта	$I_{П}$, А	$U_{П}$, В	$I_{Д}$, А	$U_{Д,В}$	$\Psi_{П}$, %	$V_{п/п}$, см/с	$V_{н}$, см/с
1	150	18	75	12	2	9,67	0,263
2	150	18	75	13	2,6	9,67	0,333
3	150	18	75	13	-1,7	9,67	0,393
4	152	19	75	13	9,7	9,67	0,424

Таблица 13 – Результаты измерений и расчетов для скорости наплавки

№ опыта	$F_{Н}$, мм ²	H , мм	B , мм	$F_{О}$, мм ²	$\Psi_{О}$, %	$F_{Ш}$, мм ²	$\alpha_{Р}$, г/Ач	$\alpha_{Н}$, г/Ач
1	28,3	0,61	3,74	5,3	15,8	33,6	14,2	13,93
2	22,2	0,64	3,38	5,2	19	27,4	14,2	13,84
3	19,65	0,65	3,41	5,0	20,3	24,65	14,2	14,45
4	16,16	0,53	6,62	2,52	13,5	18,68	14,02	12,66

Зависимость параметров проплава от скорости наплавки представлены на рисунке 37.



«Снижаются как площадь сечения наплавленного металла, так и основного. При этом ширина валика остается равной ширине расплавления основного металла.

Из этого следует, что при данной толщине основного металла, с изменением скорости наплавки, температура ванны и скорость теплоотвода от неё в рамках этих режимов менялась незначительно.

При наплавке на основной металл с меньшей толщиной стенки влияние скорости наплавки увеличивается. Для получения валиков такого же качества на тонкостенной основе следует снижать ток на основной дуге, вплоть до отключения изделия из сварочной цепи.

Критическая толщина основного металла при данных режимах плавления проволоки и скорости наплавки 4 мм/с составила 2 мм (изделие отключено от цепи). Дальнейшее снижение толщины и скорости наплавки приводит к сквозному проплавлению и провисанию металла ванны» [31] (рисунок 38).



Рисунок 38 – Сквозное проплавление при наплавке на сталь толщиной 1,5 мм

4.2 Наплавка с поперечными колебаниями горелки

«Однако, с помощью некоторых известных приёмов можно значительно снизить температуру сварочной ванны. С увеличением расстояния между горелкой (парой проволока-электрод) и деталью, снижается температура капель наплавляемого металла, достигающих сварочной ванны. Так же снижается тепловое воздействие дуги проволока-электрод на ванну, степень которого, при токе на проволоке выше 100 А (вследствие возникновения магнитного дутья, отклоняющего газовый поток дуги в направлении подачи проволоки), достигает высоких значений (рисунок 39). Поперечные колебания горелки увеличивают теплоотвод от сварочной ванны. С применением таких приёмов удалось получить равномерный по длине валик с минимальным проплавлением на толщине основы 1,5 мм» [31] (рисунок 40).



Рисунок 39 – Плавление электродной проволоки в отсутствии детали.

$$d_{\text{пров}} = 1,0 \text{ мм}; I_{\text{п}} = 160 \text{ А}; V_{\text{п/п}} = 0,2 \text{ м/с}$$

«При наплавке по данной схеме (рисунок 33а) перенос присадочного металла происходит не по нормали к поверхности основы, а с отклонением в сторону подачи проволоки. Угол отклонения увеличивается с повышением интенсивности плавления проволоки и уменьшается с повышением мощности дуги на изделие. Это отклонение может создать трудности наплавки при увеличении расстояния между горелкой и деталью, и может быть компенсировано наклоном горелки и сопла подвода проволоки в сторону движения наплавки» [31].

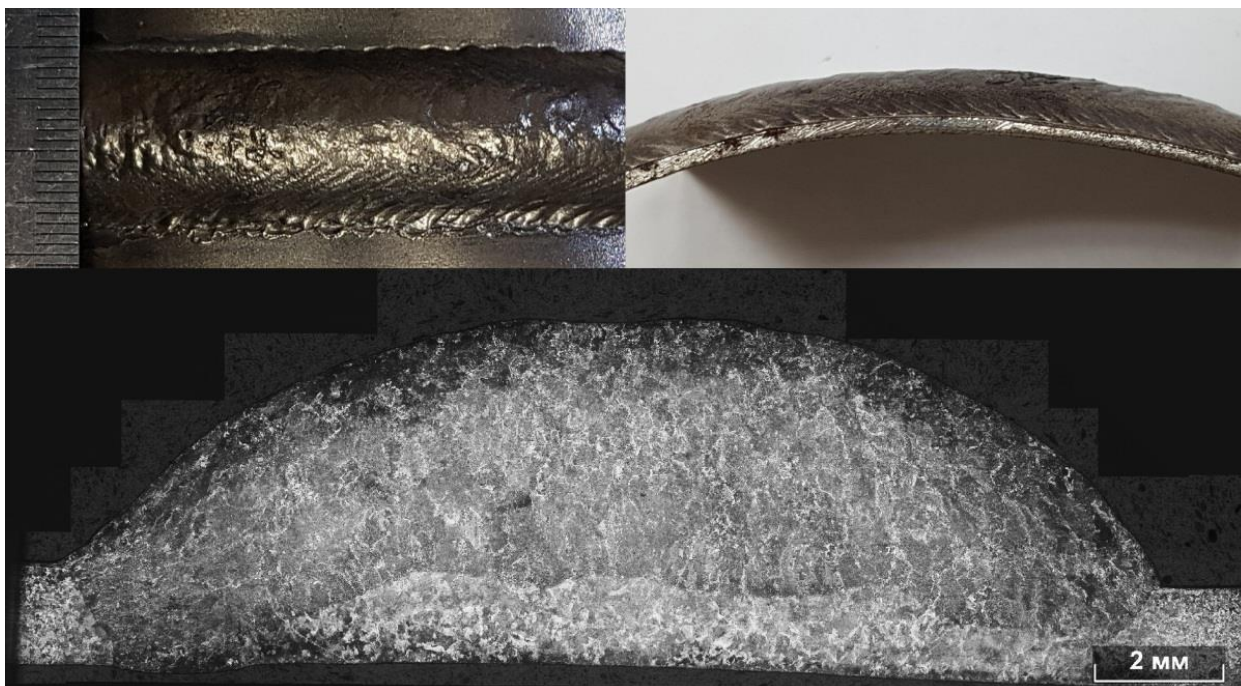


Рисунок 40 – Наплавка валика, выполненная с поперечными колебаниями горелки

«По результатам описанных опытов видно, что используя проволоку одного диаметра можно получить качественную наплавку на различных толщинах основного металла. Это говорит о высокой гибкости процесса. Однако для каждого диаметра проволоки существуют свои параметры плавления, при которых достигается желаемый перенос металла с наименьшим перегревом. Поэтому, для различных требований производительности наплавки, желательно подбирать наиболее подходящий диаметр проволоки» [31].

4.3 Механические свойства образцов наплавки

Для осуществления поперечных колебаний был изготовлен механизм на базе шагового двигателя FL42STH и программируемого блока управления двигателем SMSd – 1.5K. Диапазон регулирования частоты колебаний 0.1 – 4 Гц. Диапазон регулирования амплитуды колебаний 0 – 35 мм.

На образце №1 наплавки, выполненной с поперечными колебаниями горелки, на трубу с толщиной стенки 1,5 мм и образце №2 наплавки, выполненной без поперечных колебаний на трубу с толщиной 6 мм, были проведены испытания на микротвёрдость по методу Виккерса.

Измерения твёрдости проводились по двум горизонтальным прямым, соответствующим зонам основного и наплавленного металлов, расположенным вдоль линии сплавления и по центральной вертикальной линии (рисунки 41 и 43).

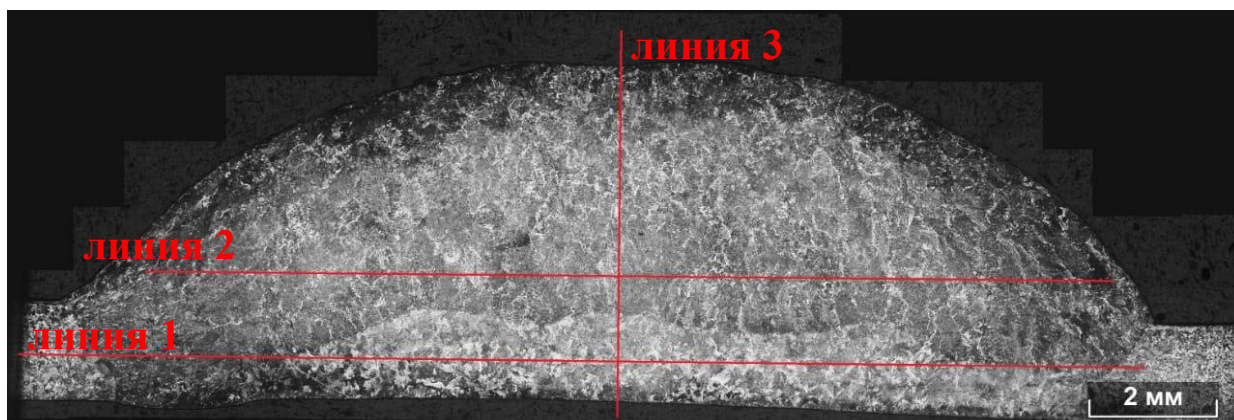


Рисунок 41 – Макрошлиф образца №1

Измерения велись с шагом 1 мм по горизонтальным линиям и с шагом 0,5 мм по вертикальной с началом отсчёта координат в точке пересечения поверхности образца с соответствующей прямой. Результаты испытаний приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Результаты испытаний образца №1 на микротвёрдость

Линия 1		Линия 2		Линия 3	
Расстояние, мм	Твёрдость, HV _{0.2}	Расстояние, мм	Твёрдость, HV _{0.2}	Расстояние, мм	Твёрдость, HV _{0.2}
0,3	135	0,3	199	0,3	209
1,3	148	1,3	181	0,8	211
2,3	175	2,3	186	1,3	209
3,3	166	3,3	193	1,8	199
4,3	150	4,3	208	2,3	219
5,3	158	5,3	217	2,8	210
6,3	178	6,3	206	3,3	187
7,3	151	7,3	213	3,8	166
8,3	178	8,3	218	4,3	142
9,3	153	9,3	213	4,8	147
10,3	162	10,3	183	5,3	148
11,3	172	11,3	198		
12,3	155	12,3	183		
13,3	175	13,3	186		
14,3	184	14,3	184		
15,3	194	15,3	177		
16,3	167	16,3	182		
17,3	178				
18,3	139				
19,3	140				
20,3	133				
21,3	117				

На первой линии среднее значение микротвердости HV 155 единиц, а размах варьирования $R = 194 - 117 = 78$ единиц HV. Получается, что размах варьирования составляет половину от средней твердости. На второй линии средняя твердость выше и составляет 170 единиц, а размах варьирования $R = 218 - 177 = 41$ единица HV, что примерно равно четверти среднего значения. Таким образом, твердость наплавленного шва выше, чем у основного металла, а размах варьирования твердости уменьшился в 2 раза. Это подтверждается измерением твердости по осевой линии шва. Среднее значение твердости 186 единиц при размахе варьирования $R = 219 - 142 = 77$ единиц. Получили четкую тенденцию снижения твердости по мере углубления от поверхности шва к основному металлу.

На рисунке 42 результаты измерения твёрдости представлены в виде графика пространственного распределения по образцу №1.

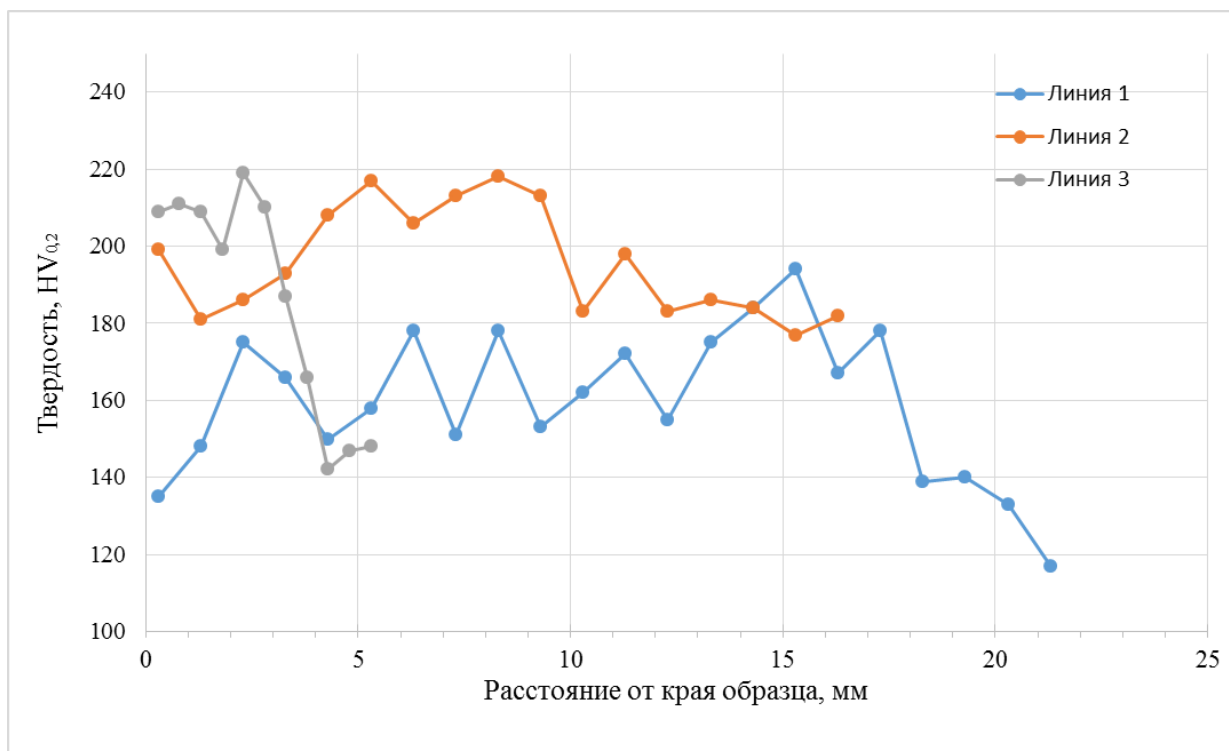


Рисунок 42 – График распределения твёрдости в металле образца №1

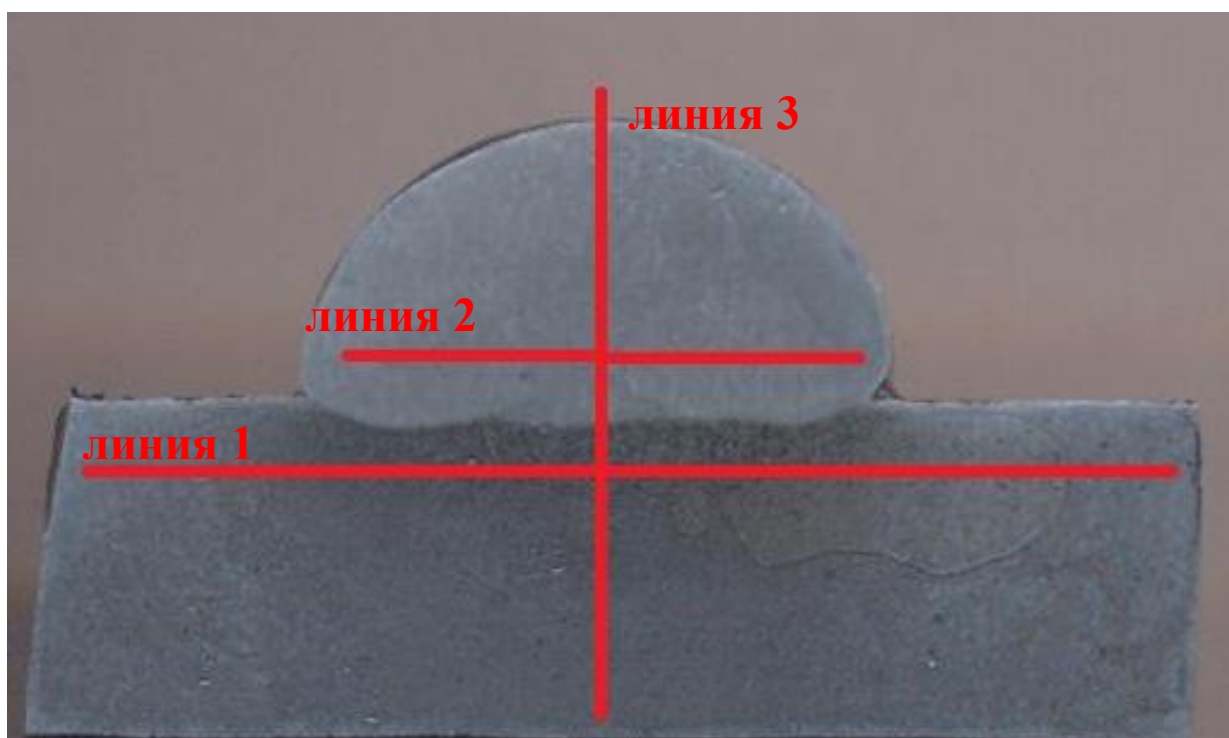


Рисунок 43 – Макрошлиф образца №2 с указанием линий замеров

Таблица 15 – Результаты испытаний образца №2 на микротвёрдость

Линия 1		Линия 2		Линия 3	
Расстояние, мм	Твёрдость, HV _{0.2}	Расстояние, мм	Твёрдость, HV _{0.2}	Расстояние, мм	Твёрдость, HV _{0.2}
0,3	224	0,3	240	0,3	233
1,3	208	1,3	237	0,8	237
2,3	199	2,3	227	1,3	246
3,3	196	3,3	248	1,8	233
4,3	193	4,3	235	2,3	241
5,3	204	5,3	234	2,8	248
6,3	199	6,3	220	3,3	240
7,3	196	7,3	241	3,8	245
8,3	201	8,3	235	4,3	230
9,3	214	9,3	230	4,8	230
10,3	193	10,3	224	5,3	225
11,3	206			5,8	220
12,3	202			6,3	212
13,3	210			6,8	209
14,3	204			7,3	204
15,3	195			7,8	199
16,3	199			8,3	202
17,3	206			8,8	207
18,3	230			9,3	205
19,3	230			9,8	200
				10,3	201
				10,8	195

Для шва, полученного без поперечных колебаний на первой линии (основной металл) среднее значение микротвердости HV 205 единиц, а размах варьирования $R = 248 - 220 = 28$ единиц HV, то есть уменьшился в шве по сравнению с основным металлом. Получается, что размах варьирования составляет около 14 % от средней твердости. На второй линии (шов) средняя твердость выше и составляет 215 единиц, что на 10 единиц больше, чем для основного металла, а размах варьирования $R = 218 - 177 = 41$ единица HV, что примерно равно 20% среднего значения. Таким образом, твердость наплавленного шва выше, чем у основного металла, а размах варьирования примерно на одном уровне. Это подтверждается измерением твердости по осевой линии шва. Среднее значение твердости 221 единиц при размахе варьирования $R = 246 - 195 = 51$ единица. Размах варьирования составляет 23% от средней твердости. Получили, как и для наплавки с колебаниями, четкую

тенденцию снижения твердости по мере углубления от поверхности шва к основному металлу.

Размах колебаний в данном образце меньше, чем в предыдущем, при общем повышении микротвердости.

На рисунке 44 – результаты измерения твёрдости представлены в виде графика пространственного распределения по образцу №2.

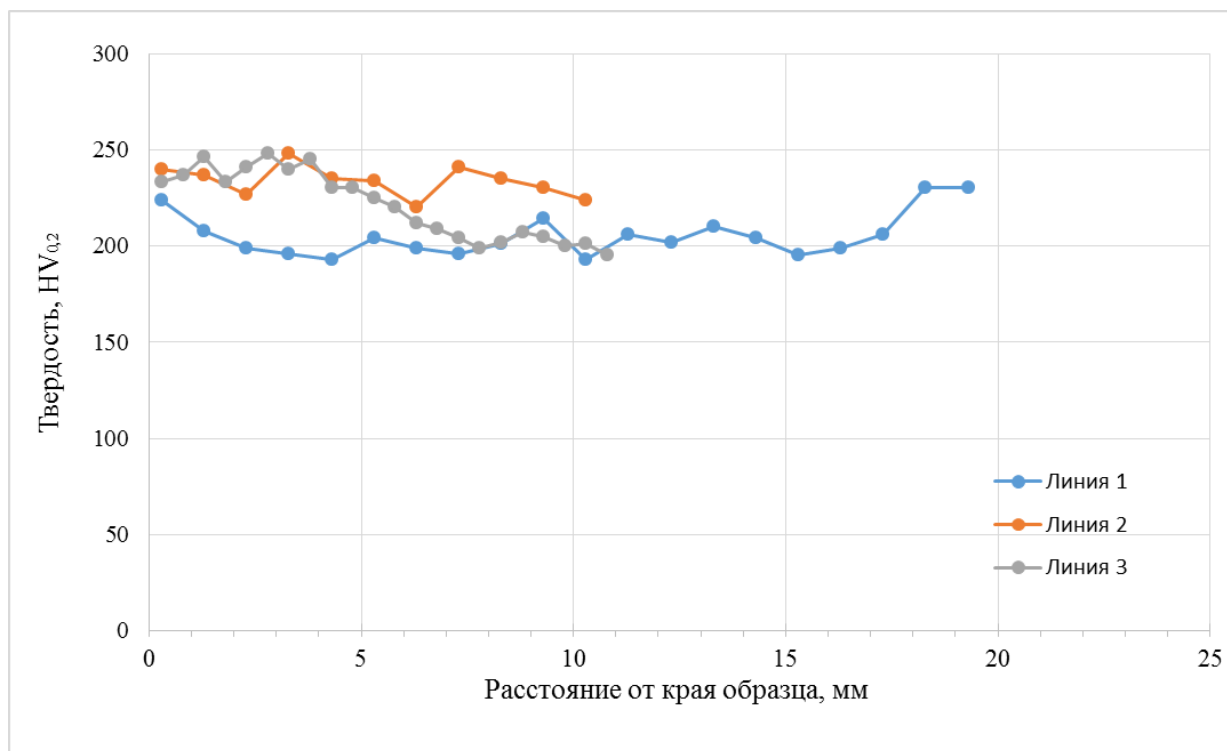


Рисунок 44 – График распределения твёрдости в металле образца №2.

4.4 Исследование химического состава наплавляемых валиков

На образцах №1 и №2 так же был проведен химический анализ методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии. Измерения проводились по горизонтальным линиям, соответствующим зонам основного и наплавленного металла вдоль линии сплавления с шагом 2 мм. На рисунках 45 и 46 изображены макрошлифы образцов №1 и №2 соответственно с указанием точек замеров содержания химических элементов. Пример отчетов, выдаваемых прибором для одной из точек замера, представлен на рисунке 47.

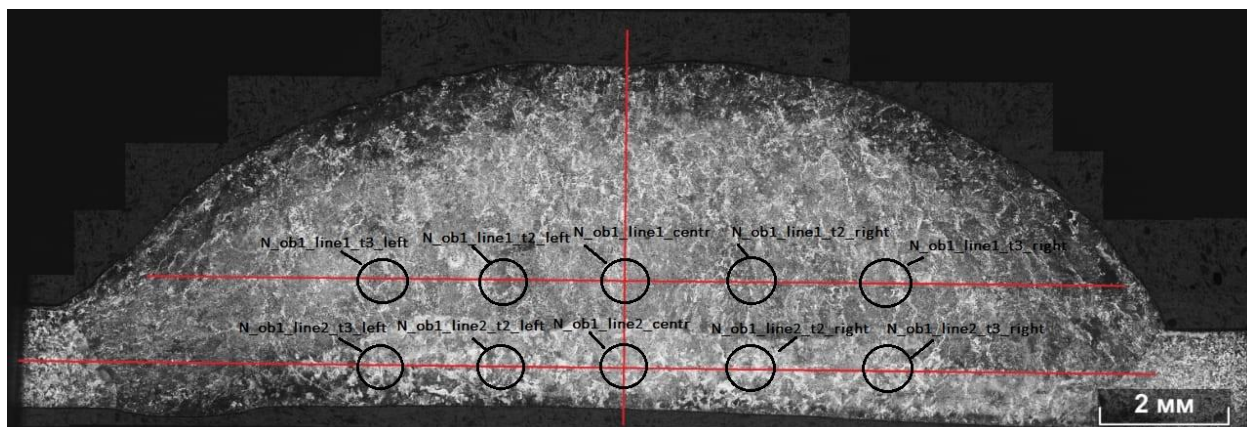


Рисунок 45 – Макрошлиф образца №1 с указанием точек замеров

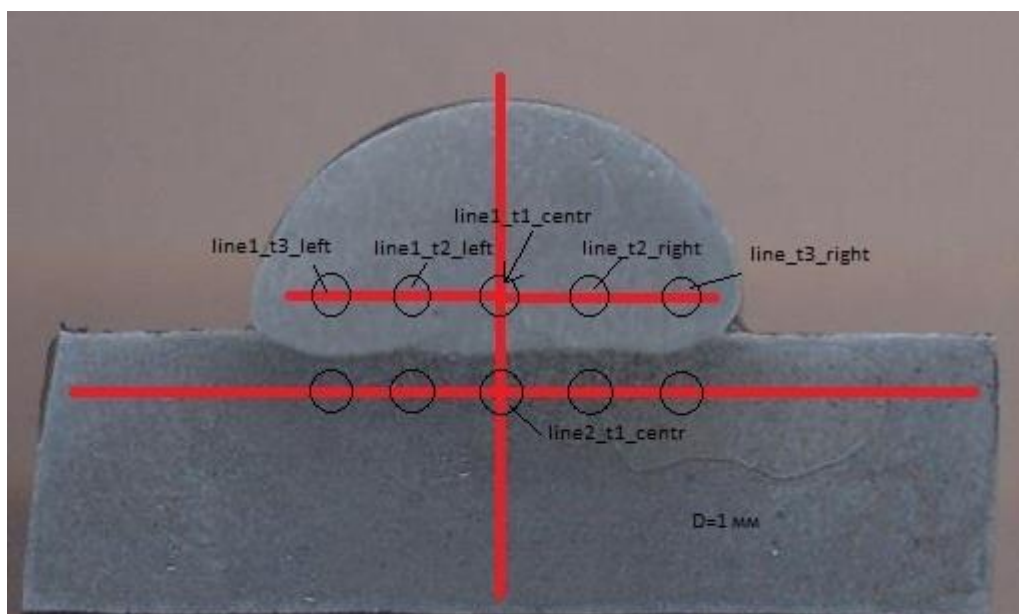


Рисунок 46 – Макрошлиф образца №2 с указанием точек замеров

Анализировалось распределение содержания не всех, а только легирующих проволокой марганца и кремния, а также меди, являющейся примесью, но количественно ее содержание было на третьем месте.

Результаты анализа по содержанию марганца, кремния и меди представлены в таблицах 16 и 17. Нумерация точек замеров слева направо.

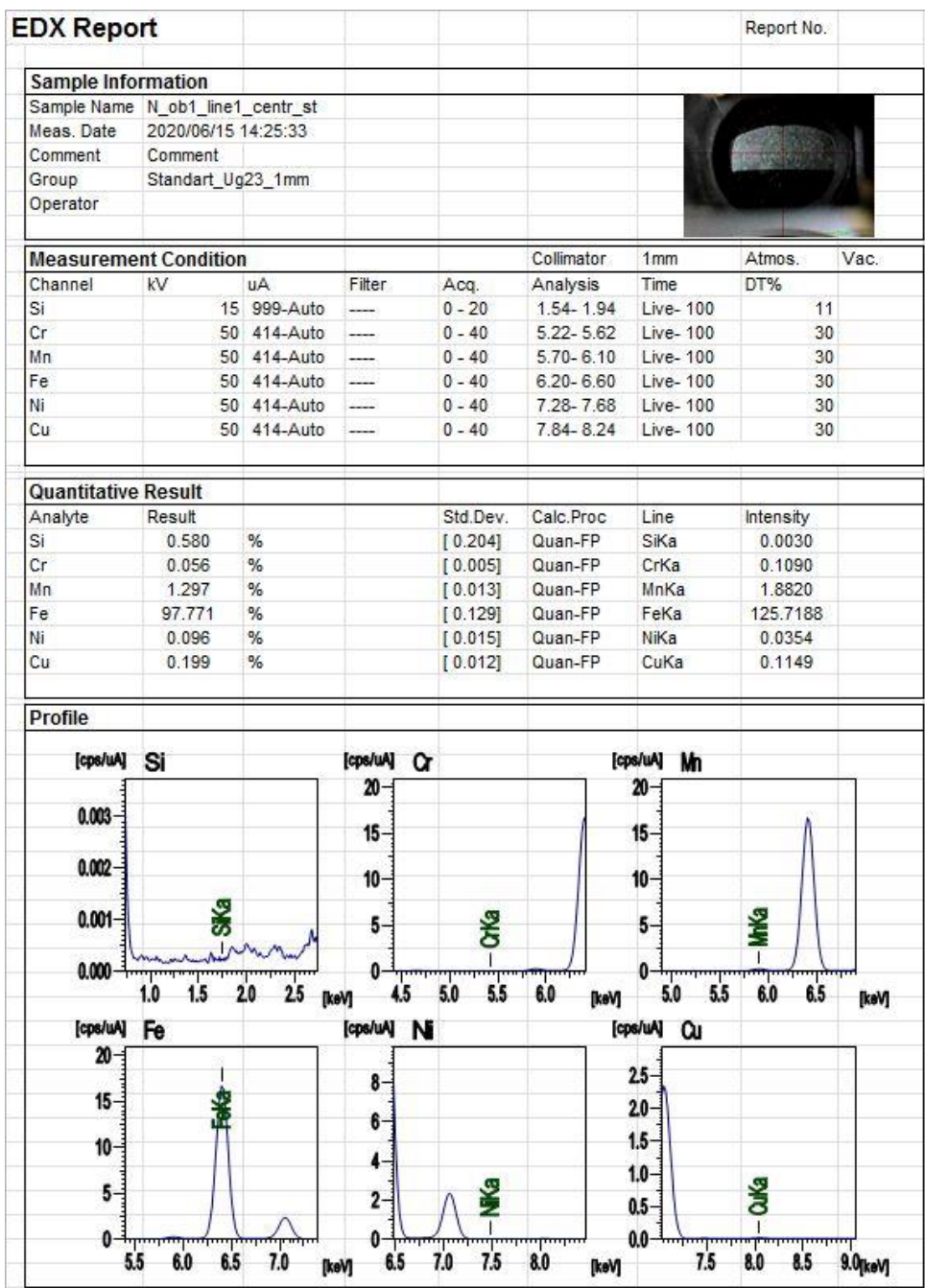


Рисунок 47 – Пример отчета с прибора

Таблица 16 – Результаты химического анализа образца №1 (наплавка с колебаниями)

№ точки	Металл шва			Основной металл		
	Mn, %	Si, %	Cu, %	Mn, %	Si, %	Cu, %
1	1.323	0.499	0.213	0.697	0.409	0,098
2	1.303	0.587	0.215	0.462	0.315	0,041
3	1.297	0.580	0.199	0.454	0.404	0,059
4	1.295	0.720	0.213	0.469	0.305	0,042
5	1.205	0.493	0.187	0.484	0.377	0,046

Таблица 17 – Результаты химического анализа образца №2 (наплавка без колебаний)

№ точки	Металл шва			Основной металл		
	Mn, %	Si, %	Cu, %	Mn, %	Si, %	Cu, %
1	1.415	0.664	0.208	0.525	0.416	0.179
2	1.430	0.563	0.233	0.532	0.368	0.177
3	1.407	0.498	0.237	0.518	0.419	0.175
4	1.428	0.711	0.241	0.521	0.353	0.180
5	1.427	0.641	0.237	0.532	0.434	0.178

Сравнительное изображение среднего содержания химических элементов для обоих образцов приведено на рисунке 48 в виде диаграммы.

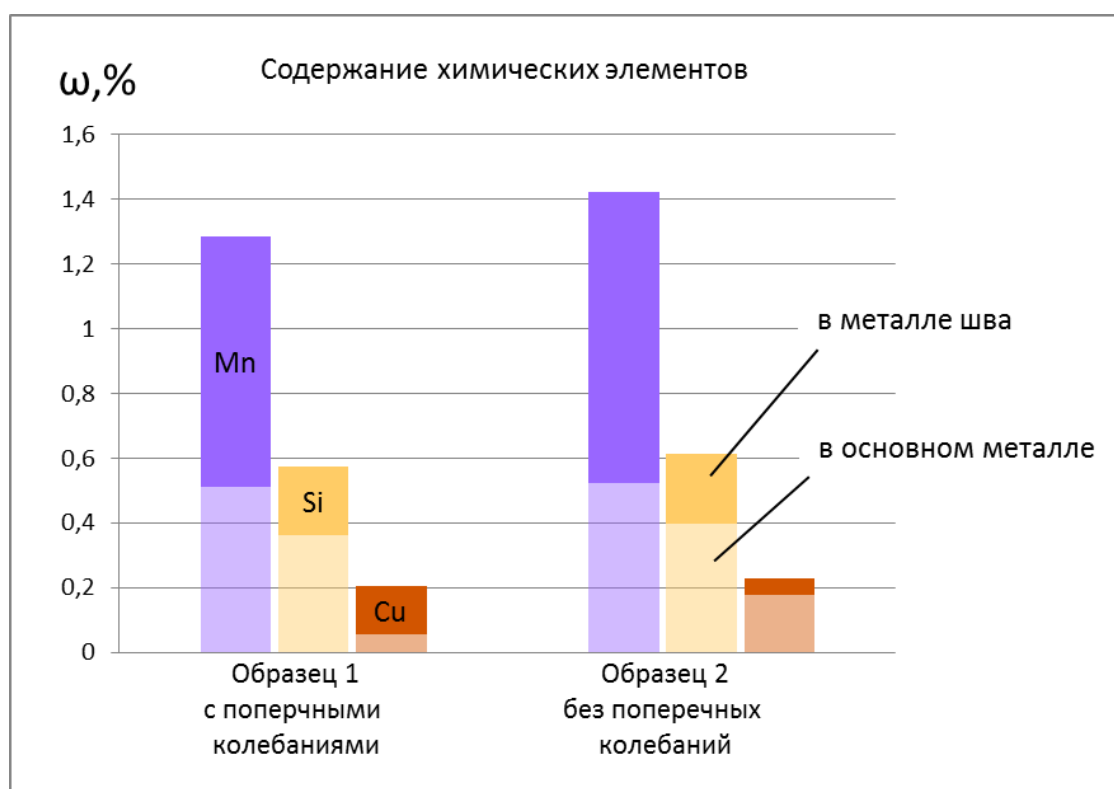


Рисунок 48 – Диаграмма содержания химических элементов в образцах №1 и №2.

Для дальнейшего использования данных по химическому анализу образцов наплавки, представляется целесообразным проверить результаты химического анализа на наличие грубых погрешностей измерения с использованием статистических методов. Основным содержанием

предварительной обработки результатов наблюдений является их проверка на подчинение нормальному закону распределения [32].

«Для небольших выборок ($n < 120$), имеющих приближенно нормальный закон распределения, должно выполняться условие: $|CAO/\bar{S} - 0.7979| < 0.4/\sqrt{n}$ » [32]. Среднее абсолютное отклонение (CAO) необходимо вычислить по формуле: $CAO = \sum |x_i - \bar{x}|/n$, где n – число измерений в выборке.

Так же проверку гипотезы нормальности распределения можно провести, используя размах варьирования R . Отношение $R/\bar{S}$, где $\bar{S}$ – , должно располагаться между критическими верхними и нижними границами, указанными в таблице П.6. [33]., стр. 299.

В таблицах 18 – 29 приведены результаты проверки вышеуказанными методами.

Таблица 18 – Образец 1 (с поперечными колебаниями), металл шва, Mn

№ наб.	Mn, % (x_i)	$\bar{x}$ (среднее)	$x_i - \bar{x}$	CAO $= \sum x_i - \bar{x} /n$	$(x_i - \bar{x})^2$	$\bar{S}^2$ $= \sum (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)$	$\bar{S}$
1	1.323	1.2846	+0.0384	0.03184	0.00147456	0.002128	0.045856
2	1.303		+0.0184		0.00033856		
3	1.297		+0.0124		0.00015376		
4	1.295		+0.0104		0.00010816		
5	1.205		-0.0796		0.00633616		

CAO = 2.48 %; $R = 0.118$

$CAO/\bar{S}$ для норм. распределения $= \sqrt{2/\pi} = 0.79788$;

$|CAO/\bar{S} - 0.7979| < 0.4/\sqrt{n}$; $|0.03184/0.045856 - 0.7979| < 0.4/2.236$;

$|-0.10355| < 0.17888$

При $p = 0.1$ (10%-ый уровень значимости) $2.22 < R/\bar{S} < 2.712$;

$2.22 < 2.573 < 2.712$

Таблица 19 – Образец 1, металл шва, Si

№ наб.	Si, % (x_i)	$\bar{x}$	$x_i - \bar{x}$	CAO $= \sum x_i - \bar{x} /n$	$(x_i - \bar{x})^2$	$\bar{S}^2$ $= \sum (x_i - \bar{x})^2/n-1$	$\bar{S}$
1	0.499	0.5758	-0.0768	0.06384	0.00589824	0.008423	0.091777
2	0.587		+0.0112		0.00012544		
3	0.580		+0.0042		0.00001764		
4	0.720		+0.1442		0.02079364		
5	0.493		-0.0828		0.00685584		

CAO = 11,09 %; R = 0.227

$|CAO/\bar{S} - 0.7979| < 0.4/\sqrt{n}$; $|0.06384/0.091777 - 0.7979| < 0.4/2.236$;

$|-0.1023| < 0.17888$

При $p = 0.1$ (10%-ый уровень значимости) $2.22 < R/\bar{S} < 2.712$;

$2.22 < 2.473 < 2.712$

Таблица 20 – Образец 1, металл шва, Cu

№ наб.	Cu, % (x_i)	$\bar{x}$	$x_i - \bar{x}$	CAO $= \sum x_i - \bar{x} /n$	$(x_i - \bar{x})^2$	$\bar{S}^2$ $= \sum (x_i - \bar{x})^2/n-1$	$\bar{S}$
1	0.213	0.205	+0.008	0.01	0.000064	0.000147	0.012124
2	0.215		+0.01		0.0001		
3	0.199		-0.006		0.000036		
4	0.213		+0.008		0.000064		
5	0.187		-0.018		0.000324		

CAO = 4,88 %; R = 0.028

$|CAO/\bar{S} - 0.7979| < 0.4/\sqrt{n}$; $|0.01/0.012124 - 0.7979| < 0.4/2.236$;

$|0.02691| < 0.17888$

При $p = 0.1$ (10%-ый уровень значимости) $2.22 < R/\bar{S} < 2.712$;

$2.22 < 2.309 < 2.712$

Таблица 21 – Образец 1, основной металл, Mn

№ наб.	Mn, % (x_i)	$\bar{x}$	$x_i - \bar{x}$	CAO $= \sum x_i - \bar{x} /n$	$(x_i - \bar{x})^2$	$\bar{S}^2$ $= \sum (x_i - \bar{x})^2/n-1$	$\bar{S}$
1	0.697	0.5132	+0.1838	0.07352	0.03378244	0.010679	0.103339
2	0.462		-0.0512		0.00262144		
3	0.454		-0.0592		0.00350464		
4	0.469		-0.0442		0.00195364		
5	0.484		-0.0292		0.00085264		

$$CAO = 14,33 \% ; \quad R = 0.243$$

$$|CAO/\bar{S} - 0.7979| < 0.4/\sqrt{n} ; |0.07352/0.103339 - 0.7979| < 0.4/2.236;$$

$$|-0.08645| < 0.17888$$

$$\text{При } p = 0.1 \text{ (10\%-ый уровень значимости)} \quad 2.22 < R/\bar{S} < 2.712;$$

$$2.22 < 2.351 < 2.712$$

Таблица 22 – Образец 1, основной металл, Si

№ наб.	Si, % (x_i)	$\bar{x}$	$x_i - \bar{x}$	CAO $= \Sigma x_i - \bar{x} /n$	$(x_i - \bar{x})^2$	$\bar{S}^2$ $= \Sigma(x_i - \bar{x})^2/n-1$	$\bar{S}$
1	0.409	0.362	+0.047	0.0416	0.002209	0.002414	0.049132
2	0.315		-0.047		0.002209		
3	0.404		+0.042		0.001764		
4	0.305		-0.057		0.003249		
5	0.377		+0.015		0.000225		

$$CAO = 11,49 ; R = 0.104$$

$$|CAO/\bar{S} - 0.7979| < 0.4/\sqrt{n} ; |0.0416/0.049132 - 0.7979| < 0.4/2.236;$$

$$|0.0488| < 0.17888$$

$$\text{При } p = 0.1 \text{ (10\%-ый уровень значимости)} \quad 2.22 < R/\bar{S} < 2.712;$$

$$2.22 > 2.117 < 2.712$$

$$\text{Проверка по } x_1: \tau = |x_1 - \bar{x}|/\bar{S} \leq \tau_{1-p}; \quad \tau = |0.047|/0.049132 = 0.957 \leq 1.79$$

$$\text{Проверка по } x_4: \tau = |x_4 - \bar{x}|/\bar{S} \leq \tau_{1-p}; \quad \tau = |-0.057|/0.049132 = 1.16 \leq 1.79$$

Таблица 23 – Образец 1, основной металл, Cu

№ наб.	Cu, % (x_i)	$\bar{x}$	$x_i - \bar{x}$	CAO $= \Sigma x_i - \bar{x} /n$	$(x_i - \bar{x})^2$	$\bar{S}^2$ $= \Sigma(x_i - \bar{x})^2/n-1$	$\bar{S}$
1	0,098	0.0572	+0.0408	0.01704	0.00166464	0.000572	0.023917
2	0,041		-0.0162		0.00026244		
3	0,059		+0.0018		0.00000324		
4	0,042		-0.0152		0.00023104		
5	0,046		-0.0112		0.00012544		

$$CAO = 29,79 \% ; \quad R = 0.104$$

$$|CAO/\bar{S} - 0.7979| < 0.4/\sqrt{n} ; |0.01704/0.023917 - 0.7979| < 0.4/2.236;$$

$$|-0.08544| < 0.17888; \quad \text{При } p = 0.1 \text{ (10\%-ый уровень значимости)}$$

$$2.22 < R/\bar{S} < 2.712; \quad 2.22 < 2.383 < 2.712$$

Таблица 24 – Образец 2, металл шва, Mn

№ наб.	Mn, % (x_i)	$\bar{x}$	$x_i - \bar{x}$	CAO $= \sum x_i - \bar{x} /n$	$(x_i - \bar{x})^2$	$\bar{S}^2$ $= \sum (x_i - \bar{x})^2/n-1$	$\bar{S}$
1	1.415	1.4214	-0.0064	0.00832	0.00004096	0.000099	0.00995
2	1.430		+0.0086		0.00007396		
3	1.407		-0.0144		0.00020736		
4	1.428		+0.0066		0.00004356		
5	1.427		+0.0056		0.00003136		

CAO = 0,59 %; R = 0.023

$|CAO/\bar{S} - 0.7979| < 0.4/\sqrt{n}$; $|0.00832/0.00995 - 0.7979| < 0.4/2.236$;

$|0.03828| < 0.17888$

При $p = 0.1$ (10%-ый уровень значимости) $2.22 < R/\bar{S} < 2.712$;

$2.22 < 2.312 < 2.712$

Таблица 25 – Образец 2, металл наплавки, Si

№ наб.	Si, % (x_i)	$\bar{x}$	$x_i - \bar{x}$	CAO $= \sum x_i - \bar{x} /n$	$(x_i - \bar{x})^2$	$\bar{S}^2$ $= \sum (x_i - \bar{x})^2/n-1$	$\bar{S}$
1	0.664	0.6154	+0.0486	0.06792	0.00236196	0.007277	0.085305
2	0.563		-0.0524		0.00316969		
3	0.498		-0.1174		0.01378276		
4	0.711		+0.0956		0.00913936		
5	0.641		+0.0256		0.00065536		

CAO = 11,04 %; R = 0.213

$|CAO/\bar{S} - 0.7979| < 0.4/\sqrt{n}$; $|0.06792/0.085305 - 0.7979| < 0.4/2.236$;

$|-0.0017| < 0.17888$

При $p = 0.1$ (10%-ый уровень значимости) $2.22 < R/\bar{S} < 2.712$;

$2.22 < 2.497 < 2.712$

Таблица 26 – Образец 2, металл наплавки, Cu

№ наб. л.	Cu, % (x_i)	$\bar{x}$	$x_i - \bar{x}$	CAO $= \sum x_i - \bar{x} /n$	$(x_i - \bar{x})^2$	$\bar{S}^2$ $= \sum (x_i - \bar{x})^2/n-1$	$\bar{S}$
1	0.208	0.2312	-0.0232	0.00928	0.00053824	0.000176	0.013266
2	0.233		+0.0018		0.00000324		
3	0.237		+0.0058		0.00003364		
4	0.241		+0.0098		0.00009604		
5	0.237		+0.0058		0.00003364		

$$CAO = 4,01 \% ; \quad R = 0.033$$

$$|CAO/\bar{S} - 0.7979| < 0.4/\sqrt{n} ; |0.00928/0.013266 - 0,7979| < 0.4/2.236;$$

$$|-0.09837| < 0.17888$$

$$\text{При } p = 0.1 \text{ (10\%-ый уровень значимости)} \quad 2.22 < R/\bar{S} < 2.712;$$

$$2.22 < 2.488 < 2.712$$

Таблица 27 – Образец 2, основной металл, Mn

№ наб.	Mn, % (x_i)	$\bar{x}$	$x_i - \bar{x}$	CAO $= \Sigma x_i - \bar{x} /n$	$(x_i - \bar{x})^2$	$\bar{S}^2$ $= \Sigma(x_i - \bar{x})^2/n-1$	$\bar{S}$
1	0.525	0.5256	-0.0006	0.00512	0.00000036	0.000040	0.006325
2	0.532		+0.0064		0.00004096		
3	0.518		-0.0076		0.00005776		
4	0.521		-0.0046		0.00002116		
5	0.532		+0.0064		0.00004096		

$$CAO = 0,97 \% ; \quad R = 0.014$$

$$|CAO/\bar{S} - 0.7979| < 0.4/\sqrt{n} ; |0.00512/0.006325 - 0,7979| < 0.4/2.236;$$

$$|0.01159| < 0.17888$$

$$\text{При } p = 0.1 \text{ (10\%-ый уровень значимости)} \quad 2.22 < R/\bar{S} < 2.712;$$

$$2.22 < 2.222 < 2.712$$

Таблица 28 – Образец 2, основной металл, Si

№ наб.	Si, % (x_i)	$\bar{x}$	$x_i - \bar{x}$	CAO $= \Sigma x_i - \bar{x} /n$	$(x_i - \bar{x})^2$	$\bar{S}^2$ $= \Sigma(x_i - \bar{x})^2/n-1$	$\bar{S}$
1	0.416	0.398	+0.018	0.03	0.000324	0.001247	0.035313
2	0.368		-0.03		0.0009		
3	0.419		+0.021		0.000441		
4	0.353		-0.045		0.002025		
5	0.434		+0.036		0.001296		

$$CAO = 7,54 \% ; \quad R = 0.081$$

$$|CAO/\bar{S} - 0.7979| < 0.4/\sqrt{n} ; |0.03/0.035313 - 0,7979| < 0.4/2.236;$$

$$|0.05165| < 0.17888$$

$$\text{При } p = 0.1 \text{ (10\%-ый уровень значимости)} \quad 2.22 < R/\bar{S} < 2.712;$$

$$2.22 < 2.294 < 2.712$$

Таблица 29 – Образец 2, основной металл, Cu

№ набл..	Cu, % (x_i)	$\bar{x}$	$x_i - \bar{x}$	CAO $= \sum x_i - \bar{x} / n$	$(x_i - \bar{x})^2$	$\bar{S}^2$ $= \sum (x_i - \bar{x})^2 / n - 1$	$\bar{S}$
1	0.179	0.1778	+0.0012	0.00114	0.00000144	0.000004	0.002
2	0.177		-0.0008		0.00000064		
3	0.175		-0.0028		0.00000784		
4	0.180		+0.0022		0.00000484		
5	0.178		+0.0002		0.00000004		

CAO = 0,64 %; R = 0.005

$|CAO / \bar{S} - 0.7979| < 0.4 / \sqrt{n}$; $|0.00114 / 0.002 - 0.7979| < 0.4 / 2.236$;

$|-0.0779| < 0.17888$

При $p = 0.1$ (10%-ый уровень значимости) $2.22 < R / \bar{S} < 2.712$;

$2.22 < 2.5 < 2.712$

По результатам проверки гипотеза нормальности распределения подтверждается для всех исследованных образцов и элементов.

На рисунке 49 приведены сравнительные диаграммы для CAO по марганцу, кремнию и меди, выраженных в процентах по степени отклонения от среднего содержания в образцах обоих способов наплавки. CAO является простым и наглядным показателем степени разброса экспериментальных данных.

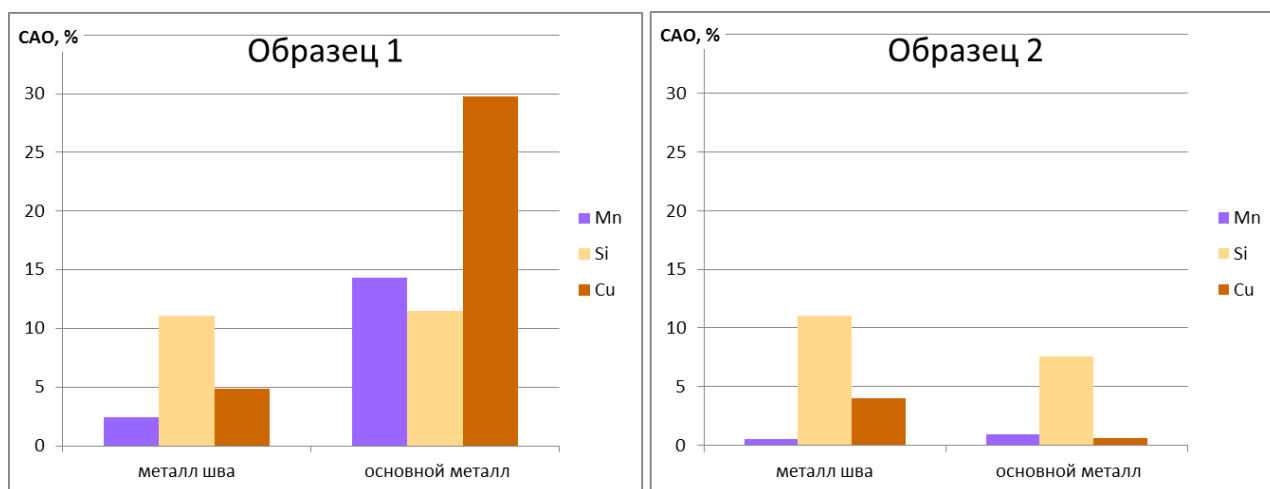


Рисунок 49 – диаграммы CAO для образцов №1 (поперечные колебания) и №2 (без колебаний)

По диаграмме для образца 1 можно сделать вывод, что отклонения содержания элементов в наплавке с поперечными колебаниями существенно меньше, чем в основном металле. Для наплавки без колебаний такой большой разницы нет. Следует отметить, что в различных образцах основного металла САО (то есть разброс содержаний) может существенно отличаться. Также можно отметить, что САО для кремния почти в 5 раз больше, чем для марганца в шве с колебаниями, в то время как для основного металла САО близки, что говорит о близкой неоднородности легирующих элементов в основном металле.

Для расчетов по прогнозированию химического состава металла наплавляемых валиков был проведён химический анализ металла наплавочной проволоки. В экспериментах использовалась проволока 08Г2С d=1 мм. Результаты анализа химического состава проволоки приведены в таблице 30. В таблице указаны средние значения по результатам не менее трех измерений на одном образце.

Таблица 30 – Результаты анализа химического состава металла проволоки

Измерения	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
Образец	0.120	0.80	1.84	0.082	0.049	0.188	0.179	0.27
Погрешность измерения по ГОСТ Р 54152	±0.016	±0.05	±0.06	±0.008	±0.007	±0.016	±0.016	±0.03
Марка стали Св-08Г2С по ГОСТ 2246-70	0.05-0.11	0.70-0.95	1.80-2.10	≤0.030	≤0.025	≤0.20	≤0.25	≤0.25
Допустимое отклонение по ГОСТ 2246-70	±0.01	±0.05	±0.05	-	-	-	-	-

Используя результаты химического анализа проволоки, химического анализа основного металла образцов наплавки двумя способами, а так же данных по расчётам доли участия основного металла в металле швов из параграфа 4.1, можно рассчитать ожидаемое содержание химических

элементов в металле валиков до наплавки. Для этого используем формулу (15).

$$\psi_o = (\omega_{\text{ожид}} - \omega_{\text{п}}) / (\omega_o - \omega_{\text{п}}) \quad (14)$$

$$\omega_{\text{ожид}} = \omega_o \psi_o + \omega_{\text{пров}} (1 - \psi_o) \quad (15)$$

где: ω_o – содержание элемента в основном металле.

$\omega_{\text{ожид}}$ – ожидаемое содержание элемента в металле наплавки.

$\omega_{\text{ш}}$ – измеренное содержание элемента в металле наплавки.

Результаты расчётов ожидаемого содержания, а также его фактического снижения (потерь) в металле шва в абсолютных значениях представлены в таблице 31, и в относительных – в таблице 32.

Таблица 31 – Результаты расчётов потерь химических элементов в наплавленных валиках

Хим. элемент	$\omega_{\text{пров}}, \%$	Образец 1 ; $S_n = 50.45 \text{ мм}^2$; $S_{\text{пр}} = 8.31 \text{ мм}^2$; $\psi_o = 14.14\%$				Образец 2 ; $S_n = 40.6 \text{ мм}^2$; $S_{\text{пр}} = 4.37 \text{ мм}^2$; $\psi_o = 9.72\%$			
		$\omega_o, \%$	$\omega_{\text{ожид}}, \%$	$\omega_{\text{ш}}, \%$	Потери по $\omega, \%$	$\omega_o, \%$	$\omega_{\text{ожид}}, \%$	$\omega_{\text{ш}}, \%$	Потери по $\omega, \%$
Mn	1.84	0.5132	1.6524	1.2846	0.3678	0.5256	1.7122	1.4214	0.2908
Si	0.8	0.362	0.7381	0.5758	0.1623	0.398	0.7609	0.6154	0.1455
Cu	0.27	0.0572	0.2399	0.205	0.0349	0.1778	0.261	0.2312	0.0298

Таблица 32 – Результаты расчётов относительных потерь химических элементов в наплавленных валиках

Хим. элемент	Образец 1; $\psi_o = 14.14\%$				Образец 2; $\psi_o = 9.72\%$			
	$\omega_{\text{ожид}}, \%$	$\omega_{\text{ш}}, \%$	Потери по $\omega, \%$	Относит. потери, %	$\omega_{\text{ожид}}, \%$	$\omega_{\text{ш}}, \%$	Потери по $\omega, \%$	Относит. потери, %
Mn	1.6524	1.2846	0.3678	22,26	1.7122	1.4214	0.2908	16.98
Si	0.7381	0.5758	0.1623	21,99	0.7609	0.6154	0.1455	19.13
Cu	0.2399	0.205	0.0349	14,55	0.261	0.2312	0.0298	11.42

На рисунке 50 представлены сравнительные диаграммы ожидаемого и действительного содержания химических элементов в металле наплавленных

валиков, а так же относительных потерь.

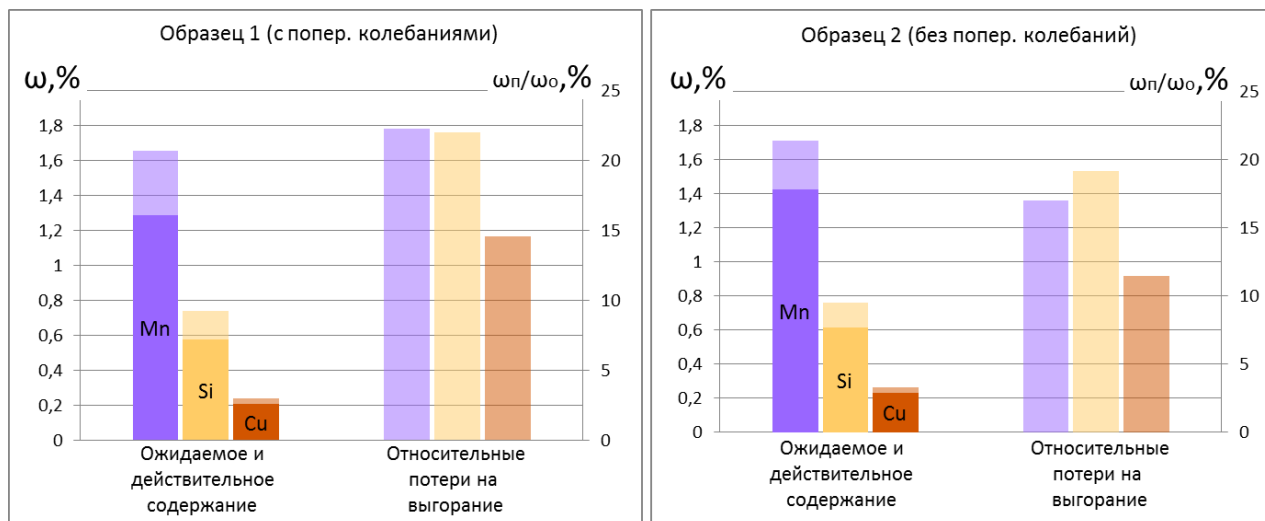


Рисунок 50 – Сравнительные диаграммы потерь хим. элементов в наплавленных валиках

Наибольший интерес представляют относительные потери элементов, которые могут позволить разработать методику расчета химического состава наплавки или решать обратную задачу – создавать проволоки, обеспечивающие требуемый состав шва. Относительные потери легирующих марганца и кремния на выгорание при наплавке с поперечными колебаниями практически одинаковы и несколько больше, чем потери меди. Аналогичная картина имеет место и для образца, полученного без поперечных колебаний. Аналогичным способом, используя результаты химического анализа основного и наплавленного металла, а так же данных по доли участия, рассчитываем по формуле (16) содержание элементов, переносимых с расплавленным металлом проволоки и остающихся в металле шва.

$$\omega_{\Pi} = (\omega_{\text{ш}} - \omega_o \psi_o) / (1 - \psi_o) \quad (16)$$

Результаты расчётов содержания хим. элементов в переносимом металле а так же его фактического снижения (потерь) относительно содержания в проволоке в абсолютных значениях представлены в табл. 33, и в относительных – в таблице 34.

Таблица 33 – Результаты расчётов потерь хим. элементов в переносимом металле

Хим. элемент	$\omega_{\text{пров}}, \%$	Образец 1 ; $S_{\text{н}} = 50.45 \text{ мм}^2$; $S_{\text{пр}} = 8.31 \text{ мм}^2$; $\psi_0 = 14.14\%$				Образец 2 ; $S_{\text{н}} = 40.6 \text{ мм}^2$; $S_{\text{пр}} = 4.37 \text{ мм}^2$; $\psi_0 = 9.72\%$			
		$\omega_0, \%$	$\omega_{\text{ш}}, \%$	$\omega_{\text{ожид. пров}}, \%$	Потери по $\omega, \%$	$\omega_0, \%$	$\omega_{\text{ш}}, \%$	$\omega_{\text{ожид. пров}}, \%$	Потери по $\omega, \%$
Mn	1.84	0.5132	1.2846	1.4116	0.4284	0.5256	1.4214	1.5178	0.3222
Si	0.8	0.362	0.5758	0.611	0.189	0.398	0.6154	0.6388	0.1612
Cu	0.27	0.0572	0.205	0.2293	0.0407	0.1778	0.2312	0.2369	0.0331

Таблица 34 – Результаты расчётов относительных потерь хим. элементов в переносимом металле

Хим. элемент	$\omega_{\text{пров}}, \%$	Образец 1; $\psi_0 = 14.14\%$			Образец 2; $\psi_0 = 9.72\%$		
		$\omega_{\text{ожид. пров}}, \%$	Потери по $\omega, \%$	Относит. потери, %	$\omega_{\text{ожид. пров}}, \%$	Потери по $\omega, \%$	Относит. потери, %
Mn	1.84	1.4116	0.4284	23.28	1.5178	0.3222	17.51
Si	0.8	0.611	0.189	23.624	0.6388	0.1612	20.15
Cu	0.27	0.2293	0.0407	15.074	0.2369	0.0331	12.26

На рисунке 51 представлены сравнительные диаграммы содержания химических элементов в проволоке по результатам хим. анализа и расчётного содержания тех же элементов в металле проволоки, переносимом в металл шва с учетом потерь на испарение. Относительные потери на выгорание в образце с колебаниями несколько выше, чем без колебаний, но для каждого из элементов достаточно стабильны.

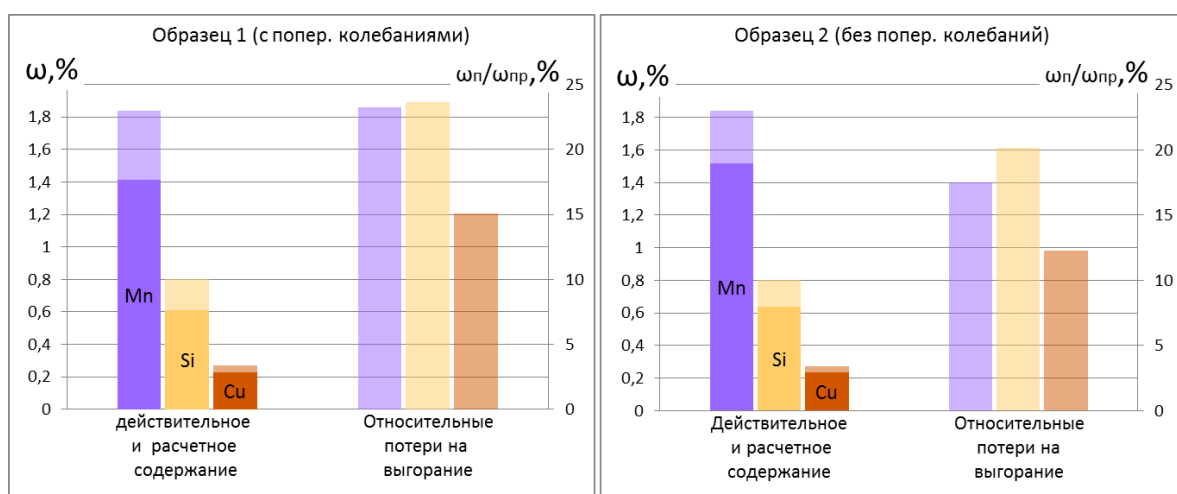


Рисунок 51 – Сравнительные диаграммы потерь хим. элементов в наплавляемом металле

Выводы по 4 главе

1. Впервые доказана возможность получения наплавочных швов высокого качества при использовании комбинации стационарных во времени свободных дуг прямого и косвенного действия с неплавящегося и плавящегося электродов в условиях магнитного взаимодействия дуг.
2. Разработанный способ обеспечивает малую долю участия основного металла в металле шва – при сварке без поперечных колебаний ψ составляет около 10%, а с колебаниями 14%. При этом производительность наплавки возрастает в несколько раз.
3. Стабильность плавления электродной проволоки в дуге косвенного действия достаточно высока и позволяет обеспечить мелкокапельный перенос металла в шов.
4. Определены основные статистические характеристики распределения легирующих элементов марганца и кремния в наплавках с поперечными колебаниями и без колебаний, которые подчиняются закону нормального распределения, то есть их разброс в сечении наплавки носит случайный характер.
5. Расчет легирующих элементов в шве по доле участия основного металла следует проводить с учетом потерь электродного металла на испарение, которые достаточно стабильны для двух способов наплавки, что позволяет разработать инженерную методику расчета состава шва или требования по составу проволоки.

Заключение

Цель данной магистерской диссертации заключалась в повышении качества наплавленного слоя за счет создания процесса отдельного регулирования производительности расплавления основного и дополнительного металлов. В работе удалось впервые разработать стабильный процесс наплавки с использованием комбинации свободных дуг прямого и косвенного действия, несмотря на сложности, возникающие из-за магнитного взаимодействия дуг.

Как правило, речь идет о необходимом количестве наплавленного металла при минимальном расплавлении основного металла, что хорошо и для сварки и для наплавки, за исключением тех случаев, когда в расплавленном слое требуется определенное процентное соотношение этих металлов. Предлагаемый способ с регулируемым распределением тепловложения позволяет получить не только наплавку с минимальным термическим воздействием на металл детали, но и получить необходимое количество наплавленного металла при необходимой степени расплавления основного металла или наоборот. Проведенные исследования показали перспективность данного способа в использовании как при автоматизированной, так и при ручной механизированной наплавке.

Одним из направлений совершенствования процесса наплавки является использование пульсирующих дуг со смещением фазы пульсаций. Необходимо также разработка методики расчета режимов наплавки по заданным размерам наплаваемого шва. Для этого необходимо использовать как известные формулы для расчета температур в наплаваемом теле, так и разработка методики, учитывающей поперечные колебания сварочной горелки. Ещё одним направлением исследований для совершенствования способа является решение проблем стабилизации переноса расплавленного электродного металла в различных пространственных положениях сварочной горелки.

Список используемой литературы и источников

1. Шоршоров М.Х., Тавер Е.И. Сварка стали двойной плазменной струей/ Сварочное производство, 1971 г., № 10. С. 26 – 28.
2. Вайнерман А.Е., Шоршоров М.Х., Веселков В.Д., Новосадов В.С. Плазменная наплавка металлов. Л.: Машиностроение, 1969. - 192с.
3. Сидоров В.П. О гибкости технологического процесса сварки. //Сб. тр. Всероссийской науч.-техн. конф. «Сварка XXI век. Теория и методика, повышение качества профессионального образования и аттестации специалистов сварочного производства»- Тольятти: ТГУ, 2002.- С.110-115.
4. Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. Методика определения требований к точности параметров сварки. / Сварка и Диагностика . 2014 г. №3. С. 10-13.
5. Скобло Т.С., Тихонов А.В., Рыбалко И.Н. Новый способ восстановления деталей/ Автомобильный транспорт, 2012 г., вып. 31. С. 124 – 128.
6. Наплавка и металлизация [Электронный ресурс]: <https://studfile.net/preview/1675631/> (дата обращения: 01.04.2020).
7. Г. В. Мураткин, В. С. Малкин, В. Г. Доронкин. Основы восстановления деталей и ремонт автомобилей [Текст] : учебное пособие : [в 2 ч.] ; / М-во образования и науки Российской Федерации, Тольяттинский гос. ун-т, Ин-т машиностроения, Каф. "Нанотехнологии, материаловедение и механика". - Тольятти : Изд-во ТГУ, 2012.
8. Технология конструкционных материалов Раздел №8 «Наплавка» [Электронный ресурс]: <https://studfile.net/preview/7329925/> (дата обращения: 01.04.2020).
9. Ручная дуговая наплавка штучными электродами [Электронный ресурс]: https://studopedia.ru/15_15740_podgotovka-poverhnosti-pod-naplavku.html (дата обращения: 01.04.2020).

10. Сидоров В.П., Кутулбаев Р.Б. Исследование неравномерности скорости расплавления штучного электрода с покрытием. / Сварка и Диагностика . 2014 г. №6. С. 11-13.

11. Плазменная наплавка (ПН) [Электронный ресурс]: https://studopedia.ru/15_15745_plazmennaya-naplavka-pn.html (дата обращения: 01.04.2020).

12. Способ обработки плазменной импульсной дугой / Сидоров В.П., Абросимов С.М./ Авторское свидетельство СССР на изобретение № 854651, кл. В 23 К 31/10, 1981.

13. Вайнбойм Д. И. Автоматическая дуговая сварка / Д. И. Вайнбойм. – Машиностроение, 1966. – 200 с.

14. ГОСТ 2601-84. Сварка металлов. Термины и определения основных понятий [Текст]. – переизд. (октябрь 1996 г.) с Изм. N 1, 2, утв. март 1992 г., (ИУС 1-87, 6-92)

15. В.П. Сидоров, С.М. Абросимов. Способ импульсной плазменной наплавки. АС СССР № 1693808. В23 К 9/167. От 11.05.1989. Для служебного пользования. (ДСП).

16. Ельцов В.В. Ремонтная сварка и наплавка изделий из сплавов магния и алюминия трехфазной дугой / Ельцов В.В. / диссертация ... доктора технических наук : 05.03.06. - Тольятти, 2002. - 327 с.

17. Электрошлаковая наплавка (ЭШН) [Электронный ресурс]: https://studopedia.ru/14_136623_elektroshlakovaya-naplavka.html (дата обращения: 01.04.2020).

18. Конспект лекций по дисциплине «Основные способы сварки, наплавки и пайки» для подготовки бакалавров [Электронный ресурс]: <http://uz.denemetr.com/docs/768/index-284107-1.html?page=6> (дата обращения: 01.04.2020).

19. Полуавтоматическая и автоматическая дуговая наплавка [Электронный ресурс]: https://studopedia.ru/14_136622_poluavtomaticheskaya-i-avtomaticheskaya-dugovaya-naplavka.html (дата обращения: 13.04.2020).

20. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление / перевод с японского Попова В.Н., Под ред. Стёпина В.С., к.т.н. Шестёркина Н.Г., - М. изд. «Машиностроение». Москва 1985 г. – 240 с.

21. Современные способы наплавки и их возможности [Электронный ресурс]: <http://hssco.ru/sovremennyye-sposoby-naplavki-i-ix-vozmozhnosti/> (дата обращения: 13.04.2020).

22. Короткова Г.М., Шаповалов В.А., Моторин К.В., Пузырева В.А. Статические фазные вольтамперные характеристики трехфазной дуги. Деп. 30.04.85 г., № 69, ЭТ 85.

23. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга – М.: Машиностроение, 1970 г. - 334.

24. Тиходеев Г.М. Энергетические свойства электрической сварочной дуги [Текст] – М-Л.: Изд. АН СССР, 1961. – 251 с

25. Столбов В.И. , Сидоров В.П., Куркин И.П. Определение эффективной мощности источника нагрева при сварке плазменной трехфазной дугой. / Сварочное производство. – 1988. №5. С. 30-32.

26. ГОСТ 10543-82. Проволока стальная наплавочная. Технические условия (с Изменениями № 1, 2), Введен 01.07.1983г. Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 27.05.82 № 2160.

27. Наплавка, Проволока сварочная, Проволока порошковая [Электронный ресурс]: <http://weldzone.info/materials/wire/19-deposition/506-provoloki-dlya-naplavki> (дата обращения: 30.04.2020).

28. Сидоров В.П. Наплавка разветвленной дугой [Текст] / В.П. Сидоров, Н.А. Борисов // 4 Международная НТК, Пенза: Приволжский Дом знаний. - 2008.-С.84–87.

29. Сидоров В.П. Особенности наплавки свободной разветвленной дугой [Текст]/ В.П. Сидоров, Н.А. Борисов // 5-я международная научн.-практ. конф. «Глобальный научный потенциал», 16-17 июня 2009 –Тамбов. -2009.- С.54–57.

30. Гладкий П.В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменная наплавка. – К.: «Екотехнологія», 2007. – 292 с.

31. Сидоров В.П., Борисов Н.А. Выбор режимов наплавки разветвленной дугой / Проведение научных исследований в области машиностроения: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции с элементами научной школы для молодежи. Тольятти, 27-28 ноября 2009 г. В 3-х ч. / под общ. Ред. М.М. Криштала. – Тольятти: ТГУ, 2009. – Ч. 1. – 314 с. С.130–133.

32. Львовский Е.Н. «Статистические методы построения эмпирических формул»: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.

33. Закс Л. «Статистическое оценивание». Пер. с нем. В.Н. Варыгина. Под ред. Ю.П. Адлера, В.Г. Горского. М.: Статистика, 1976. – 598 с.

34. Сидоров В.П. О понятии гибкости технологического процесса сварки (Тезисы доклада). Материалы конференции сварщиков Урала. Челябинск. 2000 г. – С. 106–108.

35. Сварка в машиностроении: Справочник. В 4-х т. /Редкол.: Г.А. Николаев (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1978 – т. 2 / Под ред. А.И. Акулова. 1978. 462 с.

36. Сидоров В.П. Расчеты параметров сварки плавлением. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. – 286 с.

37. Эсибян Э.М. Плазменно-дуговая аппаратура. Киев: Техника, 1971. 164 с.

38. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев. – 8-е изд., перераб. и испр. – М.: ООО «Издательство Оникс: ООО «Издательство «Мир и образование», 2006. – 1056 с.

39. Коновалов А. В., Неровный В. М., Куркин А. С., Теория сварочных процессов. Учебник для вузов, МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2007 – 752 с.

40. Красулин Ю. Л. Способ сварки металлов / Патент на изобретение SU 128 956 A1. 1960 г. по МПК B23K9/00 B23K9/95.

41. Моторин К.В., Короткова Г.М. Сварка точками 3-фазной сжатой дугой / Сварка. Реновация. Триботехника: тезисы докладов VIII Уральской научно-практической конференции.—Нижний Тагил, 2017. С. 16 – 20.

42. Sidorov V.P., Fedyakin V. A., Kutulbaev R. B. Determination of the melting rate of coated electrodes / Welding International. 2016. Т. 30, № 12. С. 968-971.

43. Kovtunov A.I., Churin S.A. Effect of welding conditions on penetration in mechanized surfacing / Welding International . 2012. Vol. 26, № 9. P. 707-709.

44. Il'yashchenko D.P., Zernin E.A., Shadskii S.V. Chemical composition of welding aerosol in manual coated electrode arc welding / Welding International. 2011. № 9. С. 719-721.

45. Sidorov V.P., Melzitdinova A.V. Definition of the mathematical model coefficients on the weld size of butt joint without edge preparation / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Т. 253. conference 1.

46. Sidorov V.P. Calculation of Models of Arc Welding under the Flux of Double –Sided Butt Joints / Materials Science and Metallurgical Technology. 2019. № 946. С. 889-894.