

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 кафедры)

15.04.01 Машиностроение
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического
оборудования
(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Исследование двухдуговой наплавки покрытыми электродами

Студент(ка) С.Н. Пивнев _____ подпись

(И.О. Фамилия)

Научный
руководитель В.П. Сидоров _____ подпись

(И.О. Фамилия)

Консультанты Т.А. Варенцова _____ подпись

(И.О. Фамилия)

Руководитель
программы д.т.н., профессор В.В. Ельцов _____ подпись

(ученая степень, звание И.О. Фамилия)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Допустить к защите
Заведующий кафедрой

д.т.н., профессор
В.В. Ельцов

(ученая степень, звание И.О. Фамилия)

_____ подпись

« _____ » _____ 20 _____ г.

Тольятти, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Вопросы легирования сварного шва при сварке покрытыми электродами.....	6
1.1 Формирование сварного шва из основного и наплавляемого металлов.....	6
1.2 Особенности двухдуговых способов сварки.....	12
1.3 Ручная дуговая сварка покрытыми электродами.....	38
2 Методика проведения экспериментов.....	45
2.1 Выбор электродов для экспериментов и их свойства.....	45
2.2 Определение производительности расплавления электродов.....	50
2.3 Получение проб наплавляемого металла электродов и их анализ.....	53
Выводы по разделам 1 и 2.....	63
3 Расчет содержания элементов в наплавляемом металле при двухдуговой наплавке.....	65
3.1 Параметры двухдуговой наплавки покрытыми электродами.....	65
3.2 Сравнение расчетных данных при комбинированной наплавке дугой косвенного действия.....	66
3.3 Исследование химического состава швов при ручной однодуговой наплавке.....	68
3.4 Исследование швов, выполненных двухдуговой наплавкой.....	72

Выводы по разделу 3.....	77
4 Компьютерное проектирование содержания легирующих элементов в шве.....	79
4.1 Расчет химического состава шва при двухдуговой наплавке.....	79
4.2 Исследование глубины проплавления при двухдуговой сварке.....	84
4.3 Техническое задание на разработку компьютерной программы.....	91
Выводы по разделу 4.....	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	94
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	96

ВВЕДЕНИЕ

Сварка занимает видное место в современной технике. Ее развитие идет в основном в направлении совершенствования известных процессов и оборудования. Одним из ведущих процессов сварки является дуговая сварка, которая имеет много разновидностей. Наиболее распространена сварка плавящимся электродом, которая позволяет одновременно расплавлять основной металл и заполнять разделку свариваемых кромок с легированием сварного шва. В принципе, каждый шов должен иметь свой химический состав, наилучшим образом отвечающий эксплуатационным требованиям к изделию. Поэтому идеальным было бы наличие для каждого сочетания основного металла и сварного шва своего специального сварочного материала. Однако в связи с многообразием марок свариваемых металлов, типов сварных соединений и условий эксплуатации сварных конструкций в настоящее время это недостижимо.

Одним из развивающихся способов дуговой сварки плавящимся электродом являются многодуговые процессы, в частности наиболее простым вариантом из них является двухдуговая сварка. До настоящего времени основным преимуществом этих способов сварки было принято считать повышение ее производительности [1]. Лишь сравнительно недавно было обращено внимание, что у данных способов сварки есть дополнительные возможности по легированию сварного шва [2]. В большей степени развита автоматическая двухдуговая сварка. Работ в области двухдуговой ручной сварки плавящимся электродом практически нет. Между тем в таком способе сварки имеется потребность. Это связано с необходимостью расширения технологических возможностей дуги, например при ремонтных работах, когда требуется уникальное содержание наплавляемого металла. Такое содержание может быть получено использованием покрытых электродов разных типов и разного химического

состава наплавляемого металла. Данная работа посвящена разработке двухдугового процесса ручной дуговой сварки с использованием электродов разных типов. Поэтому целью работы является: **Расширение технологических возможностей ручной дуговой сварки и наплавки покрытыми электродами, путем исследования двухдугового процесса с электродами различных типов.**

1 Вопросы легирования сварного шва при сварке покрытыми электродами

1.1 Формирование сварного шва из основного и наплавляемого металлов

К металлургическим процессам при сварке плавлением относятся легирование металла сварного шва, очистка его от вредных примесей, защита зоны сварки от взаимодействия с окружающим воздухом. Для дуговой сварки под флюсом и при сварке покрытыми электродами имеет место похожий характер металлургических процессов. Металл сварного шва частично может легироваться за счет протекания металлургических реакций между веществами флюса или покрытия и сварочной ванной. Это усложняет расчеты содержания легирующих элементов в шве, так как процессы в сварочной ванне протекают быстро, металлургические реакции не успевают достичь равновесия, теория расчета таких реакций разработана недостаточно. Поэтому в основном определение содержания легирующих элементов в сварных швах базируется на экспериментальных данных. Содержание легирующих элементов в шве важно потому, что оно определяет его эксплуатационные характеристики: теплоустойчивость, коррозионную стойкость, жаропрочность, износостойкость и некоторые другие. Например, для конструкционных сталей известны формулы, связывающие содержание легирующих элементов в сварном шве с его механическими характеристиками [3]. Основное влияние на содержание легирующих элементов в шве оказывает его содержание в стержне электрода. Для расчета содержания элементов в шве важно понятие доли участия в нем основного металла (рисунок 1.1).

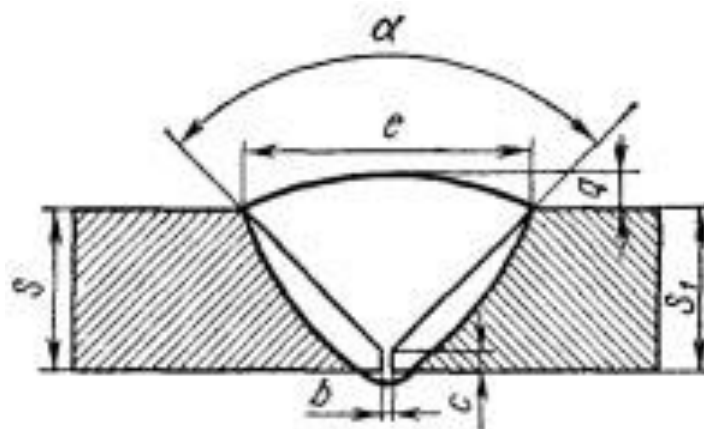


Рисунок 1. 1 – Сечение сварного шва с разделкой кромок

Она определяется отношением [4]

$$\psi_0 = F_0 / F_{\text{ш}} = F_0 / (F_0 + F_{\text{д}}), \quad (1.1)$$

где $F_{\text{ш}}$ – поперечное сечение шва, см^2 ; F_0 – поперечное сечение расплавленного основного металла, см^2 ; $F_{\text{д}}$ – поперечное сечение дополнительного металла, см^2 .

Под дополнительным металлом будем понимать весь металл в шве, полученный как за счет переноса металл из стержня, так и за счет металлургических реакций между шлаком и сварочной ванной.

Непосредственно измерить можно только сечение всего шва $F_{\text{ш}}$, например, путем изготовления макрошлифа и затем можно определить расчетом $F_{\text{д}}$. В шве с разделкой кромок сложно разделить слагаемые площадей в формуле (1.1). Проще это сделать для шва без разделки кромок или наплавки на пластину (рисунок 1.2).

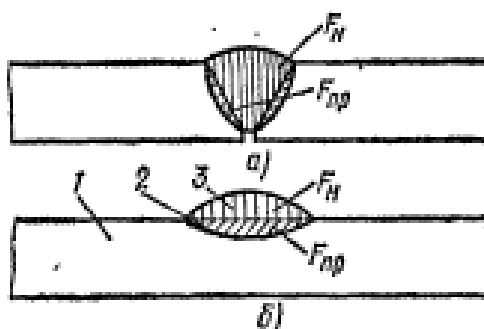


Рисунок 1. 2 – Сечение сварного шва без разделки кромок

Среднюю площадь поперечного сечения дополнительного металла, введенного в шов, можно определить по производительности наплавки, взвешивая сварной образец до и после сварки

$$F_{\text{д}} = M_{\text{д}}/(\rho L_{\text{ш}}), \quad (2.2)$$

где $M_{\text{д}}$ – масса дополнительного металла, г; ρ – плотность металла, г/см³;
 $L_{\text{ш}}$ – длина шва, см.

Формулой (2.2) можно пользоваться, если размеры наплавленного валика достаточно стабильны. В связи с отклонениями параметров сварки значение $F_{\text{д}}$, найденное по формуле (2.2) представляет усредненную по всей длине шва площадь сечения дополнительного металла.

Сложнее всего определять площадь поперечного сечения основного металла. Это возможно расчетным способом на основе теории сварочных источников тепла [5,6], однако пока такие расчеты носят весьма приближенный характер, в особенности для ручной сварки из-за низкой стабильности процесса. Наиболее развиты расчеты для сварных соединений без разделки свариваемых кромок и наплавки на пластины.

Содержание какого-либо химического элемента в сварном шве $C_{\text{ш}}$, в % можно определить с помощью формулы смешения [4]

$$C_{\text{ш}} = C_{\text{о}} \psi_{\text{о}} + C_{\text{д}} (1 - \psi_{\text{о}}), \quad (1.3)$$

где $C_{\text{о}}$ – содержание данного элемента в основном металле; $C_{\text{д}}$ – содержание этого же элемента в дополнительном металле.

Дополнительный металл не является каким-то отдельным физическим объектом, он растворен в металле шва. Поэтому его можно назвать условным сплавом. Однако в большинстве случаев содержание элемента в дополнительном металле достаточно близко к его содержанию в

наплавляемом металле. А содержание наплавляемого металла можно получить различными методами, в том числе путем многослойной наплавки на пластину.

Совместное рассмотрение формул (1.1–1.3) позволяет наметить пути регулирования содержания элементов в сварном шве. Содержание элементов в основном металле C_0 является исходной, заданной величиной и не может изменяться при решении такой задачи. Доля участия ψ_0 может регулироваться изменением формы разделки свариваемых кромок. Однако разделка кромок стандартизирована [7] и не может быть существенно изменена. Максимальное сечение разделки ограничивается экономическими соображениями, так как ее увеличение ведет к удорожанию сварной конструкции, как за счет увеличения трудоемкости обработки кромок, так и за счет увеличения расхода электродных материалов. Минимальное сечение тоже ограничено, например, при ручной сварке, трудностями манипуляции сварочным электродом в разделке.

Исходя из формы сечения шва на рисунке 1.1 можно прийти к выводу, что доля участия ψ_0 должна изменяться по высоте шва. Наибольшая ψ_0 имеет место в корне шва (при ручной сварке $\psi_0 \approx 0,4$), а наименьшая в области лицевой стороны шва ($\psi_0 \approx 0,2$) [4]. В соответствии с формулой (1.3) это приведет к неравномерности распределения химических элементов по высоте шва. Причем, если сварка выполняется одной дугой, наименьшее содержание элемента будет в корне шва, а наибольшее с лицевой стороны. В то же время в большинстве случаев наибольшие нагрузки сварной шов испытывает со стороны корня шва (агрессивные среды, повышенные температуры и пр.). Такое распределение подтверждается экспериментально [4] (таблица 1.1)

Таблица 1.1 – Изменение содержания химических элементов по высоте шва

Расстояние от низа шва,		
-------------------------	--	--

мм	Si, %	P,%
10	0,59	0,019
30	0,67	0,023
50	0,67	0,025
70	0,69	0,025
90	0,73	0,027
110	0,74	0,028

Следует отметить, что содержание вредной примеси фосфора, наоборот, минимально в корне шва.

Управление составом сварного шва за счет режимов однодуговой сварки плавящимся электродом также проблематично. Это обусловлено низкой гибкостью технологического процесса однодуговой сварки [8,9]. Под гибкостью понимается сложность регулирования какого-либо важного показателя шва (определяющего фактора ОФ) за счет режимов сварки. В данном случае ОФ является доля участия ψ_0 . Например, проплавление основного металла увеличивается с увеличением тока дуги. При этом также увеличивается и количество дополнительного металла с электрода, а доля участия остается почти неизменной. Из всех параметров однодуговой сварки в небольших пределах позволяет управлять долей участия диаметр электрода [10].

Отсюда следует, что получить оптимальный состав шва при однодуговой сварке можно только использованием специальной сварочной проволоки или электрода, что практически невозможно из-за высоких затрат. Отсюда вытекает необходимость обратиться для достижения такой цели к способам двухдуговой сварки.

Поскольку дополнительный металл физически в шве выделить из сварного шва нельзя [11] то, его можно назвать условным сплавом. То есть

физически непосредственно концентрацию C_d измерить нельзя, ее можно определить только расчетным путем из (1.3), поскольку можно измерить содержание элемента в шве $C_{ш}$ и в основном металле C_o . Но конструкторов и технологов в первую очередь интересует именно $C_{ш}$. Поскольку прямое измерение C_d невозможно, используют ее приближенные значения путем определения содержания элементов в металле многослойной наплавки, в которой практически отсутствует основной металл [4]. Если принять допущение, что от слоя к слою сварного шва доля участия основного металла в нем (предыдущего слоя) не изменяется и основной металл не оказывает влияния на протекание металлургических реакций, то содержание элемента в слое многослойного шва можно определить по формуле [12]

$$C_N = C_H - (C_H - C_o) \psi_o^N, \quad (1.4)$$

где C_N – содержание элемента в N-слое шва, %; C_H – содержание этого элемента в металле, наплавленном в медную форму, %; N – номер слоя.

При $\psi_o = 0,3$ уже в третьем слое содержание элемента в шве и многослойной наплавке будет отличаться всего на 2,7%.

На практике содержание химических элементов в наплавляемом металле получают наплавкой 8-ми или 5-ти слоев, а также наплавкой дугой прямого действия в медную форму [4]. Так проверяют реальное содержание элементов в наплавляемом металле и сравнивают с содержанием, допускаемым стандартами и техническими условиями. Многослойная наплавка весьма дорогостоящая, а при наплавке в медную форму происходит расплавление меди и попадание ее в шов, медная форма быстро выходит из строя. В 2018 г. в Тольяттинском государственном университете была защищена выпускная бакалаврская работа [13], в которой была опробована методика получения образцов для анализа химического состава спектральными методами с помощью дуги косвенного действия с двумя

одинаковыми покрытыми электродами. Были получены положительные результаты.

Таким образом, если возникнет необходимость точного расчета содержания химических элементов в сварном шве в конкретном технологическом процессе, то приходится пользоваться данными по определению состава наплавляемого металла, полученными с помощью указанных выше методик. При этом будет иметь место погрешность расчетов, обусловленная влиянием металлургических реакций между основным металлом и сварочными материалами. По данной погрешности можно будет судить о роли таких реакций и способах учета их влияния в расчетах химического состава шва.

1. 2 Особенности двухдуговых способов сварки

Двухдуговые и многодуговые способы сварки развивались преимущественно с целью повышения производительности наплавки [1] с целью ускоренного заполнения разделки кромок. Повысить производительность до необходимого уровня можно было бы и с помощью однодуговой наплавки путем увеличения тока сварки и диаметра электрода. Однако такое увеличение имеет предел, обусловленный возрастанием давления дуги, увеличения объема сварочной ванны, что приводит к нарушению качественного формирования шва. Сила давления дуги по данным многих исследователей пропорциональна квадрату силы тока дуги [14]. Определенное ограничение накладывается и мощностью источника питания одной дуги, свыше определенного значения резко возрастает стоимость оборудования.

Сварка двумя электродными проволоками нашла широкое применение как за рубежом [64,65,66], так и в России. Питание электродов осуществляется по двум вариантам. При первом электродные проволоки соединены к общему токоподводу и питаются от одного сварочного

источника (рисунок 1.3 а) («двухэлектродная сварка», «сварка расщеплённым электродом»), при втором варианте каждая электродная проволока имеет отдельный токоподвод и источник питания (рисунок 1.3 б) («двухдуговая сварка»).

Известны два подхода к организации процесса сварки двумя проволоками. При первом подходе обе проволоки подаются из одной горелки («twin-wire welding» или «double electrode welding») [66, 67] (рисунок 1.4). При втором подходе каждая электродная проволока поступает из своей сварочной горелки (рисунок 1.5) («tandem welding») [65].

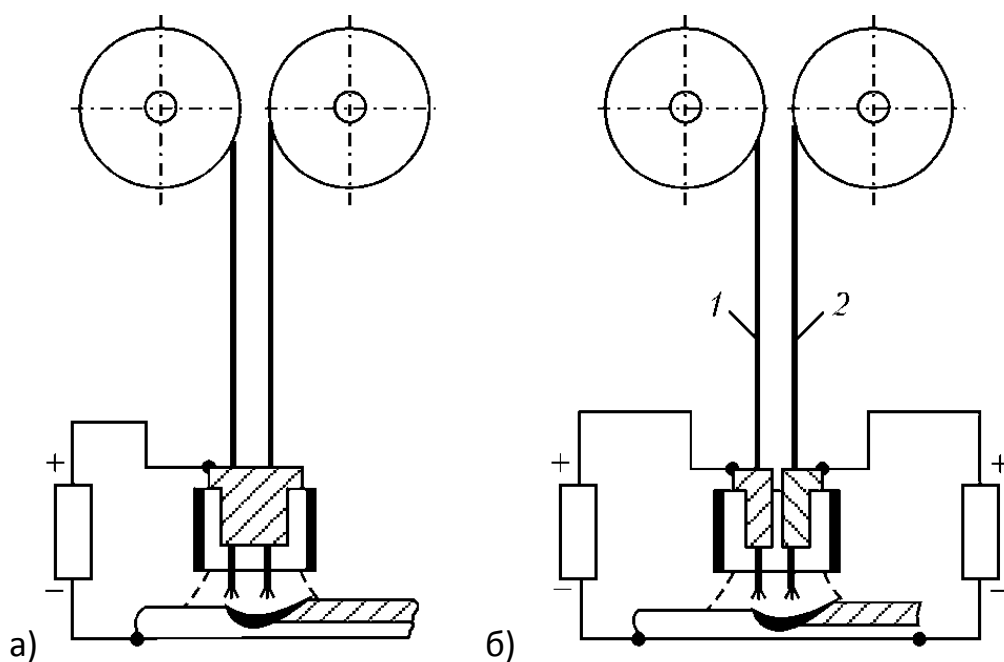


Рисунок 1.3 – Известные схемы сварки: а) двухэлектродная; б) двухдуговая

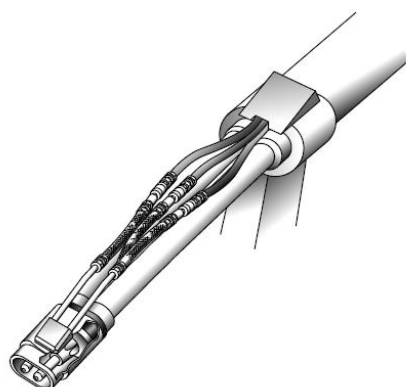


Рисунок 1.4 – Головка для сварки двумя проволоками

При двухэлектродной сварке («twin-wire welding») обе сварочные проволоки через общее сопло подаются в общую сварочную ванну, при этом обе проволоки подключаются к одному источнику питания, а сами проволоки располагают как вдоль, так и поперёк стыка (рисунок 1.6). В случае расположения проволок вдоль стыка можно получить максимальную глубину проплавления, а в случае расположения электродов поперёк стыка достигается максимальная ширина наплавки при минимальном проплавлении.



Рисунок 1.5 – Оборудование для двухдуговой тандемной сварки

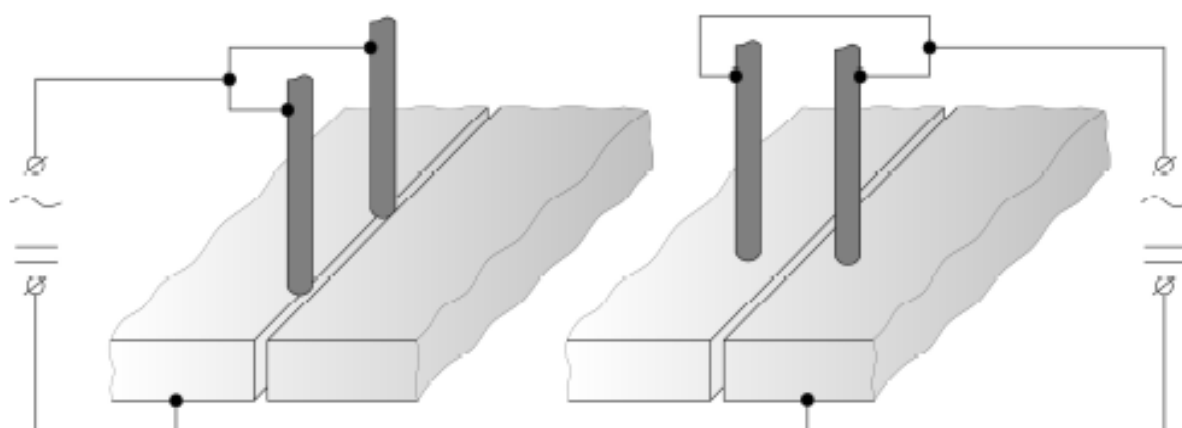


Рисунок 1.6 – Расположение сварочных проволок при двухэлектродной сварке вдоль стыка (а) и поперёк стыка (б)

При двухдуговой сварке через общее сопло проволоки электроизолированы друг от друга, сварочные дуги питаются от двух различных источников, электроизолированные токоподводы объединены в одном сопле, а сварочные дуги горят в общей ванне.

При двухдуговой тандемной сварке электродные проволоки подаются отдельно через две сварочные горелки, сварочные дуги питаются от двух источников и образуют две сварочные ванны. Таким образом, двухдуговая сварка подразделяется на сварку с общей сварочной ванной и с отдельными ваннами.

Если сравнивать двухэлектродную и двухдуговую сварку, то вторая обеспечивает более широкие возможности для регулирования ввода мощности в зону сварки, повышения стойкости металла шва к образованию горячих и холодных трещин, так как позволяет регулировать скорости охлаждения металла [5, 68]. Установлено, что механические свойства соединений при двухдуговой сварке выше [62]. Производительность расплавления электродов при двухдуговой сварке повышается до 6...9 кг/час [63].

Использование двух дуг позволяет снизить и распределить их давление на сварочную ванну, повысив производительность наплавки Π

$$\Pi = \alpha_H I , \quad (1.5)$$

где α_H – эмпирический коэффициент наплавки, г/(А·час); I - ток дуги, А.

Таким образом, производительность наплавки измеряется в кг/час или г/сек. Коэффициент наплавки α_H определяется взвешиванием образца с наплавленным металлом, когда с поверхности шва удаляются брызги электродного металла. Близкий ему по смыслу коэффициент расплавления

при автоматической сварке определяется через скорость расплавления электрода [15]

$$\alpha_p = V_{\text{Э}}/j, \quad (1.6)$$

где $V_{\text{Э}}$ – скорость расплавления (подачи электродной проволоки), см/с; j – плотность тока в сечении электрода, А /см².

Связь между двумя коэффициентами устанавливается с помощью формулы

$$\alpha_H = \alpha_p(1 - \psi_{\text{П}}), \quad (1.7)$$

где $\psi_{\text{П}}$ – безразмерный коэффициент потерь на угар и разбрызгивание.

Иногда $\psi_{\text{П}}$ указывают в процентах.

Для автоматической сварки под флюсом $\psi_{\text{П}} \approx 0,01$ [16,17]. Современные электроды также имеют $\psi_{\text{П}}$, не превышающий $\psi_{\text{П}} = 0,05$. Значение $\psi_{\text{П}}$ для электродов может служить для оценки их качества [18]. Для расчетов более удобно пользоваться размерностью коэффициентов α_p и α_H в г/(А·с). Для перехода на эту размерность нужно α_p или α_H в г/(А·ч) разделить на 3600.

В свою очередь коэффициент расплавления электродов зависит от параметров дуги. В первую очередь это ток дуги и диаметр электрода. Для способов дуговой автоматической сварки присущ также такой параметр как вылет электрода. Это расстояние от точки подвода тока к электроду до его расплавляемого торца. По вылету протекает сварочный ток и нагревает его теплотой Джоуля –Ленца. Таким образом, электрод при сварке нагревается не только мощностью, выделяемой сварочной дугой, но и за счет нагрева его вылета. При автоматической сварке ток к проволоке часто подводится скользящим токоподводом. Проволока входит в токоподвод холодной и постепенно нагревается до максимума в зоне действия приэлектродной области дуги. Кроме того, следует учитывать, что сопротивление проволоки зависит от ее температуры и растет по мере удаления от токоподвода. Также понятно, что время нахождения проволоки под током будет зависеть от

скорости проволоки, то есть от тока дуги. При движении проволоки происходит и процесс теплоотдачи от нее в окружающую среду. Таким образом, нагрев проволоки в вылете является достаточно сложным физическим явлением [5]. На коротком участке проволоки, близком к дуге, нагрев от нее складывается с нагревом от тепла Джоуля –Ленца и процессы еще более усложняются из-за более интенсивного роста сопротивления проволоки. В работах [19,20] предложена методика определения нагрева электрода только от мощности Джоуля –Ленца. Для этого неподвижную проволоку, закрепляют в двух токоподводах и нагревают током определенное время.

Таким образом, коэффициент расплавления электрода можно представить в виде суммы двух слагаемых

$$\alpha_p = \alpha_{pд} + \alpha_{pв}, \quad (1.8)$$

где $\alpha_{pд}$ - коэффициент расплавления от нагрева приэлектродной областью дуги (катодной или анодной); $\alpha_{pв}$ – коэффициент расплавления за счет нагрева электродной проволоки в вылете.

Роль вылета в общем нагреве электрода может быть значительной, особенно это проявляется при сварке тонкими проволоками. Для первого слагаемого формулы (1.8) известны эмпирические формулы [3], относящиеся к автоматической сварке под слоем флюса. Для обратной полярности дуги

$$\alpha_{pд} \approx 11,6 \pm 0,4 \text{ г/(А·час)}. \quad (1.9)$$

Следовательно, $\alpha_{pд}$ на обратной полярности практически не зависит от тока дуги. Обратная полярность чаще всего используется при автоматической сварке под флюсом. Если обратиться к полным зависимостям α_p от тока дуги на обратной полярности, то видно (рисунок 1.7), что они возрастают все интенсивнее с ростом тока. Поскольку согласно формуле (1.9) $\alpha_{pд}$ не зависит от тока, то такая форма роста может быть

обусловлена только нагревом вылета электрода. К сожалению, в литературе практически не приводятся данные о вылете как параметре сварки. Известно только, что вылет обычно увеличивают с ростом диаметра электрода. Такое требование обусловлено необходимостью обеспечения жесткости электрода после точки токоподвода, чтобы обеспечить его подачу в строго определенную часть сварочной ванны. Известны рекомендации [16], согласно которым длина вылета L_B должна быть

$$L_B = 10d, \quad (1.10)$$

где d – диаметр электрода.

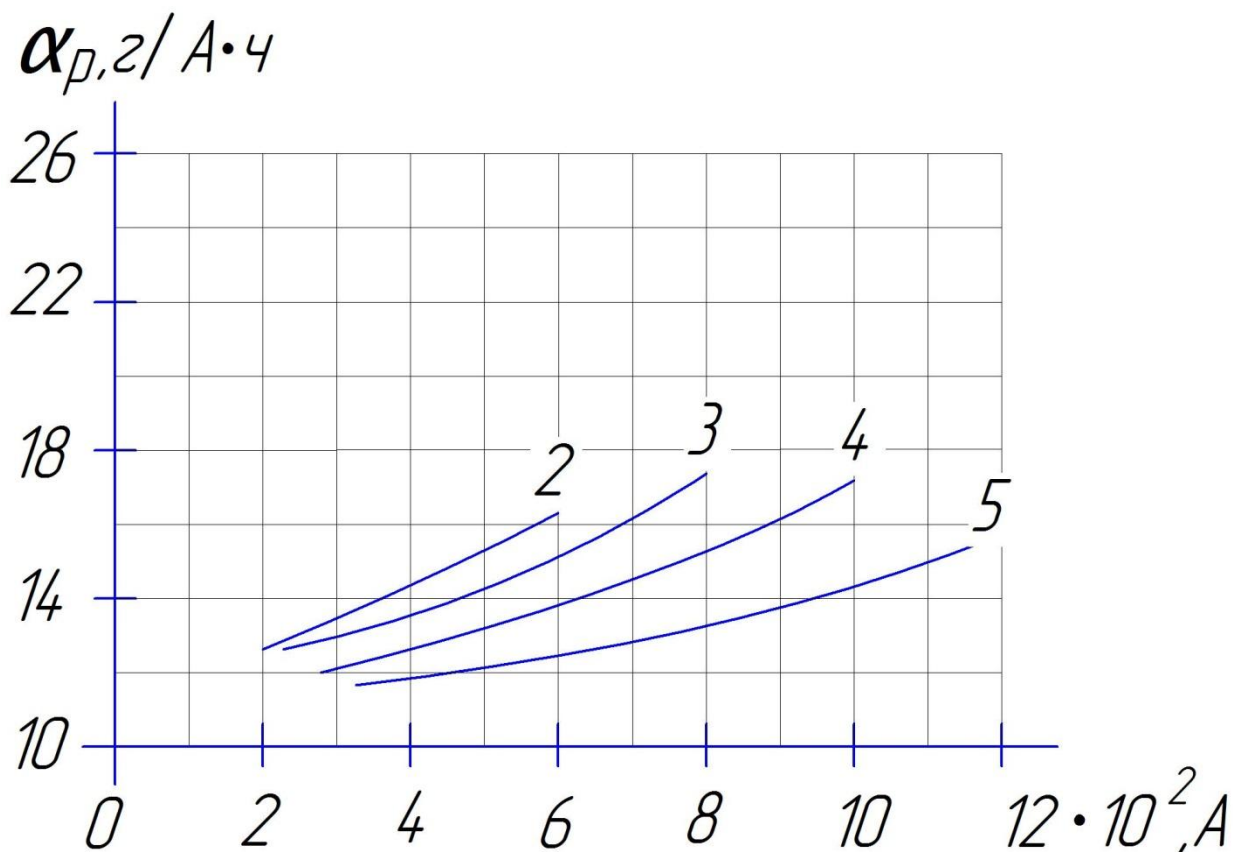


Рисунок 1.7 – Влияние тока на α_p при сварке под флюсом. Полярность обратная. Цифры – d в мм

Если исходить из того, что вылет однозначно связан с диаметром электрода, то по зависимостям рисунка 1.7 можно установить эмпирическую

зависимость второго слагаемого в формуле (1.8) в г/(А·час) от диаметра электрода [21]

$$\alpha_{рв} = I / (74 + 36 \cdot d). \quad (1.11)$$

Для сварочной дуги под флюсом прямой полярности отмечено влияние диаметра электрода на $\alpha_{рд}$

$$\alpha_{рд} = 6,3 + (70,2 \cdot 10^{-3} I / d^{1,035}); \quad (1.12)$$

С помощью формулы (1.11) можно приближенно определять общий коэффициент расплавления α_r и для дуги прямой полярности, путем сложения (1.11) и (1.12). Однако при этом из-за увеличения $\alpha_{рд}$ прямой полярности для нее рекомендуется корректирующий коэффициент 0,94 [21]. Дуга переменного тока по коэффициенту расплавления $\alpha_{рд}$ имеет средние значения между дугами прямой и обратной полярности [3].

Таким образом, для автоматической сварки под флюсом с помощью формул (1.8-1.12) можно определять производительность расплавления как одnodуговой, так и двухдуговой сварки. При этом в подавляющем числе случаев при двухдуговой сварке используются одинаковые параметры дуг: диаметры, токи, вылеты, полярности [1]. Глубина проплавления при двухдуговой сварке больше, чем при одnodуговой даже при одинаковой сумме токов. Это объясняется тем, что передняя дуга передает свою мощность в холодный металл и эта мощность эффективнее используется для расплавления металла. В свою очередь вторая дуга действует уже на подогретый металл, что также способствует повышению глубины проплавления. За счет этого можно повысить предельную толщину, свариваемую без разделки кромок.

Формулы (1.9), (1.11), (1.12) могут быть применены в ряде случаев и для ручной дуговой сварки покрытым электродом, если учесть влияние покрытия на снижение скорости расплавления [45].

Важным параметром двухдуговой сварки, повышающим ее технологическую гибкость, является дистанция между дугами. С увеличением дистанции больше определенной величины уменьшается глубина проплавления и площадь поперечного сечения проплавления основного металла, а производительность наплавки не изменяется. Это позволяет регулировать долю участия основного металла в шве ψ_0 . Для достижения однородности химического состава шва дистанция должна выбираться такой, чтобы сварочные ванны от двух дуг сливались в общую ванну. В то же время при сближении дуг увеличивается взаимодействие их магнитных полей. Сила взаимодействия двух параллельных проводников, которыми можно считать дуги, при протекании тока определяется формулой [22, с.26]

$$F = \mu_0 I_1 I_2 / (2\pi a) , \quad (1.13)$$

где μ_0 - магнитная проницаемость среды; I_1, I_2 - токи дуг, a - расстояние между дугами.

Дистанция между электродами оказывает влияние на глубину проплавления. Если при $a \leq 10$ мм образуется одна общая ванна, то при $a \geq 17$ мм общей ванны нет [22, с. 27].

При одинаковом направлении тока проводники (дуги) отталкиваются друг от друга, а при протекании в противоположном направлении - притягиваются [23]. Это может приводить к нестабильности пространственного положения дуг и свойств шва.

Работ, в которых используют при двухдуговой сварке электроды различного химического состава известно немного [2,24]. Способ [2] предложен для сварки преимущественно закаливаемых сталей, сварку ведут на постоянном токе, а электроды располагают последовательно по ходу сварки, расстояние между электродами устанавливают 0,7-0,9 длины сварочной ванны первой дуги, при этом первым располагают электрод из

аустенитно-ферритной проволоки, содержащий массовый процент углерода 0,01-0,05, марганца 0,9-1,6, кремния 0,4-0,8, хрома 19,0-21,0, никеля 8,6-10,2, молибдена 2-2,6, титана 0,3-0,7, кальция 0,02-0,06, железо остальное, либо из аустенитной проволоки, а вторым – электрод из аустенитной проволоки, содержащей массовый процент углерода 0,01-0,1, кремния 0,2-1,0, марганца 5,0-8,0, хрома 18,5-22,0, никеля 8,0-11,0, титана 0,01-0,9, железо остальное, причем сварку аустенитно-ферритной проволоки ведут на обратной полярности, а сварку аустенитными проволоками ведут на прямой полярности, причем токи сварочных дуг выбирают одинаковыми.

В данном способе затруднено получение оптимального химического состава шва. Легирующие элементы в проволоках изменяются в широких пределах и это обуславливает возможность получения сварных швов на рекомендованных параметрах сварки с сильно отличающимся химическим составом и, следовательно, свойствами. Способ не предусматривает приемов регулирования химического состава шва с целью получения его оптимального состава. Изменение одновременно токов двух дуг при их равенстве приводит к одновременному пропорциональному изменению площадей поперечного сечения основного и наплавленного металлов. При этом доля участия основного металла в металле шва почти не изменяется. Следовательно, не изменяется и химический состав шва. Аналогично влияние второго основного параметра режима двухдуговой сварки – ее скорости. Изменение диаметра электродов позволяет лишь немного изменить соотношение основного и наплавленного металла в сварочном шве и влиять на его химический состав. При этом заданные геометрические параметры шва получают отклонение от номинальных значений, что нежелательно.

Кроме того, в известном способе плавящиеся электроды различного химического состава располагают по отношению к направлению скорости

сварки и полярности сварочных дуг единственным образом, что также снижает возможности регулирования химического состава шва.

В работе [24] исследовалась двухдуговая наплавка двумя проволоками различного химического состава на низкоуглеродистую сталь. В одном случае применяли сочетание стальной и алюминиевой проволоки, в другом никелевой и алюминиевой. Электродные проволоки располагались в плоскости, перпендикулярной направлению наплавки. Расстояние между точками пересечения проволок одинакового диаметра с наплавляемой пластиной изменялось в пределах 0...5 мм. Проволоки подавались в зону наплавки с одинаковой скоростью, несмотря на большое различие плотностей стальной и алюминиевых проволок. В этой работе изучались в основном различия в электрических характеристиках дуг обратной полярности и свойства наплавки. Характеристикой дуг являлось среднеквадратичное отклонение токов дуг (СКО). Влияние режимов наплавки на содержание в шве легирующих элементов не исследовалось.

Большие возможности для регулирования химического состава сварного шва предоставляет использование комбинации дуг прямого и косвенного действия, когда один из электродов дуги является неплавящимся. В этом случае сварка должна производиться в среде инертного газа. Давно известен такой способ сварки сжатой дугой [25], однако он не получил широкого распространения. При таком способе можно независимо регулировать расплавление электродного и основного металлов, изменяя долю участия их в шве. Для свободной дуги такие исследования также производились [26]. Было впервые обращено внимание на важное преимущество дуги комбинированного действия с одной электродной проволокой – возможность регулирования химического состава шва параметрами сварки. Изменяя ток дуги прямого действия можно регулировать только проплавление основного металла, а изменяя ток или диаметр электрода дуги косвенного действия – производительность расплавления проволоки. Оба варианта позволяют изменять химический состав шва в широких пределах, получая оптимальный

состав. Основной проблемой этого способа является, по-видимому, магнитное взаимодействие дуг, приводящее к нестабильности формирования валика. При сварке сжатой дугой прямого действия влияние магнитного поля дуги косвенного действия на дугу прямого действия сказывается меньше из-за большей пространственной устойчивости сжатой дуги. По-видимому, именно поэтому в работе [25] исследовалась сжатая дуга прямого действия, которая за счет потока плазмообразующего газа обладает большей пространственной устойчивостью.

В работе [27] для уменьшения магнитного взаимодействия комбинации дуг предложено использовать их пульсации. В период большого тока в дуге прямого действия в дуге косвенного действия протекает малый ток и наоборот.

Известен был способ сварки трехфазной дугой, при котором фазу изделия периодически отключали от источника питания и подключали ее к электродной проволоке [28]. Это позволяет от одного трехфазного источника питания питать и изделие и проволоку. При этом осуществляется независимое регулирование проплавления изделия и проволоки. Производительности расплавления могут регулироваться, в том числе и длительностями протекания тока.

В последнее время появились работы по сварке комбинацией дуг прямого и косвенного действия с плавящимися электродами, в которых также создается возможность использовать электродные проволоки различного химического состава [29-31] (рисунок 1.8).

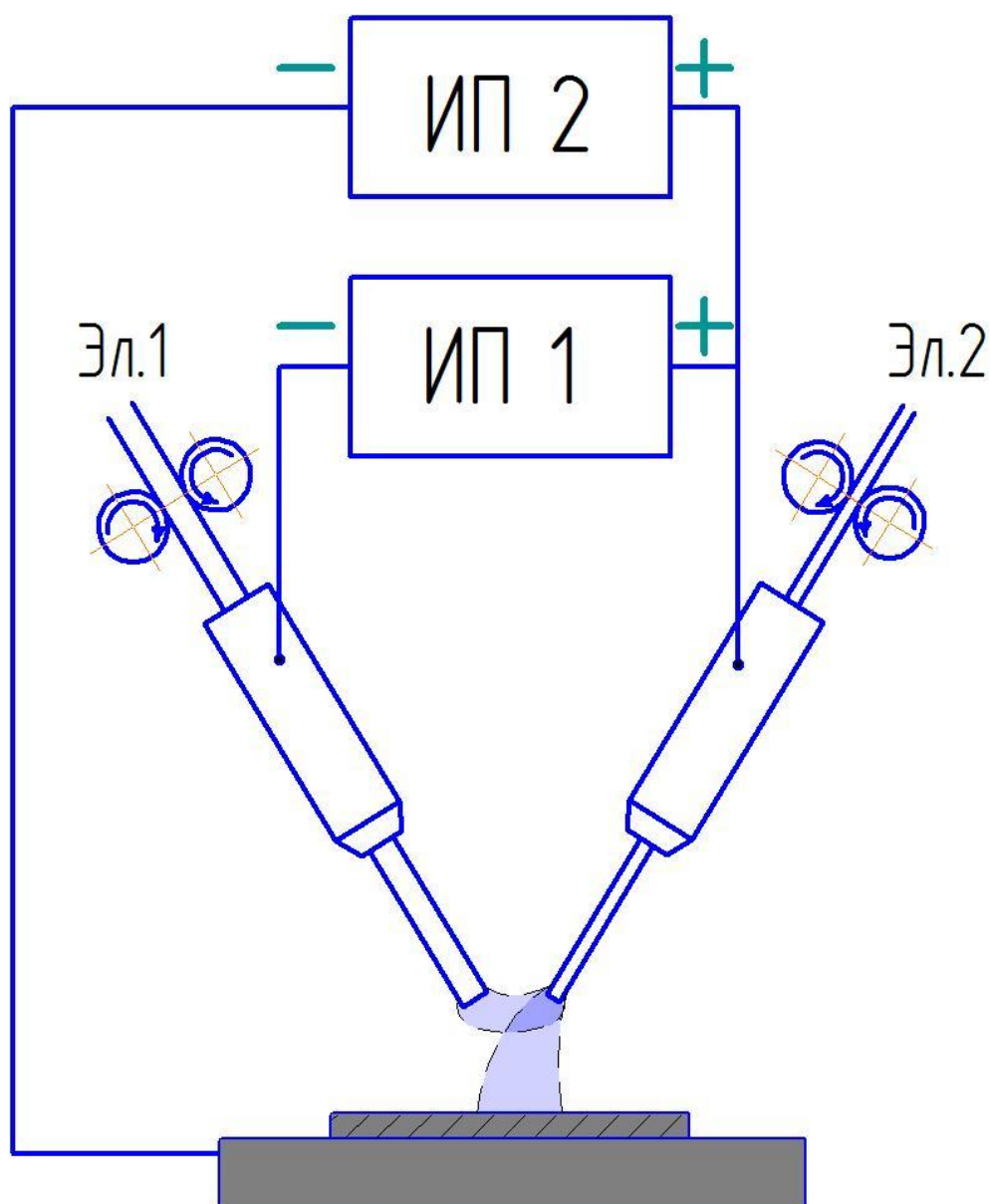


Рисунок 1. 8 – Схема механизированной наплавки дугой комбинированного действия с неплавящимися электродами [29]. ИП – источник питания

К двум плавящимся электродам и изделию [29] постоянно подключают полюсы от источников питания. Полюса одного источника питания постоянного тока подключают к электродам, отрицательный полюс второго источника постоянного тока подключают к изделию, а положительный полюс второго источника тока подключают к электроду, к которому подключен положительный полюс первого источника тока. Скорости подачи электродов назначают, соответствующими значениям коэффициентов расплавления электродов в обычных дугах прямой и

обратной полярностей, причем скорость подачи электрода, подключенного к отрицательному полюсу источника тока выбирают соответствующей коэффициенту расплавления плавящегося катода в дуге прямой полярности, а скорость подачи электрода, подключенного к положительным полюсам источников тока выбирают соответствующей коэффициенту расплавления плавящегося электрода-анода в дуге обратной полярности. Диаметры плавящихся электродов могут отличаться друг от друга. Электрод большего диаметра может подключаться как к положительному полюсу источников питания, так и к отрицательному. Химические составы плавящихся электродов также могут отличаться друг от друга.

Расположение на изделии отрицательного полюса источника питания обеспечивает высокую проплавляющую способность дуги, а также очистку изделия от окисных пленок, например, при сварке в аргоне алюминиевых сплавов. Расположение на плавящихся электродах положительного и отрицательного полюсов второго источника питания позволит обеспечить гибкое регулирование их скоростей подачи и высокую производительность расплавления электродных проволок.

Возможность гибкого регулирования токов дуг в электродах и изделии позволит в широких пределах изменять долю электродного металла в металле шва. Использование проволок различного диаметра и химического состава в сочетании с регулированием токов дуг позволит значительно расширить технологические возможности регулирования химического состава шва.

Общую производительность наплавки валика при наплавке комбинацией дуг можно определить по формуле

$$\rho \cdot F_H \cdot V_C / (1 - \Psi_{II}) = J_K \cdot \alpha_{PK} \cdot F_K + J_A \cdot \alpha_{PA} \cdot F_A, \quad (1.14)$$

где F_H – площадь поперечного сечения наплавляемого валика, см^2 ; V_C – скорость сварки, см/с ; J_K – плотность тока на электроде-катоде, А/см^2 , J_A –

плотность тока на электроде-аноде, A/cm^2 ; F_K – площадь сечения электрода-катода, cm^2 ; F_A – площадь сечения электрода-анода, cm^2 .

Поскольку $J_K \cdot F_K = I_K$ – ток на электроде-катоде, $J_A \cdot F_A = I_A$ – ток на электроде-аноде, то произведение тока на коэффициент расплавления дают производительности расплавления электродов

$$П_K = \alpha_{PK} \cdot I_K, \quad П_A = \alpha_{PA} \cdot I_A. \quad (1.15)$$

Ток в положительном электроде I_A равен сумме токов в отрицательном электроде и изделии

$$I_A = I_K + I_{из}. \quad (1.16)$$

Долю участия ψ_K электродного металла электрода-катода в наплавленном металле валика можно представить в виде

$$\Psi_K = П_K / (П_K + П_A). \quad (1.17)$$

Тогда, доля участия ψ_A электродного металла электрода-анода в наплавленном металле валика

$$\Psi_A = П_A / (П_K + П_A). \quad (1.18)$$

Содержание какого-либо химического элемента в смеси двух электродных проволок (без учета химических реакций) будет определяться выражением

$$C_{\text{Э}} = C_{\text{ЭК}} \cdot \Psi_K + C_{\text{ЭА}} \cdot \Psi_A, \quad (1.19)$$

где $C_{\text{ЭК}}$ – содержание данного элемента в электроде-катоде, $C_{\text{ЭА}}$ – содержание этого же элемента в электроде-аноде.

Поскольку значения ψ_K и ψ_A зависят от тока и диаметра электрода, то и содержание элемента в наплавленном металле будет зависеть от этих параметров.

Этот принцип был использован в патенте [30], но уже одновременно для двух проволок различного химического состава при питании дуг от источника с разнополярными прямоугольными импульсами тока.

В способе дуговой механизированной импульсной наплавки в среде инертного газа [30], отрицательный полюс источника питания постоянного тока подключают к неплавящемуся электроду, а положительный полюс подсоединяют к изделию и электродной проволоке, электродную проволоку подают непрерывно в промежуток между неплавящимся электродом и изделием, зажигают дугу между неплавящимся электродом и изделием и затем периодически отключают изделие от положительного полюса источника питания и периодически подключают к нему электродную проволоку.

В отличие от способа [27] подключают к положительному полюсу источника питания и подают непрерывно в промежуток между неплавящимся электродом и изделием вторую электродную проволоку другого химического состава, периодически зажигают на нее дугу косвенного действия с неплавящегося электрода, соотношение длительностей протекания тока в каждой из электродных проволок устанавливают в пределах 0,2...0,4 по отношению к циклу протекания тока, а величину токов дуг на плавящиеся электроды в периоды протекания по ним тока, определяют по формуле

$$I_{\text{Э}} = (\pi d_{\text{Э}}^2 V_{\text{Э}} \rho t_{\text{Ц}}) / (4 t_{\text{Э}} \alpha_{\text{Р}}), \quad (1.20)$$

где $d_{\text{Э}}$ - диаметр плавящегося электрода, см; $V_{\text{Э}}$ - требуемая скорость расплавления электрода, см/с; $t_{\text{Ц}}$ - полное время цикла протекания тока в плавящихся электродах и изделии, с; $t_{\text{Э}}$ - время протекания тока в данном плавящемся электроде, с; $\alpha_{\text{Р}}$ - коэффициент расплавления плавящегося электрода при сварке дугой прямого действия на обратной полярности дуги при токе $I_{\text{Д}} = I_{\text{Э}} \cdot t_{\text{И}} / t_{\text{Ц}}$.

Подключение положительного полюса источника питания и зажигание дуг между неплавящимся электродом и остальными электродами производят в последовательности: «изделие – первая проволока – изделие – вторая проволока – изделие».

При такой схеме (рисунок 1.9) обеспечивается одновременно независимость производительности проплавления основного металла и производительностей расплавления двух электродных проволок с возможностью регулирования в широких пределах химического состава металла шва большим числом легирующих элементов, содержащихся в проволоках различных марок. Появляется возможность, не создавая новые сварочные проволоки, обеспечить практически для любого шва его требуемый химический состав с помощью известных проволок. Это обеспечивается за счет поочередного периодического горения одной из трех дуг от одного источника питания, причем создается возможность устойчивых зажиганий дуг косвенного действия между неплавящимся электродом и проволоками и дуги прямого действия между неплавящимся электродом и изделием, несмотря на достаточно длительные перерывы их горения. Устойчивое зажигание дуги на изделие обеспечивается тем, что электродные проволоки подаются в промежуток между изделием и неплавящимся электродом непрерывно и играют по отношению к изделию роль дежурных дуг. Устойчивость повторных зажиганий дуг косвенного действия обеспечивается вследствие постоянной подачи электродных проволок в столб дуги, проникновению проволок в столб дуги и подключению к ним достаточно высокого напряжения холостого хода одного источника питания постоянного тока.

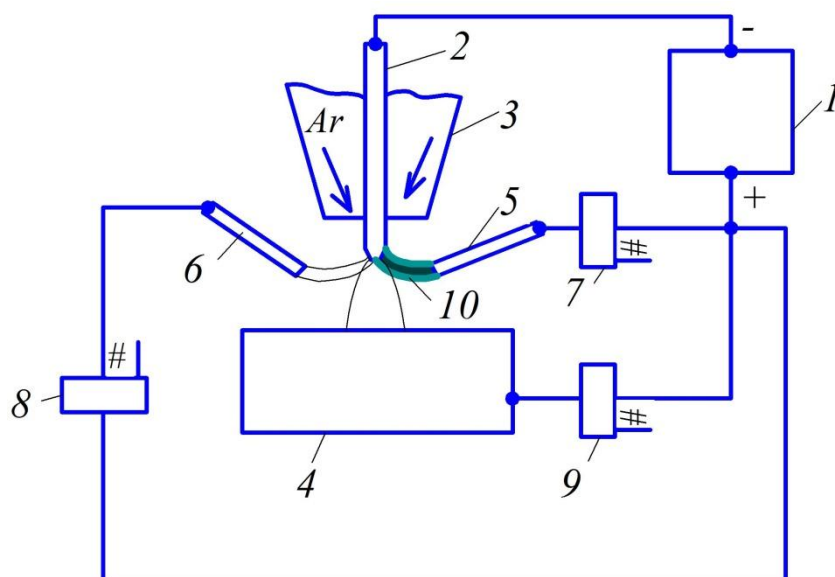


Рисунок 1.9 – Схема наплавки комбинацией дуг с двумя проволоками

К отрицательному полюсу источника питания 1 дуги постоянного тока постоянно подключен неплавящийся вольфрамовый электрод 2, размещенный в сварочной горелке 3. Горелка 3 перемещается относительно изделия со скоростью V_C . В сопло горелки 3 подается инертный газ аргон, гелий или их смесь. К положительному полюсу источника питания 1 подсоединены наплавляемое изделие 4 и плавящиеся электроды 5 и 6 различного химического состава. Электроды 5 и 6 с посредством двух различных подающих устройств подаются с постоянными скоростями в промежуток между неплавящимся электродом 2 и изделием 4. Электроды 5 и 6 могут быть различного диаметра. В электрическом проводнике, соединяющим плавящийся электрод 5 с положительным полюсом источника питания 1 установлен электронный ключ 7, обеспечивающий подключение и отключение электрода 5 и зажигание и гашение дуги между электродом 2 и электродом 5. В электрическом проводнике, соединяющим плавящийся электрод 6 с положительным полюсом источника 1 также установлен электронный ключ 8, обеспечивающий подключение и отключение электрода 6 и зажигание и гашение дуги между неплавящимся электродом 2 и электродом 6. В электрическом проводнике, соединяющем изделие 4 с положительным полюсом источника питания 1 установлен

электронный ключ 9, обеспечивающий подключение и отключение изделия 4 по отношению к положительному полюсу источника питания 1.

Электронная схема управления управляет электронными ключами таким образом, что в каждый момент времени горит только одна сварочная дуга. На рисунке 1.5 показано, что горит дуга 10 косвенного действия между плавящимся электродом 5 и неплавящимся 2. При этом включен электронный ключ 6, а электронные ключи 8 и 9 отключены.

В начальный момент наплавки зажигают дугу между неплавящимся электродом 2 и изделием 4 при включенном электронном ключе 9, которая горит в течение времени $t_{и}$. Электронные ключи 7 и 8 в этот период отключены. После этого включают подачу электродной проволоки 5, электронный ключ 9 разъединяют, подключая электронным ключом 7 электрод 5. Тем самым зажигают дугу 10 между электродами 2 и 5. Через некоторое время $t_{э1}$ электронный ключ 7 разъединяют, отключая дугу между электродами 2 и 5 и включают вновь ключ 9, зажигая вновь дугу между электродом 2 и изделием 4 на время $t_{и}$. Время горения дуги между неплавящимся электродом 2 и изделием 4 времени $t_{и}$ в промежутке между горением дуг на плавящиеся электроды 5 и 6 выбирается одинаковым.

После этого включают подачу электродной проволоки 6 и отключают электронный ключ 9, а электронный ключ 8 включают, зажигая дугу косвенного действия между электродами 2 и 6 на время $t_{э2}$. Этим завершается один цикл работы всех трех дуг. Время горения дуг на плавящиеся электроды могут быть одинаковыми $t_{э1} = t_{э2}$ или различными

$t_{э1} \neq t_{э2}$. Полное время цикла $t_{ц}$ равно сумме длительностей горения дуг между неплавящимся электродом, изделием и плавящимися электродами

$$t_{ц} = 2t_{и} + t_{э1} + t_{э2}.$$

Новый цикл начинается гашением дуги между электродами 2 и 6 путем размыкания электронного ключа 8 и включением дуги между электродом 2 и изделием 4 электронным ключом 9. Между подключениями электродов 5 и 6 каждый раз включается дуга между неплавящимся электродом 2 и изделием 4. Переключение ключей производится с достаточно высокой частотой, обеспечивающей непрерывное плавление и подачу электродов 5 и 6 с постоянными скоростями. Характеристики источника питания 1 обеспечивают отдельное регулирование тока в электродах 5 и 6 и изделии 4. Ток дуги «неплавящийся электрод 2 – изделие 4» обеспечивает необходимый провар изделия 4. Токи дуг «неплавящийся электрод 2 – плавящийся электрод 5» и «неплавящийся электрод 2 – плавящийся электрод 6» обеспечивают необходимую производительность наплавки для обеспечения легирования шва нужными легирующими элементами, содержащимися в электродных проволоках различного химического состава. Стабильное зажигание дуг обеспечивается высоким быстродействием электронных ключей и хорошими условиями зажигания всех трех дуг. Дуги косвенного действия хорошо зажигаются благодаря их подаче в столб дуги прямого действия в промежутке между электродом 2 и изделием 4. Дуга прямого действия надежно возбуждается благодаря выдуванию столбов дуг косвенного действия собственным магнитным полем в направлении детали и хорошей ионизации дугового промежутка « неплавящийся электрод 2 – изделие 4».

На рисунке 1.10 представлена циклограмма тока в неплавящемся электроде. Ток в неплавящемся электроде протекает постоянно. Общее время цикла на рисунке 1.10 $t_{ц}$, совпадает с длительностью протекания тока в неплавящемся электроде. На циклограмме приведены длительности протекания тока в изделии и в плавящихся электродах. Циклограмма содержит участки 1,2,3,4, представляющие зависимости токов дуг от времени горения. Участок 1 постоянного тока $I_{д}$ дуги прямой полярности

между неплавящимся электродом и изделием. Прямая 2, параллельная оси времени, показывает ток дуги $I_{Э1}$ на первый плавящийся электрод во второй части цикла, длительность протекания которого $t_{Э1}$. Прямая 3, параллельная оси времени показывает ток дуги $I_{И}$ на изделие во время третьей части цикла, длительность протекания которого $t_{И}$. Прямая 4, параллельная оси времени показывает ток во втором электроде $I_{Э2}$ дуги между неплавящимся электродом и вторым плавящимся электродом, длительность протекания которого $t_{Э2}$.

На рисунке 1.10 в общем случае длительности протекания токов и токи в плавящихся электродах не равны между собой: $I_{Э1} \neq I_{Э2}$; $t_{Э1} \neq t_{Э2}$. Ток дуги на изделие $I_{И}$ протекает в два раза чаще, чем в каждом из электродов. Это необходимо для повышения устойчивости повторных зажиганий дуг. Длительность протекания токов в каждом из плавящихся электродов $t_{Э1}$ и $t_{Э2}$ должна составлять 0,2...0,4 периода $t_{Ц}$. Суммарное время протекания тока в двух плавящихся электродах составляет $t_{Э1} + t_{Э2} = 0,4...0,8 t_{Ц}$. Время протекания тока в изделии $t_{И} = 0,2...0,6 t_{Ц}$. Это позволяет регулировать в необходимых пределах соотношение производительностей наплавки и расплавления основного металла в зависимости от того, ведется процесс наплавки или сварки. Длительности протекания токов дуг в электродах $t_{Э1}$ и $t_{Э2}$ и токи $I_{Э1}$ и $I_{Э2}$ могут быть выбраны и равными между собой: $t_{Э1} = t_{Э2}$, $I_{Э1} = I_{Э2}$;

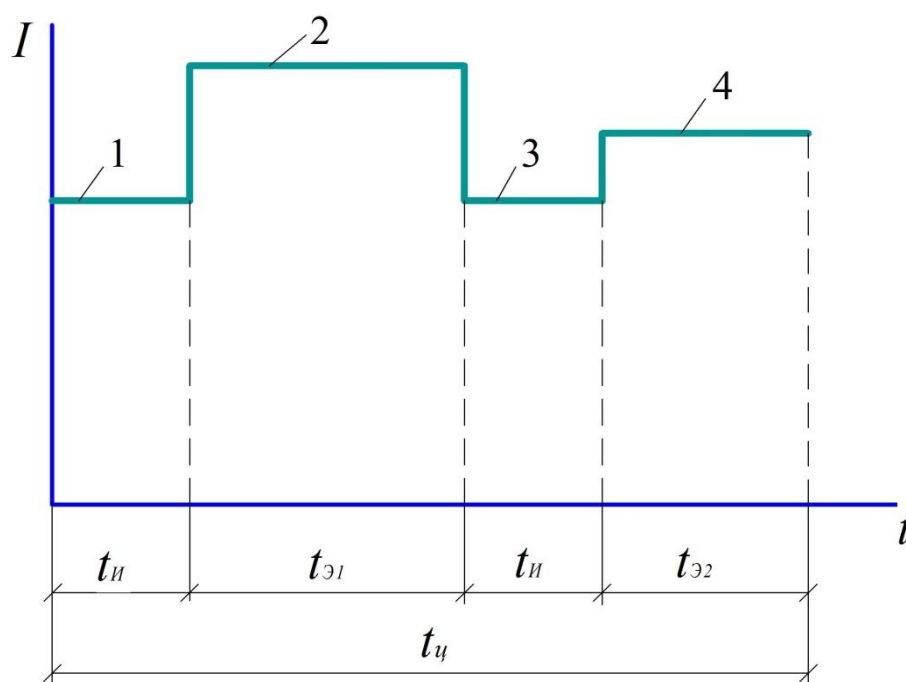


Рисунок 1. 10 – Циклограмма тока в неплавящемся электроде

В этом патенте впервые было отмечено, что использование двух проволок позволяет, используя известные электродные проволоки, подбирать их оптимальное сочетание и получать широкий спектр легирующих элементов в шве и определять опытным или расчетным путем режимы наплавки и сварки, обеспечивающие требуемое содержание легирующих элементов в наплавленном металле и шве. Способ может широко использоваться не только при наплавке, но и при сварке для заполнения разделки кромок. Также впервые в этом способе было установлено, что использование комбинации двух различных проволок позволяет получить любой химический состав наплавляемого металла, используя только стандартные электродные проволоки. В дальнейшем было обращено внимание на использование этих двух установленных положений при двухдуговой сварке.

Наиболее просто двухдуговую сварку можно реализовать в ручном варианте исполнения, так как не требуется дорогостоящих специализированных сварочных автоматов. В то же время исследования по такому способу ранее практически отсутствовали.

В работе [32] был предложен способ ручной двухэлектродной сварки (рисунок 1.11). По этому способу используют отдельные электрододержатели, а электроды плавятся поочередно вследствие отключения дуги на одном из них, причем сварочную дугу обрывают принудительно путем выключения тока в сварочной цепи электрода. В отличие от известного ранее способа механизированной сварки, до сварки получают зависимости времени расплавления покрытой части электродов от тока дуги при одноэлектродной сварке, при сварке изменяют периодически полярность изделия, сохраняя полярность каждого электрода, действующие значения токов в электродах выбирают по полученным до сварки зависимостям времени расплавления электродов от тока дуги, обеспечивающими одинаковое время расплавления покрытой части электродов.

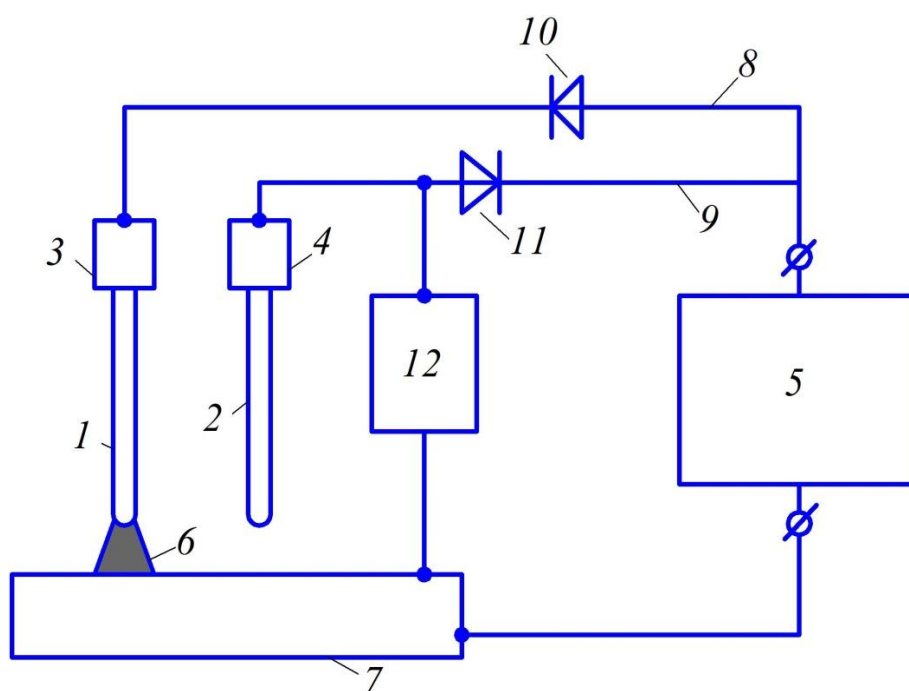


Рисунок 1. 11 – Схема реализации двухэлектродной сварки

В этом способе, как один из вариантов, предложено покрытые электроды выбирать с различным химическим составом наплавленного металла. При этом покрытые электроды могут быть с различными диаметрами и

длинами стержней. Так при горении поочередно двух дуг возможно улучшение условий горения каждой из них и поэтому предложено, что полярность одного или каждого из покрытых электродов может назначаться отличающейся, от рекомендуемой для него при одноэлектродной сварке.

Для реализации способа двухэлектродной сварки основным является обеспечение условий устойчивого повторного зажигания дуг с каждого из электродов. Поэтому было предложено использовать для этих целей источник питания сварочной дуги с разнополярными импульсами тока прямоугольной формы (РПИ). Переключение тока с одного электрода на другой осуществляется включенными в цепь вентилями (диодами). Источники с РПИ находят все большее применение в производстве. Они универсальны и позволяют сваривать не только стали, но и алюминиевые сплавы [33,34]. К недостаткам двухэлектродной сварки следует отнести необходимость весьма близкого расположения торцов электродов для обеспечения повторных зажиганий дуг. Это затрудняет, например, возможность выполнения сварки двумя сварщиками и требует обязательного создания специального электрододержателя.

Поскольку время расплавления электродов различного химического состава может быть различным, то при создании общего электрододержателя длины дуг могут отличаться. Для исключения этого эффекта в способе [32] предложено синхронизировать время расплавления покрытой части электродов. Однако это ограничивает возможности регулирования химического состава наплавляемого металла.

Для синхронизации расплавления электродов предложено использовать установленную в работах [35 – 37] гиперболическую зависимость времени расплавления покрытой части электрода от времени горения дуги (рисунок 1.12).

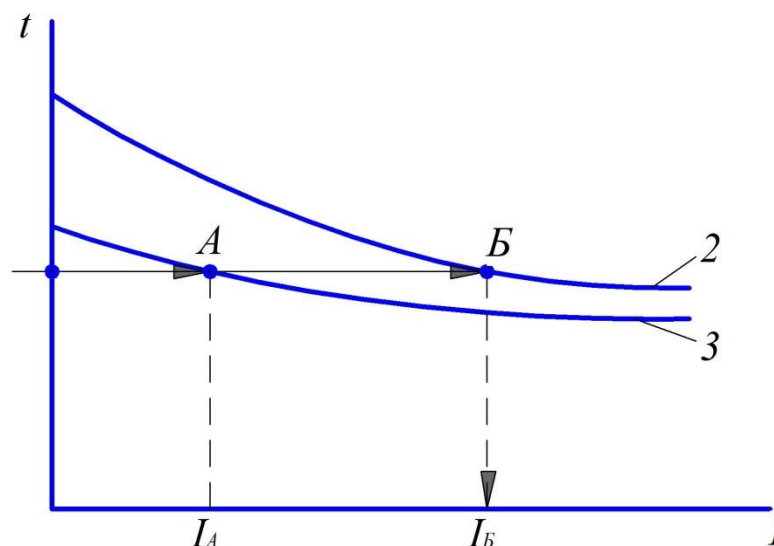


Рисунок 1.12 – Схема определения токов дуг для обеспечения равного времени расплавления электрода

Если измерить время расплавления электрода при трех значениях тока из рекомендованного диапазона, то с помощью стандартной компьютерной программы аппроксимации [38] можно определить коэффициенты А и В гиперболической зависимости

$$t = A + (B/I). \quad (1.21)$$

Зависимость (1.21) с высокой точностью 1-2 % выполняется при выполнении наплавки квалифицированным сварщиком. На рисунке 1.12 приведены две зависимости для разных марок электродов. Задавшись необходимым одинаковым временем расплавления, определим токи дуг, обеспечивающие необходимое время сварки.

В рассматриваемом патенте [32] впервые показано число возможных вариантов сочетаний электродов. Общее число таких зависимостей равно количеству электродов, имеющих названные различия и которые могут совместно использоваться для сварки. Число сочетаний двух электродов из n различных типов электродов C_n^2 определяется формулой

$$C_n^2 = n(n-1)/2, \quad (1.22)$$

Число сочетаний при пяти различных электродах составляет $C_5^2 = 10$, а при шести $C_6^2 = 15$, при десяти $C_{10}^2 = 45$. Число сочетаний быстро растет с увеличением числа возможных электродов. Это делает перспективным применение различных сочетаний сварочных электродов при двухэлектродной сварке в отношении получения большого разнообразия химического состава шва, так как в производстве используются сотни марок покрытых электродов с различными свойствами. Многие из сочетаний электродов обеспечат уникальный химический состав наплавленного металла и характеристик шва, что особенно необходимо при ремонтной сварке конструкций из сложно свариваемых материалов.

Поэтому было обращено внимание на более технологически простой способ двухдуговой сварки покрытыми электродами [39] (рисунок 1.13).

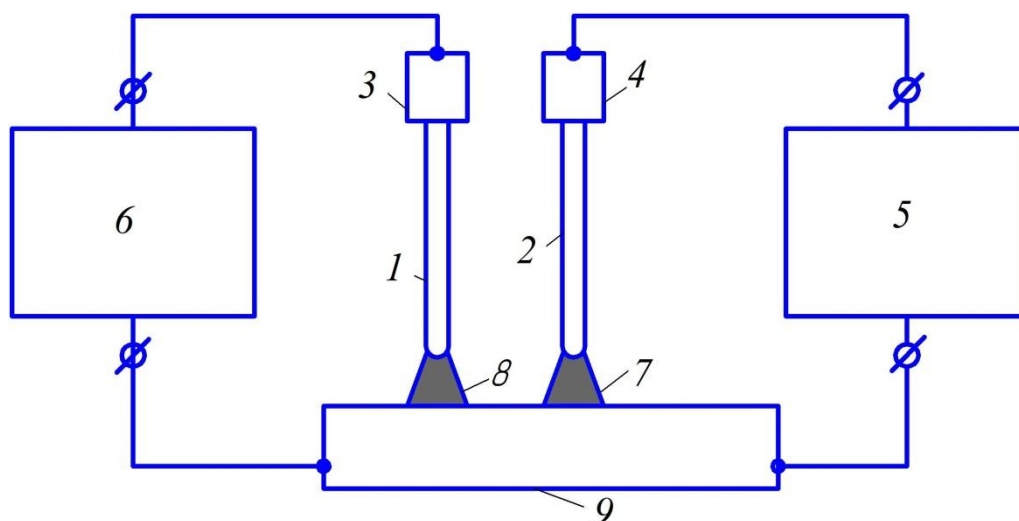


Рисунок 1.13 - Схема процесса ручной двухдуговой сварки

Выполнение двухдуговой ручной сварки возможно как двумя, так и одним сварщиком. Для выполнения работы одним сварщиком необходимо сконструировать компактный электрододержатель с изоляцией подвода тока к электродам. В этом случае также будет иметь место ограничение по соблюдению одинаковой длины сварочной дуги и синхронизации токов сварки.

Для постановки задач работы необходимо также подробнее рассмотреть особенности сварки покрытыми электродами.

1.3 Ручная дуговая сварка покрытыми электродами

Общие требования к покрытым электродам и их классификация приводятся в ГОСТ 9466 [40]. Классификация сопровождается условным обозначением для того, чтобы легко было распознать назначение электродов. На типы для сварки конструкций различного назначения они подразделяются по трем стандартам: ГОСТ 9467, ГОСТ 10052 и ГОСТ 10051 [41-43].

В ГОСТ 9467 [41] определены обозначения электродов для сварки конструкционных сталей, а также 9 типов для сварки теплоустойчивых сталей. Электроды для сварки теплоустойчивых сталей обозначаются буквой Э-, за которой следует обозначение содержания основных легирующих элементов, например ГОСТ 10052 [42] содержит требования к 49 типам электродов для сварки высоколегированных сталей. Они имеют такое же обозначение, как и электроды для сварки теплоустойчивых сталей, однако число и содержание легирующих элементов намного выше. 44 типа электродов для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами [43] имеют также обозначение по содержанию легирующих элементов, однако главным для них является твердость и износостойкость наплавленного металла. В таблице 1.2 приведены требования к химическому составу для различных типов электродов из трех стандартов

Таблица 1.2 - Требования к содержанию химических элементов в наплавленном металле [41-43]

Тип	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Nb	S _≤	P _≤
Э- 10X1M1НФБ	0,07- 0,12	0,15- 0,40	0,6- 0,9	1,0- 1,4	0,6- 0,9	0,7- 1,0	0,15- 0,35	0,07- 0,20	0,025	0,030
Э- 10X25Н13Г2Б	≤0,12	0,4- 1,2	1,2- 2,5	21,5- 26,5	11,5- 14,0	-	-	0,7- 1,3	0,020	0,030

Э-35Х12Г2С2	0,25- 0,45	1,5- 2,5	1,6- 2,4	10,5- 13,5	-	-	-	-	0,02	0,03
-------------	---------------	-------------	-------------	---------------	---	---	---	---	------	------

Обращает на себя внимание существенный допускаемый разброс легирующих элементов в наплавляемом металле, достигающий 20-30% от средних значений. Такой разброс обусловлен металлургическими особенностями плавки металла для электродной проволоки. Не меньший разброс допускается и для проката, используемого для производства сварных конструкций. Все это приводит к значительной неоднородности эксплуатационных характеристик сварных швов одних и тех же конструкций.

Все электроды подразделяются [40] по толщине покрытия в зависимости от отношения D/d , где D – диаметр электрода с покрытием, d – диаметр стержня - на 4 группы. Электроды с тонким покрытием обозначаются буквой М, для которых $D/d \leq 1,20$. К электроды со средним покрытием (С) относятся такие, у которых $1,20 < D/d \leq 1,45$. Электроды с толстым покрытием обозначаются D и для них $1,45 < D/d \leq 1,80$. Электроды, у которых $D/d > 1,80$ считаются электродами с особо толстым покрытием. Очевидно, что толщина покрытия оказывает влияние на скорость расплавления электродов и производительность наплавки.

По допустимым пространственным положениям сварки электроды разделяют на четыре группы. Это следует учитывать при разработке процесса двухдуговой сварки. Используемые электроды, в случае ведения сварки в положениях отличных от нижнего, должны совпадать по допускаемому положению сварки. Также следует учитывать, что при сварке не в нижнем положении сварочный ток уменьшается на 10-15%.

По роду и полярности применяемого при сварке и наплавке тока, а также по номинальному напряжению холостого хода используемого источника питания сварочной дуги переменного тока частотой 50 Гц электроды

подразделяются на 10 групп и обозначаются цифрами от 0 до 9. Электроды, обозначенные цифрой 0 могут использоваться только для обратной полярности дуги. Электроды, обозначенные цифрой 9 могут использоваться с дугой переменного тока от источника питания с достаточно высоким напряжением холостого хода 90 ± 5 Вольт. Как было показано в разделе 1.1, полярность дуги оказывает некоторое влияние на производительность расплавления и должна учитываться при разработке процесса двухдуговой сварки.

Важным фактором при ручной сварке является то, что вылет электрода в процессе сварки является переменной величиной. Это приводит к постепенному увеличению нагрева электрода к концу его расплавления. Таким образом, эта скорость неравномерна во времени. Следовательно, неравномерным будет и распределение легирующих элементов по длине сварного шва. В работах [44-46] показано, что изменение скорости расплавления электродов во времени подчиняется линейному закону. Неравномерность увеличивается с увеличением тока дуги. Для обеспечения равномерного расплавления электрода в патенте [46] предложено изменять ток дуги в процесс расплавления электрода, постепенно снижая его по заданному закону. Однако это не исключает неоднородности сварного шва, поскольку изменение тока сварки приводит к изменению проплавления основного металла.

Нагрев электрода в вылете является одной из двух причин низкой производительности наплавки покрытых электродов по сравнению с автоматической сваркой голой электродной проволокой. Первая причина связана с тем, что покрытие забирает на себя часть выделяемой мощности. По второй причине нагрева электрода в вылете, вынужденно снижают допустимые плотности тока на стержень электрода. В противном случае покрытие в конце расплавления электрода перегревается и отслаивается от

стержня. В таблице 1.3 приведены данные по рекомендуемым плотностям тока [3].

Таблица 1.3 - Рекомендуемые плотности тока при сварке покрытыми электродами [3]

Диаметр, мм	3	4	5	6
Плотность тока, А/мм ²	13,0-18,5	10,0-14,5	9,0-12,5	8,5-12,0

Две указанные причины совместно приводят к тому, что производительность ручной наплавки может снижаться до 10 раз по сравнению с автоматической сваркой под слоем флюса. Это важная причина необходимости автоматизации процесса сварки. В то же время ручной сварке нет пока замены в единичном производстве и при ремонте сварных конструкций. Именно поэтому разработка двухдуговой сварки будет способствовать существенному расширению технологических возможностей ручной дуговой сварки.

Для обоснованного выбора параметров двухдуговой наплавки необходимы критерии оптимальности легирования металла сварного шва. В настоящее время можно рассматривать несколько критериев. Для оценки свариваемости низколегированных сталей используют эквивалент углерода. Чем ниже значение этого эквивалента, тем лучше свариваемость стали и меньше вероятность холодных трещин. Известен ряд формул для эквивалента углерода, несколько отличающихся между собой. Логичным будет, если мы будем применять этот показатель и для оценки уровня легирования сварного шва. Такой подход предложен в работе [73] для двухдуговой автоматической сварки, но он полностью применим и для ручной сварки.

Эквивалент углерода в низколегированной стали определяется, например, по известной формуле, рекомендуемой ГОСТ 27772-88 [74]

$$C_{\text{ЭКВ}} = C + \text{Si}/24 + \text{Mn}/6 + \text{Cr}/5 + \text{Mo}/4 + \text{Ni}/40 + \text{Cu}/13 + \text{V}/14 + \text{B}/2, \quad (1.23)$$

где C, Si, Mn, Cr, Mo, Ni, Cu, V, содержание этих легирующих элементов в %.

Эквивалент углерода в стали позволяет оценить свариваемость низколегированной стали в отношении вероятности образования в ней при сварке холодных трещин. При значении $C_{\text{ЭКВ}} < 0,5$ в стали холодные трещины не образуются. То же самое будет относиться и к сварному шву. Чем меньше будет $C_{\text{ЭКВ}}$ для металла шва, тем меньше будет вероятность образования в нем холодных трещин. Поэтому более предпочтительным будет являться процесс сварки, параметры которого обеспечивают меньшее значение $C_{\text{ЭКВ}}$ в сварном шве.

При сварке высоколегированных сталей в качестве показателя оптимального химического состава сварного шва следует использовать соотношение эквивалентов хрома и никеля, определяющего структуру и фазовый состав металла сварного шва.

Эквивалентное содержание в стали хрома в % подсчитывают, например, по следующей формуле

$$\text{Cr}_{\text{ЭКВ}} = \text{Cr} + 2 \cdot (\text{Mo} + \text{Nb} + \text{Al}) + 1,5 \cdot (\text{Si} + \text{W}) + 5 \cdot \text{Ti} + 1 \cdot \text{V}, \quad (1.24)$$

где Al, W, Ti, Nb – соответственно содержание алюминия, вольфрама, титана и ниобия в %.

Эквивалентное содержание в стали никеля в % подсчитывают по следующей формуле

$$\text{Ni}_{\text{ЭКВ}} = \text{Ni} + 0,5 \cdot \text{Mn} + 30 \cdot (\text{C} + \text{N}), \quad (1.25)$$

где N – содержание азота в %.

Совместное действие легирующих элементов при сварке высоколегированных сталей на конечную структуру шва оценивают по отношению $\text{Cr}_{\text{ЭКВ}}/\text{Ni}_{\text{ЭКВ}}$, называемому хромо-никелевым эквивалентом и затем с помощью известных структурных диаграмм Шеффлера [75].

Также известны зависимости, связывающие прочностные характеристики сварных швов с содержанием в них легирующих элементов. Например в работе [3] для временного сопротивления шва разрыву в кгс/мм² приводится следующая формула

$$\sigma_B = 4,8 + 50C + 25,2 \text{ Mn} + 17,5 \text{ Si} + 23,9 \text{ Cr} + 7,7 \text{ Ni} + 8W + 70 \text{ Ti} + 17,6 \text{ Cu} + 29\text{Al} + 16,8 \text{ Mo}. \quad (1.26)$$

В формуле (1.26) содержание элементов также берется в %.

Проведенный обзор показывает, что сварка комбинацией дуг с двумя проволоками позволяет получить широкий спектр наплавляемого металла. Аналогичная ситуация должна быть и при двухдуговой сварке. Однако двухдуговая сварка покрытыми электродами ранее не исследовалась. Необходимо в первую очередь опробовать процесс наплавки и формирования шва, определить степень магнитного взаимодействия дуг. Также необходимо проверить, насколько расчетная методика определения легирующих элементов в шве совпадает с опытными данными. Чтобы использовать все возможности наплавки разными типами электродов необходима разработка компьютерной программы перебора вариантов, включая параметры сварки. Следовало бы также разработать алгоритм методики расчета проплавления сечения основного металла, чтобы рассчитывать химический состав шва при двухдуговой сварке.

На основании выполненного анализа для достижения поставленной цели работы необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику проведения исследований.
2. Выполнить опыты по двухдуговой наплавке проб для определения химического состава наплавляемого металла.
3. Разработать методику расчета содержания химических элементов в наплавленном металле и техническое задание на разработку компьютерной программы для ее реализации.

4. Сравнить расчетное и опытное содержание химических элементов в наплавленном металле.
5. Разработать алгоритм расчета содержания легирующих элементов в шве при двухдуговой наплавке и сварке без разделки кромок.

2 Методика проведения экспериментов

2.1 Выбор электродов для экспериментов и их свойства

Для проведения экспериментов по ручной двухдуговой наплавке покрытыми электродами разных марок были выбраны отечественные электроды ТМЛ-1У и ЦЛ-11 [47] и импортные ETC PH KV5 [48]. Электроды были выбраны из условия достаточно большой разницы в содержании легирующих элементов. Также электроды ЦЛ-11 сильно отличаются от двух других марок по своим сварочно-технологическим свойствам. Важно было установить, насколько совместимы будут между собой столь разные электроды при ведении процесса двухдуговой сварки.

Электроды марки ТМЛ-1У относятся к типу Э-09Х1М по ГОСТ 9467 и предназначены для сварки стыков паропроводов, работающих при температуре до 500 °С. Сварка производится во всех пространственных положениях, кроме вертикального «сверху-вниз» на постоянном токе обратной полярности. Коэффициент наплавки этими электродами $\alpha_H=9,0$ г/(А·час), расход электродов на 1 кг наплавленного металла 1,5 кг. Обладают хорошей стабильностью дуги и отделимостью шлака [47]. Требования к содержанию химических элементов в наплавленном металле приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав наплавленного металла электродов марки ТМЛ-1У, %

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Mo	S≤	P≤
%	0,06-0,12	0,15-0,4	0,5-0,9	0,8-1,2	0,4-0,7	0,025	0,035

Рекомендуемые токи для сварки в нижнем положении приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 –Геометрические размеры электродов марки ТМЛ-1У и сила и плотности тока при сварке

Диаметр, мм	Длина, мм	Ток, А	Плотность тока, А/мм ²
3,0	350	80-110	11,3-15,6
4,0	350; 450	130-170	10,4-13,5
5,0	450	170-200	8,7-10,2

В работе [18] особенности использования электродов ТМЛ-1У раскрыты подробнее. Электроды ТМЛ-1У предназначены сварки паропроводов из хромомолибденовых и хромомолибденованадиевых сталей, работающих при температурах до 540 °С, труб котлов из сталей 12Х1МФ, 12ХМФСР и 12Х2МФБ независимо от рабочей температуры. Более высокая температура эксплуатации не допускается из-за отсутствия ванадия в наплавленном металле композиции Э-09Х1М. Известно, что для теплоустойчивых сталей перлитного класса в настоящее время находит основное применение карбидное упрочнение.

При реализации эффекта карбидного упрочнения основными легирующими элементами в сталях с решеткой α -Fe являются Cr, Mo, V и иногда ниобий Nb. Эффект достигается при образовании карбидов типа VC (TiC, NbC), в состав которых не входит железо. При этом повышается длительная прочность металла шва до 550-570 °С.

На электроды марки ТМЛ-1У на базовом предприятии имелся сертификат качества, по которому можно судить о соответствии электродов требованиям стандарта ГОСТ 9467. Электроды диаметром 3,0 мм изготавливаются из сварочной проволоки Св-08А или Св-08 по ГОСТ 2246 [49]. Электроды

изготовлены в марте 2015 г. Масса партии 50 кг, номер партии 378. Производитель ЗАО «Электродный завод г. С-Петербург (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Содержание химических элементов в марке ТМЛ-1У по данным сертификата качества № 132

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P
%	0,113	0,256	0,707	1,20	0,675	0,0043	0,018

Содержание большинства элементов ближе к верхнему пределу их допускаемых содержаний по ГОСТ 9467 (см. таблицу 2.1).

Электроды марки ЦЛ-11 (таблицы 2.4, 2.5) предназначены для сварки ответственных конструкций из коррозионно-стойких хромоникелевых сталей 12X18H10T, 12X18H9T, 08X18H12T, 08X18H12Б и им подобных, когда к металлу шва предъявляются повышенные требования по стойкости к межкристаллитной коррозии. Сварка может вестись во всех пространственных положениях, кроме вертикального «сверху-вниз» на постоянном токе обратной полярности. Коэффициент наплавки электродов $\alpha_H=12,5$ г/(А·час), расход электродов на 1 кг наплавленного металла 1,8 кг. Сварка должна производиться короткой дугой. Электроды прокаливаются перед сваркой в течение часа при температуре 330-350 °С.

Таблица 2.4 – Химический состав наплавленного металла электродами марки ЦЛ-11 по требованиям ГОСТ 10052, %

Элемент	C	Si \leq	Mn	Cr	Ni	S \leq	P \leq
%	0,05-0,12	1,3	1,0-2,5	18,0-22,0	8,0-10,5	0,020	0,030

Примечание: в электродах должен содержаться также ниобий 0,7-1,3 %, но не менее 8·С.

Таблица 2.5 – Геометрические размеры электродов марки ЦЛ-11 и сила тока при сварке

Диаметр, мм	Длина, мм	Ток, А	Плотность тока, А/мм ²
2,0	300	30-60	9,6-19,2
2,5	350	50-80	11,2-16,3
3,0	350	70-90	9,9-12,7
4,0	350	130-150	10,4-11,9
5,0	350; 450	150-180	7,7-9,2

Обращает на себя внимание, что рекомендованные токи не перекрывают диапазон 90-130 А, а также высокий коэффициент наплавки, почти на 40% превышающий аналогичный показатель ТМЛ-1У. Возможно, такой высокий коэффициент наплавки обусловлен высоким электросопротивлением высоколегированной сварочной проволоки и более тонким покрытием, а также теплофизическими свойствами покрытия. Рекомендуемые плотности тока для ЦЛ-11 в целом ниже, чем для ТМЛ-1У. Можно указать на несоответствие, заключающееся в том, что нижний предел плотности тока для диаметра 4 мм больше, чем для диаметра 3 мм. Поэтому к рекомендациям по токам следует относиться критически.

На электроды диаметром 3 мм марки ЦЛ-11 на базовом предприятии также имелся сертификат качества, по которому можно судить о соответствии электродов требованиям стандарта ГОСТ 10052. Марка сварочной проволоки в сертификате не приводится. Сертификат № 7907 оформлен 19.04.2017 г. Изготовлены электроды в том же месяце. Масса

партии 350 кг, номер партии 20652. Производитель ЗАО «Электродный завод г. Железногорск Курской области (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Химический состав наплавленного электродами марки ЦЛ-11 металла по данным сертификата качества, %

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	S	P
ЦЛ-11	0,073	0,45	2,01	19,7	9,2	0,97	0,013	0,019

Сравнение данных таблиц 2.3 и 2.6 показывает, что оформление одинаковых реквизитов в сертификатах качества существенно отличаются, т.е. нет единых требований к их оформлению, что представляется неверным. Оформление сертификатов качества само должно быть эталоном качества, а этого не наблюдается. Даже содержание легирующих элементов указывается с различной точностью.

Импортные электроды ETC PH KV5 [48] по мнению специалистов службы главного сварщика базового предприятия являются аналогами электродов ТМЛ-1У. Импортные электроды по стандарту США AWS AS.S относятся к типу E8016 B-2 , по стандарту EN-1599 к E Cr-Mo1 B22 HS. Рекомендованные токи 90-130 А для диаметра 3,25 мм. Сертификат с конкретными значениями содержания химических элементов в наплавленном металле на базовом предприятии отсутствовал, вместо него была представлена копия требований по стандарту США США AWS AS.S (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – Требования к химическому составу электродов марки ETC PH KV5

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P
%	0,05-0,1	0,6	0,9	1,0-1,5	0,4-0,65	0,03	0,03

В стандарте регламентируются те же химические элементы, что и в ГОСТ 9467. Среднее содержание хрома несколько выше для ЕТС РН KV5. На некоторые элементы указан диапазон допускаемых концентраций, а на некоторые указаны точные значения.

2.2 Определение производительности расплавления электродов

Определение точных значений производительности расплавления электродов необходимо для выполнения расчетов содержания наплавляемого металла при двухдуговой наплавке.

Сначала определяли приведенную плотность электрода, которая позволяет связывать начальную скорость расплавления со скоростью при плавлении голой электродной проволоки [44–45]. Приведенная плотность покрытого электрода это такая его условная плотность, когда вся его масса сосредоточилась бы в объеме электродного стержня. Взвешивание пяти электродов производили на весах 4-го класса точности ВЛЭ-1 (таблица 2.8).

Таблица 2.8 – Результаты взвешивания исследуемых электродов

Марка электродов	Общая длина, мм	Диаметр стержня, мм	Диаметр покрытия, мм	Длина для подключения, мм	D/d	Масса 5 штук, г	Масса 1 штуки, г
ТМЛ-1У	350	3,0	5,0	15	1,6	134,13	26,80
ЦЛ-11	350	3,0	4,7	20	1,57	129,80	25,86
ЕТС РН KV5	350	3,25	6,0	25	1,85	178,92	35,40

Приведенную плотность покрытия ρ_0 определяли по формуле [44]

$$\rho_0 = \rho_{СТ} + \rho_{П} [(D/d)^2 - 1], \quad (2.1)$$

где $\rho_{СТ}$ – плотность стержня, г/см³, $\rho_{П}$ – плотность покрытия, г/см³.

Плотность покрытия рассчитывали по его массе на основании данных таблицы 2.8 и его объему. Плотность стержней принимали $\rho_{СТ} = 7,85$ г/см³ (таблица 2.9).

Таблица 2.9–Результаты определения плотности покрытий и приведенной плотности

Марка	$\rho_{\text{п}}, \text{г/см}^3$	$\rho_{\text{о}}, \text{г/см}^3$
ТМЛ-1У	1,75	10,58
ЦЛ-11	1,91	10,66
ЕТС РН КУ5	1,94	12,52

Приведенная плотность отечественных электродов практически одинакова, а у импортных существенно больше. Отношение D/d для импортных электродов существенно выше, чем у отечественных. По отечественной классификации по ГОСТ 9466 они относятся к электродам с особо толстым покрытием, в то время как отечественные с толстым. Наряду с увеличением диаметра стержня на 0,25 мм это должно приводить к замедлению скорости расплавления импортных электродов. **Большее** количество шлака способствует снижению скоростей охлаждения металла сварного соединения, что благоприятно сказывается на его свойствах.

После определения параметров покрытия электродов исследовалась зависимость времени расплавления покрытой части для выбранных марок и типоразмеров электродов от тока дуги (таблица 2.10). Для наплавки использовали источник питания Invertek 350PRO [35], имеющий цифровую индикацию значений тока сварки с точностью 1 А. Напряжение дуги во всех опытах находилось в пределах $U_{\text{д}}=19-22$ В. Выполнялась наплавка в нижнем положении на стальную пластину валиков шириной 10-15 мм. К наплавке привлекался высококвалифицированный сварщик 5-го разряда, аттестованный в системе Национальной ассоциации контроля сварки (НАКС). Наплавку проводили на трех значениях тока из диапазона, рекомендованного техническими условиями на данную марку и типоразмер электрода: минимальном токе $I_{\text{м}}$, среднем $I_{\text{с}}$ и максимальном $I_{\text{б}}$. Время горения дуги фиксировалось секундомером СОСпр-2б-2-010 с точностью 0,1 с. Опыт на каждом токе повторялся. Длины расплавленной части электрода и огарка измеряли с помощью электронного штангенциркуля

ЩЦЦ-1-150-0.01. Сварщик был нацелен на максимальное расплавление покрытой части. При этом в большинстве случаев покрытие оставалось нерасплавленным в среднем примерно на 10 мм. Корректировку результата (приведение) на всю длину покрытия производили следующим образом. Сначала рассчитывалась средняя скорость расплавления для длины расплавленного участка. Потом определялось время, при котором покрытие расплавилось бы полностью. Полученные два значения времени расплавления всего покрытия усреднялись и использовались для определения зависимости их от тока. Опыты проводились для рекомендованной документацией обратной полярности дуги. После этого по трем средним значениям токов I_D и времени t определяли коэффициенты гиперболических зависимостей вида

$$t = F_1 + K_1 / I_D, \quad (2.2)$$

$$I_D = F_2 + K_2 / t. \quad (2.3)$$

Коэффициенты F и K рассчитывались по методу наименьших квадратов с помощью компьютерной программы на языке Бейсик, приведенной в [38].

Таблица 2.10 – Данные по изменению времени расплавления покрытой части электродов

Марка	Токи, А			Коэффициенты
	80	90	100	
ТМЛ-1У				
Опыт	85,75	75,5	69,3	F=2,76 с K=6612,8 Ас
Расчет	85,42	76,24	68,9	
Отклонение, %	-0,4	+1,0	-0,6	
Среднее отклонение	0,7% по абсолютной величине			
ЦЛ-11	80	90	100	
Опыт	62,6	57,3	49,4	F=-2,05 с K=5520 Ас
Расчет	63,2	55,95	50,15	
Отклонение, %	+1,0	-2,4	+1,5	
Среднее	1,6% по абсолютной величине			
Импортные	80	90	100	
Опыт	110,1	99,6	94,1	F= 29,03 с K=6447,7 Ас
Расчет	109,6	100,7	93,5	

Отклонение, %	-0,5	+1,1	-0,6
Среднее	1,6% по абсолютной величине		

Как и для исследованных ранее марок электродов [35,36] гиперболическая зависимость времени расплавления от тока дуги подтверждается с высокой точностью. Импортные электроды имеют намного большее время расплавления, что связано с увеличением сечения на 17% и значительно большей приведенной плотностью электрода. Полученные зависимости позволяют получить производительность расплавления каждой марки электродов при любом токе дуги и рассчитывать точное содержание наплавляемого металла при двухдуговой сварке.

2.3 Получение проб наплавляемого металла электродов и их анализ

Для получения проб наплавленного металла каждого из электродов была использована методика с помощью дуги косвенного действия [13,50] (рисунок 2.1) .

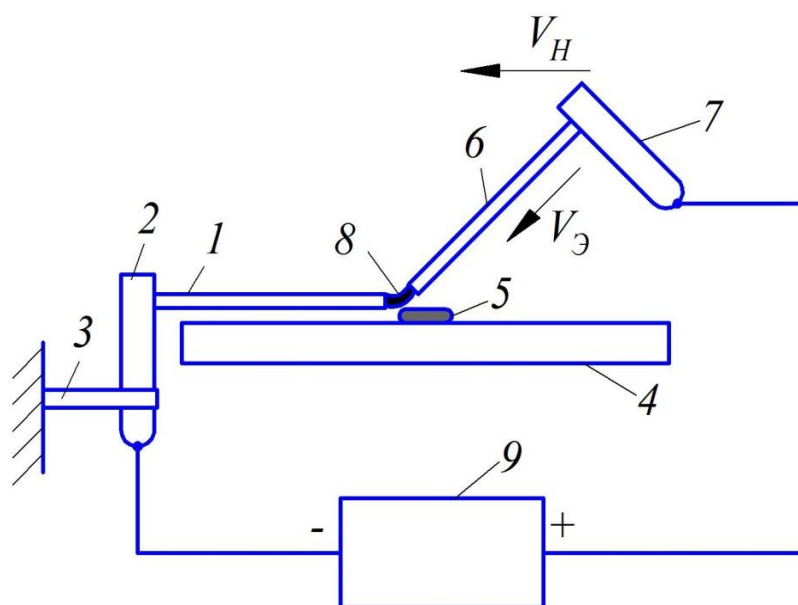


Рисунок 2.1 – Схема получения проб от дуги косвенного действия

Покрытый электрод 1 закреплен в электрододержателе 2, который, в свою очередь, прочно закрепляется в зажиме 3, так, чтобы покрытый электрод 1 располагался параллельно медной пластине 4, на которую

производится наплавка пробы 5. Расстояние от стержня покрытого электрода 1 до пластины 4 выбирается равным толщине покрытия электрода 1 плюс 1-2 мм. Второй, точно такой же покрытый электрод 6, закрепляется в электрододержателе 7 и может перемещаться электросварщиком свободно в любом направлении. Между покрытыми электродами 1 и 6 возбуждается сварочная дуга 8 косвенного действия путем соприкосновения сварщиком подвижного покрытого электрода 6 с неподвижным покрытым электродом 1 или бесконтактным способом. Дуга косвенного действия 8 питается от сварочного источника питания постоянного тока 9. Отрицательный полюс сварочного источника питания 9 подключается к неподвижно закрепленному покрытому электроду 1, а положительный полюс источника питания 9 к подвижному электроду 6. Сварочный ток дуги косвенного действия выбирается средним из рекомендуемого производителем диапазона для данной марки и диаметра покрытых электродов 1 и 6. После зажигания дуги косвенного действия 8 между электродами 1 и 6 сварщик по мере расплавления конца неподвижного электрода 1 перемещает конец подвижного электрода 6 со скоростью наплавки V_H и скоростью подачи $V_Э$ таким образом, чтобы длина дуги 8 косвенного действия между электродами 1 и 6 оставалась постоянной. Скорость расплавления неподвижного электрода 1 определяет скорость ведения процесса наплавки сварщиком. Подвижный покрытый электрод 6 располагается под углом 45 градусов к поверхности медной пластины 4. Капли расплавленного металла с электродов 1 и 6 под действием силы тяжести и электромагнитных сил падают на медную пластину 4, образуя общую жидкую ванну, но не расплавляя пластину 4. В результате расплавления электродов 1 и 6 дугой косвенного действия 8 на медной пластине 4 образуется проба 5 наплавляемого металла, которая не соединена прочной связью с медной пластиной 4. Медь с пластины 4 практически не переходит в наплавляемую пробу 5. При этом сварщик осуществляет поперечные колебания концом с амплитудой 3...5 мм концом подвижного электрода 6 в поперечном

направлении относительно неподвижного электрода 1 так, чтобы получить пробу 5 достаточной ширины и толщины. В процессе наплавки пробы в зоне наплавки обеспечиваются практически идентичные условия расплавления и защиты наплавляемого металла от окружающего воздуха, как и при многослойной наплавке. После получения пробы 5 необходимых размеров дуга косвенного действия 8 отключается и проба 5 очищается от шлака. При необходимости наплавка может прерываться для зачистки шлака и выполнения второго слоя наплавки. Проба 5 после зачистки от шлака и некоторого остывания снимается с медной пластины 4 и передается для дальнейшей подготовки к спектральному или химическому анализу для определения ее химического состава. При сохранении высокой температуры пробы ей может легко быть придана более удобная форма для проведения спектрального анализа путем сжатия пробы на прессе.

Также возможны варианты выполнения методики по схеме на рисунке 2.1, когда вместо закрепленного электрода 1 используется такой же подвижный электрод, расплавление которого выполняет второй сварщик. В этом случае возможно получение пробы не вытянутой в направлении неподвижного электрода, а более близкой по форме к круглой, так как зона горения дуги косвенного действия может почти не смещаться от места ее зажигания. При этом оба сварщика выполняют манипуляции концами электродов в поперечном направлении. При таком варианте плавления электродов каждый из них может располагаться под углом к поверхности пластины.

Не исключен вариант реализации методики, при котором расплавление двух электродов выполняет один специально обученный сварщик.

Объем пробы наплавляемого металла в см³ можно определить по формуле

$$V = E \cdot H \cdot \delta,$$

где E – средняя ширина пробы, см; L – длина пробы, см; δ – средняя толщина пробы, см.

При длине пробы $H=5,0$ см, ширине пробы $1,5$ см и толщине $0,3$ см получаем объем пробы $V = 2,25$ см³. Масса такой пробы для стали при плотности стали $\rho=7,85$ г/см³ составит $17,7$ г, что вполне достаточно для проведения химического или спектрального анализа.

При диаметре электродов $4,0$ мм площадь поперечного сечения каждого из них $F_э=0,1256$ см². Тогда для получения объема наплавки $V = 2,25$ см³ потребуется расплавить дугой косвенного действия каждый из электродов на длине примерно $4,5$ см. На наплавку будет затрачено примерно $10-15$ секунд основного времени сварки. Внешний вид одной из проб представлен на рисунке 2.2.





Рисунок 2.2– Внешний вид полученных проб наплавляемого металла

Химический состав проб, полученных по приведенной методике с помощью дуги косвенного действия, определялся спектральным методом на базовом предприятии на спектрографе PMI MASTER [56] (рисунок 2.3),



Рисунок 2.3 – Внешний вид прибора для спектрального анализа PMI MASTER

PMI-MASTER UVR- уникальный анализатор металлов, который позволяет проводить высокоточный анализ и определять марку любых сталей и сплавов с возможностью анализа углерода, серы, фосфора. Анализатор портативен и может работать от небольшого аккумулятора, что позволяет использовать его в условиях: цеха, лаборатории и улицы.

Анализатор имеет возможность точного анализа C, P, S, Si и легирующих элементов "на месте" при помощи легкого выносного датчика. С его помощью возможно измерение на неровных образцах, тонких прутках и проволоке без специальных адаптеров. Запатентованная система обтекания электрода аргоном «JetStream» обеспечивает сверхнизкий расход аргона. Оптическая система спектрометра на основе CCD (ПЗС) линеек обеспечивает устойчивость анализатора к перепадам температур и вибрациям, что очень важно для мобильного прибора.

Программное обеспечение контролирует все параметры спектрометра, позволяет пользователю создавать собственные калибровочные модели и идентифицировать марку материала по встроенным базам данных. Легкий и надежный датчик AS спроектирован для работы в двух режимах: «дуга» (без аргона) и «искра» (с аргоном). В режиме «дуга» пользователь может выполнять быстрые анализы по сортировке и идентификации, в режиме «искра» - прецизионные анализы в том числе анализ углерода. Датчик UV-PRO с миниатюрной оптической системой высокого разрешения для анализа S и P, B, низких концентраций углерода. Датчик UV Touch со встроенным дисплеем для работы в труднодоступных местах.

Технические характеристики:

- Оптическая система на основе CCD по схеме Паше-Рунге;
- Диапазон длин волн 170-420 нм;
- Работа в режимах «дуга» и «искра»;
- Миниатюрная оптическая система в датчике UV-PRO для анализа низких содержаний C, S и P;

- Встроенный промышленный компьютер , управление спектрометром осуществляется через сенсорный дисплей (функция TouchScreen).
- Автоматическое профилирование линий;
- Электропитание: 220В, 50/60 Гц;
- Энергопотребление: 200 Вт в режиме измерения, 50 Вт в режиме ожидания;
- Габариты: 500/355/290 мм;
- Вес с блоком сетевого питания: 28 кг;
- Возможно добавление основ: Fe, Al, Cu, Ni, Ti, Zn, Pb, Sn, Co, Mg.

Наплавка дугой косвенного действия электродами двух одинаковых марок диаметром 3 мм выполнялась на токе 90 А. На данном токе проводилось два опыта. Всего было получено 6 проб наплавляемого металла. Несмотря на то, что в дуге косвенного действия, один из электродов подключен к положительному полюсу, а другой к отрицательному, и скорость расплавления различна, согласно формуле (1.19) это не влияет на содержание элемента в пробе. Результаты анализа приведены в таблице 2.11.

По электродам марки ЦЛ-11 все значения содержаний определенных элементов входят в требования, предъявляемые стандартом. Соответствие по наиболее значимым элементам С, Mn, Cr, Ni хорошее. Разброс данных по данным двух опытов небольшой. Это указывает на достаточно высокую точность новой методики определения содержания элементов.

Таблица 2.11 –Содержание легирующих элементов в пробах, полученных с помощью дуги косвенного действия, %

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Mo
Марка	ЦЛ-11						
ГОСТ 10052	0,05-0,12	<1,3	1-2,5	18,0-22,0	8,0-10,5	0,7-1,3	-
Опыт 1	0,05	0,26	1,79	19,2	9,26	0,75	-

Опыт 2	0,06	0,34	1,93	19,2	9,6	0,73	-
Среднее	0,055	0,30	1,86	19,2	9,43	0,74	-
Δ,%	9,1	13,3	3,8	0	1,8	1,4	
Марка	ТМЛ-1У						
ГОСТ 9467	0,06-0,12	0,15-0,40	0,5-0,9	0,8-1,2	-	-	0,4-0,7
Опыт 1	0,07	0,10	0,39	0,94	0,02	-	0,62
Опыт 2	0,07	0,10	0,16	0,50	0,06	-	0,62
Среднее	0,07	0,10	0,275	0,72	0,04	-	0,62
Δ,%	0	0	41,8	27,7	-	-	0
Марка	ЕТС РН KV5						
Стандарт США AWS AS.S	0,05-0,1	0,6	0,9	1,0-1,5	-	-	0,4-0,65
Опыт 1	0,05	0,11	0,39	1,15	0,03	-	0,58
Опыт 2	0,08	0,19	0,47	1,24	0,03	-	0,59
Среднее	0,065	0,15	0,43	1,195	0,03	-	0,585
Δ,%	23,1	26,7	9,3	3,8	0	-	0,5

Для электродов марки ТМЛ-1У содержание кремния и марганца ниже установленного нижнего предела. По остальным, наиболее важным элементам, результаты соответствуют требованиям ГОСТ 9467. Можно отметить, что чем выше содержание легирующего элемента, тем ниже точность его определения. Также точность определения не ниже допустимого разброса содержания элементов по стандартам.

Для электродов марки ЕТС РН KV5 подтверждено, что они являются аналогами отечественной марки ТМЛ-1У, поскольку содержание хрома и молибдена у них высокое. Также как для электродов ТМЛ-1У значения кремния и марганца ниже установленных требований. Это свидетельствует о том, что низкое содержание данных элементов в пробах не случайно и

происходит их выгорание в процессе получения проб или уменьшение по какой либо другой причине. В целом по результатам данных опытов можно утверждать, что методика получения проб с помощью дуги косвенного действия является перспективной, а для специальных легирующих элементов может применяться при экспресс- анализе. По-видимому, наплавку следует производить не на медную пластину, а в медную форму с цилиндрической выемкой, чтобы получить пробы одинакового размера и стабилизировать протекание металлургических реакций. Следует изучать варианты влияния манипуляции концами электродов, влияние расстояния от электродов до формы и расстояния между торцами электродов и формой.

Кроме того, электродами тех же марок были выполнены наплавки дугой косвенного действия на медную пластину, когда использовались электроды трех исследуемых марок в различных сочетаниях. Такие наплавки должны моделировать получение итогового содержания наплавляемого металла, близкого к процессу двухдуговой наплавки при разных полярностях дуг. Результаты анализа приведены в таблице 2.12.

Первые две строки данных в таблице 2.12 представляют повторение одинакового опыта. Поэтому полученные значения содержания легирующих элементов усреднялись (третья строка). Следующая строка представляет абсолютное значение относительного отклонения $\Delta, \%$ для каждого из опытов. Следующая строка в таблице 2.12 представляет опыт, когда полюса на электродов ТМЛ-1У и ЦЛ-11 были изменены на противоположные. Поэтому значения этого опыта усреднялись с двумя предыдущими, и также определялось относительное отклонение по абсолютной величине.

Таблица 2.12 – Содержание легирующих элементов в пробах при сочетании марок, %

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Mo
ТМЛ-1У-	0,09	0,21	1,28	12,3	5,06	0,49	0,25

ЦЛ-11 (+)							
ЦЛ-11(+) ТМЛ-1У	0,08	0,4	1,21	12,0	5,08	0,55	0,24
Среднее	0,085	0,305	1,245	12,15	5,07	0,52	0,245
Δ,%	5,9	31,1	2,8	1,2	0,2	5,8	2,0
ЦЛ-11(-) ТМЛ-1У	0,06	0,17	1,17	12,8	5,37	0,29	0,25
Среднее	0,073	0,238	1,208	12,48	5,22	0,405	0,25
Δ,%	<u>17,8</u>	<u>28,6</u>	<u>3,1</u>	<u>2,6</u>	<u>2,9</u>	<u>28,4</u>	<u>0</u>
ЦЛ-11(+) Импорт	0,05	0,30	1,29	13,5	5,66	0,24	0,21
ТМЛ- 1У(+) Импорт	0,06	0,15	0,50	1,14	0,1	-	0,54
Импорт и ТМЛ-1У(-)	0,10	0,18	0,51	1,2	0,1	-	0,54
Среднее	0,08	0,165	0,505	1,17	0,1	-	0,54
Δ,%	25,0	9,1	1,0	2,6	0	-	0

Примечание: знак (+) или (-) означает, какой полюс источника питания подключен к данному электроду.

В этом случае уже изменение полярности оказывает некоторое влияние на содержание элемента в пробе. Значительное относительное отклонение имеет место только для марганца (31,1%). Для остальных элементов относительное отклонение в пределах 0,2 % - 5,9%, а среднее без учета марганца составило всего 3% . Поэтому воспроизводимость результатов по данной методике следует считать достаточно высокой.

При противоположном подключении полюсов к электродам проводился только один опыт. В этом случае отклонения от среднего значения для ряда элементов (углерод, кремний, ниобий) существенно выше, что объясняется изменением условий опыта. Можно предположить, что вследствие различий в полюсах на электродах протекание некоторых реакций взаимодействия

между каплей металла и шлаком протекает несколько иначе, чем в дуге прямого действия и это немного сказывается на результатах легирования швов. Однако этот эффект может наблюдаться и при двухдуговой сварке или наплавке и его можно учитывать и использовать при легировании швов.

Выводы по разделам 1 и 2

1. Проводя двухдуговую наплавку покрытыми электродами известных типов с различным химическим составом наплавляемого металла можно за счет комбинации диаметров, токов и марок обеспечить практически любой требуемый состав наплавляемого металла.
2. Подобраны три марки электродов с различным химическим составом для проведения экспериментов и определены их основные характеристики – плотности покрытия, приведенные плотности электродов.
3. Для выбранных марок электродов подтверждено, что зависимость их времени расплавления от тока дуги подчинена гиперболическому закону. Установлены коэффициенты гиперболических зависимостей для обратной полярности дуги.
4. Опробована методика получения проб наплавляемого металла путем нанесения слоя на подложку из толстой медной пластины с помощью дуги косвенного действия. Методика использована как одинаковых электродов дуги косвенного действия, так и комбинации различных марок.
5. По большинству исследованных легирующих элементов содержание их в пробе отвечает требованиям стандартов, регламентирующих химический состав, что показывает перспективность исследуемого метода получения проб.
6. При разработке технологии двухдуговой сварки покрытыми электродами разных марок экспериментальное определение

содержания по основным легирующим элементам можно производить наплавкой аналогичными электродами дугой косвенного действия.

3 Расчет содержания элементов в наплавляемом металле при двухдуговой наплавке

3.1 Параметры двухдуговой наплавки покрытыми электродами

К основным параметрам ручной дуговой наплавки покрытыми электродами можно отнести полярность дуги, диаметр электрода и ток дуги. Ток дуги задается для каждого диаметра данной марки электродов. При двухдуговой наплавке к этим параметрам добавляется расстояние между дугами. За счет этого расстояния можно изменять только площадь проплавления основного металла, но оно не влияет на состав наплавляемого металла. Может иметь значение порядок расположения дуг при различных токах и диаметрах электродов. Это обусловлено тем, что в зависимости от мощности передней и задней дуг также изменяется площадь проплавления основного металла. Таким образом, двухдуговая сварка представляет собой систему, в которой ряд параметров позволяют регулировать состав наплавляемого металла (диаметр электродов, токи, полярности), а ряд параметров – площадь проплавления – состав шва (расстояние между дугами, токи, диаметры, скорость сварки, полярности, расположение электродов относительно направления скорости сварки). Наибольшее затруднение при проектировании состава шва вызывает определение площади проплавления основного металла. Расчетными методами можно определить эту площадь только для простых соединений, например при наплавке на пластины или массивные тела, при сварке стыковых соединений без разделки кромок. Даже для таких случаев построение автоматизированной системы проектирования состава шва представляет собой непростую задачу.

3.2 Сравнение расчетных данных при комбинированной наплавке дугой косвенного действия

Расчет содержания элемента в наплавленном металле двумя различными электродами следует выполнять по формуле смешения:

$$C_H = (C_1 \cdot \Pi_1 + C_2 \cdot \Pi_2) / (\Pi_1 + \Pi_2), \quad (3.1)$$

где C_1 , C_2 – содержание элемента при однодуговой наплавке каждым из электродов, %, Π_1 и Π_2 – производительности наплавки каждого электрода, г/(А·с).

Из формулы (3.1) следует, что при наплавке двумя электродами одной марки и диаметра дугой косвенного действия содержание любого элемента в пробе аналогично его содержанию в каждом из электродов. При использовании электродов разного диаметра ситуация будет иной и содержание элементов в пробе будет несколько отличаться в зависимости от полюсов, подключенных к электродам. Поэтому пробы всегда нужно получать электродами одинакового диаметра. Это условие в проведенных опытах выполнялось.

В связи с тем, что коэффициенты гиперболических зависимостей времени расплавления для прямой полярности на электродах не были определены, то использовали результат работ [35,36], в которых получено, что на малых токах коэффициент расплавления на прямой полярности на 10 % ниже, чем на обратной. Поэтому коэффициенты наплавки электродов, приведенные в [47] уменьшали также на 10%. Значения использованных коэффициентов наплавки приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения коэффициентов расплавления и наплавки, г/(А·ч)

Марка	α_{PO}	α_{HO}	α_{PP}	α_{HP}
ЦЛ-11	13,08	12,5	11,77	11,25
ТМЛ-1У	9,74	9,0	8,77	8,1
Импортные	8,4	8,0	7,56	7,1

Пример расчета содержания элемента в комбинированной наплавке. Поскольку ток электродов в дуге косвенного действия одинаков, то производительности наплавки пропорциональны коэффициентам наплавки, которые берем из таблицы 3.1. Выбираем среднее содержание хрома из таблицы 2.12 $C_{Cr} = 19,2 \%$. Среднее содержание хрома в ТМЛ-1У $C_{Cr} = 0,72\%$. Содержание хрома в комбинированной наплавке ЦЛ-11+ТМЛ-1У при (-) на ЦЛ-11

$$C_{Cr} = (19,2 \cdot 11,25 + 0,72 \cdot 9) / (11,25 + 9,0) = 11,0 \%$$

Аналогично рассчитывали содержание других элементов.

Таблица 3.2 – Сравнение расчетных и опытных содержаний в комбинированных наплавках

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Mo
ЦЛ-11(-) ТМЛ-1У(+)	0,06	0,17	1,17	12,8	5,37	0,29	0,25
Расчет	0,061	0,22	1,24	12,0	5,76	0,45	0,24
ТМЛ-1У (-)	0,09	0,21	1,28	12,3	5,06	0,49	0,25
Расчет	0,061	0,22	1,24	11,93	5,74	0,45	0,24
ЦЛ-11(+) ТМЛ-1У	0,08	0,4	1,21	12,0	5,08	0,55	0,24
Расчет	0,061	0,208	1,15	11,06	5,31	0,415	-
ЦЛ-11(+) Имп.	0,050	0,30	1,29	13,5	5,66	0,24	0,21
Расчет	0,059	0,246	1,34	12,68	6,03	0,47	0,21
ТМЛ-1У(+) Имп.	0,06	0,15	0,50	1,14	0,1	-	0,54
Расчет	0,068	0,122	0,34	0,93	0,04	-	0,60

Имп.(+) ТМЛ-1У	0,10	0,18	0,51	1,2	0,1	-	0,54
Расчет	0,068	0,13	0,35	1,46	0,035	-	0,6

Примерно в половине случаев (18 значений из 39) расчетные значения больше опытных (данные по никелю в двух последних опытах не учитывались, поскольку он является примесью). Опытные и расчетные значения достаточно близки. Особенно это касается элементов, которые имеются в электродах в наиболее существенных количествах, таких как хром, никель, марганец, молибден. Эти элементы придают наплавляемому металлу специальные свойства. Совпадение по углероду также хорошее. Эти значения всегда занимают промежуточное положение по отношению к значениям, полученным при получении проб дугой косвенного действия одинаковыми электродами. Поэтому можно сделать вывод, что расчет содержания легирующих элементов в наплавляемом металле при двухдуговой наплавке вполне можно рассчитывать по пробам, производимым электродами разных типов с дугой косвенного действия.

3.3 Исследование химического состава швов при ручной однодуговой наплавке

Исследуемыми марками электродов были выполнены однодуговые наплавки на стальные пластины, для которых также был проведен спектральный анализ, который подтвердил, что основной металла это сталь 20 по ГОСТ 1054. Наплавки были выполнены на трех токах и установлено их высокое качество при визуальном осмотре в отношении отсутствия поверхностных пор и включений. Для швов, наплавленных при токе 100 А был проведен анализ химического состава спектральным методом. Швы зачищались шлифмашинкой на высоту 2 мм и дугой прибора ставились точки диаметром 2 мм на полученной плоской поверхности. Измерение в двух разных точках по длине шва показало, что результаты измерений

практически не отличаются (таблица 3.2). Для наплавки электродами марки ТМЛ-1У заключением лаборатории было подтверждено, что наплавка получена именно этими электродами.



Рисунок 3.1 – Внешний вид наплавки несколькими марками электродов на токе 100 А

Таблица 3.2 – Содержание элементов в металле швов при однодуговой наплавке, %

Элемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb
Сталь 20	0,22	0,23	0,43	0,024	0,022	0,04	0,02	-	-
ТМЛ-1У-шов	0,06	0,30	0,60	0,020	0,018	0,88	-	0,43	-
ТМЛ-1У-НМ	0,07	0,10	0,275	-	-	0,72	0,04	0,62	

ЦЛ-11- шов	0,11	0,64	1,36	0,020	0,011	12,0	6,0	-	0,70
ЦЛ-11- НМ	0,055	0,30	1,86	-	-	19,2	9,43	-	0,74
Импорт- Шов	0,10	0,32	0,72	0,020	0,018	0,70	-	0,33	
Импорт -НМ	0,065	0,19	0,43	-	-	1,195	-	0,585	

Примечание: НМ- наплавляемый металл.

По углероду для всех трех марок электродов содержание в шве является промежуточным между основным и наплавленным металлами. Содержание кремния для всех трех марок повысилось в шве по сравнению с наплавленным металлом, что объясняется металлургическими реакциями между шлаком покрытия и сварочной ванной. Аналогичная картина для марганца имеет место только для ТМЛ-1У и их импортных аналогов. В шве ЦЛ-11 содержание марганца снизилось по сравнению с наплавленным металлом. Содержание хрома в шве от ТМЛ-1У оказалось выше, чем в наплавленном металле, что можно объяснить только различием использованных электродов или ошибками измерений. По хрому и молибдену для импортных электродов имеет место, как и должно быть, уменьшенное содержание в шве.

В работе [53] предложен способ определения площади проплавления основного металла, основанный на измерении содержания легирующих элементов в сварном шве и в основном металле

$$F_0 = \Psi_{OC} F_H / (1 - \Psi_{OC}), \quad (3.2)$$

где Ψ_{OC} – среднее значение доли участия основного металла в металле шва по всем химическим элементам, %; F_H - площадь поперечного сечения наплавленного металла, см².

В данном случае значение F_H можно определить только приближенно на основе данные о коэффициентах расплавления и наплавки и размеров сварочного валика. Но на практике это не составляет большого труда. Более важное значение имеет определить работоспособность данного способа, что можно оценить по степени стабильности коэффициентов Ψ_O , определяемых по формуле

$$\Psi_O = (C_{III} - C_H) / (C_O - C_H), \quad (3.3)$$

где C_{III} – содержание химического элемента в шве, %; C_H – содержание этого элемента в наплавленном металле, %; C_O – содержание элемента в основном металле, %.

Поскольку предыдущий анализ показал, что содержание марганца и кремния в дополнительном металле подвержено существенным изменениям вследствие металлургических реакций, то определение доли участия Ψ_O будем производить только для специальных легирующих элементов. Под специальными легирующими элементами будем понимать те, которые приводятся в условном обозначении типа электродов.

Подставляли значения содержаний из таблицы 3.2 в формулу (3.3) и получали значения Ψ_O , которые приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Значения Ψ_O по значениям содержания элементов в швах из таблицы 3.2

Элемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb
Сталь 20	0,22	0,23	0,43	0,024	0,022	0,04	0,02	-	-
ЦЛ-11	0,33	*	0,35	-	-	0,38	0,36	-	-
$\Delta, \%$	-7,0	-	-1,4	-	-	+7,0	+1,4	-	

Примечание: среднее значение доли участия по четырем элементам $\Psi_O = 0,355$.

Применение данной методики показало, что в данной ситуации она работоспособна только для высоколегированной наплавки электродами ЦЛ-11. Среднее значение по четырем элементам углероду, марганцу, хрому и никелю $\Psi_0 = 0,355$ со средним алгебраическим отклонением от этой величины в 4,2% является хорошим результатом. Это намного превышает точность определения Ψ_0 с помощью теории тепловых процессов путем расчета площади проплавления основного металла. Аналогичный результат подтвержден наплавкой импортными электродами, для которых хорошо совпали значения Ψ_0 для хрома и молибдена, отклонение от среднего составляет 1,0%. Поскольку содержание хрома в шве от ТМЛ-1У оказалось аномальным, то по этому элементу не удалось получить достоверное значение доли участия. Поэтому данную методику можно рекомендовать только для специальных легирующих элементов. Для таких элементов как кремний и марганец можно определять по найденному значению Ψ_0 расчетное содержание, а разница содержаний даст представление о роли металлургических реакций при легировании этими элементами. Представляет интерес сопоставление расчетных значений Ψ_0 и опытных значений полученным по макрошлифам. Рассмотренная методика может быть использована для оценки стабильности параметров сварки, которая характеризуется стабильностью площади проплавления основного металла. Наиболее достоверные результаты с помощью такой методики могут быть получены при автоматических способах сварки. Показателем стабильности и однородности сварного шва может являться изменение среднеквадратичного отклонения доли участия Ψ_0 по длине шва.

3.4 Исследование швов, выполненных двухдуговой наплавкой

Опыты по ручной дуговой наплавке покрытыми электродами выполнялись от двух сварочных источников питания Invertek Pro на токах 90,100,110 А на пластины толщиной 6 мм из низкоуглеродистой стали

20 по ГОСТ 1054 [69]. Наплавку отдельными электрододержателями выполняли два опытных сварщика 6 разряда, аттестованные в системе НАКС. Диаметр отечественных электродов был 3,0 мм, импортных 3,25 мм. При этом фиксировалось и отмечалось на пластинах сочетание марок электродов, и какой из них был первым в направлении сварки (рисунки 3.2-3.4).



Рисунок 3. 2 – Внешний вид двухдуговой наплавки. Первая дуга – импортные электроды, вторая дуга – ТМЛ-1У

Было опробовано несколько сочетаний марок электродов. Дистанцию между торцами свариваемых электродов поддерживали на 1 -2 мм большей, чем диаметры электродов с покрытием. Поперечные колебания торцов электродов у каждого из сварщиков были одинаковыми.

Во всех опытах имело место хорошее формирование наплавленных валиков. Валики получились плотными без пор и включений. Разбрызгивание не отличалось от того, каким оно было при однодуговой

наплавке. Таким образом, было установлено, что с точки зрения техники наплавки двухдуговая сварка покрытыми электродами не представляет серьезных затруднений и вполне может осуществляться квалифицированными сварщиками.



Рисунок 3.3– Внешний вид двухдуговой наплавки. Первая дуга – ТМЛ-1У, вторая дуга, ЦЛ-11



Рисунок 3.4– Внешний вид двухдуговой наплавки. Первая дуга – импорт, вторая ТМЛ-1У

Для проведения анализа химического состава швов, выполненных двухдуговой наплавкой, шлифовальной машинкой срезали верхнюю часть шва на высоту 2,0 мм. (рисунок 3.5.) На каждом из исследуемых швов определяли состав в двух точках. Результаты анализа швов сведены в таблицу 3.4.



Рисунок 3.5– Внешний вид образца с точкой спектрального анализа

Таблица 3.4. – Содержание легирующих элементов в двухдуговых наплавках, в %

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Mo
Сталь 20	0,18	0,31	0,46	0,026	0,05	-	-
1- ЦЛ11	0,07	0,30	1,00	7,14	3,40	0,34	-
2- ТМЛ-1У	0,09	0,35	1,03	8,33	3,20	0,40	-
Среднее	0,08	0,325	1,015	7,735	3,3	0,37	-
Δ, %	12,5	7,7	1,5	7,7	3,0	8,1	-
Сталь 20	0,18	0,30	0,45	0,026	0,04	-	-
1. ТМЛ-1У	0,11	0,32	1,02	8,50	3,60	0,33	-
2. ЦЛ-11	0,11	0,31	1,10	9,65	3,90	0,46	-
Среднее	0,11	0,315	1,06	9,075	3,75	0,395	-
Δ, %	0	1,6	3,8	6,3	4,0	16,4	-
Сталь 20	0,17	0,24	0,45	0,024	0,04	-	-
1. KV	0,11	0,22	0,60	0,82	0,10	-	0,38
2. ТМЛ-1У	0,10	0,26	0,58	0,84	0,10	-	0,41
Среднее	0,105	0,24	0,59	0,83	0	-	0,395
Δ, %	4,8	8,3	1,7	1,2	0	-	7,8

Примечание: Цифра 1 означает, что электрод располагался первым по отношению к направлению движения, а цифра 2 – вторым.

Для шва, у которого впереди двигался электрод марки ЦЛ-11, среднее отклонение по всем элементам для двух опытов составляет 6,75 %, при диапазоне изменений от 1,5 до 12,5%. Для шва, в котором первым двигался электрод марки ТМЛ-1У получили среднее отклонение ниже: 5,35%. Для последнего шва, когда использовались аналогичные электроды среднее отклонение снизилось до 4,0%. В целом можно утверждать, что при осуществлении двухдуговой сварки в ручном режиме разброс легирующих элементов по длине шва невелик.

Содержание элементов в шве мало зависит от порядка движения электродов. Это можно видеть по паре электродов ЦЛ-11+ТМЛ-1У. Существенное отличие, достигающее 14,2% от среднего имеет место только для хрома. По-видимому, при большей отработке техники наплавки такой разброс элементов может быть существенно снижен. К еще большему уменьшению разброса содержаний приведет разработка специального электрододержателя, фиксирующего дистанцию между электродами и облегчающего выполнение шва. Подсчет доли участия основного металла в металле шва ЦЛ11 + ТМЛ-1У по формуле (3.3)м проводился для элементов с достаточно большим содержанием – хрома и никеля. Значения содержаний в наплавляемом металле выбирались из таблицы 3.1. Получили $\psi_0 = 0,377$ с очень высоким совпадением. Для шва ТМЛ-1У+ЦЛ11 получили $\psi_0 = 0,282$ также с высоким совпадением. Такое существенное различие в долях участия не может быть случайным и указывает на то, что расположением электродов можно также регулировать химический состав шва.

Выводы по разделу 3

1. Определены основные параметры процесса ручной сварки покрытыми электродами, за счет которых можно регулировать химический состав наплавляемого металла при двухдуговой наплавке покрытыми электродами.

2. Расчет содержания легирующих элементов в наплавляемом металле при двухдуговой наплавке можно с достаточно высокой точностью вести по формуле смешения по данным однодуговой наплавки дугой косвенного действия на толстую медную пластину с учетом параметров каждой из дуг.
3. При условии определения площади проплавления основного металла с точностью $\pm 10\%$ можно с достаточно высокой точностью рассчитывать содержание специальных легирующих элементов в сварном шве, по их содержанию в наплавляемом металле.
4. Формирование наплавляемых валиков при двухдуговой наплавке покрытыми электродами протекает устойчиво, получение качественных швов не вызывает затруднений.
5. Среднюю вариацию содержания специальных легирующих элементов в наплавленных швах при двухдуговой наплавке можно оценить как не превышающую в среднем по длине шва 5%.

4 Компьютерное проектирование содержания легирующих элементов в шве

4.1 Расчет химического состава шва при двухдуговой наплавке

Для расчета химического состава шва при двухдуговом процессе необходимо решить следующие задачи:

1. Определение химического состава наплавляемого металла.

Как показано выше, эта задача решается, если известны химические составы наплавляемого металла входящих в процесс электродов. Химический состав наплавляемого металла отдельных электродов может быть известен, например, по сертификатам качества. При отсутствии сертификата известны требования к содержанию химических элементов в наплавляемом металле. Несмотря на то, что эти требования имеют существенный разброс, ими можно пользоваться, выбирая средние значения из допускаемого диапазона. Также химический состав наплавляемого металла может быть определен с помощью пробы при нанесении наплавки дугой косвенного действия. Коэффициенты наплавки электродов на рекомендуемой полярности также можно считать известными, поэтому при заданных токах электродов известны и производительности наплавки.

2. Определение площади поперечного сечения проплавления основного металла

При расчете химического состава сварного шва наиболее сложным является расчет площади проплавления основного металла. В сварочной теории в определенной степени развиты методы расчета такой площади для простых случаев сварки без разделки свариваемых кромок и наплавки на массивное тело [5,6]. Вопросы расчета температур и площади проплавления в соединениях с разделкой развиты пока недостаточно. Определенного прогресса в этом направлении можно ожидать за счет применения численных

методов математического моделирования. Также недостаточно распространены методики расчета при действии не одним, а двумя и более источниками тепла. Для разработки таких методик в первом приближении можно использовать принцип независимого наложения температурных полей от каждого источника тепла (принцип суперпозиций). Поскольку в основном используются формулы для расчета температур в линейной постановке, то такой принцип правомерен. Линейная постановка задачи заключается в том, что теплофизические коэффициенты в формулах принимаются не зависящими от температуры, а принимаются усредненными для некоторого среднего значения температуры. Обычно это 400-500 °С. Метод суперпозиций достаточно успешно применялся при исследовании процесса одновременной двухсторонней сварки [70].

В последнее время на кафедре сварки ТГУ все чаще стал использоваться подход, при котором для определения теплофизических коэффициентов модели используются характерные точки термического цикла, а именно размеры опытных значений сварных швов [70]. Логика при этом следующая – если мы выполняем расчеты для определения размеров шва и его сечения, то логично и значения теплофизических коэффициентов определять на основе аналогичных размеров. Например, если нас будет интересовать не ширина шва, а размеры зоны термического влияния (ЗТВ), то в этом случае также и коэффициенты целесообразно определять на основе опытных значений ширины ЗТВ. Такой метод получил название метода приведения математической модели к условиям экспериментов. При этом автоматически учитывается влияние теплоотдачи в окружающую среду и в оснастку. В настоящее время такой подход распространен не только на теплофизические коэффициенты, но и на эффективную мощность сварочного источника тепла [71]. Прежний подход заключался в использовании понятия эффективного КПД сварочных источников, для точного знания которого необходимо проводить калориметрирование свариваемых деталей. Однако эффективный

КПД также имеет существенный разброс значений и его использование дает существенные погрешности. Также при определении размеров сварного шва следует учитывать распределенность теплового потока от сварочного источника тепла. Для многих случаев сварки подходит закон нормального распределения эффективной мощности при ее вводе в изделие [5]. Для нормально кругового источника (НКИ) тепла на поверхности пластины необходимо определять три коэффициента: отношение эффективной мощности к объемной теплоемкости, осевой тепловой поток источника и коэффициент температуропроводности. Ситуацию облегчает то, что осевой тепловой поток слабо влияет на параметры проплавления и может приниматься постоянным для достаточно широкого диапазона параметров сварки. Для определения всех трех коэффициентов необходимо три экспериментальных значения размера шва. Например, можно определить с помощью шлифа ширину шва, максимальный провар и еще одну ширину шва в среднем сечении шва. Тогда можно составить систему трех уравнений с тремя неизвестными коэффициентами и рассчитать точное значение этих коэффициентов. Так как осевой тепловой поток слабо зависит от размеров шва, то зачастую достаточно определить два других коэффициента через систему не трех, а только двух уравнений.

Расчеты размеров шва и сечения проплавления основного металла при ручной сварке покрытым электродом осложняются недостаточно стабильным характером процесса. В известной методике расчета режимов ручной сварки [3] исходным параметром является сечение наплавленного валика. Для корня шва при V – образной разделке кромок оно рекомендуется в пределах 6-8 диаметров электрода, а для заполняющих слоев 8-12 диаметров. При этом для заполняющих слоев рекомендуется увеличенный диаметр электрода. Это приводит к значительному увеличению производительности заполнения разделки кромок по сравнению с корнем шва. Рекомендация режима сварки, исходя из сечения наплаваемого валика, приводит к тому, что он может

быть получен в некотором диапазоне токов, рекомендуемых для данной марки электродов. Однако на практике рекомендация по связи диаметра электрода с сечением валика не выполняется и в производственных технологиях сварки и при аттестации сварщиков в технологических картах указывают весь диапазон токов для данного диаметра электрода. Фактически это означает, что выбор основного параметра сварки – тока сварки передоверяется сварщику. Сварщик может выполнить требование по соотношению между диаметром электрода и сечением валика, а может и не выполнить. Выполнение рекомендации означает, что он должен соблюсти определенную скорость сварки или, что, то же самое, длину валика. Естественно, что для сварщика это будет носить чисто случайный характер.

Рассмотрим рекомендацию [3], приравняв площадь, наплавляемую электродом, с площадью, задаваемую требованиями

$$V_C = \alpha_H I / [\rho(6-8)d]. \quad (4.1)$$

Из формулы (4.1) следует, что при произвольном назначении тока сварки из рекомендуемого диапазона скорость сварки будет иметь допустимые отклонения. При выполнении таких отклонений по скорости сварки нет гарантий, что будет получено требуемое проплавление основного металла. Особенно важно это при сварке корневых швов. Поэтому нужно задавать не любое значение тока, а конкретные значения тока и скорости с определенным допуском, обеспечивающие провар основного металла. При этом площадь наплавленного металла не имеет большого значения.

В патенте [57] предложен другой подход к назначению режимов ручной дуговой сварки, позволяющей приблизить ее по стабильности процесса и свойств шва к автоматической сварке. Определяющим при назначении режимов должно быть не сечение наплавляемого валика, а ток и скорость ручной сварки. В работах [58,59] вообще показано, что наплавляемый металл очень слабо влияет на проплавление основного металла. А на сечение

проплавления основного металла большое влияние оказывает скорость сварки. Часто используемое понятие погонной энергии, не отражает особенностей проплавления основного металла. В особенности это проявляется при сварке металла небольшой толщины, к которой можно отнести и сварку притупления в корне шва.

Причины, по которым сварщику предоставляют большую самостоятельность при выборе тока и скорости сварки понятны. Это происходит из недостаточной точности подготовки кромок и сборки их под сварку. Все эти недостатки приводят к тому, что ответственность за качественное формирование шва возлагается целиком на сварщика. На практике это приводит к существенному разбросу выбираемых режимов сварки и свойств сварных швов и соединений, в том числе их значительной их химической неоднородности. Естественно, что при двухдуговой сварке, при которой одной из основных задач является получение требуемого состава шва такое произвольное назначение режимов сварки недопустимо.

Патент [57] предлагает для этого решение, заключающееся в том, что для любого тока сварки нужно определить оптимальную скорость сварки, которая задается не сечением наплавляемого валика, а его длиной для заданного электрода. Ток и скорость сварки должны однозначно обеспечивать требуемое сечение проплавления основного металла. Сварщик должен стремиться соблюсти заданную длину валика для расплавляемого электрода, а параметры подготовки кромок и сборки должны быть достаточно качественными, чтобы позволять ему это выполнить.

Для расчета проплавления основного металла при сварке двумя дугами была разработана программа «TANDEM» на языке Бейсик. В программе используется формула для температур в пластине от действия нормально-кругового источника тепла [60]. Действуют два таких источника, оси которых расположенных на расстоянии ΔX друг от друга в направлении скорости сварки. Программа параллельно рассчитывает и складывает

температуры от каждого источника. Координата точки расчета x одного источника отличается от координаты второго на дистанцию ΔX . За начало координат принимается ось переднего источника. При двухдуговой односторонней сварке можно использовать численный метод дихотомии (деление отрезка пополам). При поиске максимальной глубины проплавления первая расчетная точка выбирается в середине толщины пластины. Если температура в этой точке меньше температуры плавления, то расчетная точка переносится в середину отрезка между срединной плоскостью и лицевой плоскостью. Если температура первой точки больше температуры плавления, то расчетная точка переносится в середину отрезка между срединной плоскостью и обратной плоскостью пластины. Так продолжается до тех пор, пока разность между температурой точки и температурой плавления не станет меньше наперед заданной величины. В этом случае программа выдает значение полученной глубины проплавления. Затем координата вдоль оси X изменяется с заданным шагом и отыскивается провар в новой точке. Так продолжается до тех пор, пока значения глубины проплавления не начнут уменьшаться. Отыскание следующей поперечного профиля проплавления основного металла производится изменением поперечной координаты Y . Затем полученные точки складываются по методу трапеций и так рассчитывается площадь проплавления. При расчетах осевой тепловой поток может быть принят 4000 Вт/см^2 .

4.2 Исследование глубины проплавления при двухдуговой сварке

Если координата X_1 отсчитывается в направлении движения от переднего источника, тогда координата точки по оси X_2 от второго источника $X_2 = X_1 - R_1$, где $\Delta X = R_1$ - дистанция между источниками. Поиск провара производился методом дихотомии. Программа позволяла задавать q_1 каждого источника и q_0 , который в большинстве случаев, принимался постоянным для обоих источников.

Ряд численных экспериментов производили для $\delta = 6$ мм, $c_p = 5,23$ Дж/(°С см³), $a = 0,08$ см²/с. $V_c = 0,2$ см/с. Расстояние между источниками $R_1 = 2,0$ см. Мощности каждого источника 1150 Вт выбиралась как половина от общей мощности, обеспечивающей 100% провар.

В результате получили, что первый источник практически обеспечивает весьма малый провар. Суммарный провар составил $0,5\delta$, что уступает аналогичному показателю при сварке одним источником удвоенной мощности. В следующем опыте уменьшили расстояние между источниками до $R_1 = 1,5$ см (рисунок. 4.1).

Таким образом, разделение источников на два последовательных не дает энергетического эффекта, не исключая возможности использования источников большей мощности, регулирования структуры металла шва и металлургических процессов.

После этого изменили соотношение мощностей источников как 1:2, при впереди идущем источнике меньшей мощности. Мощность 1-го $q_{и1} = 753$ Вт, 2-го $q_{и2} = 1506$ Вт. Суммарная мощность источников не изменилась. Расстояние между источниками $R_1 = 1,5$ см.

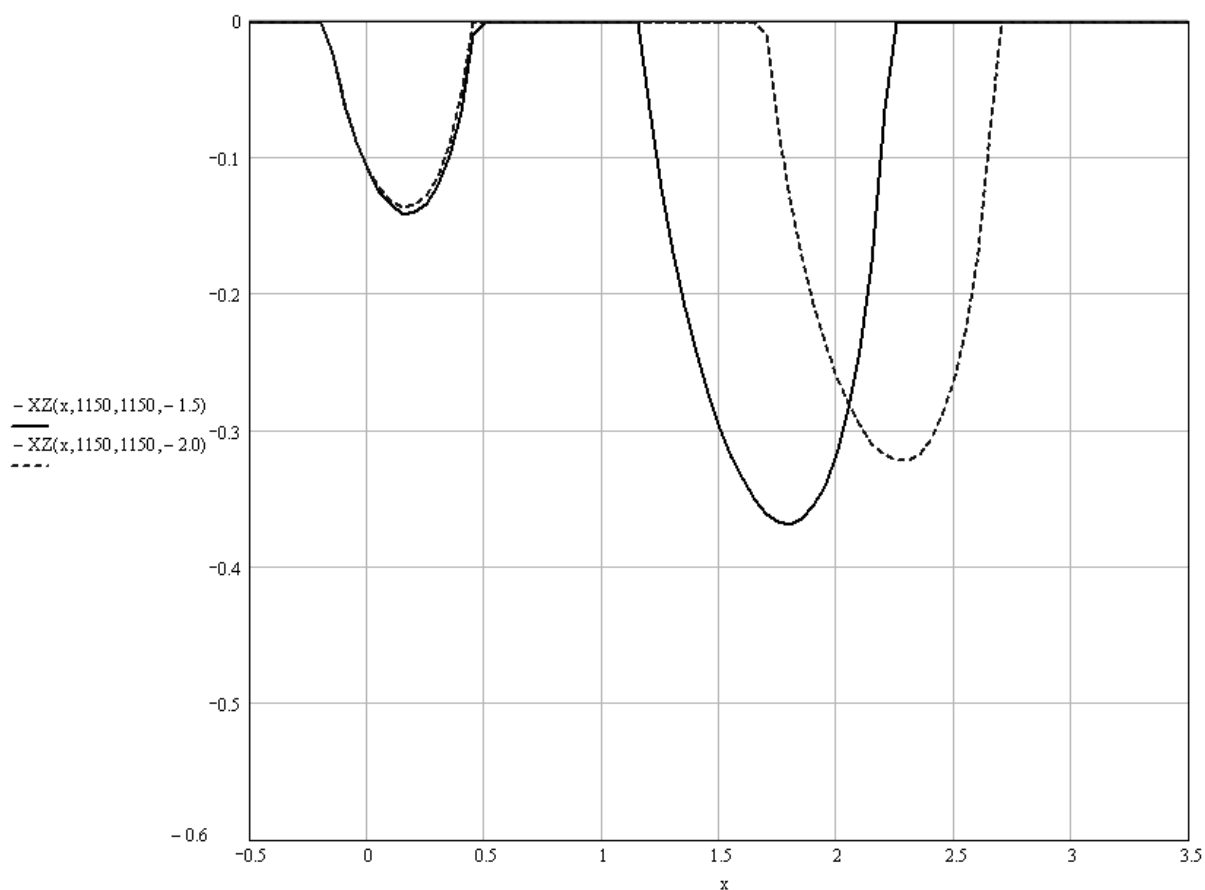


Рисунок 4.1 - Продольные профили ванн при односторонней двухдуговой сварке для дистанций между дугами 2,0 и 1,5 см

Провар увеличился на 0,5 мм, то есть примерно на 8%. Таким образом, предпочтительнее, чтобы вторым двигался источник меньшей мощности, так как в этом случае лучше используется подогревающий эффект первого источника.

Был проведен эксперимент, при котором мощность 2-го источника была выбрана $q_{и2} = 1150$ Вт, а 1-го $q_{и1} = 2300$ Вт (т. е. 2:1). Дистанция $R_1 = 1,5$ см. При скорости $V_c = 0,3$ см/с был получен полный провар (рисунок 4.2).

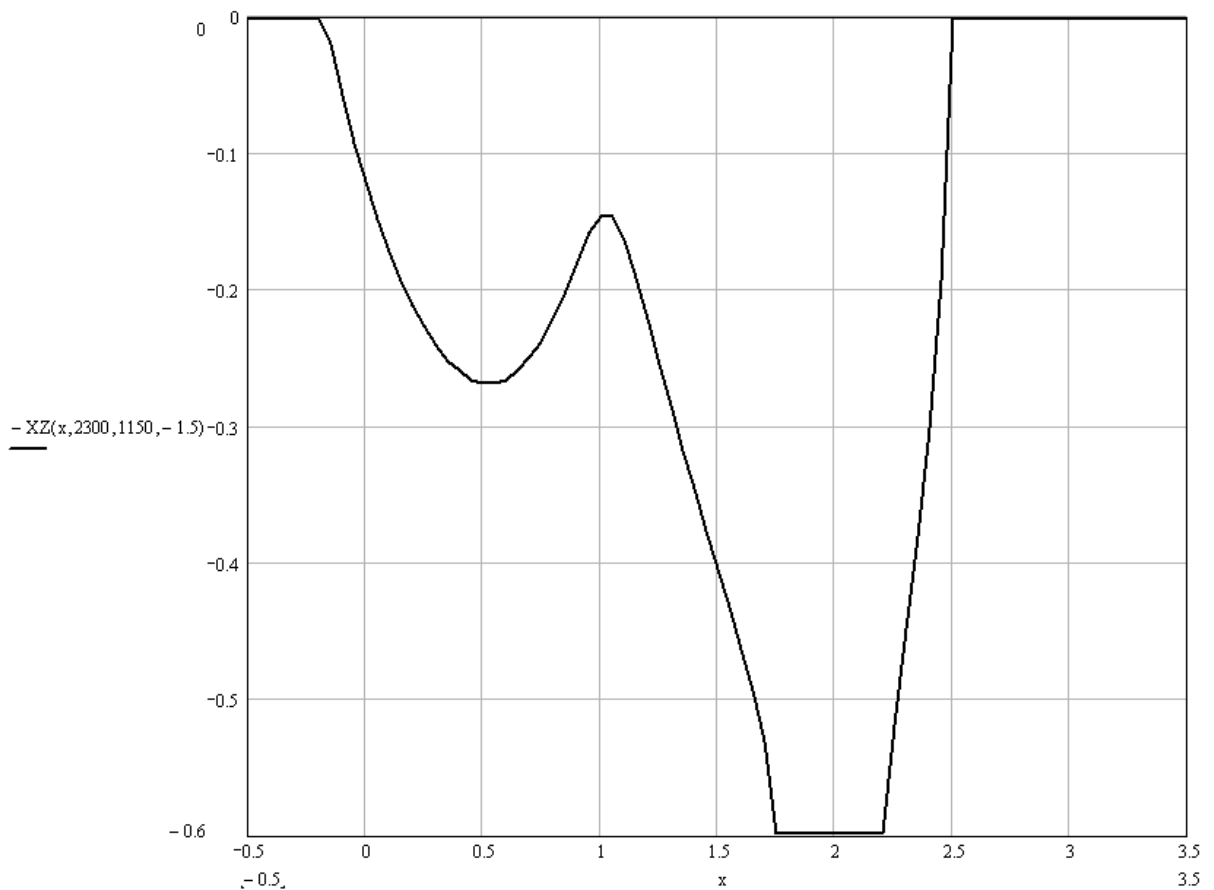


Рисунок 4.2- Форма провара при мощном переднем источнике

Таким образом, на данном режиме получили производительность соединения стыка $J = 0,18 \text{ см}^2/\text{с}$, что в 1,5 раза больше чем при сварке одним источником, а удельная энергия сварки осталась на прежнем уровне. Такого повышения скорости соединения было бы невозможно обеспечить простым увеличением мощности одного источника.

Затем определялась максимальная скорость, которая может быть обеспечена при использовании двух источников максимальной мощности. Такая скорость составила $V_c = 0,45 \text{ см/с}$, вместо $0,2 \text{ см/с}$ при сварке одним источником. Таким образом, при увеличении мощности в 2 раза тандемный способ обеспечивает опережающий рост скорости сварки. Достигнута производительность соединения стыка $J = 0,27 \text{ см}^2/\text{с}$, вместо $0,12 \text{ см}^2/\text{с}$ т.е. на 225%. Удельная энергия сварки $E = 4520/0,27 = 16,74 \text{ кДж/см}^2$, вместо $18,83$

кДж/см². Таким образом сварка двумя последовательными источниками тепла снижает термическое воздействие на металл.

После этого на данном режиме ($q_{и1} = q_{и2} = 2,26$ кВт) определялась максимальная скорость, обеспечивающая провар $\delta = 10$ мм. При скорости $V_C = 0,2$ см/с был получен продольный профиль ванны (рисунок 4.3).

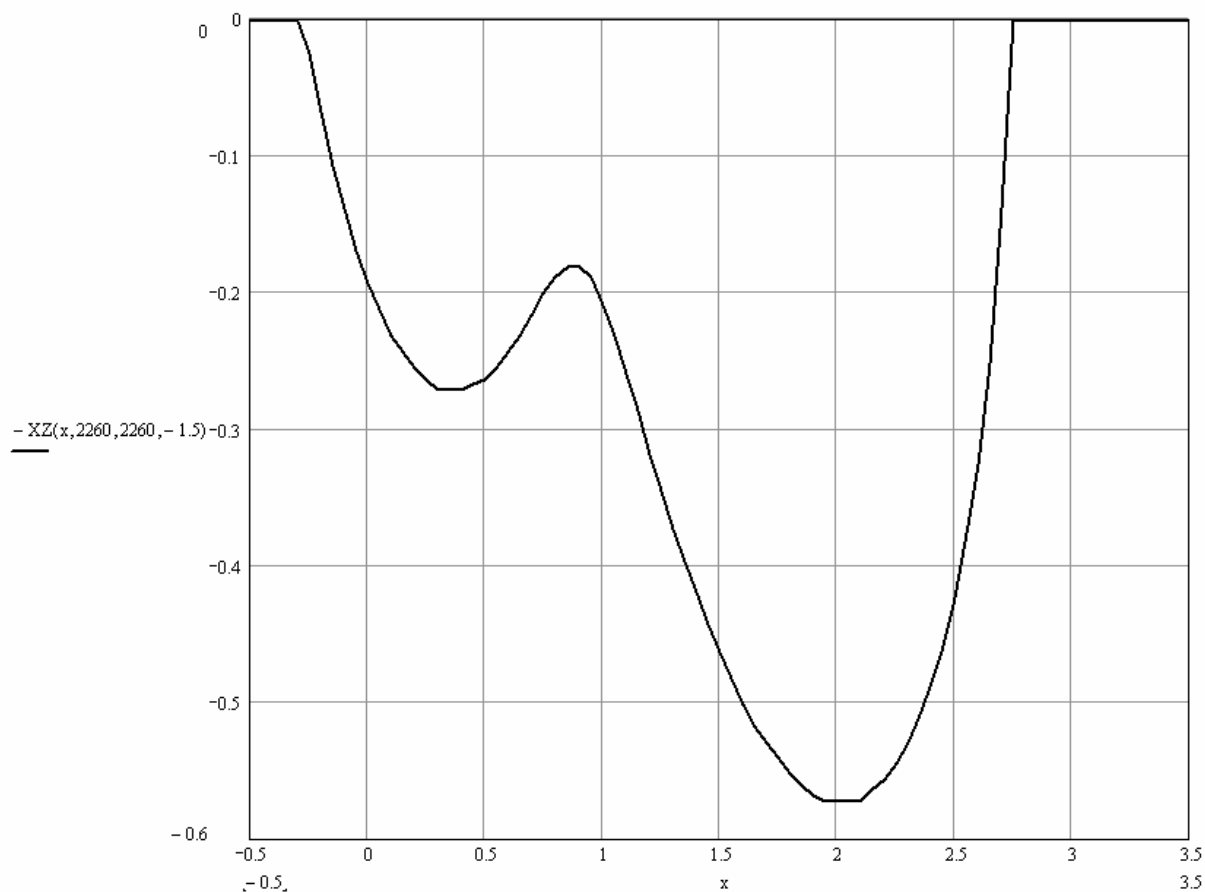


Рисунок 4.3- Форма провара при двухдуговой сварке. $V_C = 0,2$ см/с

Таким образом, получен провар 56% от толщины и $J = 0,112$ см²/с. Т.е может быть обеспечена последовательная двухсторонняя тандемная сварка с достаточно высокой скоростью соединения. Удельная энергия $E = 20,18$ кДж/см² для одного прохода.

В результате расчетов, скорость обеспечивающая полный провар на толщине 10 мм составляет $V_C = 0,13$ см/с = 4,68 м/ч. $J = 0,13$ см²/с. $E = 4520/0,13 = 34,77$ кДж/см².

Мощность каждого источника тепла зависит от полярности дуги и определяется с помощью так называемой удельной эффективной мощности, приходящейся на 1 А тока дуги [71]. Учитывается только мощность, вносимая в изделие приэлектродной областью дуги. Мощность, передаваемая жидким электродным металлом не учитывается, так как она практически не влияет на провар основного металла [57,58]. Таким образом, полярность и ток каждой дуги в расчетах провара должны задаваться отдельно значениями удельной эффективной мощности. Скорость сварки принимается одинаковой для обеих дуг. Задаются также диаметры каждого из электродов и по их токам рассчитываются производительности наплавки. При известной скорости сварки это позволяет определить площадь поперечного сечения наплавленного металла и содержание элемента в наплавляемом металле и шве.

Из этого вытекает следующая последовательность (алгоритм) при расчете содержания легирующих элементов в сварном шве при наплавке на пластину.

1. При однодуговой наплавке на пластину на граничных и среднем токе рекомендуемого диапазона определяются коэффициенты гиперболической зависимости времени расплавления электрода от тока дуги.
2. Для среднего тока из рекомендуемого диапазона назначается скорость ручной сварки и по времени расплавления электрода рассчитывается длина валика.
3. Измеряется средняя ширина полученного шва.
4. Значение осевого теплового потока НКИ принимается $q_0 = 4000 \text{ Вт/см}^2$, значение коэффициента температуропроводности a для низкоуглеродистой стали $a = 0,08 \text{ см}^2/\text{с}$, объемная теплоемкость $5,0 \text{ Дж}/(\text{см}^3 \text{ }^\circ\text{C})$.

5. По средней ширине шва рассчитывается по формуле нормально-кругового источника тепла приведенная эффективная мощность и удельная эффективная мощность на 1 А тока дуги q_y .
6. Для любого тока дуги при двухдуговой сварке эффективная мощность рассчитывается по формуле $q_1 = q_y I$.
7. С помощью компьютерной программы расчета глубины проплавления при двухдуговой сварке строится половина поперечного профиля проплавления основного металла и рассчитывается охватываемая им площадь.
8. По токам дуг и коэффициентам наплавки рассчитываются производительности наплавки и содержание каждого легирующего элемента в наплавляемом металле, полное сечение наплавляемого металла.
9. С помощью формулы смешения рассчитывается содержание элементов в сварном шве.
10. Выполняются сварной шов двухдуговой ручной сваркой на расчетных режимах.
11. Сравнивается расчетное и опытное содержание легирующих элементов, рассчитываются относительные отклонения и накапливаются данные по корректирующим коэффициентам.
12. Выполняются расчеты по всему массиву типов и марок электродов, токов, диаметров электродов, полярности дуг, расположению электродов относительно скорости сварки, дистанции между электродами.
13. С помощью выбранного критерия легирования оценивается оптимальность уровня легирования сварного шва.

4.3 Техническое задание на разработку компьютерной программы

Число различных сочетаний C_n^m m сварочных проволок из n известных марок проволок можно определить по формуле из математической теории сочетаний [72]

$$C_n^m = n! / [(n-m)!m!], \quad (4.2)$$

где n – число объектов, в нашем случае марок сварочных проволок,

m – число сочетаемых проволок, в нашем случае две.

При наличии около $n \approx 170$ типов сварочных электродов число их возможных сочетаний одинакового диаметра для процесса двухдуговой сварки составит

$$C_{170}^2 = 170! / [168!2!] \approx 14350.$$

С учетом различия диаметров электродов из ряда, например 2,3,4 мм, и хотя бы двух граничных токов дуги для них число сочетаний многократно возрастает и может достигать сотен тысяч вариантов. Отсюда следует, что при наличии такого большого числа вариантов можно подобрать такое сочетание известных типов и диаметров, что требуемый состав наплавляемого металла будет обеспечиваться с высокой точностью. Эта точность не будет уступать разбросу содержания элементов в наплавляемом металле известных сварочных электродов, которая составляет 10-20% от среднего содержания, регламентируемого стандартами. Естественно, что подбор необходимого состава наплавляемого металла должен проводиться по какому-то количественному критерию. В качестве таких критериев можно привести, например, эквивалент углерода при сварке низколегированных сталей или отношение эквивалентов хрома и никеля при сварке высоколегированных сталей. Могут быть использованы критерии, которые связывают твердость наплавленного металла с содержанием легирующих

элементов (электроды для наплавки слоев с особыми свойствами) или аналогично прочность для конструкционных легированных сталей.

Для реализации такого подхода было сформулировано задание для алгоритма компьютерного решения прямой задачи проектирования требуемого химического состава наплавляемого металла [54, 76].

Алгоритм и программа должны позволять решать следующие задачи:

1. Хранить в базе данных информацию о допустимых диапазонах содержания химических элементов в наплавляемом металле при однодуговой наплавке.
2. Хранить информацию о марках, диаметрах электродах и диапазонах допустимых токов для каждой марки электродов, возможных полярностях сварочной дуги и коэффициентах наплавки.
3. Программа должна обеспечивать постепенное дополнение приведенной информации без изменения алгоритма расчета.
4. Программа должна иметь блок, обеспечивающий выбор критерия, по которому оценивается химический состав наплавляемого металла с возможностью его дополнения иными критериями.
5. Программа должна обеспечивать перебором всех возможных вариантов циклы вычислений критерия по схеме выбора: «пара электродов- полярность тока- коэффициент расплавления – диаметр электрода – минимальный ток- максимальный ток- расчет содержания элементов – вычисление критерия- выдача на печать исходных данных режима и результатов с конкретным содержанием элементов с маркировкой оптимального на данном этапе вычислений варианта.

В настоящее время программа разрабатывается для 9 типов электродов для сварки теплоустойчивых сталей, производится ее отладка и оптимизация.

Выводы по разделу 4

1. Предложен подход, применимый для двухдуговых и двухэлектродных способов сварки, заключающийся в выборе электродов различного химического состава из массива выпускаемых промышленностью, позволяющий получать новые составы наплавляемого металла и образцы для исследования новых сплавов.
2. Предложено производить поиск оптимального состава наплавляемого металла при двухдуговой наплавке решением прямой задачи компьютерным перебором всех возможных вариантов на основе известных в сварке критериев оптимальности.
3. Разработано техническое задание и алгоритм программы поиска оптимального состава наплавляемого металла при ручной двухдуговой сварке покрытыми электродами для сварки теплоустойчивых сталей.
4. Разработана методика расчета глубины проплавления при двухдуговой сварке двумя последовательно расположенными дугами путем использования наложения температур от двух нормально-круговых источников тепла, действующих на поверхности пластины. Параметры каждого из источников тепла могут быть установлены по результатам однодуговой ручной наплавки покрытым электродом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По выполненной работе можно сделать ряд выводов научного и практического характера:

1. Показана возможность получения двухдуговой ручной сваркой покрытыми электродами различными марками, существенно отличающимися по химическому составу и физическим свойствам качественных валиков наплавленного металла с хорошим формированием шва.
2. Установлена перспективность применения для получения проб наплаваемого металла, предназначенного для спектрального анализа, дуги косвенного действия с электродами различных марок с нанесением проб на толстую медную пластину.
3. Установлено, что методика расчета содержания легирующих элементов в наплавленном металле при двухдуговой сварке электродами разных типов может основываться на использовании формулы смешения с учетом производительностей наплавки каждого из электродов.
4. При двухдуговой сварке электродами различных типов возможно управление содержанием легирующих элементов в наплавленном металле путем вариации параметров сварки: токов дуг, диаметров электродов, полярностей. Дополнительное регулирование содержания элементов в шве возможно путем изменения дистанции между электродами.
5. Предложено осуществлять выбор сочетаний типов электродов для двухдуговой сварки из известных типов по среднему содержанию регламентированных легирующих элементов путем перебора решением прямой задачи с использованием специальной компьютерной программы, что позволит получить широкий спектр новых наплаваемых металлов на основе известных.
6. Разработано техническое задание на разработку специальной компьютерной программы по расчету содержания легирующих

элементов в наплавляемом металле. Отбор вариантов оптимального сочетания типов электродов и параметров сварки в такой программе может осуществляться на основе ряда известных и специальных критериев.

7. Предложен алгоритм расчета содержания легирующих элементов в сварных швах при двухдуговой сварке соединений пластин без разделки кромок и наплавке на пластину на основе расчета проплавления основного металла с помощью одной из схем сварочных источников тепла, при котором эффективная мощность источника тепла определяется по экспериментальному значению ширины шва.

Дальнейшее развитие данной работы следует вести в направлении совершенствования методики проб наплавляемого металла с помощью дуги косвенного действия, изучению особенностей техники двухдуговой сварки покрытыми электродами, изучению степени неоднородности распределения легирующих элементов по длине и сечению шва. Важным является разработка компьютерных программ расчета содержания легирующих элементов в наплавляемом металле и расчета поперечного сечения проплавления основного металла при двухдуговой сварке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Новиков К. Ю. Современные достижения и технологические возможности двухдуговых и двухэлектродных способов сварки. Магистерская диссертация. – Тольятти, 2018. – ТГУ. – 71 с.
2. Кирьяков В.М., Клапатюк Е.В. Способ дуговой сварки под флюсом // Патент России № 2023556, 1994. Бюл. № 20.
3. Акулов А.И., Технология и оборудование сварки плавлением/ А.И. Акулов [и др.]. – М.: Машиностроение. – 1977. – 432 с.
4. Сварка в машиностроении: Справочник. В 4-х т. / Редкол.: Г.А. Николаев и др. – М.: Машиностроение, 1978. – т.2 / Под ред. А.И. Акулова. 1978. –462 с.
5. Теория сварочных процессов/ А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Макаров, В.М. Неровный, Б.Ф. Якушин; Под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.
6. Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке / В.А. Кархин. – СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2015 – 572 с.
7. Межгосударственный стандарт ГОСТ 5264-80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. М.: Стандартинформ, 2010. – 35 с.
8. Сидоров В.П. О понятии гибкости технологического процесса сварки / В.П. Сидоров // Материалы конференции сварщиков Урала. Челябинск. 2000 г.- С.106-108.
9. Сидоров В.П. О гибкости технологического процесса сварки / В.П. Сидоров // Сварка XXI век – «Теория и методика, повышение качества профессионального образования и аттестация специалистов сварочного производства». Труды Всероссийской конференции. Тольятти: ТГУ. 2002 – С. 110-114.

10. Сидоров В.П. Расчет доли участия основного металла в металле шва при наплавке под слоем флюса / В.П. Сидоров, Н.А. Борисов // Славяновские чтения: Сб.научн. тр. 4-5 июня 2009 г. Липецк – Кн.2. – Липецк: изд-во ЛГТУ.- 2009.- С.112–116.
11. Сидоров В.П. Об определении понятия наплавленного металла / В.П. Сидоров // Сварка. Реновация. Триботехника: материалы IX Уральской научно-практической конференции 21.01.2019 : – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2019. – С.53–57.
12. Фрумин И.И. Автоматическая электродуговая наплавка / И.И. Фрумин / ГНТ изд-во по черной и цветной металлургии. Харьков, 1961. – 421 с.
13. Красюков В.Е. Исследование проб от расплавления покрытых электродов дугой косвенного действия. / В.Е. Красюков // Выпускная работа бакалавра. Тольятти : ТГУ. – 2018. – 104 с.
14. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением / А.А. Ерохин // М.: Машиностроение.-1973. – 448 с.
15. Сидоров В.П. Теория и технология сварочных процессов: сборник задач для студентов специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного производства» Тольятти: Изд-во ТГУ, 2009. Изд. 2-е исправл. – 228 с.
16. Оборудование для дуговой сварки: Справочное пособие / Под ред. В.В.Смирнова. Л.: Энергоатомиздат. – 1986. –656 с.
17. Алексеев Ю.Е. Оборудование для дуговой сварки под флюсом / Ю.Е. Алексеев, Л.Н. Кушнарев // Л.: Энергия – 1977. – 128 с.
18. Вороновицкий И.Н. Электроды для сварки оборудования тепловых электростанций / И.Н. Вороновицкий. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 96 с.
19. Сидоров В.П. Методика определения сопротивления вылета сварочного электрода / В.П. Сидоров, М.А. Абрамова, И.В. Новский / Современные проблемы сварочного производства: сборник научных трудов / под ред.

М.А. Иванова, И.А. Ильина. – Челябинск: Издательский Центр ЮУрГУ, 2016. – С. 14–18.

20. Сидоров В.П., Абрамова М.А., Новский И. В. Способ определения сопротивления вылета сварочного электрода // Патент России № 2634650. 2017. Бюл. № 31.
21. Сидоров В.П., Абрамова М.А., Корсун Д.Е. Методика расчета составляющих эффективной мощности дуги под флюсом с учетом полярности тока Инновационные технологии и экономика в машиностроении : сб. трудов VI Международной научно- практической конференции / Юргинский технологический институт . – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С.52– 54.
22. Гаген Ю.Г. Сварка магнитоуправляемой дугой / Ю.Г. Гаген, В.Д. Таран. М.: Машиностроение, 1970. – 160 с.
23. Кошкин Н.И. Справочник по элементарной физике / Н.И. Кошкин, М.Г. Ширкевич // М.: Наука, 1965. 249 с. С.154.
24. Семистенов Д.А. О взаимосвязи энергетических характеристик и сварочных процесса двухдуговой наплавки / Д.А. Семистенов, А.И. Ковтунов, Д.И. Плахотный, А.Г. Бочкарев, Т.В. Семистенова // Сварка и диагностика, 2016.- № 4. С. 27-32.
25. Тавер Е.И. Сварка стали двойной плазменной струей / Е.И. Тавер, М.Х. Шоршоров // Сварочное производство, 1971, № 10. – С. 27– 28.
26. Сидоров В.П. Проведение научных исследований в области машиностроения /В.П. Сидоров, Н.А. Борисов : сб. материалов Всеросс. научн. техн. конф. с элементами научной школы для молодежи. Тольятти, 27-28 ноября 2009 г. В 3-х ч. / Тольятти: ТГУ, 2009. – Ч.1., С.130 – 132.
27. Сидоров В.П. Способ сварки комбинацией дуг // Патент России № 2 646 302. 2018 г. Бюл. № 7.
28. Сидоров В.П., Ковтунов А.И., Моторин К.В. Способ наплавки трехфазной дугой // Патент России № 2451584. 2012 г. Бюл. № 15.

29. Сидоров В.П., Зюбин Д.В., Борисов А.Н. Способ сварки дугой комбинированного действия // Патент России № 2598715. 2017 г. Бюл. № 4.
30. Сидоров В.П. Способ дуговой механизированной импульсной наплавки // Патент России № 2 641 940. 2018 г. Бюл. № 3. (2 эл., дуга пр черед с дуг косв по очереди).
31. Сидоров В.П. Способ механизированной наплавки комбинацией дуг // Патент России № 2 649 351. 2018 г. Бюл. № 7
32. Сидоров В.П. Способ дуговой двухэлектродной сварки покрытыми электродами // Патент России № 263748. 2017 г. Бюл. № 36.
33. Brima Welding International. Установки аргонодуговой сварки универсальные инверторные TIG 315 P-1 AC/DC, TIG 500 P AC/DC. Паспорт и руководство по эксплуатации. Изд-во Тиберис, 2005. –24 с.
34. Руководство по эксплуатации инверторного аппарата (TIG) IG160 AC/DC | TIG200 AC/DC | TIG250 AC/DC | TIG315 AC/DC TIG200PAC/DC | TIG250P AC/DC | TIG315P AC/DC. Фирма «Инсварком». С- Петербург, 2011, 14 с.
35. Абрамова С.В. Исследование скорости расплавления электродов / С.В. Абрамова // Магистерская диссертация. Тольятти, ТГУ. – 2016. – 114 с.
36. Сидоров В.П. Зависимость времени расплавления покрытых электродов от тока дуги / В.П. Сидоров, С.В. Абрамова / Сварочное производство, 2018. – № 10, С.14 – 18.
37. Сидоров В.П., Абрамова С.В. Способ определения коэффициента расплавления покрытых электродов // Патент России № 2 665 863. 2018 г. Бюл. № 25.
38. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. – М.: Наука. – 1987. – 240 с.
39. Сидоров В.П. Способ двухдуговой сварки покрытыми электродами // Патент России № 2 648 433. 2018 г. Бюл. № 9.

40. ГОСТ 9466-75. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки и наплавки. Классификация и общие требования. Росстандарт. М.: 1992.
41. ГОСТ 9467-75. Электроды покрытые для ручной сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. М.: ИПК Издательство стандартов, 2005. – 6 с.
42. ГОСТ 10051-75. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. Типы. М.: Издательство стандартов, 1993. – 12 с.
43. ГОСТ 10052-75. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами. Типы. М.: Издательство стандартов, 1993. – 12 с.
44. Сидоров В.П. Исследование неравномерности скорости расплавления штучного электрода с покрытием / В.П. Сидоров, Р.Б. Кутулбаев // Сварка и диагностика. – 2014. – № 6. – С.11-13.
45. Сидоров В.П. Исследование скорости расплавления покрытых электродов / В.П. Сидоров, В.А. Федякин, Р.Б. Кутулбаев // Сварочное производство. – 2016. – № 1. – С. 3–5.
46. Сидоров В.П., Кутулбаев Р.Б. Способ дуговой сварки штучным покрытым электродом // Патент России № 2 571 668. 2015 г. Бюл. № 35.
47. Сварочные материалы. Каталог. Мценск. МЕЖГОСМЕТИЗ. – 232 с.
48. Электроды марки KV5. Паспортные данные / ОАО «Азотреммаш», 2018 г. – 1 с.
49. ГОСТ 2246-70. Проволока стальная сварочная. Технические условия. М.: ИПК Стандартиформ. – 2008. – 19 с.
50. Сидоров В.П. Способ получения проб наплавляемого металла // Заявка на патент России № 2018147675 от 26.12.2018 г.
51. Антикайн, П.А. Изготовление объектов котлонадзора. Справочник / П.А. Антикайн, А.К. Зыков. – М. – Metallurgy, 1980. – 328 с.

52. Сидоров, В.П. Влияние полярности на скорость расплавления покрытых электродов / В.П. Сидоров, С.В. Абрамова // Современные проблемы сварочного производства: сборник научных трудов XXVI научн.-техн. конф. сварщиков Урала . – г. Челябинск, (17 – 20 апреля 2016 г.) Издательский центр ЮУрГУ. – С 18 – 22.
53. Сидоров В.П. Способ определения площади проплавления при сварке плавящимся электродом / Патент РФ № 2 648 597.- Оpubл. 26.03.18. Бюл. № 9.
54. Сидоров, В.П. Оптимизация химического состава ручной дуговой наплавки / В.П. Сидоров, С.Н. Пивнев, С. Пивнева // В сборнике конференции Тольятти 2019 г.
55. Пивнев, С.Н. Определение зависимости времени расплавления электродов от тока дуги / С.Н. Пивнев / В сборнике Студенческие Дни науки ТГУ.2019 г. (в печати).
56. Технические характеристики прибора PMI- Master. [Электронный ресурс] – URL : https://www.bergeng.com/mm5/downloads/oxford/PMI-MASTER-Pro-Brochure_July-2012_lowres.pdf (дата обращения 03.05.2019).
57. Пат. 2661526 Российская Федерация, МПК В23К 9/14. Способ ручной дуговой сварки штучными покрытыми электродами /Сидоров В.П. ; заявитель и патентообладатель Сидоров В.П. – № 2017114057 ; заявл. 21.04.2017 ; опубл. 17.07.2018, Бюл. № 20. – 3 с.
58. Сидоров, В.П. Расчеты параметров сварки плавлением / В.П. Сидоров. – Тольятти : ТГУ, 2017. – 250 с.
59. Денисов, П.В. Расчет температуры нагрева тонколистового металла нормально распределенным источником при точечной сварке импульсной дугой [Текст] / П.В. Денисов, Г.А. Мирлин // Сварочное производство. – 1974. – №1. – С. 3–6.
60. Лесков, Г.И. Электрическая сварочная дуга / Г.И. Лесков. – М.: Машиностроение, 1970. – 334 с.

61. Чувашова, А.В. Электроды для ручной дуговой сварки, применяемые на опасных производственных объектах, подконтрольных Ростехнадзору / А.В. Чувашова. – Ижевск: Изд-во ЗАО «Ижмашпринт», 2006. – 70 с.
62. Гончаров, С.Н. Влияние термического цикла двухдуговой сварки на стойкость стали 20ХГСНМ против образования холодных трещин / С.Н. Гончаров, Н.З. Гуднев, Ю.А. Стеренбоген и др. // Автоматическая сварка. – 1982. – № 7. – С. 14–15.
63. Шолохов, М.А. Развитие элементов теории формирования шва и технологических основ многопроходной сварки плавящимся электродом по узкому зазору корпусных конструкций специальной техники из высокопрочных сталей: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. – Екатеринбург: Уральский ГТУ. – 2016.
64. Kah P. Current trends in welding processes and materials: improve in effectiveness / Kah P., Marikinen J. // Reviews and Advanced Materials Science. – 2012. – Vol. 30. – P. 189–200.
65. Kiran, D.V. Arc behavior in two wire tandem submerged arc welding / D.V. Kiran, D.W. Cho, W.H. Song, S.J. Na // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – № 8. – P. 1546–1556.
66. Egerland S. The pulsed GMAW twin-wire process for high / Egerland S., Hills G., Hummer W. // African fusion . – 2009. № 9. – P. 26–32.
67. Li, K.H., Chen, J.S. and Zhang, Y.M. Double-electrode GMAW process and control // Welding Journal. – 2007. – № 8– P. 231–237
68. Li, K.H., Chen, J.S. and Zhang, Y.M. Double-electrode GMAW process and control // Welding Journal. – 2007. – № 8– P. 231–237.
69. ГОСТ 1050-2013.Metalлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. – 36 с.

70. Сидоров, В.П. Двухдуговая двусторонняя сварка неплавящимися электродами в аргоне /В.П. Сидоров, С.А. Хурин. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015 . – 191 с.

71. Сидоров, В.П. Расчетно-экспериментальное определение провара точки, наплавленной неподвижной дугой / В.П. Сидоров, А.В. Мельзитдинова // Вектор науки ТГУ. – 2018. – №4 (46). – С. 40 – 46.

72. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: Наука, 1977. -871 с.

73. Заявка на изобретение № 2018106218 от 19.02.2018. В.П. Сидоров / Способ автоматической двухдуговой сварки. Решение о выдаче патента от 24.04.2019.

74. ГОСТ 22772-88. Прокат для строительных сварных конструкций. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 1996. – 13 с.

75. Пивнев, С. Н. Алгоритм реализации задачи двухдуговой сварки покрытыми электродами разных типов / С.Н. Пивнев, М.А. Кудрявцев // Богатство России : II Всероссийский форум научной молодежи (Москва 10-11- декабря 2018 г.) : сборник докладов : Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2019 . – С.35-36.

76. Pivnev, S.N. Algorithm of realization of the problem of double-arc welding with coated electrodes of different types / Pivnev S.N., Sidorov V.P., Pivneva S.V. // В сборнике: сборник трудов ИТНТ-2019. 2019. С. 637-644.